XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

НОВЫЕ ИДЕИ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ



3 – 4 АПРЕЛЯ 2025 г.
МОСКВА

ТОМ 1

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Геофизика, геоинформатика, искусственный интеллект в недропользовании

МГРИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

УДК 082 + [550.8+553] (082)
ББК 94.3 + 26.21я43 + 26.34я43

Новые идеи в науках о Земле: в 9 т. Материалы XI Международной научной конференции «Новые идеи в науках о Земле» - М. : Издательство МГРИ, 2025.

Т. 1: ГЕОФИЗИКА, ГЕОИНФОРМАТИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ/ ред. коллегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. - М.: Издательство МГРИ, 2025 – 421 с.

ISBN 978-5-907595-10-1

УДК 082 + [550.8+553] (082)
ББК 94.3 + 26.21я43 + 26.34я43

ISBN 978-5-907595-01-9 (Том 1)

© РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ГЕОФИЗИКА, ГЕОИНФОРМАТИКА, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ 9
Жданов М.А.*, Баранов А.А. Выявление корреляционных зависимостей между содержанием золота и урана в рудах месторождения «Южное» Эльконского горста. 9
Имаев Д.Р.*, Сементеева Л.Ш. Искусственный интеллект в недропользовании. 13
Индриксон И.Ю.*, Демченко И.А. Препятствия для широкого внедрения ИИ при оптимизации процессов строительства скважин, как эффективного инструмента снижения стоимости и повышения безаварийности бурения нефтегазовых скважин. 17
Исмагулов С.Е.*, Песчанская А.А.Использование механизма внимания в нейросетях для восстановления рельефа по спутниковым снимкам. 21
Козловский А.М.*, Лобанова О.С., Радченко Д.Н. Совершенствование роботизированных геотехнологий при добыче общераспространенных полезных ископаемых на месторождениях сложной морфологии. 25
Мединская Д.К.*, Яковлева А.А., Семенов В.В. Оценка результативности съемок вдоль осей погруженных трубопроводов комплексом бесконтактной магнитометрической диагностики. 29
Сидорова Д.В.*, Варнавский В.А. Повышение точности прогнозирования геомеханических процессов с помощью искусственного интеллекта. 33
Шагарова Л.В.* Применение искусственного интеллекта и систем больших геоданных для мониторинговых геологических задач. 37
Афанасьева Н.О.*, Поляков В.М., Шишляев В.В. Моделирование кустов скважин Нарыкско-Осташкинского метаноугольного месторождения. 41
Бабуркин И.А.*, Крячков И.В. Метод георадиолокации с применением высокочастотной антенны для выявления аномалий различного генезиса. 45
Давыдкина Т.В.*, Янкилевич А.А., Наумова А.Н. К вопросу определения чувствительности метода магнитотеллурического зондирования при изучении геологического строения озера Восток (на основе моделирования). 48
Еникеев Б.Н.* Опыт алгоритмизации построения синтетического разреза с данными каротажа и керна. 52
Юнусова Д.А.*, Зайнагутдинов Т.Р.*, Плюснин А.В. Методические приёмы расчленения терригенных отложений визейского нефтегазоносного комплекса. 56
Зеликман Д.И.* Оценка эффективности сейсмотомографического 3D прозвучивания для исследований откосных сооружений. 60
Индаков Г.С.*, Казначеев П.А. Термически стимулированное разрушение метаморфизированных песчаников: лабораторное исследование. 64
Карамышев А.В.* Методика нейросетевого картирования металлотектов по комплексу геофизических данных на базе априорного физико-геологического моделирования. 67
Щербаков В.М. *, Алёшин И.М., Скрыпицына Т.Н. Оперативное обновление ЦМР. Постановка проблемы. 71
Подсекция 1.1. Геофизика и математическое моделирование 75
Картежников Е.Е.*, Исайчева Е.Г. Применение ядерно-магнитного каротажа в сильном магнитном поле для качественной оценки смачиваемости. 75
Крячков И.В.*, Бабуркин И.А. Оптимальный комплекс инженерно-геофизических исследований для уточнения инженерно-геологических условий при проектировании метро. 79

Кузин А.М.* О геологической интерпретации вертикальных зон интенсивной сейсмической записи на временных разрезах МОГТ. 83
Лобанов А.М.*, Быков А.А. Оценка уклонения отвесной линии (УОЛ) от карьера Мурунтау. 87
Мягков Д.С.* Исследование взаимосвязи магматизма и денудационных процессов методом численного моделирования. 91
Наумова А.Н.*, Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А. Определение стратегии двумерной инверсии магнитотеллурических данных регионального профиля в Енисей-Хатангском прогибе..... 95
Пономарев О.Б.*, Столбунов Р.А., Иванов С.В. Гамма-каротаж, как инструмент оценки содержания KCl в калийных солях. 99
Родкин М.В.*, Прохорова Т.В., Рукавишникова Т.А. Тенденции изменения вызванной сейсмичности при продолжительным сильном антропогенном воздействии..... 103
Рябова С.А.* Отклик вариаций полного электронного содержания ионосферы на основной толчок землетрясения у полуострова Ното 2024 года (по данным приемной станции mtka). 107
Суетнова Е.И.* Характерные времена реакции зоны стабильности поддонных газовых гидратов на на выпахивание поверхности морского дна при движении айсберга в северных морях. 111
Таран Я.В.*, Алешин И.М., Холодков К.И. Опыт применения повысотной аэромагнитной съемки с БВС для вычисления вертикального градиента геомагнитного поля. 113
Тарасова В.С.*, Иванова О.В. Ранжирование геологических опасностей по результатам интерпретации геолого-геофизических данных на примере одного из месторождений Арктического шельфа. 117
Бахмутский М.Л.* Сингулярно-спектральный анализ как инструмент дифференцирования зашумленных экспериментальных кривых забойного давления при гидродинамическом исследовании скважин. 121
Буй Т.Н.*, Лэ Н.А., Нгуэн Д.М., Нгуэн Т.Т.Х. Нормализация гамма-каротажа скважин месторождения Х Кыулонгкого басейны, Вьетнам. 125
Данилов В.И.* Новый взгляд на физику планеты Земля. 129
Кузьмин Д.К.* Учет динамики коэффициента сжимаемости порового пространства при закачке и отборе газа на Увязовском ПХГ. 133
Лементуева Р.А.*, Лось В.Ф. О причинах возникновения электромагнитной эмиссии (ЭМИ) в процессе нагружения горной породы. 137
Либина Н.В.*, Ковачев С.А. Методы выделения потенциально геоопасных районов на основе цифровой модели рельефа дна. 140
Намазлы Н.Э.* Исследование осадочного чехла методом сейсмостратиграфического анализа (на примере сейсмических разрезов переходной зоны от Южно-Каспийского бассейна к Средне-Каспийскому бассейну). 144
Настасенко С.А.*, Савотченко С.Е. Гибридный метод поиска в текстовых данных с использованием графов и эмбеддингов..... 148
Романевич К.В.*, Мулев С.Н., Иванов Д.А. Определение области влияния микросейсмического события на массив горных пород в процессе сейсмомониторинга угольных шахт и рудников. 152
Селезнева Д.В.* Численное моделирование формирования систем «жидкость-жидкость-газ» при смешивании нефти с диоксидом углерода..... 156
Тедеев А.А.* Нелинейные уравнения на графах: применение к моделированию сейсмических процессов и других геофизических явлений. 159

Турсунметов Р.А.*, Исмаилов Б.Ж., Гафуров Т.А., Хасанбаев Х.Ф. К перспективе разработки комплекса электромагнитных методов высокого разрешения при поисках месторождений пресных подземных вод. 163
Фан Т. Х.*, Нгуен Тхи Ту Ханг, Нгуен Ту Туй. Определение геологических структур, связанных с зоной золотого оруденения в районе Нонгшон – Дананг (Вьетнам), по атрибуту дисперсии магнитного поля. 167
Anh Ngoc Le *Structural and Morphological features of Upper Cretaceous, offshore Cameroon. 171
Сикорский В.А.* Геолого-факторное моделирование. 175
Абрамов Г.А.*, Новиков П.В. Построение физико-геологической модели по результатам проведения комплекса геофизических методов с целью поисков золото-серебряного оруденения на участке Красный. 179
Астаскевич А.И.*, Алёшин И.М., Нестеренко М.Ю. Определение параметров земной коры по данным сети «Нефтегаз-сейсмика» (Южное Предуралье). 183
Корреляция опорных и целевых отражающих горизонтов в пределах южного борта Терско-Бадиков Р.Р.*, Калинин М.Б. Каспийского прогиба с целью выявления нефтегазоперспективных объектов. 187
Болонина А.В.*, Новиков П.В. Физико-геологическая модель археологического объекта в Великом Новгороде. 191
Виноградова Н.С.*, Иванов А.А. Особенности строения Великой Дайки по данным магниторазведки. 195
Гузенков А.А.*, Матюшенко А.А. Результаты электроразведочных работ для выделения рудной залежи на Площади 1 (Красноярский край). 199
Дятлов Е.Е.*, Чепиго Л.С. Моделирование материалов гравиразведки на Восточно-оренбургской площади. 203
Имаров Г.С.*, Иваненко А.Н., Чепиго Л.С. Геомагнитное изучение подводных гор Батиметристов в Восточной Атлантике. 207
Латышев К.А.*, Посеренин А.И. Особенности проведения геофизических исследований скважин на акватории Карского моря. 211
Мамедов Э.Н.*, Белов А.П. Применение комплекса ГИС-ГТИ ГЕО для оценки эффективности и оперативности управления буровыми работами. 215
Мефодьева А.В.*, Иванов А.А. Проект геофизических работ с целью изучения оползневых процессов в Западном округе г. Москвы. 218
Никонова Д.С.*, Новиков П.В. Построение физико-геологической модели по результатам проведения комплекса геофизических методов с целью поисков золото-серебряного оруденения на участке Венера. 222
Петропавловский Д.А.*, Новиков П.В. Физико-геологическая модель (ФГМ) участка археологических работ с остатками архитектурных сооружений 18 века в селе Кистыш Суздальского района. 226
Степанов С.В.*, Абрамов В.Ю. Опыт применения электротомографии и дифференциальной магнитометрии на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая. 230
Такиев Т.А.*, Абрамов В.Ю. Результаты электроразведочных работ для выделения песчано-гравийных отложений на участке Смоленской области. 234
Толстикова Е.С.*, Посеренин А.И. Геофизические методы исследований скважин Дунаевского месторождения с целью выделения пластов-коллекторов и оценки их фильтрационно-емкостных свойств. 238
Трюхан П.Е.*, Матюшенко А.А. Опыт применения метода георадилокации для определения толщины насыпного слоя и выявления зон разуплотнения грунта в теле железнодорожной насыпи. 242

Ушаков К.А.*, Романов В.В. Детализационные морские сейсморазведочные работы МОВ ОГТ 2D на Западном лицензионном участке (море Лаптевых) с целью утончения строения ранее выявленных перспективных объектов. 246
Фенютин П.Ф.*, Новиков П.В. Влияние изменения граф обработки материалов аэромагниторазведки и аэроэлектроразведки на цифровые результаты модели Ульбейской площади. 250
Яремченко Т.А.*, Штукин А.В., Матусов Р.А. Сравнительный анализ метода зонного кодирования с вейвлет-методами цифровой обработки сигналов..... 254
Подсекция 1.2. Геоинформатика и цифровые технологии в недропользовании 258
Гришков Г.А.*, Нафигин И.О., Устинов С.А., Минаев В.А. Прогноз полезных ископаемых с применением нейросетевых технологий на примере полиметаллических объектов юго-восточного Забайкалья. 258
Ерохин А.М.*, Петров А.В., Белов А.П. Анализ временных вариаций гравитационного поля Земли: эксперименты и моделирование с использованием машинного обучения. 262
Зиновьев Б.С.*, Гараева А.Н. Современные технологии в оценке оползневой опасности правого склона дорожной выемки м-7 «волга» в правобережье реки Свияга республика Татарстан. 266
Корнеев А.А.*, Гогоненков Г.Н., Черемисина Е.Н., Марков К.Н. Особенности и перспективы развития системы управления и хранения геолого-геофизических данных в информационной среде сопровождения региональных работ на УВС..... 270
Никитин А.И.*, Петров Р.В., Морочко А.Ф. Исследование влияния гиперпараметров и методов машинного обучения на результат классификации разливов нефти и мазута на пляжах..... 274
Песчанская А.А.*, Исмагулов С.Е., Долматова М.А. Предупреждение уровня опасных газов в угольных шахтах при помощи технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных. 278
Спиридонов И.В.* Выделение нефтегазоперспективных объектов на основе комплексного анализа геофизической информации с использованием ГИС INTEGRO в пределах Байкитской площади. 282
Филиппов Н.Б.*, Химченко П.В., Ткаченко М.А. Опыт создания и практического использования 3-D модели геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга..... 286
Авраменок А.В.*, Ладухин О.В. Интеграция и стандартизация протоколов связи БПЛА для геологоразведки. 290
Азизбекова К.А.*, Пиманова Н.Н. Обработка и анализ данных потенциальных полей в ГИС ИНТЕГРО при изучении глубинного строения по фрагменту профиля ГЗС «Кратон» в районе Вилюйской синеклизы. 294
Ахильгов С-М.М.*, Ахметсафин Р.Д. Разработка программного модуля для прогноза и замещения недостающих каротажных кривых методами машинного обучения..... 298
Белан Н.Е.*, Нагайцев М.В. Анализ геолого-геофизических данных с использованием машинного обучения: подходы и практические примеры. 302
Бойко М.С., Белобородов М.А. ГИС ПАРК как инструмент решения современных геологических задач. 306
Бондарь А.Г.*, Ахметсафин Р.Д. Организация разработки системы интерполяции наборов 1D или 2D данных в куб данных..... 310
Бычков В.В. *, Фахрутдинов Ш.И. Оценка золотоносности на основе расчета комплексного показателя рудоносности по геохимическим данным. 314

Вандышева О.В.*, Нагайцев М.В. Исторический анализ геолого-геофизических работ: от первых исследований до современных подходов машинного обучения при анализе данных геолого-геофизических измерений. 316
Деева М.В.*, Толмачёва Е.Р. Использование возможностей ГИС INTEGRO для комплексной визуализации и обработки геолого-геофизической информации в рамках подготовки студентов направления «Геоинформационные системы». 320
Зиновьева Д.В.*, Бойко М.С.*, Котов И.А. Современные цифровые методы оценки горизонтальной расчленённости рельефа. 324
Иванникова В.О.*, Бойко М.С. Использование программных решений с открытым исходным кодом для оценки шумового загрязнения с учетом действующих нормативных документов. 328
Иващенко Д.В.*, Ладухин О.В. Разработка программного комплекса для анализа сигналов геофизических приборов и модулей на стендах ручного управления. 332
Игнатьев Д.А.*, Ахметсафин Р.Д. Разработка программного обеспечения решения прямой и обратной задач электроразведки на постоянном токе в 3D. 336
Итунин Д.В.*, Ахметсафин Р.Д. Разработка модуля биржевой аналитики в области недропользования. 340
Казаков Л.А.*, Ладухин О.В. Формирование требований к ГИС с учетом специфики нагрузочного тестирования. 343
Карапетян Л.М.*, Бойко М.С. Разработка методов автоматизированной генерации и визуализации штрихового отображения рельефа с использованием открытых ГИС технологий. 347
Колесова А.П.*, Нагайцев М.В. Сравнительный анализ традиционных и современных методов машинно-обучения в обработке геолого-геофизической информации. 351
Курочкин Н.Д.*, Деева М.В. Анализ осложнений, возникших при бурении скважин вблизи Черноярской-1 скважины. 355
Лякишев М.К.*, Ахметсафин Р.Д. Оценка учета влияния магнитного склонения и наклонения при районировании на основе технологий грави- и магниторазведочных данных. 359
Стадник Д.А., Кирков А.Е., Нагайцев Н.А.*, Гаврилов Р.И. Прикладное применение горно-геологических информационных систем при обработке данных опробования геологоразведочных работ. 363
Скруйбите Р.А.*Ключевые моменты методики преподавания современных ГГИС (на примере ПО ГГИС Micromine). 368
Ненашев Д.А.*, Нагайцев М.В. Мультимодальные нейросетевые системы для автоматического обнаружения и описания объектов недропользования на данных дистанционного зондирования. 371
Николич А.*, Родионов Е.А. Анализ функциональных возможностей платформы ArcGIS для обработки и визуализации геопространственных данных. 375
Никульшин Н.И.*, Оборнев Е.А. Автоматизация системы контроля сроков строительства насосной станции с использованием Excel и VBA. 379
Пинчевский В.А.*, Бойко М.С. Процедурная генерация синтезированной цифровой модели рельефа. 383
Прошин Д.А.*, Чесалов Л.Е., Оборнев Е.А., Рамазанов Д.В. Применение технологии NextGis Mobile для мониторинга развития опасных экзогенных процессов в густонаселённых районах. 386
Ракипов В.Р.*, Оборнев Е.А.* Обработка и визуализация данных о работоспособности персонала на критических объектах горногеологических отраслей использованием библиотеки MediaPie. 390

Раков М.С.*, Солнцев Э.С., Ахметсафин Р.Д., Оборнев Е.А., Шуваева Ю.Д. Разработка WEB-сервиса: решение прямой и обратной трёхмерной задачи магнитотеллурического зондирования..... 394
Рамазанов Д.В.*, Чесалов Л.Е., Оборнев Е.А., Прошин Д.А. Создание модуля для хранения данных мониторинга опасных экзогенных процессов в СУБД PostgreSQL..... 398
Родионов Е.А., Градин И.С.* Объектно-ориентированный подход при решении двумерной прямой задачи МТЗ. 402
Тюрин Ф.А.*, Ахметсафин Р.Д. Прогноз замещения недостающих данных на картах методами машинного обучения..... 406
Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Оборнев И.Е.*, Родионов Е.А. Применение нейросетевых архитектур для решения трехмерных структурных обратных задач в геофизике..... 410
Симонцев Д.А.*, Савотченко С.Е. Цифровые модели управления сбытовыми сетями: сравнительный анализ на примере предприятий минерально-сырьевого комплекса. 414
Баракин Б.С.*, Савотченко С.Е. Актуальность применения анализа больших данных в минерально-сырьевом комплексе в контексте цифровизации экономики и промышленности. 418

СЕКЦИЯ 1. ГЕОФИЗИКА, ГЕОИНФОРМАТИКА, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

Выявление корреляционных зависимостей между содержанием золота и урана в рудах месторождения «Южное» Эльконского горста

Жданов М.А. (НИТУ МИСИС, zhdanov.759@yandex.ru),*
Баранов А.А. (НИТУ МИСИС, АО «ВНИПИпромтехнологий», AleksaAleksBaranov@rosatom.ru)

Аннотация

В условиях снижения среднего значения добычи урана в мире и увеличения потребления его в качестве топлива для электростанций необходимо решать задачу увеличения количества горнодобывающих предприятий, направленных на добычу урана. Особое внимание необходимо уделить разведанным месторождениям, так как затраты на проведение геологоразведочных работ составляют 10–15% от общих капитальных затрат на освоение участка недр в целом. Известно, что расчет стоимости добычи одной тонны урана ведется либо по максимальным, либо по усредненным показателям стоимости данного металла без учета стоимости попутных компонентов, следствием чего является повышение рентабельной цены добычи. Для снижения себестоимости добычи одной тонны урана на полиметаллических месторождениях извлекают из руд попутные компоненты. Однако в этой ситуации важно знать зависимость распределения попутного металла (элемента) относительно основного для минимизации операционных затрат.

В таких крупных месторождениях, как “Южное” Эльконского горста, факт такой попутной добычи может значительно увеличивать прибыль. Были проведены исследования корреляционной зависимости урана и золота. Произведен статистический анализ связи между содержаниями металлов. Получены данные о силе и виде корреляционной связи. Сделаны выводы по извлеченным данным и описано, как эксперимент может повлиять на оценку месторождения и планирование дополнительной геологоразведочных работ.

Ключевые слова

Горное дело, коэффициент корреляции, нормализация, уран, золото, Эльконский горст

Актуальность темы

Запасы урана постепенно сокращаются, добыча на крупнейших месторождениях Канады и Казахстана и других стран в ближайшие 10–15 лет будет существенно сокращаться [1-3]. По оценкам экспертов, спрос на топливо для электростанций будет неуклонно расти, в связи с этим его ценность в последние годы увеличивается, и эта тенденция продолжится [4]. На мировом рынке в ближайшей перспективе вероятен значительный дефицит, и те страны, которые будут иметь наибольший объем добычи урана, будут оказывать серьезное влияние на стоимость рассматриваемого вида сырья. В России в настоящее время довольно небольшие объемы добычи урана и действующие месторождения в ближайшие десятилетия исчерпают свои ресурсы [5]. Для наращивания объемов добычи нужно начинать освоение новых месторождений уже сейчас. Одним из таких является месторождение “Южное” Эльконского горста, известное своими богатыми и уникальными полиметаллическими рудами [6]. Эти руды характеризуются сложной морфологией рудных тел и комплексным составом оруденения, что оказывает существенное влияние на разработку месторождений, переработку руд и себестоимость товарной продукции [7]. На данный момент месторождение “Южное”

является достаточно затратным в отработке, но оно располагает не только ураном, но и существенными запасами золота.

Цель исследования

Целью исследования является определение корреляционных зависимостей между ураном и золотом. В связи с тем, что залежи подобного типа уже успешно отрабатываются в России и в других странах [8-10]. Зависимость урана с другими металлами наблюдается в различных месторождениях и подтверждается исследованиями [11-13]. Также она обосновывается генезисом таких месторождений.

Методика

В ходе исследования были использованы все данные имеющиеся в архивах АО «ВНИПИпромтехнологии». Размер выборки исходных данных составил 6317 строк. Исходные данные представлены в виде таблицы, где отражены данные по номеру пробы, содержанию урана и золота, и координаты. Весь эксперимент выполнен на программном коде Python с использованием библиотек: sklearn, pandas, matplotlib, numpy, seaborn, scipy, pylab. После изучения распределение элементов в выборке были построены диаграммы и выяснилось, что визуально данные распределены неравномерно, и имеют сильное положительное смещение. (рис. 1).

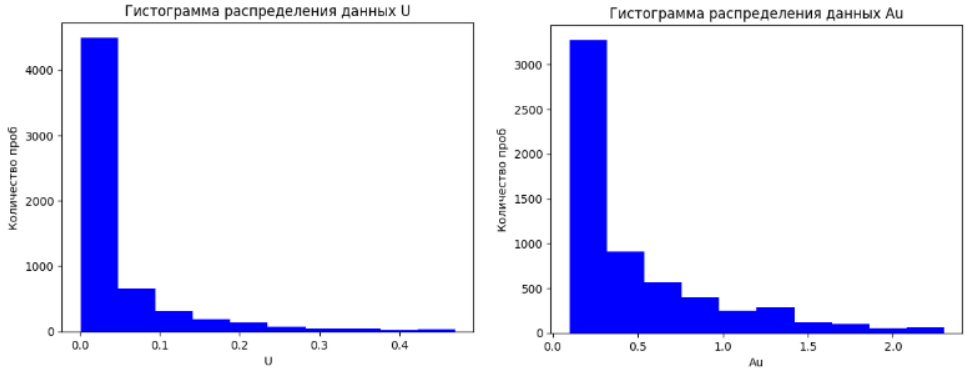


Рисунок 1. Гистограммы распределения золота и урана

Дополнительно были определены значения искажения распределений при помощи команды на Python: “skew()”. Для урана (6,815) и для золота (3,076). Данные значения также свидетельствуют о том, что и уран, и золото распределены неравномерно их распределения имеют сильную положительную асимметрию.

Учитывая допущения корреляционного анализа Пирсона, мы можем определять связь только нормально распределенных выборок и данные должны быть представлены в метрических единицах. Решение данной задачи можно осуществить разнообразными методами, но были выбраны те, которые максимально отличаются друг от друга по принципу работы. Для определения метода нормализации, максимально точно отображающего связь между элементами, используется график распределения, график Q-Q, значения искажения выборки и коэффициент корреляции Пирсона.

Было проанализировано несколько видов нормализации для нахождения лучшего распределения для вычисления коэффициента корреляции Пирсона. Среди них: логарифмическое преобразование; преобразование квадратного корня; квантильное преобразование; Z-преобразование; преобразование Бокса-Кокса. Затем были удалены выбросы. После преобразования данных были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона и отклонения для каждого метода.

Результаты

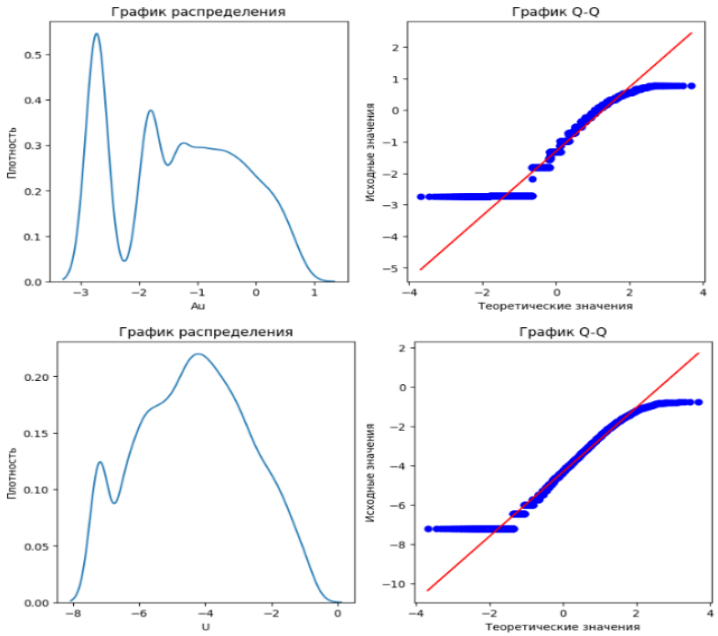


Рисунок 2. Результаты нормализации методом Бокса-Кокса

В ходе исследования были выбраны данные нормализованные методом Бокса-кокса (рис.2), т.к. они максимально соответствовали нормальному распределению. получено два коэффициента корреляции по методу Пирсона (0,415) и Спирмена(0,423). Оба коэффициента близки по значениям, что говорит о линейной зависимости. Согласно шкале Чеддока золото и уран имеют умеренную прямую зависимость.

Выводы

Месторождение “Южное” Эльконской группы можно считать полиметаллическим. Металлы, содержащиеся в руде, находятся в достаточно выраженной связи между собой, чтобы была возможность прогнозировать их совместное нахождение в руде. Информация позволит создать прогнозную золоторудную модель опираясь на пробы урана, которых достаточно много, в отличие от золота. Также исходя из линейности зависимости, модель будет более простой в своем исполнении. Также полученные результаты позволят создать более эффективные способы изучения и отработки месторождения, сокращая себестоимость добычи основного металла – урана. В целом месторождение станет более привлекательным для инвестирования капитала.

Библиография

1. Егорова И. В. Перспективы мирового рынка природного урана // Руды и металлы. – 2023. – № 1. – с. 6-16. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10001.
2. Schmid S., Taylor W.R., Jordan D.P. The Bigrlyi Tabular Sandstone-Hosted Uranium–Vanadium Deposit, Ngalia Basin, Central Australia // Minerals. – 2020. – № 10. – p. 896-925. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10001.
3. Liang R., Chi G., Ashton K., Nigel Blamey J.F., Fayek M. Fluid compositions and P-T conditions of vein-type uranium mineralization in the Beaverlodge uranium district, northern

Saskatchewan, Canada // Ore Geology Reviews. – 2017. – № 1. – p. 460-483. DOI: 10.1016/J.OREGEOREV.2016.07.012.

4. Bruneton P., Cuney M. Geology of uranium deposits // Uranium for Nuclear Power. – 2016. – № 1. – p. 11-52. DOI: 10.1016/B978-0-08-100307-7.00002-8.

5. Тарханов А.В., Бугриева Е.П., Колпаков Г.А., Казанцев В.В., Балакина И.Г., Смагин А.П. Новый тип уран-золотых месторождений в линейных корах выветривания на древних щитах на примере месторождения Северное (Алданский щит, Республика Саха (Якутия)) // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 1. – с. 14-19.

6. Молчанов А.В., Шатов В.В., Терехов А.В., Белова В.Н., Радьков А.В., Семенова В.В., Соловьев О.Л., Шатов Н.В. Эльконский золото-урановый рудный узел (Южная Якутия) (основные черты геологического строения, петрографо-геохимические особенности гидротермально-метасоматических образований и рудоносность) // Региональная геология и металлогения. – 2012. – № 50. – с. 80-101.

7. Данилов А.А., Гласс И.Д., Овчарова Е.С., Фомин В.Ю., Руденко А.А., Журавлев В.Г., Домаренко В.А. Перспективы разработки золото-урановых месторождений Елконского района // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – 2021. – № 6. – с. 143-149.

8. Mercadier J., Skirrow R.G., Cross A. Uranium and gold deposits in the Pine Creek Orogen (North Australian Craton): A link at 1.8 Ga? // Precambrian Research. – 2013. – № 238. – p. 111-119. DOI: 10.1016/J.PRECAMRES.2013.10.001.

9. Manikyamba C., Ghose N. C., Ganguly S., Pahari A., Sindhuja C.S. Gold, uranium, thorium, and rare earth mineralization in the Kadiri Volcanic Province of Eastern Dharwar Craton, India: An evaluation of mineralogical, textural, and geochemical attributes // Geological Journal. – 2020. – № 4. – p. 1-23. DOI: 10.1002/GJ.3959.

10. Моисеенко Н.В., Кузнецова И.В. Взаимосвязь урана, золота и углерода при рудообразовании // Международный гуманитарный журнал. – 2017. – № 12. – с. 40-46.

11. Шепель Е.В., Аюпова Н.Р., Рассомахин М.А., Хворов П.В. Ториевое, урановое и редкоземельное оруденение в породах Угаханского золоторудного месторождения Бодайбинского рудного района // Минералогия. – 2021. – № 3. – с. 78-93. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-5.

12. Моисеенко Н.В. Уран и торий во вмещающих комплексах золоторудных месторождений Пионер // Международный гуманитарный журнал. – 2021. – № 63. – с. 28-34. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-12-3-28-34.

13. Моисеенко Н.В., Кузнецова И.В. Уран и торий в горных породах и руде золоторудного месторождения Маломир // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 12-1(39). – с. 69-72. DOI: 110.24411/2500-1000-2019-11847.

Искусственный интеллект в недропользовании

Имаев Д.Р.* (ФГБОУ ВО "УГНТУ", imaevdinislam@gmail.com),
Сементеева Л.Ш. (ФГБОУ ВО "УГНТУ", sementeevaliana@mail.ru)

Аннотация

Искусственный интеллект (ИИ) становится одним из ключевых инструментов в современной промышленности, включая добычу полезных ископаемых. Недродобыча, как одна из самых ресурсоемких и сложных отраслей, сталкивается с множеством вызовов: от повышения эффективности до минимизации экологического ущерба. Внедрение ИИ позволяет решать эти задачи, оптимизируя процессы, снижая затраты и повышая безопасность. В данном докладе рассмотрены основные направления применения ИИ в недродобыче, его преимущества и перспективы развития.

Ключевые слова

Искусственный интеллект, недропользование, недродобыча, ИИ

Теория

Основные направления применения ИИ в недропользовании:

Геологоразведка и анализ данных

Одним из ключевых этапов недродобычи является поиск месторождений полезных ископаемых. ИИ позволяет анализировать большие объемы геологических данных, включая спутниковые снимки, данные сейсмических исследований и результаты бурения. Машинное обучение (ML) помогает выявлять закономерности и прогнозировать местоположение залежей с высокой точностью. Например, компании используют нейронные сети для анализа геофизических данных, что значительно сокращает время и затраты на разведку [1].

Оптимизация процессов добычи

ИИ активно применяется для управления горнодобывающим оборудованием, таким как экскаваторы, буровые установки и самосвалы. Автономные системы, управляемые ИИ, способны работать в сложных условиях, минимизируя человеческий фактор и повышая производительность. Например, компания RioTinto использует автономные грузовики и поезда, которые управляются с помощью ИИ, что позволяет снизить затраты на топливо и увеличить объемы добычи.

Прогнозирование и предотвращение аварий

Безопасность является приоритетом в недродобыче. ИИ помогает прогнозировать возможные аварии, такие как обрушения породы или утечки газа, анализируя данные с датчиков и исторические данные. Системы на основе ИИ могут своевременно предупреждать операторов о потенциальных угрозах, что снижает риски для персонала и оборудования.

Экологический мониторинг

ИИ также используется для контроля воздействия добычи на окружающую среду. Алгоритмы анализируют данные о выбросах, состоянии почвы и воды, что позволяет компаниям оперативно реагировать на изменения и минимизировать экологический ущерб [2].

Преимущества использования ИИ в недродобыче

Повышение эффективности: ИИ позволяет оптимизировать процессы, снижая затраты на добычу и увеличивая объемы производства.

Снижение риско**в**: Прогнозирование аварий и автоматизация опасных процессов повышают безопасность работ.

Точность анализа: ИИ способен обрабатывать огромные объемы данных, что повышает точность геологоразведки и прогнозов.

Экологичность: Мониторинг и управление экологическими рисками становятся более эффективными [3].

Проблемы и ограничения

Несмотря на все преимущества, внедрение ИИ в недродобыче сталкивается с рядом проблем:

Высокая стоимость: Разработка и внедрение ИИ-решений требуют значительных инвестиций.

Технические ограничения: Работа в сложных условиях (например, под землей или в удаленных

Регуляторные барьеры: В некоторых странах отсутствуют четкие стандарты и регулирование для использования ИИ в промышленности.

Примеры программного обеспечения и платформ

MineSense: Платформа для анализа руды в реальном времени.

WencoMiningSystems: Решения для управления автономным оборудованием.

Micromine: Программное обеспечение для геологоразведки и планирования добычи.

Экономические и экологические аспекты

Снижение затрат: Автоматизация процессов позволяет сократить расходы на рабочую силу и уменьшить потери из-за человеческих ошибок.

Увеличение доходов: Более точная геологоразведка и оптимизация добычи повышают объемы извлекаемых ресурсов.

Рециклинг отходов: ИИ помогает разрабатывать технологии для переработки отходов добычи, что уменьшает нагрузку на окружающую среду [4].

Технические аспекты применения ИИ в недропользовании

Машинное обучение и нейронные сети

Машинное обучение (ML) — это основа многих ИИ-решений в недропользовании. Алгоритмы ML используются для анализа геологических данных, прогнозирования месторождений и оптимизации процессов добычи. Например, нейронные сети могут обрабатывать спутниковые снимки и выявлять закономерности, которые человек не способен заметить. Это особенно полезно при поиске новых месторождений в труднодоступных регионах.

Большие данные (BigData)

Горнодобывающая промышленность генерирует огромные объемы данных, которые невозможно обработать вручную. ИИ позволяет анализировать эти данные в режиме реального времени, что значительно повышает эффективность процессов. Например, данные с датчиков на оборудовании могут использоваться для прогнозирования износа деталей и планирования технического обслуживания.

Интернет вещей (IoT)

IoT-устройства, такие как датчики и сенсоры, играют ключевую роль в сборе данных для ИИ. Они могут отслеживать температуру, давление, вибрацию и другие параметры, что позволяет оперативно реагировать на изменения в процессе добычи.

Статистика и прогнозы

По данным Accenture, внедрение ИИ может повысить производительность в горнодобывающей промышленности на 20-30%.

Согласно отчету MarketsandMarkets, рынок ИИ в горнодобывающей промышленности будет расти со среднегодовым темпом роста (CAGR) 23,6% с 2020 по 2025 год.

Компания PwC прогнозирует, что к 2030 году ИИ поможет сократить затраты на добычу полезных ископаемых на 15-20%.

Регуляторные аспекты

Стандартизация: Необходимость разработки международных стандартов для использования ИИ в горнодобывающей промышленности.

Лицензирование: Вопросы использования данных и алгоритмов, особенно в случае сотрудничества между странами [5].

Экологические нормы: Регуляторы могут потребовать от компаний использовать ИИ для снижения экологического ущерба.

Социальные аспекты внедрения ИИ:

Влияние на занятость

Внедрение ИИ и автоматизация процессов в недропользовании могут привести к сокращению рабочих мест, особенно в области ручного труда. Однако это также создает новые возможности для высококвалифицированных специалистов, таких как инженеры по данным, аналитики и разработчики ИИ. Компании должны учитывать социальные последствия автоматизации и разрабатывать программы переподготовки для сотрудников.

Улучшение условий труда

ИИ может значительно улучшить условия труда в горнодобывающей промышленности. Например, автономное оборудование снижает необходимость работы в опасных условиях, таких как глубокие шахты или карьеры с высоким уровнем загрязнения. Это особенно важно для снижения травматизма и профессиональных заболеваний.

Социальная ответственность компаний

Компании, внедряющие ИИ, должны учитывать социальные аспекты своей деятельности. Это включает поддержку местных сообществ, создание новых рабочих мест в смежных отраслях и инвестиции в социальные проекты, такие как образование и здравоохранение.



Рисунок 1. Станок-качалка типа наземного привода скважинных штанговых насосов при эксплуатации нефтяных скважин

Вывод

Искусственный интеллект уже сегодня играет важную роль в недродобыче, помогая решать сложные задачи и повышая эффективность отрасли. Однако для полного раскрытия потенциала ИИ необходимо преодолеть ряд технических, финансовых и регуляторных барьеров. В будущем ИИ станет неотъемлемой частью горнодобывающей промышленности, способствуя ее устойчивому развитию.

Библиография

1. McKinsey&Company. "Artificial intelligence in mining: Unearthing the potential."URL: [https://www.mckinsey.com] (https://www.mckinsey.com)

2. Rio Tinto. "Autonomous haulage systems in mining."URL: [https://www.riotinto.com] (https://www.riotinto.com)

3. World Economic Forum. "How AI is transforming the mining industry."URL: [https://www.weforum.org] (https://www.weforum.org)

4. Deloitte Insights. "AI and IoT in mining: Driving efficiency and sustainability."URL: [https://www2.deloitte.com] (https://www2.deloitte.com)

5. Mining Technology. "The role of AI in modern mining."URL: [https://www.mining-technology.com] (https://www.mining-technology.com)

Препятствия для широкого внедрения ИИ при оптимизации процессов строительства скважин, как эффективного инструмента снижения стоимости и повышения безаварийности бурения нефтегазовых скважин

Индриксон И.Ю.* (ИГиРГИ, IndriksonIYU@igirgi.rosneft.ru),
Демченко И.А. (ИГиРГИ, DemchenkoIA@igirgi.rosneft.ru)

Аннотация

В докладе описывается практический опыт применения данных ГТИ для анализа инцидентов при строительстве скважин на нефть и газ. На основании получаемых и обрабатываемых данных аппаратного комплекса станции ГТИ с возможностью дополнять базы сторонними данными (данные ГИС, параметры бурового раствора, траектория ствола скважины, геомеханика), в процессе строительства скважины, имеется возможность для обучения моделей ИИ. В целях снижения человеческого фактора при анализе осложнений, а в последующем для раннего автоматического предупреждения осложнений и аварий на основе первичных признаков, регистрируемых станцией ГТИ.

В свою очередь, неопределённость, неточность, и недостаточность необходимой информации или некачественные исходные данные ГТИ, а также наличие человеческого фактора, негативно влияет на процесс строительства скважины, увеличивая тем самым затраты на бурение, тем самым, косвенно влияет на рентабельной разработки месторождений в целом. Также игнорирование достоверности данных только увеличивает категорию природных и техногенных трудноизвлекаемых запасов углеводородов [1, 2].

Объединение искусственного интеллекта (ИИ) и геолого-технологических исследований (ГТИ) в процессе строительства скважин позволяет решать несколько ключевых задач: повышение эффективности бурения; повысить точность и скорость принятия решений, оптимизировать процесс бурения; повысить эффективность управления циклом строительства скважины, снизить непроизводительное время.

Для интеграции ИИ и проведения машинного обучения на основе данных станции ГТИ необходимо добиваться повышения качества, данных получаемых станцией ГТИ в процессе работы на скважине, что влияет как на выбор модели машинного обучения, так и на скорость и правильность принятия решений на основе выданных ИИ рекомендаций.

Ключевые слова

геолого-технологические исследования, газовый каротаж, сопровождение бурения, искусственный интеллект

Теория

На сегодняшний день, в своей практике, для целей геонавигации, мы широко используем данные газового каротажа, проводимого станцией ГТИ. С помощью данного метода мы оперативно определяем насыщение пластов, свойств пластовых флюидов, границы ГНК и ВНК [3]. Основным преимуществом газового каротажа является то, что он относится к прямым методам исследования скважин и проводится непосредственно в процессе бурения, без перерыва в работе буровой бригады и оборудования и имеет низкую стоимость по сравнению с комплексом ГИС [4-5]. Также данные ГТИ используются для раннего предупреждения возникновения осложнений в процессе строительства скважины.

Что представляет собой станция ГТИ и ее роль в сборе, обработке и передаче информации в процессе строительства скважины.

Прямые измерения технологических параметров поступают в систему сбора и обработки данных станции ГТИ от датчиков, установленных на буровой установке: датчики

давления; датчик веса; датчики оборотов ротора или верхнего силового привода; датчик момента на роторе или верхнем силовом приводе; датчик оборотов буровой лебедки; датчики ходов насоса; датчики расхода бурового раствора на входе в циркуляционную систему и выходе бурового раствора на дневную поверхность; датчики уровня бурового раствора в емкостях; датчики плотности бурового раствора на входе и выходе; датчики температуры бурового раствора на входе и выходе; система сбора и анализа компонентного состава газа содержащегося в буровом растворе.

Косвенные данные получаемые при обработке прямых измерений: нагрузка на долото; скорость проходки, и скорость проведения спускоподъемных операций; объем бурового раствора в емкостях; расчет скорректированной буровой экспоненты Сигма лога для предупреждения вскрытия зон с АВПД; проводить фильтрационный каротаж; проводить энергокаротаж – расчет энергии затрачиваемой на разрушение породы в реальном режиме времени; по данным механического и газового каротажа определять коэффициент кавернозности открытого ствола; построение фактической литологической колонки вскрываемого разреза; определение фактического газосодержания в буровом растворе; обработка технико-экономических показателей в процессе строительства скважины, определение скрытого непроизводительного времени.

В отечественной практике все чаще предпринимаются попытки применения методов искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных со станций ГТИ с целью автоматического выявления и прогнозирования осложнений при бурении скважин. К примеру, в одном из последних исследований по результатам тестирования классификационной нейросетевой модели получены следующие точности прогнозирования различных видов осложнений: «ГНВП» – 96%; «Поглощение» – 79%; «Прихват» – 87% [6].

Однако большинство исследований основываются на имитации реальных инцидентов. В свою очередь большой накопленный объем фактических статистических данных АО «ИГиРГИ», позволяет оценить качество предоставляемых данных по подрядным организациям, регионам работ и условиям проводки скважин. В общей сложности за 2020-2024гг проведен анализ данных по осложнениям в объеме 1 661 осложнений и более 17 500 скважин по геологическому сопровождению, выявлена сложившаяся проблематика с получением качественных данных, что в свою очередь влияет на косвенные параметры, обрабатываемые комплексом станции ГТИ. На рисунке 1 наглядно показано, что качество предоставляемых данных, не стабильно по рынку услуг ГТИ и, зачастую, оставляет желать лучшего. Согласно критериям, предъявляемым к данным для машинного обучения, качество исходных данных играет ключевую роль для работы алгоритмов ИИ [7].

Подрядные организации ГТИ	Скважин без замечаний	Скважин с замечаниями	Всего скважин	Коэф-нт лидера по объемам	Доля скважин с замечаниями	Коэф-нт лидера по качеству	Сумма коэф-от объема и качества
Подрядчик №1	354	71	425	1,45	17	4,46	647,02
Подрядчик №2	101	15	116	0,40	13	5,76	228,15
Подрядчик №3	218	204	422	1,44	48	1,54	222,02
Подрядчик №4	91	17	108	0,37	16	4,73	174,50
Подрядчик №5	109	64	173	0,59	37	2,01	118,94
Подрядчик №6	101	61	162	0,55	38	1,98	109,42
Подрядчик №7	54	13	67	0,23	19	3,84	87,82
Подрядчик №8	73	76	149	0,51	51	1,46	74,30
Подрядчик №9	53	155	208	0,71	75	1,00	70,99
Подрядчик №10	52	115	167	0,57	69	1,08	61,68
Подрядчик №11	11	197	208	0,71	95	0,79	55,85
Подрядчик №12	34	25	59	0,20	42	1,76	35,41
Подрядчик №13	31	38	69	0,24	55	1,35	31,87
Подрядчик №14	25	37	62	0,21	60	1,25	26,42
Подрядчик №15	8	84	92	0,31	91	0,82	25,63
Подрядчик №16	11	71	82	0,28	87	0,86	24,09
Подрядчик №17	22	21	43	0,15	49	1,53	22,39
Подрядчик №18	4	76	80	0,27	95	0,78	21,42
Подрядчик №19	5	15	20	0,07	75	0,99	6,78
Подрядчик №20	0	19	19	0,06	100	0,75	4,83
Подрядчик №21	1	12	13	0,04	92	0,81	3,58
Подрядчик №22	2	7	9	0,03	78	0,96	2,94
Подрядчик №23	3	0	3	0,01	0	1,00	1,02
Подрядчик №24	0	1	1	0,00	100	0,75	0,25

Рисунок 1. Анализ качества данных ГТИ по подрядчикам и объемам работ за 2024г.

Выводы

1. В отечественной практике все чаще предпринимаются попытки применения методов искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных со станций ГТИ с целью автоматического выявления и прогнозирования осложнений при бурении скважин.

2. Большой накопленный объем статистических данных, позволяет применить их для обучения моделей ИИ, для снижения человеческого фактора при анализе осложнения, а в последующем для раннего автоматического предупреждения осложнений и аварий на основе первичных признаков, регистрируемых станцией ГТИ.

2. Практический опыт анализа данных ГТИ показывает, что качество предоставляемых данных, не стабильно по рынку услуг ГТИ, что замедляет цифровизацию процессов анализа данных ГТИ на основе ИИ.

Библиография

1. О включении высокообводненных запасов недонасыщенных нефтью коллекторов в категорию трудноизвлекаемых / Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Поздышев А.С., Ильязов Р.Р. / Нефтяное Хозяйство №04’2023 С. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-4-11-11;

2. Проблемы трансформации запасов углеводородного сырья в нерентабельную техногенную категорию трудноизвлекаемых: научная статья / Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Давыдов А.В. / Нефтяное хозяйство. 2022. № 4. С. 38-43. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-4-38-43;

3. Применение газового каротажа для геонавигации и оперативного определения межфлюидных контактов при проводке горизонтальных скважин / Ильязов Р.Р, Никифоров С.А, Черников Е.Ю., Рахимов Т.Р.// Нефтяное Хозяйств. 2023. №2. С. 72-77. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-2-72-77;

4. Современные возможности газового каротажа при бурении скважин и необходимость его комплексного метрологического обеспечения /Ильязов Р.Р. / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2023. № 8 (368). С. 11-18. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-8(368)-11-18;

5. Расширенные геолого-технические исследования скважин: первые среди равных. / Лоерманс Т. - Георесурсы. 2017. Т. 19. № 3. Ч. 1. С. 216-221. DOI: https:/doi.org/10.18599/grs.19.3.11;

6. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования ослож- нений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения / Черников А.Д., Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сбоев А.Г., Семенова-Чащина О.К., Фицнер Л.К. // Георесурсы, 22(3), с. 87–96. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96;

7. https://habr.com/ru/articles/462365/

Использование механизма внимания в нейросетях для восстановления рельефа по спутниковым снимкам

Исмагулов С.Е. (ФГБОУ ВО ЮГУ, Ismagulov.s.e@yandex.ru),*
Песчанская А.А (ФГБОУ ВО ЮГУ, f76988925@gmail.com),
Долматова М.А (ФГБОУ ВО ЮГУ, m_dolmatova03@bk.ru)

Аннотация

В статье рассматривается восстановление рельефа по спутниковым снимкам. Описаны традиционные методы и современные подходы к созданию цифровых моделей, а также основные сложности, включая окклюзию, неоднородность освещения и ошибки регистрации. Рассматривается применение нейросетевых моделей для улучшения качества реконструкции, в частности алгоритм, основанный на модели GADEM с глобальным механизмом внимания GAM.

Данный подход позволяет нейросетям фокусироваться на значимых участках изображений, снижая ошибки и повышая детализацию 3D-моделей.

Ключевые слова

Нейросети, восстановление рельефа, цифровая модель, механизм глобального внимания

Теория

Восстановление рельефа местности по спутниковым снимкам – распространённая задача геоинформатики. Традиционные методы, такие как стереофотограмметрия, лазерное сканирование (LiDAR) и радиолокационная интерферометрия (InSAR), требуют сложных вычислений и специальных данных. Однако развитие нейросетевых технологий позволяет автоматизировать этот процесс, используя только снимки, полученные с орбитальных платформ. Реконструкция трехмерных моделей местности по спутниковым снимкам имеет значение для таких приложений, как фотореалистичная визуализация и создание реалистичных геофизических сред для моделирования [3]. Спутниковая съемка дает преимущество доступа в любое время и в любом районе без географических или политических ограничений.

Для создания цифровых моделей рельефа (DTM) из спутниковых снимков выделяют несколько подходов:

1. Автоматизированные конвейеры обрабатывают многозональные спутниковые снимки, создавая модели рельефа и ортоизображения [6].
2. ИИ и вычислительная геометрия ускоряют реконструкцию 3D-карт [1], но требуют больших обучающих данных, а также чувствительны к их качеству.
3. Регистрация снимков разных спектров помогает объединить их в единую модель, но ошибки совмещения могут снизить точность [6].
4. Генерация 3D-моделей по многократным снимкам улучшает детализацию, но зависит от условий съемки, что влияет на точность [6].

Реконструкция рельефа по спутниковым снимкам сталкивается с рядом сложностей, таких как ограниченная видимость, различия в освещении, отражения и слабо текстурированные области, которые ухудшают точность [5]. Углы обзора и окклюзия усложняют воссоздание вертикальных элементов, а модель камеры RPC затрудняет применение алгоритмов SfM. Дополнительно, удаленность спутников и облачность ограничивают точность и доступность данных.

Для решения этих проблем используются классические, гибридные и нейросетевые методы. К классическим относятся фотограмметрия и методы стерео-соответствия, но они чувствительны к изменениям освещения. Гибридные модели комбинируют традиционные подходы с машинным обучением, а нейросетевые методы (U-Net, GAN, CNN) автоматизируют процесс, но сталкиваются с проблемами шумов и разнородных данных.

Для их решения используется механизм внимания (Attention) [2], позволяющий моделям фокусироваться на значимых участках изображения и снижать ошибки.

В контексте восстановления рельефа он позволяет нейросетям сосредотачиваться на ключевых областях снимка, снижая влияние шумов и артефактов. Механизм улучшает реконструкции рельефа с помощью спутниковых изображений, позволяя нейросетям извлекать признаки и фокусироваться на важных деталях. Так, например, существует цифровая модель рельефа, построенная с помощью алгоритма, основанного на модели GADEM с глобальным механизмом внимания (GAM).

GAM – это механизм глобального внимания, используемый в нейросетях для обработки спутниковых изображений и создания цифровых моделей рельефа (DEM). В отличие от традиционных методов, GAM учитывает глобальные взаимосвязи в данных, помогая моделям выделять наиболее значимые участки изображения, что снижает потери информации и улучшает качество реконструкции рельефа.

GAM использует внимательные слои, которые анализируют глобальные взаимосвязи между пикселями изображения, выделяя ключевые участки, которые могут быть важными для построения точной модели рельефа. Путем применения внимания, фокусирующегося на глобальных признаках изображения, улучшается обработка данных и повышается точность DEM, что позволяет избежать фрагментации данных и утраты важных деталей.

В таблице 1 представлены числовые показатели, демонстрирующие сравнение точности между моделями с GAM и без него, где использование внимания значительно улучшает результаты в плане точности высотных данных и детализации рельефа [4].

Таблица 1. Сравнение производительности алгоритмов генерации рельефа местности на датасетах Луна и Мар

Датасеты	Метрики	Pix2Pix	CBDEM	GADEM
Луна	MAE (m) ↓	2.978	2.571	**2.465**
	RMSE (m) ↓	3.165	2.623	**2.498**
	R^2 (m) ↑	0.351	0.554	**0.616**
	SSIM (m) ↑	0.316	0.497	**0.608**
Марс	MAE (m) ↓	2.953	2.398	**2.273**
	RMSE (m) ↓	3.045	2.336	**2.269**
	R^2 (m) ↑	0.288	0.516	**0.625**
	SSIM (m) ↑	0.321	0.522	**0.614**

Метод **GADEM** показывает лучшие результаты по сравнению с Pix2Pix и CBDEM в восстановлении рельефа Луны и Марса. Он достигает наименьших значений **MAE** и **RMSE**, что указывает на меньшую ошибку при прогнозировании высот. Также GADEM демонстрирует наибольшие значения **R^2** и **SSIM**, что свидетельствует о лучшем соответствии реальному рельефу и сохранении структурных особенностей, что подтверждает эффективность механизма глобального внимания в задаче генерации цифровых моделей рельефа по спутниковым снимкам.

На рисунке 1 показан процесс работы алгоритма GADEM для восстановления рельефа по спутниковым снимкам. Алгоритм начинается с предобработки входного изображения,

затем выполняется извлечение признаков, которые используются в механизме глобального внимания для создания улучшенной карты признаков. Далее выполняется оценка глубины и генерация цифровой модели рельефа (ЦМР), которая затем проходит постобработку для уточнения деталей. Завершающим этапом является оценка качества, включающая анализ точности и ошибок полученной модели.

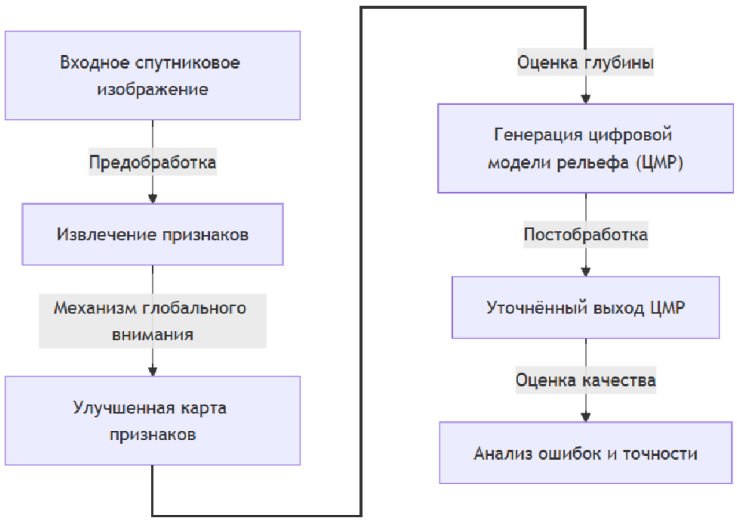


Рисунок 1. Схема работы алгоритма GADEM для восстановления рельефа по спутниковым снимкам

Выводы

Метод GADEM с глобальным вниманием (GAM) повышает точность восстановления рельефа, справляясь с шумами, вариациями освещения и слабой текстурированностью, улучшая соответствие модели реальному рельефу, что делает его перспективным для сложных ландшафтов и открывает возможности для дальнейших исследований и оптимизации.

Таким образом, метод GADEM решает ключевые проблемы восстановления рельефа, связанные с шумами, недостатком текстурных данных, изменениями освещения и сложностями совмещения снимков. Использование механизма глобального внимания (GAM) позволяет модели выделять значимые участки изображения, снижая потери информации и повышая точность цифровых моделей рельефа. Благодаря этому GADEM демонстрирует лучшие результаты по сравнению с традиционными методами, уменьшая ошибки предсказания высот и сохраняя структурные особенности местности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность научному руководителю, **Шевченко Алесе Сергеевне**, кандидату физико-математических наук, доценту Югорского государственного университета, за ценные советы, и руководство в процессе работы.

Библиография

1. Кожухов А.А., Омельченко Д.Р., Мельниченко И.А., Ческидов В.В., Мосейкин В.В. Создание модели распределения полезного компонента в железорудном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). 2023. № 8. С. 5-17. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-modeli-raspredeleniya-poleznogo-komponenta-v-zhelezorudnom-mestorozhdenii/viewer (дата обращения: 24.02.2025).
2. Краснов Д.И. Модули внимания в сверточных нейронных сетях для распознавания малоразмерных объектов // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48. № 6. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/moduli-vnimaniya-v-svertochnyh-neyronnyh-setyah-dlya-raspoznavaniya-malorazmernyh-obektov/viewer (дата обращения: 24.02.2025).

3. Степанов И.Ю. Использование методов машинного обучения в геоинформационных моделях при решении задач геофизической разведки // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-mashinnogo-obucheniya-v-geoinformatsionnyh-modelyah-pri-reshenii-zadach-geofizicheskoy-razvedki/viewer (дата обращения: 24.02.2025).

4. Li Yang, Zhijie Zhu, Long Sun, Dongping Zhang. Global Attention-Based DEM: A Planet Surface Digital Elevation Model-Generation Method Combined with a Global Attention Mechanism // Aerospace. 2024. 28 June. URL: https://www.mdpi.com/2226-4310/11/7/529. (дата обращения: 24.02.2025).

5. Liu Tianle, Zhao Shuangming, Jiang Wanshou, Guo Bingxuan. Sat-DN: Implicit Surface Reconstruction from Multi-View Satellite Images with Depth and Normal Supervision // License: CC BY 4.0. 12 Feb 2025. URL: https://arxiv.org/html/2502.08352v1. (дата обращения: 24.02.2025).

6. Tarabalka Yuliya, Girard Nicolas, Tripodi Sebastien, Larrosa Cedric, Bauchet Jean-Philippe, Fonteix Guillemette. Reconstruction of 3D Environments from Satellite Images by AI and Computational Geometry for Exploitation in Mixed Reality // STO-MP-MSG-197. 2022. URL: https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-197/MP-MSG-197-04.pdf. (дата обращения: 24.02.2025).

Совершенствование роботизированных геотехнологий при добыче общераспространенных полезных ископаемых на месторождениях сложной морфологии

Козловский А.М.* (Министерство экологии и природопользования МО, kozlovskiyam@gmail.com),
Лобанова О.С. (РАНХиГС, lobanova-os@mail.ru),
Радченко Д.Н. (ИПКОН РАН, mining_expert@mail.ru)

Аннотация

В работе рассматривается технология разработки месторождения строительного песка сложной морфологии. Совершенствование условий применения роботизированных бульдозеров в технологических операциях зачистки обеспечивается внедрением систем спутниковой навигации и позиционирования, направленных на снижение эксплуатационных потерь полезного ископаемого за счет применения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС

Исследуются физико-механические свойства песчаных и торфяных слоев, а также их влияние на производственные процессы и экономическую целесообразность эксплуатации месторождения. Результаты исследования призваны внести вклад в развитие горного производства в сфере добычи строительных материалов за счет обоснования путей перехода к роботизированным геотехнологиям [4, 7].

Ключевые слова

Системы спутникового позиционирования, навигация, совершенствование автономных систем, карьерное оборудование, бульдозер, операция зачистки, снижение потерь

Теория

Актуальность темы заключается в необходимости повышения интенсивности извлечения строительного песка на месторождениях сложной морфологии, снижения уровня потерь и разубоживания на этапе зачистки предохранительного слоя. Использование ГЛОНАСС позволяет улучшить точность выполнения работ, избегая лишних перемещений и минимизируя потери материала. Это также способствует более рациональному использованию ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. В современных условиях конкурентоспособность предприятий горнодобывающей отрасли во многом зависит от внедрения инновационных технологий, включая роботизированные горные машины, что делает исследование данной темы крайне актуальным.

Полезным ископаемым на рассматриваемом месторождении служит толща эоловых и аллювиальных отложений III, образующих разобщенную пластообразную залежь строительных песков. Залежь имеет повсеместное распространение в границах лицензионного участка. Общая мощность залежи полезной толщи изменяется от 21,1 до 24,5 м, составляя в среднем 22,5 м. Общая мощность вскрышных пород изменяется от 5,5 до 8,9 м, в среднем 7,5 м, в т.ч. ПСП– 0,9 м, внутренняя вскрыша – 3,7 м [4, 20]. Песок характеризуется достаточно низким качеством, т.к. содержание пылеватых фракций достигает 18%.

Это обуславливает дополнительные требования к параметрам технологий разработки месторождения, состоящие в минимизации разубоживания песка за счет примешивания на этапе зачистки бульдозером прослоев глин и торфа (почвы) (рис. 1). Однако, до настоящего времени, выполнение операций по зачистке налегающих слоев торфа (почвы) и суглинка производится с неизбежными потерями, которые можно характеризовать как эксплуатационные потери [4, 61].

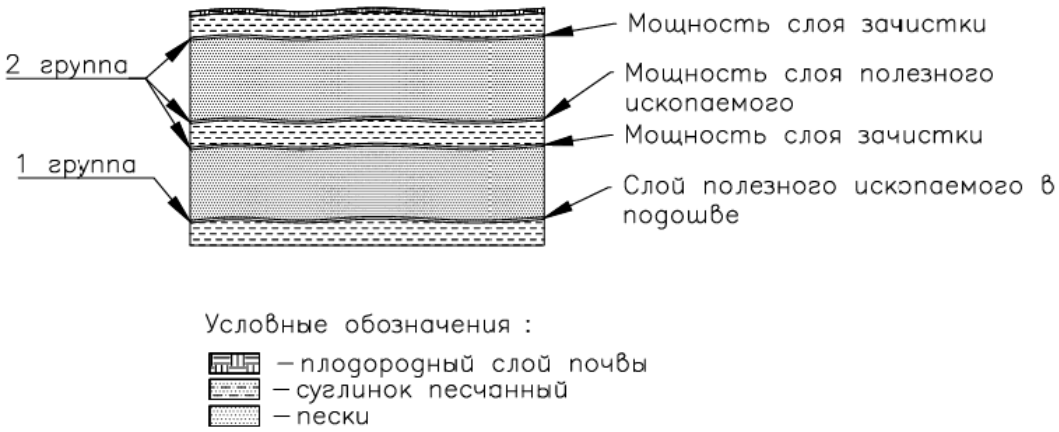


Рисунок 1. Морфология залежей и схема к расчету объемов потерь полезного ископаемого

Традиционно для разработки залежей сложной морфологии в настоящее время применяется технология, основанная на открытой разработке, экскаватор отрабатывает добычной уступ оставляя предохранительный слой перед подошвой, после него бульдозером производится зачистка, для уменьшения потерь полезного ископаемого в процессе добычных работ (рис. 2).

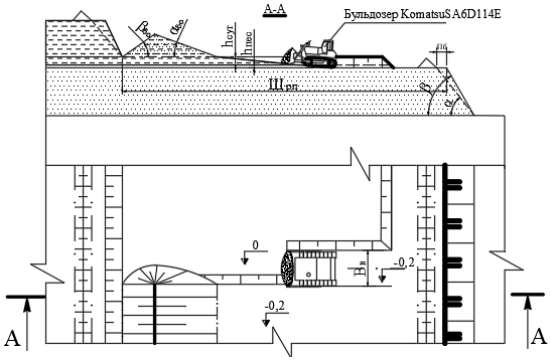


Рисунок 2. Производство работ при снятии слоя зачистки

Для увеличения объема добываемого полезного ископаемого за счет уменьшения эксплуатационных потерь предложено применение автономного (либо дистанционно управляемого) бульдозера, оснащенного, в том числе, оборудованием нивелирования и ГЛОНАСС. Это позволяет более точно прогнозировать распределение полезных ископаемых и минимизировать объемы потерь. Использование навигационных технологий, такие как системы глобального позиционирования, цифровые карты местности и географические информационные системы (ГИС), могут существенно снизить слой зачистки до 0,05 метра без потерь и разубоживания полезного ископаемого.[4, 63] Данные системы уже используются на некоторых карьерах для более точной зачистки, отвалообразования и рекультивации, но они еще не так распространены, как, например, в строительстве дорог [3]. В настоящее время технологические и технические возможности позволяют оснащать существующие бульдозеры, улучшая их селективность, работу и точность (рис. 3). Оборудование, которое рассматривается в данной работе для установки на бульдозер - TopCon Система 3D MC-X MAX [2].

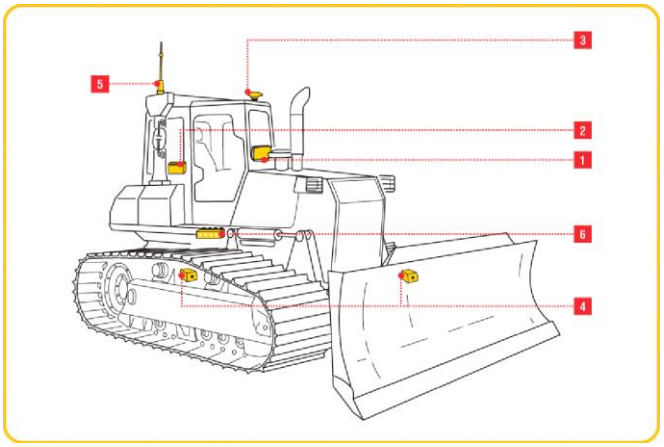


Рисунок 3. Размещение навесного оборудования на машине. [2]
1 - Панель управления GX-55; 2- Блок управления MC-X3; 3 - Спутниковая антенна GR-i3; 4 - Инерциальный датчик TS-i4; 5 - Радиоантенна; 6 - Электромагнитный клапан для поддержания уровня отвала [4, 64]

Выполненная технико-экономическая оценка показала, что использование оборудования нивелирования на бульдозерах позволит увеличить чистую прибыль на 95 млн. рублей за весь срок эксплуатации карьера. Это достигается за счет того, что за все время дополнительно добывается 213300 м3, используя один бульдозер для выполнения данной операции.

Таблица 1. Разность объемов при изменении мощности слоя зачистки

Потери объемов в слое зачистке	Мощность слоя зачистки, м		Разность объемов
	0,2	0,05	
Объем перед первым добычным уступом, тыс.м3	80,68	20,17	60,51
Объем перед внутренней вскрышей, тыс.м3	73,52	18,38	55,14
Объем перед вторым добычным горизонтом, тыс.м3	67,54	16,88	50,66
Объем зачистки подошвы, тыс.м3	62,7	15,68	47,03
Всего, тыс.м3	284,44	71,11	213,33

Исходя из приведенных расчетов, внедрение предлагаемых решений обеспечивает повышение уровня извлечения высококачественного полезного ископаемого на 213,33 тыс. м3, что за 16 лет эксплуатации месторождения. Чистая дополнительная прибыль за счет сокращения эксплуатационных потерь составляет 95 млн. рублей. [4, 81]

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вложения в установку системы нивелирования будут оправданы и принесут положительный экономический эффект. В целом, разработка месторождений с использованием ГЛОНАСС технологий является перспективным

направлением, способствующим переходу к автономному оборудованию, включая полностью роботизированные геотехнологии, увеличению производительности, качества добываемого строительного сырья и показателей экономической эффективности предприятия [4, 140].

Выводы

В результате внедрения технологии использования навигационных систем для сокращения эксплуатационных потерь в ходе исследования месторождения строительного песка была проведена комплексная разработка с учетом использования технологии ГЛОНАСС и оборудования нивелирования [4, 140].

Библиография

1. Вишняков Г. Ю. Обоснование регламента технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов с учетом уровня загрузки в конкретных условиях эксплуатации: диссертация кандидата технических наук: 2.8.8. // [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»; Диссовет ГУ.2]. - Санкт-Петербург, 2024. - 149 с.
2. [Интернет-ресурс] Официальный сайт компании Topcon Спутниковая "безмачтовая" ГНСС система 3D MC-X MAX // Topcon для профессионалов URL: https://topcon.pro/stroitelstvo/3DMCmax_System/ (дата обращения: 09.01.2025).
3. [Интернет-ресурс] Официальный сайт компании Нева-Норд Системы управления экскаваторами // Нева-Норд системы управления строительной техникой URL: https://www.neva-nord.ru/excavator.php (дата обращения: 10.01.2025).
4. Козловский А. М. Разработка месторождения строительного песка
5. «Прилесье» в Самарской области //Выпускная квалификационная работа. – 2025. – С. 143

Оценка результативности съемок вдоль осей погруженных трубопроводов комплексом бесконтактной магнитометрической диагностики

Мединская Д.К.* (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, s225007@stud.spmi.ru),
Яковлева А.А. (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Yakovleva_AA@pers.spmi.ru),
Семенов В.В. (ООО «ДИАС», semenovvv50@yandex.ru)

Аннотация

При проведении полевых измерений вдоль оси погруженного трубопровода в последние десятилетия активно применяется методика бесконтактного магнитометрического мониторинга в рамках задач неразрушающего контроля технического состояния объекта.

Путем фиксации антенным прибором внешних магнитометрических характеристик, определяются аномальные зоны упруго-пластических деформаций и разрывов сплошности ферромагнитных материалов стенок трубопроводов. Геофизический сигнал отображает в своей интегральной структуре, наличие неоднородностей в намагниченности сегментов труб. При интерпретации результатов съемок выполняется установление взаимосвязи метража интервалов трубопровода по профилю съемок, определяемого с точностью до полуметра, и аномальной области трубопровода с присвоением ранга опасности каждой аномалии.

Авторами демонстрируется оценка результативности бесконтактного метода детектирования для определения технического состояния эксплуатируемых систем транспортировки углеводородов при наличии рисковых аварийных и безаварийных интервалов.

Ключевые слова

Погруженный трубопровод, бесконтактная магнитометрия, оценка результативности, напряженно-деформированное состояние трубопровода

Теория

Оценка нарушенного состояния (локализация дефектов) трубопровода методом неразрушающего контроля выполняется на основе комплекса бесконтактной диагностики (магнитометра-градиентометра, КБД) и последующего количественного анализа магнитных аномалий. Применяемая аппаратура, согласно общепринятой терминологии, не может считаться средством измерения, поскольку не обеспечивает прямое наблюдение дефектной зоны. КБД фиксирует магнитную аномалию, содержащую в себе информацию о дефектной зоне, извлекаемую посредством стандартизированного комплекса цифровой обработки [5]. Согласно этому представлению, осуществляется стандартизированный многофакторный анализ магнитных аномалий. Магнитная аномалия, фиксирующая нарушенный участок трубопровода, в соответствии с физическими основами метода магнитной памяти металла [2,3], отвечает не только области развития дефектов со строго заданным выносом металла, но и области критических и предкритических упруго-пластических деформаций стенки трубопровода [4]. Учитывая, что стенка трубопровода не является композитом, упруго-пластические деформации в здесь способны развиваться лавинно, скачком: подобные деформации могут не сопровождаться значимым и эволюционно развивающимся утонением стенки на её локальном участке, а способны приводить к мгновенному разрыву.

Сведение результатов методом неразрушающего магнитометрического контроля (НМК) работ к обнаружению исключительно дефектов является грубой ошибкой, не соответствующей сущности применяемого метода неразрушающего контроля. Согласно

устоявшейся терминологии, бесконтактно магнитометрическая диагностика есть: экспресс-определение местоположения аномалий магнитного поля над трубопроводом при перемещении магнитометра вдоль оси объекта в пределах допустимых отклонений. Метод НМК считается этапом экспресс оценки, при этом, согласно ГОСТ Р 53006-2008 [1], экспресс-методами называются «**пассивные физические методы неразрушающего контроля**, использующие в качестве информативных параметров физические поля, характеризующие собственную (внутреннюю) энергию металла объекта контроля (акустическую эмиссию, метод магнитной памяти металла, тепловой контроль и др.)». Именно физические поля в экспресс-методе являются информативным параметром, а не пересчет этих полей в скрытые характеристики нарушенных участков техногенного объекта. В связи с последним утверждением, основной акцент в НМК делается на выявление характеристических магнитных аномалий, маркирующих аномалии напряженно-деформированного состояния (НДС) подземного трубопровода. При этом в научной и нормативной документации, термин магнитная аномалия трактуется качественно и не позволяет потенциальному заказчику количественно определить морфологические характеристики этой аномалии, а таже степень аномальности поля по отношению к его фоновой компоненте. Это означает, что попытки оценивать результативность метода НМК соотнося число, например, выявленных дефектов с общим числом магнитных аномалий, не подкрепляются ни физически, ни юридически.

Формально объектом исследования методом магнитометрического контроля выступает подземный трубопровод, характеризуемый как сильный ферромагнетик. Физически метод НМК фиксирует не особенности геометрии трубопровода, а особенности в распределении вектора остаточной намагниченности в объеме стенок данного геотехнического объекта. Согласно традиционным моделям магниторазведки, принятым в разведочной геофизике, ферромагнитное тело упрощенно считается намагниченным по падению: применительно к трубопроводу начально допускаем намагничение по его оси. Значимые девиации вектора остаточной намагниченности относительно указанной оси, маркируют аномалии НДС. Традиционно аномалия напряженно-деформированного состояния истолковывается как особенности, дефекты или повышенные нагрузки участка трубопровода, тип которых по результатам технического диагностирования невозможно идентифицировать. Стандартно термин «дефект» трактуется как: дефектность или несплошность, которая необязательно является недопустимой. В рамках таких нечетких базовых определений, оценка результативности метода НМК как нормированной частоты реализации откликов от конкретных дефектов системе характеристических магнитных аномалий – более чем спорная. В случае нефтепроводов магнитная аномалия имеет форму локального дипольного отклика, образующегося, как правило, на кривых градиентов компонент вектора магнитной индукции. Нарушенный участок трубопровода может быть представлен широким спектром вариаций аномального состояния стенки трубопровода, - от группы пространственно ограниченных дефектов с выраженным утонением стенки до области упруго-пластической деформации – и может быть размещен в различных позициях: снаружи или внутри трубы, на 12 или на 6 часов и т.д. В зависимости лишь от перечисленных факторов, в отмеченном дипольном отклике либо детально прорабатывается минимум и максимум магнитометрической кривой, либо дипольный отклик имеет конфигурацию локального выполаживания («полочки») на фланге крупного экстремума. В случае газопроводов магнитная аномалия имеет форму слабоамплитудного отклика, выделяемого на кривой магнитометрического сигнала по осцилляционной динамике (по избыточным колебаниям). Эти «избыточные колебания» не имеют детерминированной протяженности по линии измерительного профиля в силу отсутствия строго очерченных границ нарушенных участков газопроводов. Обнаруженное эмпирическим путем различие аномальных проявлений нарушенных зон в стенках нефте- и

газопроводов объективно связано с генезисом этих нарушенных зон, который, в свою очередь обусловлен:

-спецификой взаимодействия транспортируемого продукта со стенкой трубопровода в условиях нарушенной изоляции;

-особенностями вариации рабочего давления при транспортировании по трубопроводу жидкой/газообразной среды;

-наличием в этой среде ингибиторов коррозии;

-наличием в составе стенок труб легирующих присадок, определяющих их устойчивость к сероводороду.

Таким образом, процедура интерпретации сводится к преобразованию первичных магнитометрических кривых в набор функционально и физически независимых маркеров (для газопроводов) или показательных факторов (для нефтепроводов) нарушенных участков. Эти маркеры (факторы) определяют накопление весов, в рамках комплексного информационного параметра (КИП), уровень которых, в свою очередь, определяет ранг нарушенного участка. Оказалось, что зависимость КИП от величины коррозионного выноса металла подобна зависимости нормированной частоты детектирования дефектов, отраженной на Рисунке 1.

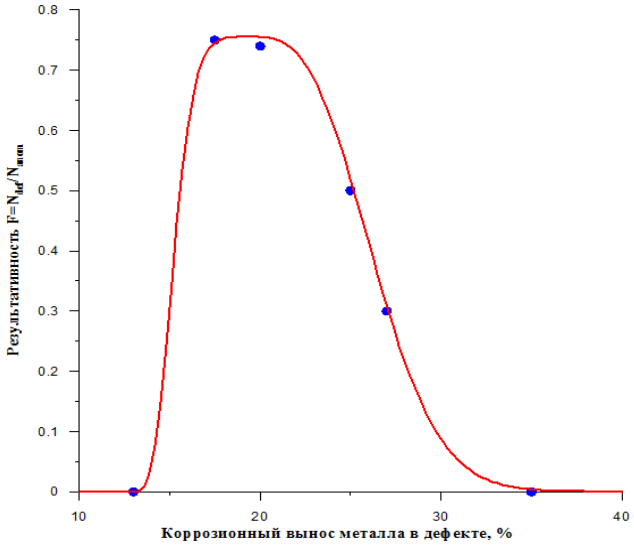


Рисунок 1. Итоговая кривая результативности НМК в привязке к физически верифицируемыми прямыми измерениями дефектом, с детерминированным уровнем коррозии

Отмеченная нормированная частота детектирования дефектов выражается следующей аппроксимационной зависимостью (1):

$$F = \frac{N_{def}}{N_{anom}} = C_1 * exp\left(\frac{-(\ln(D-C_2)-C_3)^{C_4}}{C_5 \cdot D^{C_6}}\right) = 0.755 * exp\left(\frac{(\ln(D-7)-2.5)^4}{2\cdot(9\cdot10^{-4})\cdot D^{1.1}}\right) \quad (1)$$

здесь: D - % коррозионного выноса металла в дефекте; N_{anom} - общее число характеристических (детектирующих нарушенные зоны) аномалий; N_{def} - число верифицированных шурфованием и дефектоскопией дефектов; все численные коэффициенты, стоящие в множителе, в показателе экспоненты (под логарифмом, в степени, в знаменателе) определяют такие величины как амплитуда пика функции, разброс относительно максимума функции результативности, асимметрия и иные особенности геометрии (пологий максимум, выход функции в ноль) графика.

Пологий максимум, ограниченный точками перегиба от 17% до 22% выноса металла, означает область максимальной результативности экспресс метода НК. Синие точки — это предельно приближённая к постановке задачи статистика; красная кривая отвечает приведённой выше подобранной формуле.

Выводы

Опираясь на выведенную аппроксимационную формулу оценки результативности метода НМК и относительно строгое определение характеристических магнитных аномалий можем переходить от характеристик магнитного поля к характеристикам коррозионного выноса металла. Так интерпретируя структуру функции F , оценим, результативность НМК и, соответственно, число обнаруженных дефектов равными нулю на 13% и на 35% коррозионного выноса металла на дефекте. Функция результативности - нелинейная, гладкая, положительная, асимметричная, с пологим экстремумом, т.е. подобрать её на основе фундаментальных функций оказалось невозможным. В основе подбора применялась функция логнормального распределения, но базовая формула этой функции не даёт возможности построить выраженную асимметрию при выположенном максимуме. Отсюда появились дополнительные константы, отвечающие преимущественно за морфологию функции. Из подобранного графика чётко видны: а) ограниченная область максимальной результативности метода (по пологому максимуму); б) область нулевой результативности (менее 13% и более 35% коррозионного выноса металла); в) проблемная область нелинейной связи результативности метода (значимая изменчивость результативности в интервале значений D , сопоставимом с областью максимальной результативности метода) с величиной коррозионного выноса металла (от 13% до 17% и от 23% до 28%); г) область низкой результативности (от 29% до 35%).

Библиография

1. ГОСТ Р 53006-2008 Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009.
2. ГОСТ Р ИСО 24497-1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 1: Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010.
3. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металлов //ТехНадзор. – 2017. – №. 9. – С. 44-46.
4. Мироненко И. Г. и др. Диагностики сварных швов методом магнитной памяти металла //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – №. 3-4. – С. 120-127.
5. Семенов В. В., Елисеев А. А., Мовчан И. Б. Бесконтактный магнитометрический способ локализации и оценки технологических аномалий в структуре трубопроводов //Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2018. – №. 2-2. – С. 20-30.

Повышение точности прогнозирования геомеханических процессов с помощью искусственного интеллекта

Сидорова Д.В.* (НИУ «БелГУ», mishakina6666@mail.ru),
Варнавский В.А. (ООО "Краснотурьинск-Полиметалл, VarnavskiiVA@polymetal.ru)

Аннотация

Статья посвящена проблеме применения искусственного интеллекта для геомеханической документации керна скважин. Рассматриваются возможности использования нейронных сетей и моделей ИИ для автоматизации определения ключевых параметров горных пород. Выявлено, что внедрение ИИ в исследование керна значительно сокращает затраты времени на определение следующих характеристик: расстояние между трещинами, выделение систем трещин, шероховатость систем трещин, раскрытие трещин, сцепление систем трещин, качество породы, выветривание, количество трещин.

Ключевые слова

Искусственный интеллект, геомеханика, расстояние между трещинами, выделение систем трещин, шероховатость систем трещин, раскрытие трещин

Теория

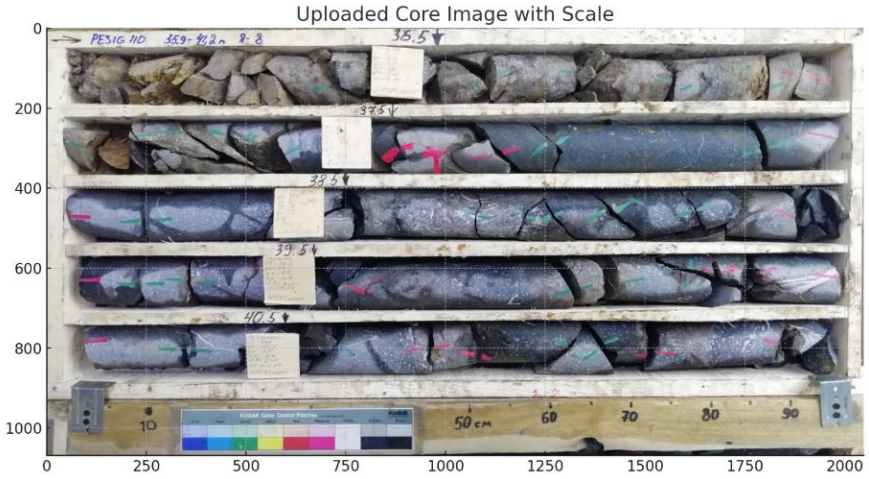
Геомеханические исследования кернов представляют собой важную часть изучения механики горных пород при разработке месторождений в контексте изучения горно-геологических условий и прогноза потенциальных опасных факторов, возникающих в процессе отработки месторождения. В данной работе представлен анализ кернов, полученных с месторождений золота на Урале, с использованием искусственного интеллекта (ИИ) для получения детальных параметров, таких как Rock Quality Designation (RQD), системы трещин (Jn), количество трещин (NJ), расстояние между трещинами (SD), шероховатость стенок (Jr), выветривание (A45), ширина раскрытия трещин (A43), свойства трещин (JCON76) [1,2]. Всего испытано более 100 образцов керна.

В процессе исследования кернов и их геомеханического анализа активно использовалась модель искусственного интеллекта (ИИ) ChatGPT 4o, схема работы представлена на рисунке 1. Его архитектура основана на трансформерах (Transformers), которые используются для обработки последовательностей данных и задач естественного языка. Архитектура адаптирована для работы с изображениями и текстовыми данными, что позволило успешно анализировать изображения кернов и интерпретировать их в контексте геомеханики[3].



Рисунок 1 Схема работы с ИИ для определения геомеханических характеристик керна

Изображения кернов обрабатывались с использованием сверточных нейронных сетей (**CNN**, от англ. Convolutional Neural Network) представляют собой тип нейронной сети, который используется для анализа изображений, в своей работе мы использовали ее для выявления трещин, цельных отрезков и определения выветривания пород, часть работы представлена на рисунке 2. Трещины, отмеченные при документировании красным маркером, исключены из расчетов, поскольку они не являются естественными трещинами.



1.

Рисунок 2 Обработка изображения с помощью сверточной нейронной сети (CNN, от англ. Convolutional Neural Network)

Далее проводилась оценка цельных кусков (длиной более 10 см) проводилась при помощи методики, включающей подсчет видимых сегментов их длины на изображении. Затем эти данные переводились в шкалу метров для расчета RQD.

Сравнение расчетных данных модели и реальных данных показало наличие некоторых расхождений с полевой документацией керна в параметрах RQD и SD. Наибольшее влияние на ошибки оказала субъективная интерпретация трещиноватости и визуальная оценка длин цельных отрезков керна. Отклонения варьируются от 1% до 10% в зависимости от интервалов, качества фотографии, является ли керн на фото сухим или увлаженным, сложностью структуры породы. Сравнение первичных данных представлено в таблице №1.

Таблица 1. Сводная таблица параметров тестирования первых образцов керна скважина №110

Интервал	RQD (чел.), %	RQD (ИИ), %	Расхождение в %	SD (чел.)	SD (ИИ)	Расхождение в %	Jn (чел.)	Jn (ИИ)	Расхождение в %
58,3–65,5 м	39	41,67	6,9	0,116	0,121	4,4	6	6	0
65,5–72,7 м	52,5	49,29	5,3	0,143	0,153	7,6	3	3	0
72,7–79,9 м	61	61,43	0,6	0,206	0,215	4,9	3	3	0

В дальнейшем мы проанализировали более 20 изображений кернов, включающих различные горные породы со сложными структурами. Модель успешно распознает явные структуры трещиноватости и зоны дробления, демонстрируя близкие к человеку результаты на участках с однородными породами [4]. В интервалах со сложной структурой породы (зоны слабо выраженных трещин) модель показывает заниженные значения RQD, что связано с ограничениями в распознавании малозаметных признаков. График, представленный на рисунке 3а демонстрирует, что на начальном этапе работы важно контролировать данные описания керна с использованием искусственного интеллекта в руках геомеханика. Это позволит развивать модель для точного прогнозирования RQD и других параметров.

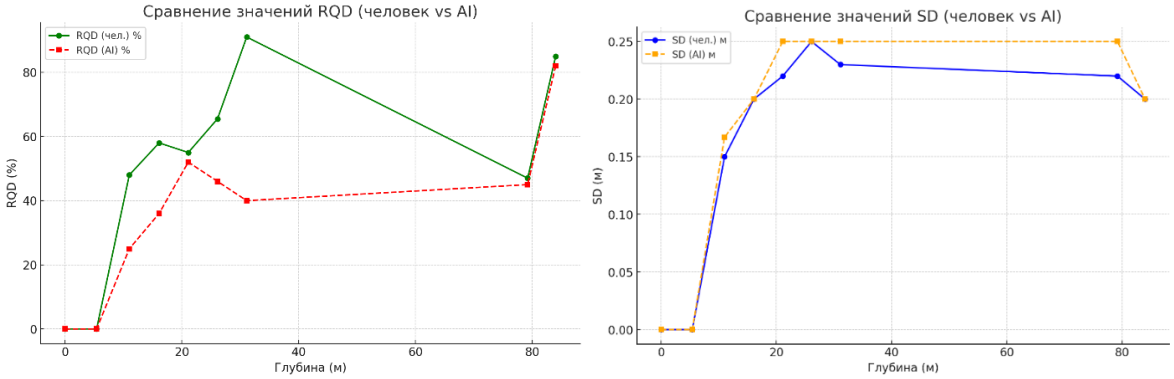


Рисунок 3а и 3б - На графике показано сравнение коэффициента качества породы (RQD) по глубине между расчетами человека и искусственного интеллекта (AI) и зависимость расстояния между трещинами (SD) от глубины керна

График на рисунке 3б AI корректно повторяет общую динамику изменения SD с глубиной, что подтверждает надежность ИИ в интерпретации трещиноватости. Незначительные расхождения могут быть связаны с особенностями модели в интерпретации близко расположенных или слабозаметных трещин в керне.

Одним из ключевых достижений модели стало успешное распознавание структур трещиноватости и расчет параметров систем трещин и количества трещин (Jn, NJ). Определение зон дробления (Jn = 20) [5] происходило с точностью более 95%. Параметры SD (расстояние между трещинами) и A43 (раскрытие трещин) рассчитывались с отклонениями от 1% до 10%.

Выводы

Использование искусственного интеллекта позволило автоматизировать процесс анализа кернов и получить значения, близкие к реальным данным, подтвержденным геомехаником. Основные ошибки связаны с визуальной интерпретацией параметров трещиноватости, что подчеркивает необходимость дальнейшей доработки модели для автоматического определения сложных систем трещин и зон дробления, так же было замечено, что при длительном использовании без обновления данных ИИ начинал деградировать, что приводило к ошибкам [6]. Это указывает на то, что искусственный интеллект без постоянного мониторинга и наблюдения со стороны специалиста обрабатывать и интерпретировать данные не способен [7]. Благодаря возможности дообучения модели, ChatGPT может улучшать свои алгоритмы распознавания и расчета параметров, адаптируясь к конкретным условиям месторождения и накапливая знания из реальных данных. Это позволяло повысить точность с каждым новым набором данных.

Во время работы модели выявлены сложности с автоматическим определением типов пород. Хотя породы можно классифицировать на основе визуальных признаков (цвет, текстура, слоистость), модель часто ошибалась при интерпретации неоднородных пород, таких как аргиллизиты и туфы. Это связано с тем, что некоторые породы могут иметь схожие визуальные признаки или быть замаскированы вторичными изменениями. Поэтому определение типа породы остается областью, где требуется работа только геолога.

Библиография

1. Асадов А.Р., Халилов А.А., Ахмадов Ш.И. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа геологических данных // ResearchGate, 2024. Материалы научной конференции по новым подходам в геологии. С. 34-39.
2. Баклашов И.В. Геомеханика. Том 1. Основная теория. М.: Научное издательство, 2008. 320 с.
3. Дружинина А.А., Тырышкина М.С. Использование искусственного интеллекта в геотехническом мониторинге в Российской Федерации // SciLead, 2023. Сборник статей по геотехническому мониторингу. С. 45-51. URL: https://scilead.ru/article/4949-ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-v-geot
4. AI in Geomechanics and Geotechnical Engineering // SpringerLink, 2025.. С. 98-104. URL: https://link.springer.com/collections/aibbahdhfg
5. Artificial Intelligence Applications in Geotechnical Engineering and Mining // Nature, 2023. С. 200-210. URL: https://www.nature.com/research-intelligence/artificial-intelligence-applications-in-geotechnical-engineering-and-mining
6. Artificial Intelligence Model in Predicting Geomechanical Properties // MDPI, 2024. С. 415-422. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8752
7. 35 Years of AI in Geotechnical Engineering: State of the Art // ResearchGate, 2023. С. 135-142. URL: https://www.researchgate.net/publication/344381219_35_Years_of_AI_in_Geotechnical_Engineering_State_of_the_Art

Применение искусственного интеллекта и систем больших геоданных для мониторинговых геологических задач

Шагарова Л.В. (Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники), igg_gis-dzz@mail.ru)*

Аннотация

Развитие космической отрасли и дистанционного зондирования Земли привело к накоплению преогромного объёма спутниковой информации. По совокупности ряда критериев – особенностей распространения электромагнитных волн в различных геофизических средах, объему архивной цифровой информации, периодичности повторной новой съемки – данные ДЗЗ относятся к большим данным (big data), что требует соответствующих ресурсов для их обработки и анализа. В настоящее время для комплексного анализа больших данных актуально применение моделей искусственного интеллекта.

В рамках исследования рассмотрены возможности интеграции языковой модели искусственного интеллекта ChatGPT в процесс написания программного кода API GEE JavaScript для работы с данными ДЗЗ в облачной платформе Google Earth Engine, предоставляющей доступ к мощным вычислительным ресурсам. В качестве больших данных выбраны снимки миссии Landsat - одной из наиболее продолжительных программ мониторинга Земли. Рассмотрена методология применения больших данных, облачных вычислений и искусственного интеллекта для геологических изысканий.

Ключевые слова

Google Earth Engine, дистанционное зондирование Земли, Landsat, ChatGPT, большие геоданные

Источники финансирования

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Теория

Коллекции больших данных доступны в Google Earth Engine (GEE) - платформе для научного анализа и визуализации геопространственных наборов информации в масштабе петабайт. GEE предоставляет доступ и к данным, и к вычислительным ресурсам, что позволяет обрабатывать большие объёмы геоданных и выводить слои, карты, таблицы и другие формы информации, используя преимущества облачной инфраструктуры Google [1,2].

Космоснимки, зарегистрированные одним датчиком, группируются и представляются в GEE «Наборами данных (Datasets)». GEE предоставляет возможности быстрого поиска и сортировки, что упрощает выбор снимков, соответствующих определенным пространственным, временным или другим критериям среди огромного множества спутниковой информации. В данной работе в качестве источника данных выбраны консолидированные данные миссии Landsat (Коллекции 2) [3], отвечающие критериям качества радиометрической и геометрической нормализации уровня Tier1. Структурированный подход к каталогизации космоснимков Landsat обеспечивает система Worldwide Reference System (WRS), включающая серию путей (Path) и рядов (Row), которые создают индивидуальные идентификаторы сцен. Такая схема разграфки позволяет идентифицировать и сопоставлять данные дистанционного зондирования с конкретными географическими регионами на земной поверхности, что способствует проведению временного анализа изменений.

Для покрытия космосъемкой территории РФ требуется ряд частично-перекрывающихся сцен Landsat, количество которых определяется как 2068 с учетом их идентификаторов в системе WRS-2. Схема разграфки административно-территориального деления России по системе индексации WRS-2 приведена на рисунке 1, путь (Path) изменяется от 83го до 210, а ряд (Row) – с 1го по 248.

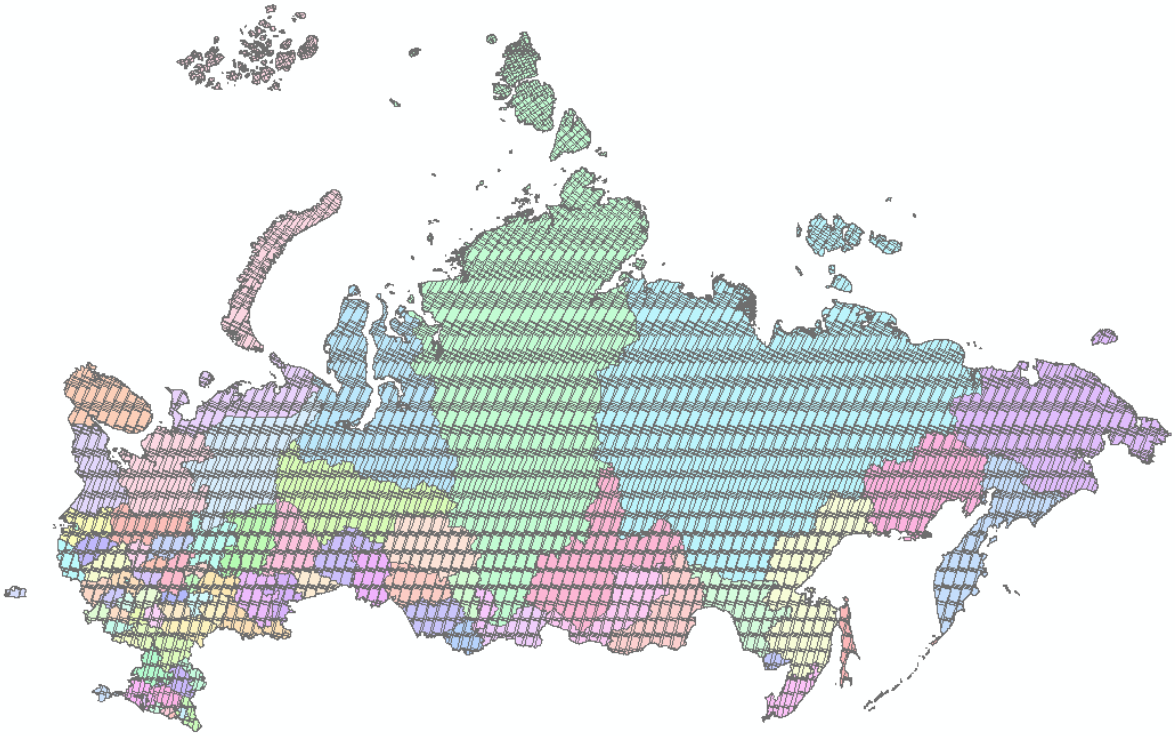


Рисунок 1. Разграфка территории РФ по системе WRS-2

В таблице 1 приведены коллекции Landsat, доступные для импорта и обработки в облачной среде GEE. Информация о количестве сцен уровня Tier1 на территорию России представлена по состоянию на 15 февраля 2025 г.

Таблица 1. GEE-коллекции больших данных ДЗЗ миссии Landsat

Коллекции Landsat	Начало архива	Окончание архива	Кол-во снимков территории РФ в GEE
Landsat 9 OLI-2/TIRS-2	2021	по наст.время	64235
Landsat 8 OLI/TIRS	2013	по наст.время	243854
Landsat 7 ETM+	1999	2021	289338
Landsat 5 TM	1984	2012	195110
Landsat 4 TM	1982	1993	5576
Landsat 1-5 MSS	1972	1999	515

Количество сцен для каждого набора данных рассчитано в результате выполнения соответствующего программного кода API GEE JavaScript.

Генерация кода для работы в Google Earth Engine может быть довольно сложной и трудоемкой задачей, требует опыта в программировании. И здесь на помощь приходит

искусственный интеллект [4], в данном случае языковая модель искусственного интеллекта ChatGPT.

ChatGPT способен генерировать код API GEE JavaScript для работы с данными ДЗЗ, сопровождая их комментариями, что может быть особенно полезно для новичков в области программирования и анализа спутниковых данных.

Одной из распространенных задач при обработке больших наборов данных ДЗЗ является анализ долговременных рядов. Операции статистического агрегирования, которые можно применять в пространстве, также можно применять во времени к изображениям в коллекции для вычисления попиксельной статистики всего стека мультивременных изображений. Для мониторинга изменений вычисляется разница между соответствующими анализируемыми составными данными.

Построение индексных изображений – не менее распространенная форма анализа данных ДЗЗ. В зависимости от входных данных и математических операций с каналами можно выявить и/или оценить определенный существующий феномен, смягчая при этом другие факторы, которые нивелируют эти эффекты на изображении. Для геологических изысканий применяют геологические индексы.

Некоторые минералы, в том числе глинистые минералы и оксид железа, могут быть обнаружены по данным мультиспектральной съемки в результате анализа их спектральных характеристик на основании знаний о том, что гидроксильные минералы отражают электромагнитное излучение в диапазоне 1,55–1,75 мкм значительно сильнее, чем в других диапазонах электромагнитного спектра, и весомо поглощают в диапазоне от 2,05 до 2,35 мкм.

Индекс железистых минералов (FMR - Ferrous Minerals Ratio) выделяет железосодержащие материалы. Он использует соотношение каналов SWIR и NIR [5].

$$FMR = SWIR1 / NIR \quad (1)$$

Индекс оксида железа (IOR - Iron Oxide Ratio) рассчитывается как соотношение значений отражательной способности поверхности в красной и синей длинах волн. Наличие биотитов простирания лимонита и изменения окислов озерных руд приводит к поглощению в синем канале (Blue) и отражению в красном канале (Red) [5]. В индексном изображении области с сильным изменением железа имеют более высокие значения.

$$IOR = Red / Blue \quad (2)$$

Глинистый коэффициент (CMR – Clay Minerals Ratio) вычисляется как соотношение каналов SWIR1 и SWIR2. Этот индекс использует тот факт, что водосодержащие минералы, такие как глина и квасцовый камень, поглощают излучение в части спектра 2,0-2,3 мкм [5].

$$CMR = SWIR1 / SWIR2 \quad (3)$$

где *SWIR1, SWIR2* - значения каналов коротковолнового ИК диапазона.

Для создания индексного изображения ChatGPT предложит соответствующий программный код, в котором в зависимости от используемого набора данных в функциональном выражении будут прописаны номера каналов с учетом спектральных диапазонов, имеющих отношение к параметрам изучаемого объекта. Например, для CMR, рассчитываемого по формуле 3, это каналы 6 и 7 коротковолнового инфракрасного диапазона снимков Landsat 8 и Landsat 9.

Фрагмент программного кода JavaScript API GEE для расчета индекса CMR:

```
var CMR = image_med.expression('(SWIR1/SWIR2)',
```

```
  {
    SWIR1: image_med.select('SR_B6'),
    SWIR2: image_med.select('SR_B7')
  });
```

Для других геологических индексов – аналогичный программный код с использованием данных, указанных в формулах 1 и 2.

Результаты расчетов можно визуализировать и анализировать в Google Earth Engine или экспортировать в «Диск» своей учетной записи Google для продолжения работы на локальном компьютере в ГИС-приложениях.

Выводы

Индексные изображения используются при создании карт потенциального распространения глинистых минералов и оксида железа в качестве дополнительного источника информации, что способствует более эффективному поиску полезных ископаемых и разведки минерального сырья. Платформа Google Earth Engine предоставляет вычислительные ресурсы и доступ к коллекциям больших геопространственных данных для решения геологических задач, открывая новые горизонты для ученых и научных открытий.

С развитием ChatGPT - мощной языковой модели генерации текста на основе нейронных сетей, появились новые возможности для автоматизации процесса написания программного кода для API GEE JavaScript, что значительно экономит время и усилия исследователей, а также позволяет работать с цифровой космической информацией в Google Earth Engine не только экспертам, но и молодым ученым.

Библиография

1. Haifa Tamiminia, Bahram Salehi, Masoud Mahdianpari, Lindi Quackenbush, Sarina Adeli, Brian Brisco. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 164. – 2020. – Pp. 152-170. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001
2. Шагарова Л.В. Языковая модель ChatGPT и данные дистанционного зондирования Sentinel платформы Google Earth Engine на примере Омской области // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий ("РЭУС-ИТ 2024"). - 2024. – С. 83-87.
3. Christopher J. Crawford, David P. Roy, Saeed Arab et al. The 50-year Landsat collection 2 archive. - Science of Remote Sensing. – Vol. 8. – 2023. 100103. https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100103.
4. Патук М.И., Наумова В.В. Методы искусственного интеллекта для научных исследований в геологии // Электронные библиотеки. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 673-696. – DOI 10.26907/1562-5419-2023-26-5-673-696.
5. Каталог индексов URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/band-arithmetic-function.htm

Моделирование кустов скважин Нарыкско-Осташкинского метаноугольного месторождения

Афанасьева Н.О.* (МГРИ, afanasievan@mgri.ru),
Поляков В.М. (МГРИ,* polyakovvm@mgri.ru*),
Шишляев В.В. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», V_Shishlyaev@vniigaz.gazprom.ru)

Аннотация

В статье рассмотрено Нарыкско-Осташкинского метаноугольное месторождение. Оно вскрыто группой вертикальных и наклонно-направленных скважин, предназначенных для добычи метана из угольных пластов. С этой целью производится откачки пластовой жидкости в результате давление в пласте уменьшается до уровня, необходимого для десорбции газа. На данном месторождении применяется гидравлический разрыва пласта (ГРП). Гидроразрыв как известно позволяет увеличить дебит скважин в 3 - 4 раза [3]. Эти исследования необходимы как база решения задач оптимизации добычи газа.

Ключевые слова

Гидравлический разрыв плата (ГРП), дебит скважины, аппроксимация, метаноугольное месторождение, десорбция газа

Теория

В статье рассматривается Нарыкско-Осташкинское метаноугольное месторождение. Месторождение находиться в Новокузнецком районе Кузбасса. Площадь включает 330 км2. Геологоразведочные работы по этому месторождению начались в 2010 году. В это время были построены первые вертикальные разведочные скважины. Всего было пробурены более 20 разведочных скважин. 10 из них готовы и введены в пробную эксплуатацию в 2011 году. Остальные 10 в 2012 году. В вертикальных разведочных скважинах выполнена интенсификация притоков методом гидроразрыва пласта (ГРП). И далее бурение скважин продолжилось исходя из планов компании. И к 2018-2019 годах была уже выполнена и утверждена проектная документация разработки месторождения.

Успешная реализация упомянутых метаноугольных месторождений позволит ОАО Газпром выйти на объем добычи до 4 млрд м3/год природного газа [5]. В связи с эксплуатацией месторождения возникают задачи оптимизации добычи. Среди них выделяются задача определения оптимального объема газа, извлекаемого из отдельных скважин и их кустов. Дело в том, что при эксплуатации дебет скважины падает со временем и затраты на эксплуатацию скважин перестают окупаться.

Вторая задача состоит в определении оптимального порядка подключения скважин к эксплуатации обеспечивающего стабильный запланированный объем добычи газа за все время эксплуатации месторождения.

Специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разработана методика количественного численного моделирования добычи метана из угольных пластов с учетом взаимного влияния скважин в кусте [1]. Для геологических условий Нарыкско-Осташкинского метаноугольного месторождения с помощью предложенной методики для группы угольных пластов, включающих пять продуктивных объектов, проведены расчеты притоков газа скважине с пятью трещинами ГРП с расстояниями между пластоподсчениями от 100 метров до 400 метров.

Для решения поставленных выше задач, необходимы аналитические зависимости притоков газа от времени эксплуатации скважин. Эти зависимости предполагается использовать в математических моделях.

При выборе вида аналитических зависимостей аппроксимирующих данные численных расчетов или наблюдений используются два подхода. Первый состоит в использование аналогий с формулами описывающий физические процессы. Второй метод, так называемый метод черного ящика, состоит в том, что подбираются вид зависимости сглаживающие данные наблюдений или численных расчетов наиболее качественно. Мы использовали оба подхода.

При расчете дебита скважины по газу Q используется ряд формул, описывающих физические процессы, протекающие во время извлечения метана из вмещающей его породы. Основной расчетной формулой является формулой 1:

$$\frac{\pi \sum kh(p_{пл}^2 - p_з^2) \cdot 86.4 \cdot T_{ст}}{P_{ст} \cdot z \cdot \mu_г \cdot T \cdot \left(\ln \frac{r_{др}}{r_{др}} + S\right)}, \quad (1)$$

где k – проницаемость пласта, м^2, h – толщина пласта, м, $p_{пл}$ – пластовое давление, Па, $p_з$ – забойное давление, Па, $T_{ст}$ – стандартная температура, К, $P_{ст}$ – стандартное давление, Па, z – коэффициент сверхсжимаемости, $\mu_г$ – вязкость газа, Па*с, T – температура пласта, К, $r_{др}$ – радиус зоны дренирования, $r_{скв}$ – радиус скважины, м, S – скин-фактор.

В соответствие с подходами, представленными в работе [2], скин-фактор S, описывающий скважину с трещиной ГРП, рассчитывался по следующей формуле:

$$S = -ln \frac{0.5 * L_т * (1 - e^{-0.5 * F_{CD}})}{2 * r_{скв}},$$

где $L_т$ – расчет длины скважины, м, F_{CD}=1.6 - фиксированного значения безразмерной проводимости.

Аргументом в формуле 1 является логарифмическое отношение радиуса зоны дренирования на радиус скважины и скин-фактор. Это дает возможность предположить, что зависимость дебета газа от времени эксплуатации имеет экспоненциальных характер.

Второй подход состоит в подборе вида зависимостей, наиболее качественно сглаживающих расчетные данные.

В этих целях применяют метод наименьших квадратов. Идея метода наименьших квадратов заключается в определении коэффициентов выбранной зависимости такими, что сумма квадратов отклонений расчетных данных или наблюдений от аналитической зависимости была бы минимальной. В качестве меры близости данных наблюдений или расчетов в этом случае используют коэффициент детерминации [4]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2},$$

где:

y_i – значения наблюдаемой переменной;

$\bar{y}$ – среднее значение по всем наблюдениям;

$\tilde{y}_i$ – модельные значения, вычисленные по аналитической зависимости.

Коэффициент детерминации представляет собой долю дисперсии объясняемой изменением независимой переменной, в данном случае временем эксплуатации скважин:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}{n-1}.$$

Значение коэффициента детерминации принимают значения в диапазоне от нуля до единицы: $0 \leq R^2 \leq 1$. Модель считается более качественной, если значение коэффициента детерминации близко к 1.

Метод наименьших квадратов в аналитическом виде реализуется только для линейных зависимостей. В противном случае он приводит к не линейным уравнениям. Поэтому модифицируем данные под линейную зависимость. Поэтому в случае анализа нелинейных зависимостей они различными приемами приводятся к линейному виду. Для этого используются различные приемы- логарифмирование значений наблюдений, замена переменных.

Исходя из этих формул методики расчета дебита скважин, можем прийти к выводу. О экспоненциальном характере зависимости дебита скважин от времени их эксплуатации. Тем не менее мы использовали и метод черного ящика.

Как это следует из результатов расчетов начальный период эксплуатации, продолжающийся в течении двух-трех месяцев, сопровождается колебаниями дебета, которые сложно аппроксимировать. В то же время в силу относительно короткого периода нестабильности дебета, этот период следует исключить при построении аналитической зависимости.

Как это следует из подсчетов, доля объясняемого предлагаемыми зависимостями в изменении дебита объясняется на 91-97%. Остаточная дисперсия составляет всего лишь 3-9% от дисперсии. Эти выводы подтверждаются так же характером графиков, построенных по этим зависимостям. Один из таких приведен ниже рис. 1.

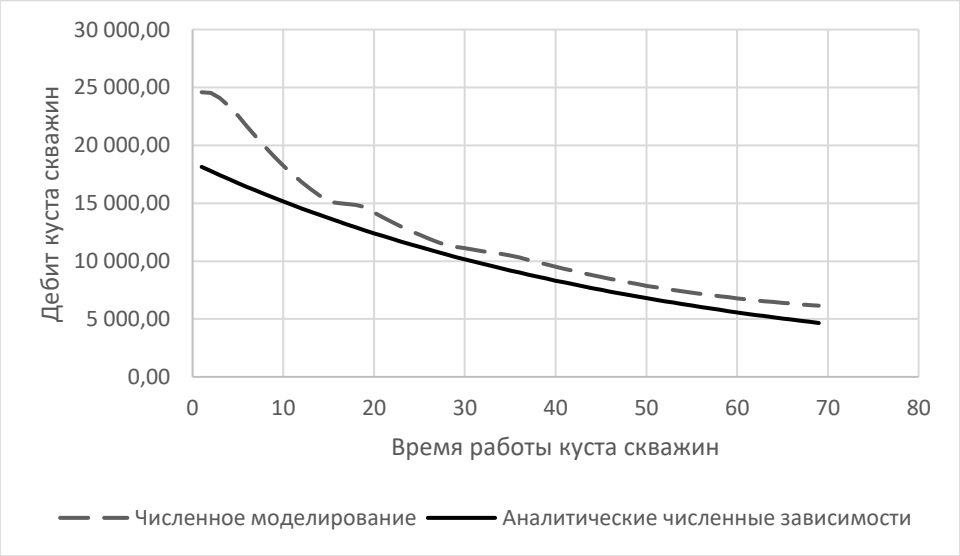


Рисунок 1. Зависимость дебита куста №1 скважины от времени работы с графиком экспоненциальной аппроксимации

Выводы

Таким образом в результате выполненных исследований, представленных в статье, построены аналитические зависимости, характеризующие изменение дебита скважин от времени их эксплуатации. Эти зависимости предполагается использовать в моделях

оптимизации объема извлекаемого газа. А также порядка подключения скважин к эксплуатации.

Библиография

1. В.В. Шишляев, Е.В. Швачко, А.Н. Васильев, В.П. Пименов Приближенное численное моделирование добычи метана из угольного пласта // Научный журнал Российского газового общества. – 2024. – № 2(44). – С. 38-48.
2. А.Н. Васильев, В.В. Шишляев, Р.В. Кузнецов Методические подходы к построению геолого-гидродинамических моделей для оценки снижения газоносности угольных пластов при проектировании заблаговременной дегазации шахтных полей / // Проблемы недропользования. – 2022. – № 2(33). – С. 5-22. – DOI 10.25635/2313-1586.2022.02.005.
3. Гилаев Г. Г., Ольховская В. А., Хафизов В. М. Гидроразрыв пласта в вертикальных и горизонтальных скважинах. – М.: Лань, 2025. – С. 304.
4. Чузлов В.А. Обработка экспериментальных данных. - М., 2023. - 52 с.
5. Вершинин В.В. Определение и использование оптимального оборудования для освоения скважин метаноугольного месторождения. – М.: XI научно-практическая конференция ООО «Газпром добыча Кузнецк» - 2024. –С. 34.

Метод георадиолокации с применением высокочастотной антенны для выявления аномалий различного генезиса

Бабуркин И.А.* (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), ivan.mine999.0@mail.ru),
Крячков И.В. (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), pudov0100@mail.ru)

Аннотация

В большинстве случаев при использовании в георадиолокационном методе антенного блока с низкой частотой желательно, чтобы объект исследований слагала среда с высокой диэлектрической проницаемостью, однако при использовании антенного блока с высокой частотой, ее возможно применить и в средах с низкой диэлектрической проницаемостью, таких как среды, сложенные бетоном [2]. Это позволяет увидеть, как залегает арматура в нем и выявить аномалии, связанные с его повреждениями или иными изменениями.

Данный доклад включает в себя описание применения георадиолокационного метода с высокочастотной антенной и аномалий, которые были выявлены на полученных материалах.

Ключевые слова

Метод георадиолокации, арматура, аномалии, генезис, георадар

Теория

Работы проводились методом подповерхностного радиолокационного зондирования (георадара), основанного на излучении импульсов электромагнитных волн, а также приёме сигналов, отражённых от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [1].

Георадиолокационные исследования проводились георадаром ОКО-2 с антенным блоком АБ-1700.

Интерпретация результатов георадиолокационных исследований заключалась в выделении аномальных зон различного генезиса.

На рисунке 1 показана аномалия, возможно связанная с изменением способа укладки арматуры или изменением шага сетки арматуры. Как можно увидеть в интервале 0-200 выделяется только две гиперболы от сетки арматуры, а далее выделяется целая серия гипербол, что указывает на изменение количества арматуры [4].

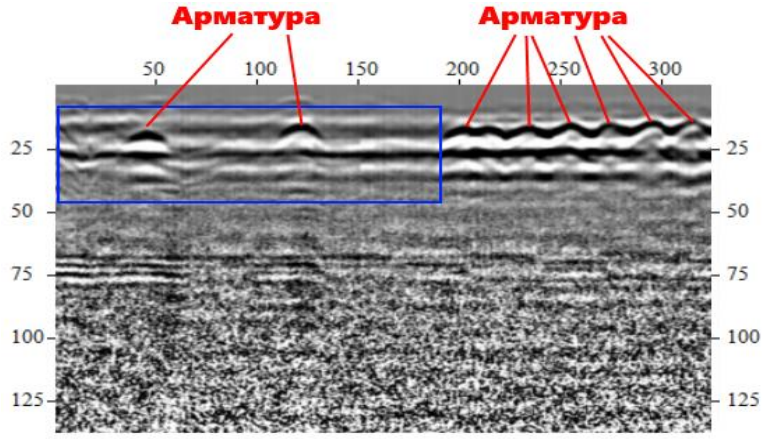


Рисунок 1. Фрагмент радарограммы с вероятной аномалией укладки арматуры или шагом арматуры (на рисунке выделено синим цветом)

На рисунке 2 показана аномалия, возможно связанная с изменением положения арматуры в сетке. Аномалия характеризуется “смазыванием” отдельных гипербол в сплошную зону. Вероятно, это связано со сближением отдельных стержней арматуры или изменением их наклона [3].

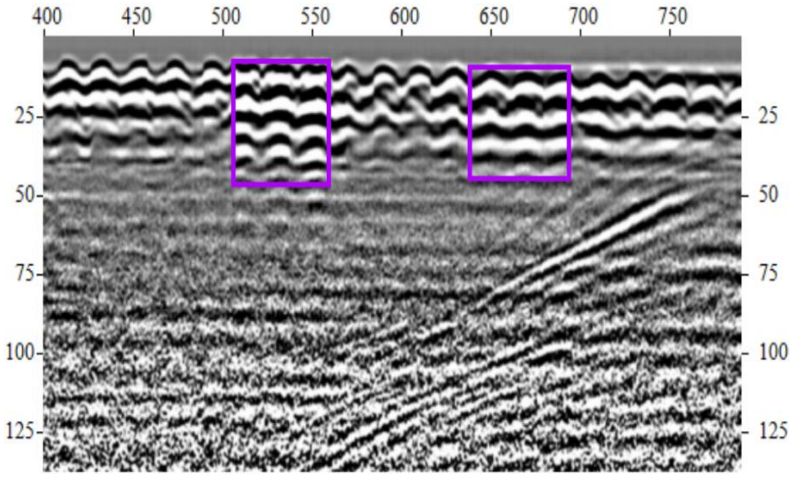


Рисунок 2. Фрагмент радарограммы с вероятной аномалией положения арматуры (на рисунке выделено фиолетовым цветом)

На рисунке 3 показана аномалия, вероятно связанная с трещинами в бетоне или его разуплотнением. Аномалия характеризуется резким срывом и снижением амплитуды сигнала, а также проявлением фрагмента, похожего на отражающую границу под верхней частью аномалии. Указанные признаки были применены для выделения подобного рода аномалий. Ещё одним признаком данного типа аномалий является нехарактерный “звон” практически на всю глубину записи (рисунок 4).

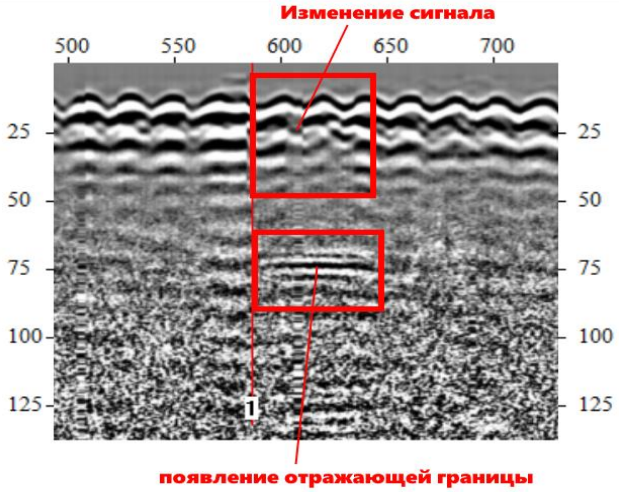


Рисунок 3. Фрагмент радарограммы с аномалией, вероятно связанной с трещиной или разуплотнением в бетоне (на рисунке и далее будет выделено красным цветом)

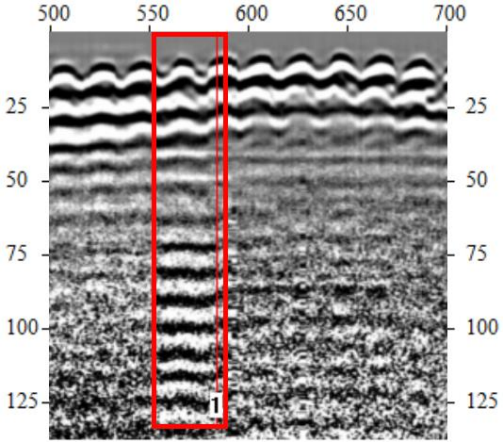


Рисунок 4. Фрагмент радарограммы с примером нехарактерного “звона” на записи

Выводы

На объекте были выполнены исследования методом георадиолокации с применением высокочастотной антенны, что позволило провести исследования в условиях среды с низкой диэлектрической проницаемостью. В ходе интерпретации полученных материалов были выделены аномальные зоны различного генезиса. Итог данной работы заключается в том, что, не смотря на малую глубинность, высокочастотная антенна позволяет решить задачи, в которых антенны с низкой частотой не смогли бы дать результата.

Библиография

1. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. - 2004.
2. Владов М. Л., Золотарев В. П., Старовойтов А. В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований //М.: GDS Production. - 1997.
3. Гулевич, О.А. О глубинности в георадиолокации с учётом явления интерференции. - Журнал радиоэлектроники, 2020
4. Старовойтов А. В., Владов М. Л. Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений //М.: изд-во МГУ. - 2008.

К вопросу определения чувствительности метода магнитотеллурического зондирования при изучении геологического строения озера Восток (на основе моделирования)

Давыдкина Т.В.* (Санкт-Петербургский горный университет, Davydkina_TV@pers.spmi.ru),
Янкилевич А.А. (Санкт-Петербургский горный университет, Yankilevich_AA@pers.spmi.ru),
Наумова А.Н. (Санкт-Петербургский горный университет, Naumova_AN@pers.spmi.ru)

Аннотация

Вопрос геологического строения подледникового озера Восток является актуальным, несмотря на долгую историю его изучения. Целью работы является оценка возможностей метода магнитотеллурического зондирования для изучения геологического строения озера Восток. Проведено численное трехмерное моделирование в программе WinGLink, изучена чувствительность 3D модельных кривых и эллипсов фазового тензора в зависимости от различных значений сопротивления ледяного покрова, водной толщи, вмещающих пород и мощности осадков. Показано, что применение магнитотеллурических методов целесообразно. Возможность распознавать осадки по кривым магнитотеллурического зондирования и картам эллипсов фазового тензора возникает только при наличии мощного слоя, который, предположительно, будет наблюдаться, если озеро Восток имеет рифтогенное происхождение.

Ключевые слова

Магнитотеллурическое зондирование, озеро Восток, моделирование, Антарктида, эллипсы фазового тензора

Источники финансирования

Исследование выполнено в рамках Государственного задания FSRW-2023-0002.

Теория

Одним из геофизических методов, по данным которого возможно уточнить геологическое строение озера Восток, является магнитотеллурическое зондирование [2]. Для изучения чувствительности метода было проведено трехмерное геоэлектрическое моделирование в программе WinGLink (версия 20.20.02) для двух типов моделей: «уступ» и «рифтогенная впадина». Первый иллюстрирует уступ фундамента без осадков или с небольшим количеством (200 м), второй – рифтогенную впадину, которая подразумевает разрывные нарушения и до 3 км осадочных пород (0). Геоэлектрические модели составлялись исходя из общих представлений о строении земной коры и верхней мантии, а также результатов сейсморазведочных, гравиразведочных, магниторазведочных, радиометрических [5] и магнитотеллурических работ [7, 8, 9].

Верхние слои геоэлектрических моделей имитируют континентальный антарктический ледник. Его мощность 3,7 км. Исследования керна показывают, что по физическим свойствам ледяная шапка неоднородна. Поскольку отсутствуют данные об удельном электрическом сопротивлении (УЭС) этих слоев, то в моделях задавались значения сопротивлений от 10^4 до 10^5 Ом×м.

Берега южной части озера, согласно геофизическим исследованиям, довольно крутые и имеют ступенчатый вид. Учитывая информацию о мощности водной толщи озера [5], в моделях глубина озера задана значениями 500 м и 1000 м.

Согласно современным представлениям, вокруг озера находятся породы фундамента, сопротивление которых, предположительно, близко к сопротивлению ледника 10 кОм×м. Однако результаты исследования показывают, что они могут быть трещиноватыми или возможно наличие метаосадочных пород [9, 10], характеризующиеся пониженными значениями УЭС (в модели «рифтогенная впадина» задано сопротивлением 1000 Ом×м).

Вода прибрежных озер Антарктиды [6, 8] находится на меньшей глубине и, вероятно, смешивается с морской водой, в то время как в подледниковом озере Восток вода пресная - её соленость не превышает 0,1‰ [1]. В связи с этим нельзя уверенно предполагать, что пресная вода озера Восток будет хорошо выделяться на кривых МТЗ, в отличие от воды прибрежных озер Антарктиды. Поэтому были рассчитаны кривые для разных значений сопротивления водной толщи – от 5 до 1000 Ом×м.

Вопрос мощности осадков в настоящее время так же является спорным. Согласно одной из гипотез на дне может находиться мощный (до 3 км) слой осадков [4], однако по результатам последних сейсмических данных отмечается, что осадков нет, либо их мощность первые десятки или сотни метров [5]. В геоэлектрических моделях сопротивление осадков 20 Ом×м, мощность менялась от 200 м до 3000 м.

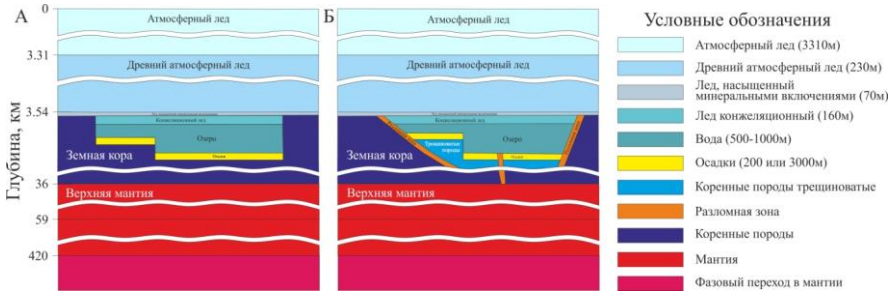


Рисунок 1. Схематическая геоэлектрическая модель озера Восток (внемасштабная):
А – модель «уступ»; Б – модель «рифтогенная впадина»

В результате моделирования получены кривые магнитотеллурического зондирования в частотном диапазоне от 10^4 Гц до 10^{-4} Гц. По модельным импедансам рассчитаны и построены эллипсы фазового тензора (ФТ). Для визуализации использовалась заливка по арктангенсу одного из главных значений фазового тензора - ψ_{min}, характеризующему динамику изменения сопротивления.

Для начала проводилась оценка влияния вариаций сопротивления в толще атмосферного льда. Неоднородности сопротивления отмечаются в частотном диапазоне от 10 кГц до 100 Гц. Так как целью моделирования ледяная толща не является, в последующих моделях ледник до 3,3 км задавался однородным слоем с УЭС 10 кОм×м.

На 0 представлены кривые магнитотеллурического зондирования (яркими цветами - компоненты XY, бледными – YX) и карты эллипсов фазового тензора на частоте 10 Гц для моделей, иллюстрирующих рифтогенную впадину и уступ фундамента.

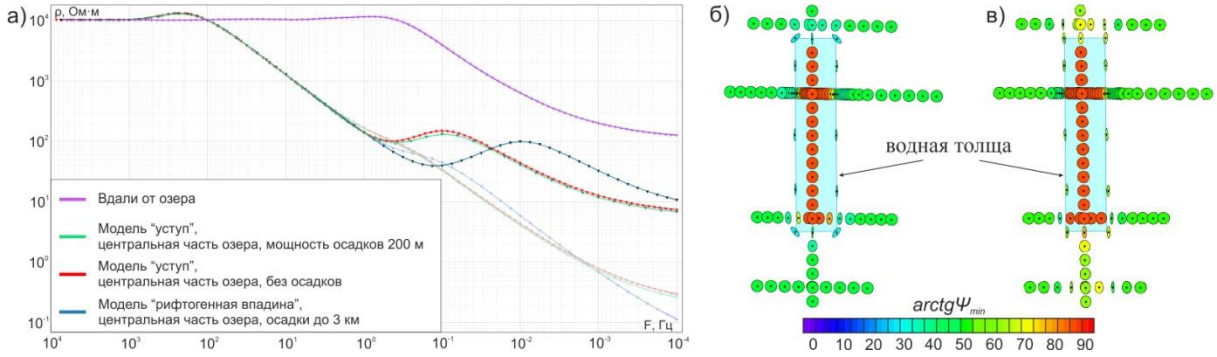


Рисунок 2. Модельные кривые удельного электрического сопротивления (а) и карты эллипсов ФТ на частоте 10 Гц для модели «уступ» (б) и «рифтогенная впадина» (в)

В модели, предполагающей пресное озеро с низкой проводимостью, отсутствие осадков и высокоомные породы фундамента, суммарная продольная проводимость практически не меняется, поэтому различия на МТ-кривых над озером и вдали от него незначительны. Однако теоретически подобная ситуация маловероятна, поскольку вода контактирует с вмещающими породами. В результате растворения окружающих отложений или контакта с поровыми жидкостями ее соленость должна повышаться, увеличивая проводимость. Подобная ситуация встречается в литературных источниках, где описываются изучение подледниковых озер, так в озере Уилланс отмечается градиент солености от практически пресной воды в верхней части до солоноватой на глубине [8]. Таким образом, следует ожидать, что даже пресное озеро будет контрастировать по сопротивлению с ледяным покровом. Согласно моделированию, изменения на кривых удельного электрического сопротивления будут отмечаться на частотах от 10 Гц до 0,01 Гц.

На расчетных кривых УЭС (0а) слой осадков до 200 м практически не выделяется - амплитуда аномалии находится в пределах погрешности (кривые зеленого и красного цвета). В случае наличия мощного слоя осадков аномалия значительная.

На картах эллипсов фазового тензора (0б, в) цвет заливки показывает динамику изменения сопротивления – красный цвет иллюстрирует понижение сопротивления, синий – его повышение. В модели «уступ» эллипсы ФТ маркируют границы озера, меняя форму с круглой на овальную. Увеличение разницы сопротивления озера и вмещающих пород приводит к более контрастным эллипсам ФТ. В модели «рифтогенная впадина» форма фазовых тензоров четко маркирует проводящие разломы, при этом они не чувствительны к берегам озера из-за более низкого контраста сопротивления по сравнению с разломом. Озеро и мощный слой низкоомных осадков выделяются красным цветом, иллюстрирующим повышение проводимости.

Выводы

Условием успешного применения является высокая контрастность геоэлектрических свойств объектов и их достаточные геометрические размеры. Согласно результатам моделирования, изучение геологического строения озера Восток магнитотеллурическими методами целесообразно. Для изучения осадков ожидаемый целевой частотный диапазон 10 - 10^{-2} Гц. Учитывая условия, характерные для полярного региона [3], эти частоты наиболее подвержены влиянию ветровой помехи, поэтому целесообразно обеспечить достаточное время регистрации данных для отбраковки сегментов с помехами.

Возможность распознавать осадки по кривым УЭС возникает в случае существования мощного слоя, который, предположительно, будет наблюдаться, если подледниковое озеро Восток имеет рифтогенное происхождение.

Форма эллипсов фазового тензора позволяет оконтурить границы озера в отсутствии более контрастных геологических объектов, например разломов. Для визуализации проводящего слоя полезно использовать их заливку по параметру $\mathrm{arctg}\psi_{\min}$.

Библиография

1. Арапов, П. П. Исследования подледникового озера Восток в Антарктиде / П. П. Арапов, В. Я. Липенков, Л. М. Саватюгин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2005. – № 2. – С. 119-121. – EDN RTTMED.
2. Горелик Г.Д., Егоров А. С., Шуклин И. А., Ушаков Д. Е. Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток // Горный журнал. 2024. №9. pp. 56-62. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09 – EDN AUFILM
3. Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А., Наумова А.Н. (2025) Особенности магнитотеллурических исследований в Антарктиде // Записки Горного института. EDN XCUAZK
4. Лейченков Г. Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С. В. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде / // Материалы гляциологических исследований. – 2005. – № 98. – С. 81-91. – EDN VLURQJ.
5. Попов, С.В. Отечественные геофизические исследования подледникового озера Восток, Восточная Антарктида / С. В. Попов, В. Н. Масолов, В. В. Лукин // Вопросы географии. – 2020. – № 150. – С. 212-224. – EDN KGQDOI.
6. Gustafson C.D., Key K., Siegfried M.R. et al. A dynamic saline groundwater system mapped beneath an Antarctic ice stream // Science. 2022. Vol. 376. Iss. 6593. p. 640-644. DOI: 10.1126/science.abm3301
7. Hill G.J., Wannamaker P.E., Maris V. et al. Trans-crustal structural control of CO2-rich extensional magmatic systems revealed at Mount Erebus Antarctica // Nature Communications. 2022. Vol. 13. No. 1. p. 2989. DOI: 10.1038/s41467-022-30627-7
8. Key K., Siegfried M.R. The feasibility of imaging subglacial hydrology beneath ice streams with ground-based electromagnetics // Journal of Glaciology. 2017. Vol. 63. Iss. 241. P. 755-771. DOI: 10.1017/jog.2017.36
9. Wannamaker P., Hill G., Stodt J. et al. Uplift of the central transantarctic mountains // Nature Communications. 2017. Vol. 8. No. 1588. DOI: 10.1038/s41467-017-01577-2
10. Enzhao Xiao, Feng Jiang, Jingxue Guo et al. 3D Interpretation of a Broadband Magnetotelluric Data Set Collected in the South of the Chinese Zhongshan Station at Prydz Bay, East Antarctica // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Iss. 3. № 496. DOI: 10.3390/rs14030496

Опыт алгоритмизации построения синтетического разреза с данными каротажа и керна

Еникеев Б.Н. (ЗАО МиМГО bnenator@gmail.com)*

Аннотация

Рассмотрены предпосылки, постановки и аспекты реализации программ генерирующих эталонный разрез и пути их совершенствования.

Ключевые слова

Петрофизика, каротаж, симулирование, база знаний

Теория

В конце 80х годов прошлого века автор доклада принимал участие в совместной работе геофизиков ЦГЭ (СССР) с коллегами из Польши, ГДР, Чехословакии, Венгрии и Болгарии. Результаты этой работы частично использовались в алгоритмических и программных разработках ЦГЭ (ASOIGIS) проводимых под руководством И.М. Чуриновой. В целом работа была полезной. Вместе с тем открылись обескураживающие моменты. Стороны демонстрировали каротажные и керновые данные и результаты их обработки и интерпретации, но эти результаты в сложных случаях, как правило, заметно расходились. Было решено собрать больше обосновывающей интерпретацию информации. Автором доклада был составлен опросник, включающий описания пород, таблицы фильтрационно-емкостных свойств, данные испытаний и т.д. Что-то удалось найти, но в основном по хорошим коллекторам. Кроме того, этих данных для каждого конкретного объекта оказалось мало. Таким образом, попытки найти материалы, на которых можно обоснованно сравнить разные подходы к интерпретации для уплотненных и сильно глинистых пород не удалось. Наиболее интересных пластов-объектов оказалось мало и поэтому возможности применения даже простейших статистических алгоритмов были ограничены.
Решено было создать, используя собранные материалы, синтетический тест (в котором разыгрываются значения искомых свойств **X (**ФЕС**)** и уже по ним вычисляются значения геофизических свойств **Y**, моделирующих отсчёты показаний каротажа). В первом варианте теста для генерации каждого компонента использовалось усеченное нормальное распределение со своим математическим ожиданием и дисперсией. После генерации производилась перенормировка. Первый вариант теста имел длину в 100 пластов. Опыт применения теста показал, что при нулевой ошибке, вносимой в рассчитанные “измерения” ГИС, и даже всего по 10 известным пластам практически все подходы давали ошибку не более чем с 5% погрешностью. Второй вариант теста строился с учётом корреляционных связей пористости с содержанием цемента и остаточной водонасыщенности с пористостью. Оптимизационная инверсия (без учёта внутренних корреляций) и с нулевыми ошибками давала точное восстановление. Вместе с тем добавление ошибки в **Y** (“измерении каротажа”) в 5% давало ошибку в результатах расчёта X в 7-8%. Дальнейший рост вносимых ошибок приводил к ускоренному росту ошибок интерпретации. При этом увеличение длины материала обучения практически мало помогало. Прирост точности в случае оптимизационной инверсии дали только учёт корреляций и ограничение диапазона изменения **X**. В этой связи полученный таким образом разрез был назван синтетическим эталонным разрезом. Но, пожалуй, самым интересной и полезной явилась возможность, детально анализировать кросс-плоты и выявлять на них кластеры, характерные и для моделируемого разреза.

Работа, описанная во введении, осталась завершенной программно, но не идеологически. Вместе с тем её востребованность в расширенной постановке за истекшие годы только выросла [1-4], хотя некоторые решения, принятые для более широкой постановки, нуждаются в профессиональном обсуждении.

С точки зрения автора доклада, генерация тестового массива должна быть ориентирована на создание массивов не совпадающих с доступными (в которые обычно много чаще чем требуется исследуются коллекторы, а не глинистые и плотные породы). Важно чтобы тестовые массивы отражали востребованную пользователем сущность изучаемых геологических объектов. Начальным стимулом к разработке явилась, возможность генерации теста произвольной длины. К настоящему времени этот фактор стал ещё более существенным (в частности из-за распространения технологий работы с нейронными сетями). Важно, чтобы пользователь программы имел нижеперечисленные возможности для генерации массивов:

1. Варьирование диапазонами объемных содержаний основных породообразующих минералов;
2. Работу с разными “литотипами” (примеры приведены в таблице 1);
3. Наличие матрицы перехода между “литотипами”;
4. Задание (для каждого “литотипа”) диапазона изменения объёмных содержаний породообразующих минералов и мощность;
5. Корректирование, диапазонов значений пористости по глубине залегания (с учётом суммарных содержаний цемента разного типа);
6. Средства наполнения и удобство пополнения библиотеки взаимосвязей.

Таблица 1. Системы дискретных типов пород

№	Системы типов породы
1	Стратотип
2	Фации
3	Минеральный состав
4	Гранулометрический состав
5	Обстановки осадконакопления (микрофации)
6	Глубина моря в период осадконакопления
7	Циклиты
8	Электрофации
9	Сейсмофации
10	Гидравлические единицы
11	Стадиальный тип
12	Геомеханические типы
13	Наличие маркеров (фауна, цвет и т.п.)
14	Фототип

Рассмотрение “литотипов” по диапазонам изменения **X** показывает высокую частоту их пересечения и иногда может быть дополнено учётом их сравнительного изменения по глубине (Рисунок 1). На рисунке 2 в форме псевдокода представлен алгоритм обсуждаемой программы (интерактивные элементы на нём отсутствуют). На рисунке 3 приведена копия экрана, дающая представление о характере интерфейса.

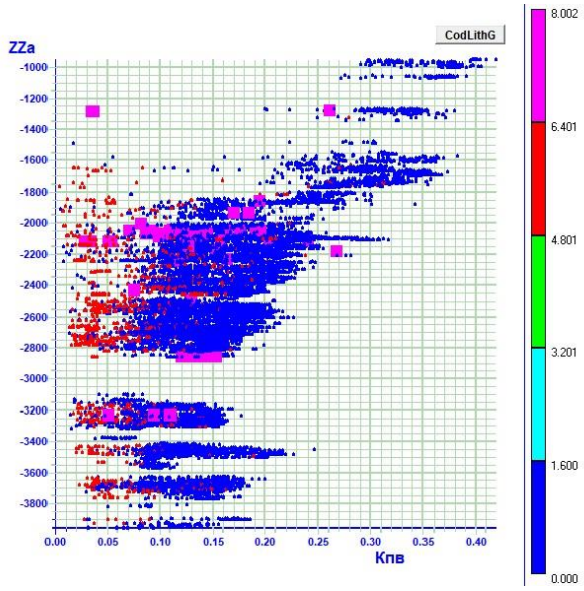


Рисунок 1. Кросс-плот изменения пористости с глубиной для “песчаник”(синий), “глина”(красный) и “алевролит”(пурпурный)

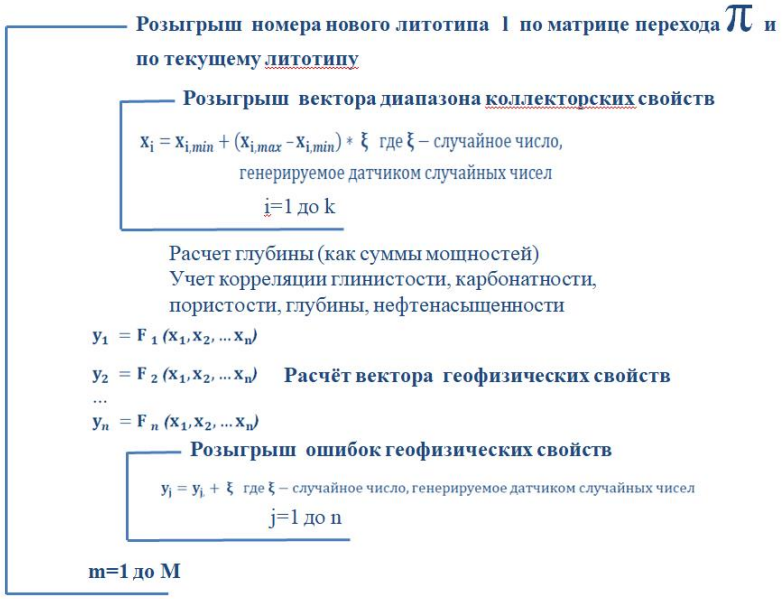


Рисунок 2. Псевдокод алгоритма генерации теста

Описанные алгоритмические и интерфейсные возможности позволяют продвинуться в работе с геолого-геофизическими проблемами, их петрофизическим наполнением и сравнением альтернативных гипотез. К актуальным в этом ракурсе задачам можно отнести нижеперечисленные:

- оценивание надежность алгоритмов настроенных на выборках разного объёма;
- сравнение интегральных распределений доступных эмпирических данных, и сгенерированных тестов;
- оценивание акустических свойств ВЧР с использованием данных шлама;

- создание массивов стохастических данных ФЕС для оценки генерации и надежности покрышек;
- получение стохастических оценок ФЕС и упругих свойств для стохастических геомеханических оценок, включая оценки эффективности гидроразрыва;
- применение синтетических тестов для увеличения эффективности обучения специалистов обработке и интерпретации данных ГИС и керна.

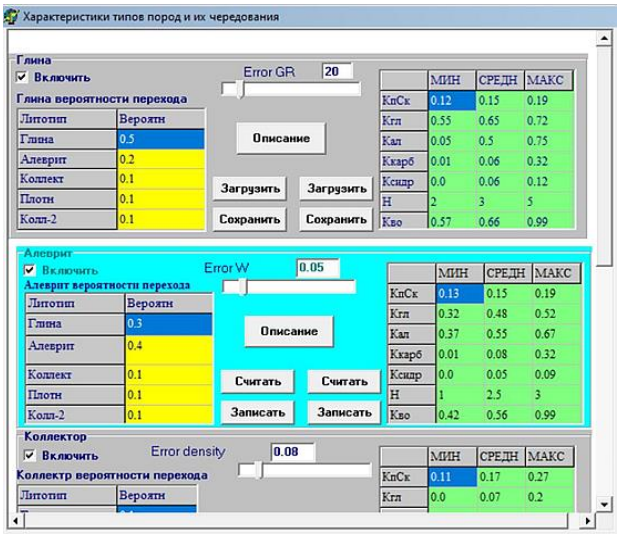


Рисунок 3. Интерфейс пользователя для задания диапазонов свойств по литотипу|

Выводы

1. Задача генерации синтетического теста для данных каротажа выводит на широкую проблематику синтеза цифрового разреза, дающую возможность применения литологической информации.
2. Приведен перечень требований к возможностям, интерфейсу и области применимости программ генерирования разреза.
3. Приведены области возможного применения программы генерирования синтетического разреза.
4. Предложен реализованный программно-пользовательский интерфейс, реализующей описанные в докладе алгоритмы.

Библиография

1. Еникеев Б. Н. О математических моделях сложных коллекторов “Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири , Двадцать третья научно-практическая конференция” Ханты-Мансийск ООО Издательский дом «ИздатНаукаСервис» 2020
2. Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Москва, Мир 1976 г., 535 стр
3. Сахоутдинов И.Р. Анализ результатов моделирования упругих свойств терригенных отложений на примере месторождений Западной Сибири. .НТВ «Каротажник » 12 (294). 2018 стр.26-37.
4. Adams S. J. Quantifying Petrophysical Uncertainties SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 2005. SPE-93125-MS

Методические приёмы расчленения терригенных отложений визейского нефтегазоносного комплекса

Юнусова Д.А. *(Альметьевский Государственный Технологический Университет «Высшая школа нефти», da.yunusova@agni-rt.ru),
Зайнагутдинов Т.Р.* (Альметьевский Государственный Технологический Университет «Высшая школа нефти», zainagutdinov.t@yandex.ru),
Плюснин А.В. (Альметьевский Государственный Технологический Университет «Высшая школа нефти», a.v.plyusnin@mail.ru)

Аннотация

Литологическая интерпретация разрезов в условиях ограниченного объёма керновых данных характеризуется особенной сложностью и неопределённостью. В данной работе рассмотрена методика литологического расчленения терригенных отложений визейского нефтегазоносного комплекса по результатам интерпретации геофизических исследований одной из скважин Пермского Предуралья, пробуренной без отбора керна.

Ключевые слова

Терригенный коллектор, литотипы, Пермское Предуралье, визейский комплекс

Теория

Терригенные породы представлены на исследуемой территории в различных объёмах: от прослоев до мощных региональных толщ. Классическими терригенными комплексами в разрезе верхнего палеозоя являются девонская терригенная толща от эмского яруса нижнего девона до терригенной части тиманского горизонта нижнефранского подъяруса верхнего девона включительно, а в карбоне – визейская терригенная толща в составе радаевского, бобриковского и нижней терригенной части тульского горизонта. Поскольку эти комплексы являются нефтегазоносными, то они представляют особый интерес (Сулима А.И., 2001). Кроме того, визейские терригенные отложения слагают мощную угленосную толщу в Кизеловском прогибе Камско-Кинельской системы.

Характеристика терригенных пород по ГИС весьма разнообразная и связана со многими факторами: фациальным типом, минералогическим составом, условиями седиментации, физико-литологическими свойствами и характером насыщения. Так, континентальные обломочные отложения подразделяются на аллювиальную и болотную группы подфаций, переходные отложения – на прибрежные и лагунные фации, а морские – на группу морских терригенных осадков (Пахомов В.И., Пахомов И.В.,1980).

Терригенная толща визейского яруса по скв. 74 представлена в объёме радаевского, бобриковского и терригенной части тульского горизонта (рисунок 1).

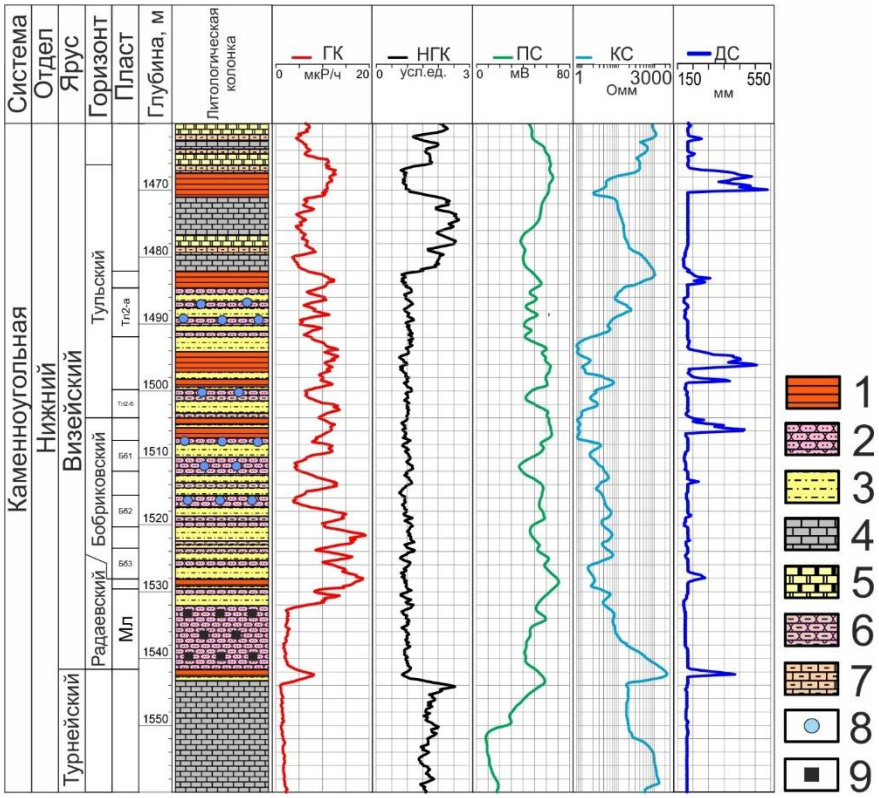


Рисунок 1. Литолого-стратиграфический разрез терригенной визейской толщи Кокуйской скв. 74 по данным интерпретации ГИС

1 - Глины и аргиллиты; 2 - Песчаник; 3 - Алевролит; 4 - Известняк плотный, крепкий; 5 - Доломит; 6 - Песчаник глинистый; 7 - Известняк глинистый; 8 - Водонасыщенность; 9 - Нефтенасыщенность

Радаевский горизонт мощностью 13,5 м почти полностью сложен песчаниками русловой фации. Кровельная часть толщиной 4 м представлена алевролитом и аргиллитом с прослоем песчаника (Сулима А.И. и др., 2021). Песчаники серые, светло-серые, средне- и крупнозернистые, кварцевые, косослоистые, с глинистым цементом, с обуглившимися растительными остатками, с хорошо окатанными зернами кварца, с жидкой нефтью в породе в виде пропитки и выпотов.

По кривым ГИС данные песчаники характеризуются следующими показаниями: пониженными ГК (1.6.0-3.6 мкР/ч), низкими НГК (0.8-1.0 усл. ед), а по стандартному двухметровому зонду КС: возрастающими от кровли к подошве от средних до высоких значений кажущегося сопротивления (100-547 Ом·м). Такие повышенные значения КС свидетельствуют о нефтенасыщенности радаевских песчаников, тогда как песчаники бобриковского и тульского горизонтов характеризуются пониженными показаниями КС (23-87 Ом·м), что говорит, в основном, об их водонасыщенности (Косков В.Н., 2016).

Кровельный алевролит выделен по следующим показаниям ГИС: ГК (4.6-8.2 мкР/ч), НГК (0.7-1.1 усл. ед), КС (11-47 ом·м,), ПС (54-58 мВ), ДС (180-193 мм), а аргиллит по полученным значениям: ГК (16.8-18.5 мкР/ч), НГК (0.9-1.0 усл. ед), КС (36-46 Ом·м,), ПС (148-154 мВ), ДС (234-268 мм), Определяющими показаниями для аргиллита являются очень высокие значения ГК и повышенные показания диаметра скважины ДС.

Вышезалегающие породы бобриковского горизонта мощностью 24.1 м в нижней части представлены чередованием алевролитов с одиночными прослоями песчаников, в средней части –пластами водонасыщенных песчаников мощностью 1-3 м, чередующихся с

алевролитами и редкими прослоями глинистых песчаников, а в кровельной части - аргиллитами.

Песчаники серые, светло-серые, кварцевые, волнистослоистые, слабосцементированные каолинитовыми глинами. Выделяются по следующим показаниям ГИС: ГК (3.6-5.3 мкР/ч), НГК (0.8-1.2 усл. ед), КС (82-92 ом·м,), ПС (37-55 мВ), ДС (185-193 мм).

Алевролиты темно-серые и серые, в различной степени глинистые, часто углистые, горизонтально-волнистослоистые. Они отличаются от радаевских алевролитов повышенной глинистостью: ГК (8.0-18.0 мкР/ч).

Кровельные аргиллиты чётко выделяются по повышенным значениям ГК (10,0-12,6 мкР/ч), резким увеличением диаметра скважины по каверномеру ДС (259-432 мм) и сопутствующим повышенным показанием кривой ПС (62-64 мВ).

Для описания литотипов были использованные статистические параметры оценки выборки данных ГИС: математическое ожидание и доверительный интервал (ДИ) изменения значений, соответствующих вероятности P0.05-P0.95.

В исследуемом разрезе аргиллит характеризуется высокими показаниями ГК с ДИ 7.3-16.2 мкР/ч, со средним значением 11.1 мкР/ч, алевролит в свою очередь характеризуется высокими показаниями ГК с ДИ 6.8-17.1 мкР/ч, со средним значением 11.4 мкР/ч. Песчаник характеризуется средними показаниями ГК с ДИ 1.9-10.4 мкР/ч, со средним значением 5.3 мкР/ч.

Выделенные литотипы имеют значительное перекрытие распределения данных для каждого из методов ГИС, поэтому их разделение на литотипы производилось комплексирование нескольких методов ГИС. Проверка качества выделения основных литотипов производилось в поле данных ГК-НГК и АК-ГК (рисунок 2).

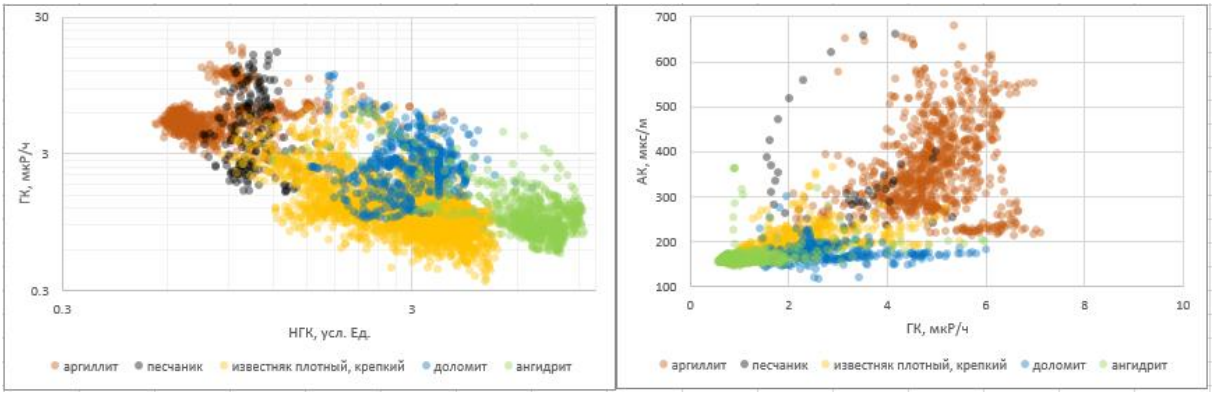


Рисунок 1. Разделение основных литотипов для всех типов разреза

Выводы

Таким образом, в данной работе рассмотрена методика литотипизации разреза, основанная на статистических параметрах данных ГИС. Данная методика была опробована на реальном месторождении Пермского Предуралья. Полученные результаты подтверждают гипотезу разделимости литотипов в пространстве параметров и выделение литотипов для скважин без керновых исследований с ошибкой менее 10%.

Благодарности

Особую благодарность выражаем научному консультанту Департамента нефтегазового инжиниринга ПИНШ, кандидату геолого-минералогических наук – Плюснину Алексею Владимировичу.

Библиография

1. Косков В.Н. Теоретические основы дисциплины «Геофизические исследования скважин» и методика выполнения квалификационных работ: учеб-метод. пособие /. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. - 121 с.

2. Пахомов В.И., Пахомов И.В. Визейская угленосная формация западного склона Среднего Урала и Приуралья / - М.: Недра, 1980. - 152 с.

3. Сулима А.И. Геологическое строение Усть-Игумского соляного поднятия // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы региональной научно-практической конференции. - ПГУ. - Пермь, 2001. - С. 150-152.

4. Сулима А.И., Плюснин А.В., Плешков Л.Д., Трубин Я.В., Тимофеев В.Д. Строение и этапы развития осадочного бассейна северо-востока Восточно-Европейской платформы в протерозое и палеозое на основе многолетних наблюдений геологических разрезов и исследований глубоких скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. - Т.332. - № 3. - С. 141-160.

Оценка эффективности сейсмотомографического 3D прозвучивания для исследований откосных сооружений

Зеликман Д.И. (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, s235005@stud.spmi.ru)*

Аннотация

В работе представлено обоснование инновационной методики 3D сейсмотомографического прозвучивания откосных сооружений для выявления зон пониженной скорости распространения сейсмических волн. Наличие этих зон является диагностическим критерием ослабленных участков массива горных пород, потенциально опасных для обрушения.

Синтезированы базовые 3D модели, отражающие сейсмогеологические условия в приоткосном массиве. На примере однородного массива с локальной ослабленной зоной показан процесс моделирования сейсмотомографических исследований. Сформирована синтетическая система наблюдений, задана исходная модель среды, рассчитаны прямая и обратная задачи сейсморазведки. На восстановленной модели уступа отчетливым образом выделяется ослабленная зона, заданная на начальном этапе. Результаты моделирования позволяют судить об эффективности методики 3D сейсмотомографического прозвучивания.

Ключевые слова

Сейсмотомография, сейсмическое прозвучивание, 3D инверсия, математическое моделирование, клиф

Введение

Проблема исследования гравитационных склоновых процессов занимает особое положение в сфере деятельности современной инженерной геодинамики. Состояние вопроса обостряется не только возрастающим техногенным влиянием на природные склоны, но и интенсивным формированием искусственно создаваемых откосов.

Значение гравитационных явлений заключается в следующих аспектах: формирование и преобразование ландшафта местности, перемещение продуктов выветривания (делювиальные отложения), экономический ущерб и угроза жизни людей. Из первых двух аспектов следует направление изучения этих явлений для установления закономерностей их появления и развития. Третий аспект на сегодняшний день является определяющим и устанавливает основное направление инженерной геологии в этом вопросе - прогноз устойчивости откосных сооружений и выявление локальных потенциально опасных участков.

Объект исследования

Оползневые склоны известны разнообразием геоморфологических и геолого-структурных условий. В общем случае в динамике развития оползневого процесса выделяют 3 стадии.

Под влиянием факторов, благоприятствующим гравитационным деформациям, возникает первая (подготовительная) стадия оползневого процесса. К ним относятся: выветривание пород, увлажнение атмосферными осадками и поверхностными водами, температурные изменения, суффозионный и фильтрационный вынос, эрозия и абразия и другие. Подготовительная стадия характеризуется активизацией перечисленных факторов, снижающих устойчивость склона и укладывается во временной диапазон от нескольких месяцев до десятилетий. За бровкой склона появляются трещины.

Вторая стадия - появление оползня. Происходит перемещение пород вниз по склону с высокой скоростью в твердых породных комплексах и низкой в содержащих глинистые

отложения в зоне сдвига. Формируется новый профиль склона. Тело оползня расчленяется трещинами отрыва и сжатия.

На этапе третьей стадии движение оползневых масс затухает. Время стабилизации зависит от геологического строения и варьируется от нескольких часов, до нескольких лет (при развитии склоновых процессов в оползневых массах).

Оползневый процесс является необратимым, однако его можно предотвратить. Принципиально важным условием является обнаружение ослабленных участков на подготовительной стадии.

Методы контроля деформаций склонов, в частности бортов карьеров, разработаны для горной геомеханики и маркшейдерского дела [1-2]. Оценка их устойчивости осуществляется на основании физико-механических свойств массива пород, полученных по результатам буровых работ с извлечением керна, либо по наблюдениям уже произошедших смещений. Эти методы обеспечивают достаточную точность, однако часто не отвечает требованию минимальных затрат и времени.

Методика 3D сейсмотомографического прозвучивания

Инженерная сейсморазведка дает возможности обнаружить ослабленные участки массива горных, на начальной стадии их формирования и развития [3]. Применение сейсмических методов обусловлено взаимосвязью скоростей распространения упругих волн в горных породах с их плотностью и прочностными характеристиками [4]. Однако, стандартная методика сейсмической томографии (СТ) в ряде случаев сталкивается с ограничениями, которые связаны с отсутствием вертикального градиента скоростей распространения упругих волн по разрезу, кривизной береговой линии, а также рельефом береговых уступов.

Для локализации ослабленных зон в массиве, прилегающем к склону, предложена методика 3D сейсмотомографического прозвучивания (СТП 3D). Особенность методики заключается в изучении массива горных пород на проходящих волнах по аналогии с межскважинным прозвучиванием. Опыт применения этой методики при обследовании берегового уступа представлен в статье [5].

Синтез сейсмогеологических моделей

Для обоснования эффективности применения методики создан набор базовых 3D моделей, отражающих сейсмогеологические условия в приоткосном массиве. Эти модели классифицируются по распределению скоростей распространения упругих волн (однородные, градиентные, среды с «инверсными» слоями) и по характеру деформаций (локальные, протяженные, зональные ослабленные участки). В качестве примера ниже представлена модель однородной среды с локальной ослабленной зоной.

Математическое моделирование выполнялось в программе ZondST3D, предназначенная для обработки и интерпретации данных сейсморазведки в различных вариантах, включая сейсмическую томографию [6].

Создание синтетической системы наблюдений. Методика СТП 3D заключается в расположении пунктов регистрации сейсмических волн (ПП) вдоль профиля у подножья склона, а пунктов возбуждения сейсмических волн (ПВ) – на площади, примыкающей к обрыву. Для моделирования измерений 20 ПП размещались с шагом 0.5 м, ПВ в количестве 400 с шагом 0.5 м на площади 10 м х10 м (рис.1.а).

Формирование исходной модели среды. В качестве примера представлена упрощенная модель однородного уступа с локальной ослабленной зоной (рис.1.б). Скорость распространения сейсмических волн в ячейках среды задана 1,5 км/с для целого массива и 1 км/с для ослабленной зоны. Такие значения скоростей характерны для известняка верхней части геологического разрезал. Высота уступа 6 м.

Расчет прямой задачи. Расчет теоретических траекторий сейсмических лучей в заданной трехмерной среде выполнен по специальному алгоритму теории графов (Shortest

path's method). Для трассировки лучей принято приближение о ячеистом строении массива с заданной постоянной скоростью распространения упругих волн для каждой ячейки. Луч проходит внутри ячейки с постоянной скоростью. В результате получены годографы первых вступлений, на основе которые выполняется инверсия.

Расчет обратной задачи. На этом этапе выполнена инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности (Occam). Стартовая модель задана массивом ячеек со скоростью 1.5 км/с. Граничные значения скоростей от 0.1 до 2 км/с.

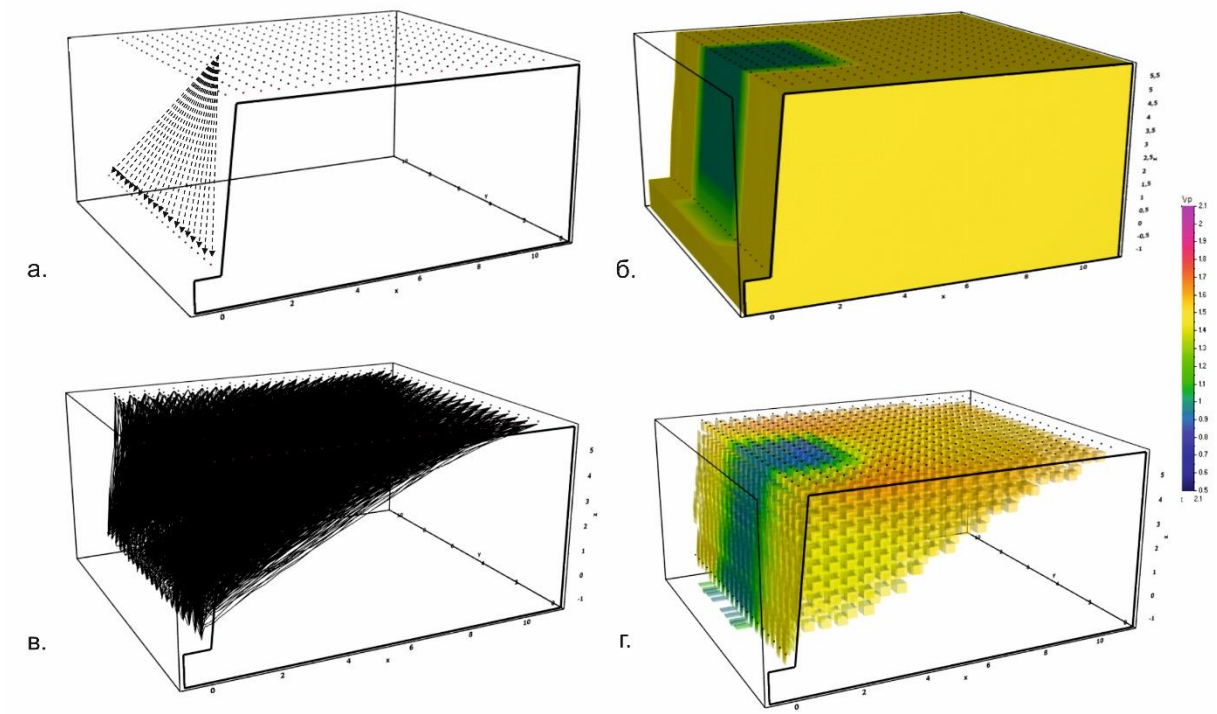


Рисунок 1. Синтетическая система наблюдений (а), заданная модель среды для прямой задачи (б), траектория лучей первых вступлений (в), восстановленная модель среды (г)

Результаты моделирования представлены в виде восстановленной 3D цифровой модели скоростей распространения сейсмических волн (рис.1.г) и траектории первых вступлений (рис.1.в) в массиве. В структуре восстановленной модели отчетливым образом выделяется ослабленная зона, примыкающая к склону. Градиент скоростей распространения волн отражает положение ее границ. За счет краевых эффектов вокруг искомого объекта возникают ложные аномалии до 1,6 км/с.

Выводы

Результаты выполненного моделирования показывают, что методика 3D сейсмотомографического прозвучивания является эффективным методом изучения состояния откосных сооружений.

Исследования по методике СТП 3D обеспечивают выявление зон пониженных скоростей распространения сейсмических волн. Локальное уменьшение скоростей на территории, прилегающей к обрыву может указывать на наличие зон деструкции горных пород и маркировать начальную стадию формирования и развития гравитационных склоновых процессов.

Данная методика может стать частью комплекса мониторинговых наблюдений для изучения динамики и развития опасных геологических процессов.

Благодарности

Автор статьи благодарит научного руководителя работ профессора кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II Глазунова В.В. помощь в проведении моделирования.

Библиография

1. Шабаров А. Н., Куранов А. Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // *Горный журнал*. 2023. № 5. С. 5-10. DOI 10.17580/gzh.2023.05.01.
2. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1176–1191. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191.
3. Глазунов В. В., Бурлуцкий С. Б., Шувалова Р. А., Жданов С. В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 987–999.
4. Горяинов Н. Н., Боголюбов А. Н., Варламов Н. М. Изучение оползней геофизическими методами. – Недра, 1987.
5. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И., Букатов А.А. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25.— ES1001. — DOI: 10.2205/2025es000993 — EDN: ZNNZCA.
6. ZondST3D: руководство пользователя [Электронный ресурс]. —Версия 2.5. — 2021. — URL: https://zondst3d.com/manual (дата обращения: 15.10.2023).

Термически стимулированное разрушение метаморфизированных песчаников: лабораторное исследование

Индаков Г.С. (МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, indakov.gs16@physics.msu.ru), Казначеев П.А. (ИФЗ РАН, p_a_k@mail.ru)*

Аннотация

Термическое разрушение горных пород остается мало изученным, несмотря на актуальность темы для теории вулканических и глубокофокусных землетрясений, а также таких прикладных задач, как добыча углеводородного сырья. Одной из важных проблем является поиск взаимосвязей между особенностями разрушения и микроструктурой пород. В данном исследовании на основе данных импульсов акустической эмиссии в экспериментах по нагреву, проведенных с образцами метаморфизированных песчаников, рассмотрены статистические параметры разрушения: активность акустической эмиссии, параметр наклона в законе Гутенберга-Рихтера и параметры волновых форм импульсов. Для анализа микроструктуры рассмотрены параметры распределения зерен горной породы по размерам. Предложена методика расчета величин и проведена валидация результатов на основе прочих методов.

Ключевые слова

горные породы, термическое воздействие, акустическая эмиссия, микроструктура, размеры кристаллов

Источники финансирования

Экспериментальные данные получены в рамках гос. задания ИФЗ РАН, работа выполнена в рамках программы «Научное наставничество ИФЗ РАН».

Теория

Изучение процессов разрушения горных пород под воздействием температуры в настоящее время является одной из актуальных задач геофизики. В природе породы могут подвергаться воздействию высоких температур при контакте с магмой, в зонах геотермальной активности, под действием естественной радиоактивности или в результате тектонических процессов [1]. Кроме того, нагрев пород может происходить в шахтах и карьерах при добыче полезных ископаемых, в скважинах и коллекторах при разработке углеводородных месторождений, в инженерных сооружениях при пожарах, а также в местах хранения радиоактивных отходов. Одним из распространенных методов мониторинга процессов разрушения горной породы при нагреве является регистрация термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), связанной, главным образом, с образованием микротрещин под воздействием термических напряжений. Лабораторные исследования по данной теме позволяют предположить зависимость статистических параметров ТАЭ друг с другом и с параметрами распределения зерен минералов по размерам [2-3].

В данной работе исследуются особенности термически стимулированного разрушения образцов метапесчаников в лабораторных условиях на основе статистики импульсов ТАЭ и микроструктурных снимков шлифов образцов, полученных на оптическом микроскопе. Метапесчаники представляют собой образцы метатерригенных горных пород Северного Приладожья, различающихся условиями метаморфизма, такими как давление и температура [4].

Рассмотрены статистические параметрами ТАЭ: активность акустической эмиссии, параметр наклона графика повторяемости (b-value) и параметры волновых форм – RA («Rise

Time To Amplitude») и AF («Average Frequency»), характеризующие преимущественный тип трещин, образующихся при нагружении образца. Параметр b-value, характеризующий в экспериментах по нагреву соотношение количества импульсов ТАЭ и их амплитуды, был оценен методом максимального правдоподобия для цензурированной выборки.

При исследовании микроструктуры зернистая структура горной породы рассматривалась в качестве совокупности зерен, для каждого из которых возможна оценка характерной величины. Для анализа оптических микрофотографий шлифов горной породы был использован метод пересечения опорных линий [5], согласно которому на изображение наносится N равно отстоящих друг от друга параллельных линий и отмечаются все их пересечения с границами зерен породы. Распределение длин отрезков в пикселях пересчитывается в распределение зерен по размерам согласно заданному масштабу измерения. Реальное распределение размеров зерен аппроксимировалось логнормальной функцией, традиционно используемой для подобных целей (рис. 1). Оценивались такие статистические параметры распределения величин, как квантили 0.85-0.95, мода, медиана и средний размер зерна [6]. Валидация полученных результатов проведена методом акустической спектроскопии [4].

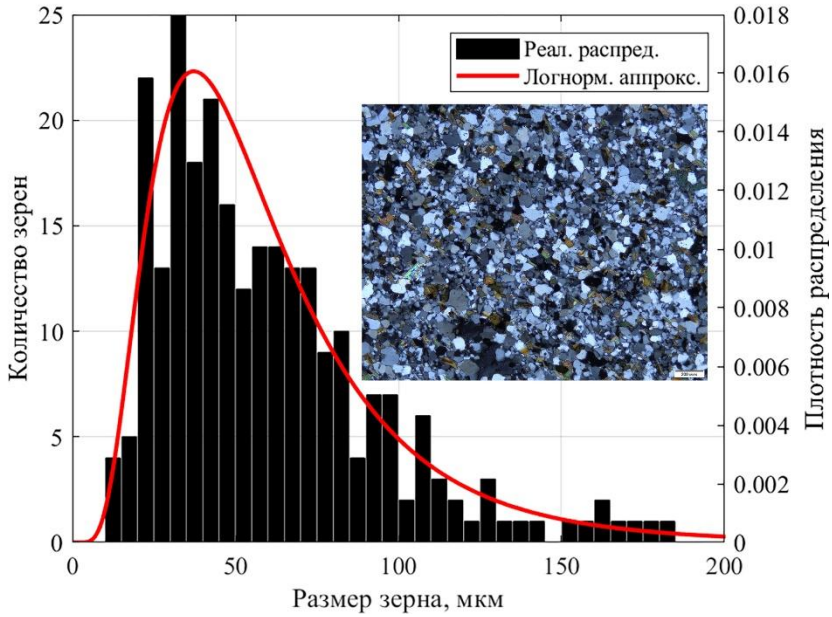


Рисунок 1. Оценка размеров зёрен методом пересечения опорных линий по данным оптической микроскопии для образца ЛВ1356: микрофотография масштаба 200 мкм и соответствующее ей распределение зёрен по размерам [6]. Столбчатая диаграмма отображает реальное распределение зерен по размерам с шагом 5 мкм, красная кривая соответствует логнормальной аппроксимации

Выводы

В работе предложены методы оценки статистических параметров ТАЭ и микроструктуры, проведен анализ их взаимосвязей. В дальнейших исследованиях в данном направлении планируется проведение дополнительных экспериментов по нагреву и составление представительного набора данных на основе рассчитанных параметров образцов. Главной перспективой анализа такого набора данных является возможность применения методов машинного обучения, в частности, деревьев решений и ансамблевых методов, а также нейронных сетей с различными архитектурами для обработки временных последовательностей, что активно развивается мировым сообществом [7].

Библиография

1. Шкуратник В.Л., Вознесенский А.С., Винников В.А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. – М.: изд. "Горная книга", 2015. – 241 с.
2. Индаков Г.С., Казначеев П.А. Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2021. № 1:2110501 – с. 1–12.
3. Shao S., Wasantha P.L., Ranjith P.G., Chen B. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, v. 70 – pp. 381–387.
4. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С. Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // Физика Земли. 2024. № 4. – с. 93–111.
5. ASTM E112-13. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. ASTM, 2021. – 11 p.
6. Казначеев П.А., Индаков Г.С., Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Матвеев М.А., Майбук З.-Ю.Я., Краюшкин Д.В. Методы оценки размеров зерен горных пород: обзор и сравнение // Наука и технологические разработки. 2024. Т. 103. № 2. – с. 3-23.
7. Ciaburro G., Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. Appl. Sci. 2022, v. 12, 10476. – pp. 1–30.

Методика нейросетевого картирования металлотектов по комплексу геофизических данных на базе априорного физико-геологического моделирования

Карамышев А.В.* (ФГБУ «Институт Карпинского», Andrey_Karamyshev@karpinskyinstitute.ru)

Аннотация

В докладе рассматриваются методы глубокого машинного обучения (МО) для решения задач прогноза полезных ископаемых (ПИ) на основе комплексной интерпретации геофизических данных. Предложена методика автоматизированного картирования металлотектов, основанная на априорном физико-геологическом моделировании целевых рудных объектов. Особое внимание уделяется проблеме недостаточности обучающих данных и сложности непосредственного распознавания рудных объектов. Предложенный подход фокусируется на независимом распознавании отдельных геологических факторов контроля оруденения, что повышает обоснованность выделения перспективных участков. Реализация методики была успешно протестирована на данных Центрально-Колымского района, а также на новой территории с иным геологическим строением. Подчеркивается важность качественной предобработки данных и выбора релевантных признаков для успешного применения методов МО в геолого-геофизических исследованиях.

Ключевые слова

Глубокое машинное обучение, сверточные нейронные сети, распознавание образов, физико-геологическое моделирование, прогноз полезных ископаемых

Теория

Методы глубокого машинного обучения (МО) обладают значительным потенциалом в геолого-геофизических исследованиях благодаря их способности анализировать сложные пространственные закономерности в данных. В отличие от решений из области классического МО, глубокие сверточные нейросети опираются на высокоуровневые абстракции — геометрию аномалий, их ориентировку и взаимное расположение, что снижает зависимость от распределения значений отдельных признаков. Это делает их перспективными, в частности, для задач прогноза полезных ископаемых (ПИ), где требуется интеграция разнородных данных: геофизических полей, геохимических карт, дистанционного зондирования и др.

Однако ключевой проблемой остается недостаточная воспроизводимость и интерпретируемость результатов существующих нейросетевых решений в области машинного прогноза, связанная с ограниченным объемом размеченных данных, их несбалансированностью и низким качеством аннотации. Особенно остро эта проблема проявляется при попытках прямого распознавания рудных объектов по эталонам-аналогам: уникальность месторождений и слабая выраженность их сигналов в геофизических полях затрудняют формирование репрезентативных обучающих выборок.

В качестве альтернативы предлагается фокусироваться не на прямом выделении рудных тел, а на автоматизированном распознавании элементов геологического строения, связанных с оруденением, или металлотектов. Данный подход позволяет использовать обширные массивы данных, фактически уже размеченных в ходе геологического картирования, частично решая таким образом проблему дефицита обучающих примеров.

Разработанная методика включает следующие этапы:

8. Физико-геологическое моделирование — создание априорных геологических, петрофизических и геофизических моделей целевого объекта.

9. Подготовка данных — сбор и предобработка многокомпонентных геофизических, геохимических и спутниковых данных, а также слоев геологической аннотации с формированием размеченных сводных баз данных.

10. Обучение нейросетей — тренировка моделей для выделения целевых рудоконтролирующих факторов (разрывные нарушения, интрузивные массивы, литологические границы).

11. Прогнозирование — генерация карт отдельных геологических факторов, их синтез и выделение перспективных зон на основе априорной модели.

12. Верификация — оценка эффективности полученных моделей на тестовых данных на основе количественных метрик и качественного экспертного анализа полученных карт.

13. Перенос обучения (при необходимости) – адаптация полученных моделей к новым данным путем дообучения на малой выборке.

Концепция применения методики предполагает формирование банка таких моделей, предобученных на уникальных комбинациях целевых факторов и наборов входных признаков. При решении новых задач, схожих по геологическому контексту, выбор конкретной модели из банка осуществляется с учетом особенностей строения исследуемой территории и доступности данных различных типов.

Опытная реализация методики (рис. 1) выполнена на примере Центрально-Колымского района (ЦКР), выбранного по причине его обеспеченности качественными равномерными геофизическими покрытиями. Технологический стек реализации включал язык Python для разработки скриптов, охватывающих полный цикл работ: импорт сырых данных, их предобработку (нормализация, отбор релевантных признаков, формирование выборок, аугментация), обучение нейросетевых архитектур, визуализацию промежуточных результатов и экспорт итоговых прогнозов в текстовом и графическом виде. В качестве базового инструментария машинного обучения использовалась библиотека TensorFlow 2.0.

В рамках эксперимента было обучено 36 нейросетевых моделей с архитектурой U-Net, различающихся комбинациями входных данных и целевыми объектами распознавания. Основной фокус был направлен на выявление ключевых факторов контроля крупнообъемного золотого оруденения, включая: выходы рудовмещающих толщ, интрузивные массивы, к периферии которых приурочены известные рудные объекты, и разрывные нарушения, играющие роль путей миграции гидротермальных растворов. Важной особенностью моделей является их направленность не на распознавание уникальных для конкретного региона объектов, а на выделение широко распространенных типов геологических структур (разломы, интрузии, литологические границы), чьи проявления в геофизических полях варьируются между регионами лишь в деталях. Это создает предпосылки для переноса обученных моделей на новые территории с иным геологическим строением. Для адаптации к специфике нового домена (например, иным петрофизическим свойствам пород) достаточно дообучения на ограниченном объеме локальных данных — подход, соответствующий парадигме доменной адаптации, для которой уже существуют отработанные алгоритмы.

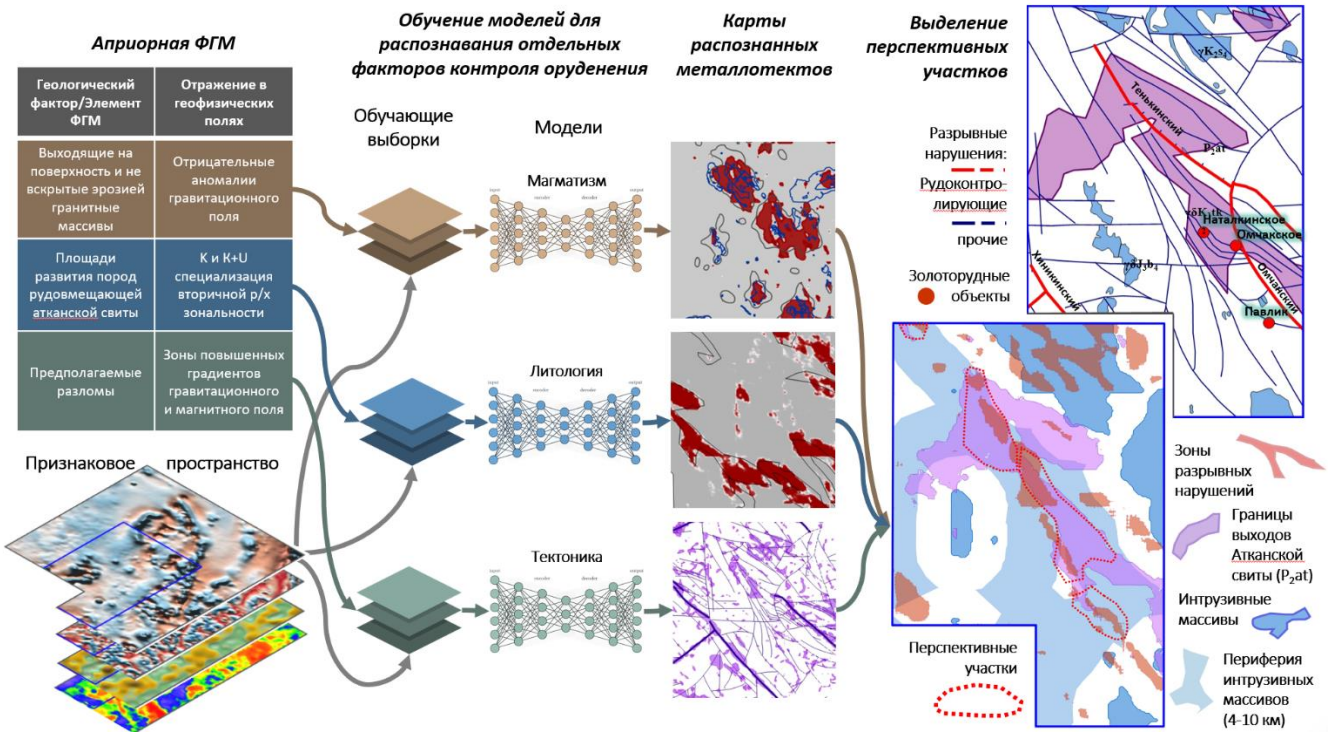


Рисунок 1. Реализация алгоритма автоматизированного картирования металлотектов на примере распознавания факторов локализации крупнообъемного золотого оруденения, выделенных на основе априорной ФГМ Омчакского рудного узла

Результаты

На данных Центрально-Колымского района обученные модели для всех трех целевых факторов продемонстрировали согласованность прогнозов с фактическими данными как на количественном (коэффициенты Dice и IoU), так и на качественном визуальном уровне. Последнее особенно важно, поскольку формальные метрики, по причине, например, пробелов в аннотации обучающей выборки, не всегда корректно отражают геологическую осмысленность результатов.

Наибольшую эффективность на исходной тестовой выборке и устойчивость к переносу на другие площади показали модели, комбинирующие признаки, полученные по данным различных методов. Так, изменение геологического контекста продемонстрировало, что модели, оперирующие исключительно магнитометрическими данными, склонны к ложным срабатываниям, выделяя нецелевые аномальные объекты. В отличие от них, комплексные модели после дообучения на ограниченном объеме данных показали значительное улучшение точности, превысив даже исходные показатели на валидации.

Выводы

1. Предлагаемая методика автоматизированного картирования металлотектов на основе комбинирования априорного физико-геологического моделирования и методов глубокого МО позволяет преодолеть ограничения, связанные с нехваткой обучающих данных, и повысить интерпретируемость результатов в сравнении с непосредственным распознаванием рудных объектов.
2. Качество входных данных и релевантность признаков критически влияют на результат: избыточность или неоднородность данных могут нивелировать преимущества даже сложных архитектур.

3. Комплексирование разнородных геофизических данных при обучении и стратегия доменной адаптации позволяют эффективно масштабировать решения для различных геологических условий.

Библиография

1. Карамышев А. В. Автоматизированное картирование металлотектов с использованием методов глубокого машинного обучения // Отечественная геология. 2024. №4, - с. 19-34
2. Карамышев А.В., Фёдорова К.С., Тарасов А.В. Прогноз скрытого золотого оруденения в пределах Центрально-Колымского района по комплексу геолого-геофизических признаков методом распознавания // Руды и металлы. 2020. №2, - с. 10-24
3. Granek, J. Application of machine learning algorithms to mineral prospectivity mapping // PhD diss., University of British Columbia, 2016
4. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – 2015. – p. 234-241.

Оперативное обновление ЦМР. Постановка проблемы

Щербаков В.М. * (ИФЗ РАН, МИИГАиК, valera666883@mail.ru),
Алёшин И.М. (ИФЗ РАН,* ima@ifz.ru*),
Скрыпицына Т.Н. (МИИГАиК,* tatyana.skrypitsyna@yandex.ru*)

Аннотация

В условиях интенсивной урбанизации и антропогенных изменений ландшафта значительно возрастает необходимость оперативного обновления и гепространственного анализа цифровых моделей рельефа (ЦМР). Задачи такого рода возникают во многих ключевых отраслях экономики и жизнеобеспечения. Несмотря на позитивные тенденции в развитии технологий получения данных дистанционного зондирования Земли и их обработки, в масштабах страны проблему геопространственного мониторинга нельзя считать решённой. В статье систематизированы ключевые проблемы, связанные с поддержанием актуальности ЦМР. На основе анализа современных технологий предложены направления для разработки эффективных решений.

Ключевые слова

ЦМР, фотограмметрия, дистанционное зондирование, нейронные сети, мониторинг

Теория

Сложно найти те стороны человеческой жизни и деятельности, где прямо или косвенно не требовалась бы информация о рельефе. Начиная с конца прошлого века информация о рельефе представляется в виде цифровых моделей, которые являются основой для современной топографии, гидрологического моделирования, градостроительного планирования, оценки рисков и других приложений [3]. Современными нормативными актами обновление карт и планов установлено с определённой периодичностью и в соответствии с техническими регламентами. В Российской Федерации это регулируется Федеральным законом № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных» [2], а также Постановлением Правительства РФ № 678 «Об утверждении Положения о создании и обновлении государственных топографических карт и планов» [1], где закреплены требования к срокам актуализации данных. Однако, в регионах с активным антропогенным воздействием рельеф изменяется быстрее, чем обновляются ЦМР, например, строительство, вырубка лесов, добыча ресурсов. Это приводит к неточности прогнозов затоплений и эрозии, ошибкам в проектировании инфраструктуры.

В Российской Федерации традиционные методы обновления, такие как, лидарные съёмки, спутниковая и аэрофотосъёмка, не могут обеспечить постоянное обновление рельефа на территории всей страны. Высокая стоимость оборудования и логистики делает их экономически нецелесообразными для частого мониторинга, поэтому в большинстве случаев ЦМР обновляются раз в 5–10 лет, что не соответствует динамике современных антропогенных и природных изменений.

С другой стороны, в европейских странах, с небольшими по сравнению с Российской Федерацией территориями, обновление ЦМР происходит регулярно, но при таких полномасштабных съёмках до 80% данных остаются невостребованными (по данным Европейского космического агентства лишь 20% собранных геоданных используются для актуализации карт), создавая избыточную нагрузку на системы хранения [6]. Решением данного противоречия является создание технологии, позволяющей актуализировать только измененные фрагменты ЦМР. Для этого необходимо решить ряд задач.

Первая задача – это оперативное обнаружение изменений. Современные алгоритмы, такие как методы на основе свёрточных нейронных сетей (CNN) и анализа разностных

мультиспектральных изображений, обработки спутниковых и аэрофотоснимков часто дают ложные результаты из-за сезонных колебаний, изменения цвета растительности, снежного покрова, вариаций освещения и облачности [5]. Возникает потребность в гибридных подходах, сочетающих оперативное обнаружение изменений и точечное обновление данных. Для повышения точности необходимы совместные алгоритмы, сочетающие машинное обучение с геопространственными данными. Особое внимание требуется к алгоритмам приоритизации: например, зоны вырубок лесов или стройплощадок должны автоматически ранжироваться как высокорисковые, что требует интеграции с базами данных по землепользованию.

Методы обновления цифровых моделей рельефа, построенных по спутниковым данным, обеспечивают ежедневное покрытие и низкую стоимость, но их невысокое пространственное разрешение затрудняет детектирование топографических изменений (рис. 1).

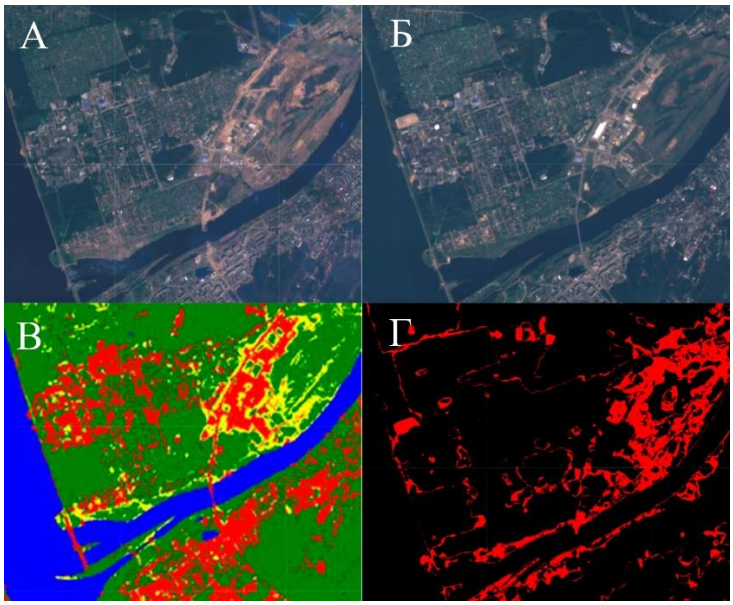


Рисунок 1. Фрагменты снимков со спутника Sentinel-2 на территорию г. Дубна, Московской области. А - снимок 2017 года; Б - снимок 2021 года; В - классифицированное изображение на 2019 год; Г - маска изменений, произошедших на выбранной территории за промежуток с 2017 по 2021 год

Логичным подходом к решению этой задачи является комбинирование спутниковых снимков для выявления зон изменений с аэросъёмкой. Однако их эффективность зависит от точности классификации земного покрова, что часто приводит к ошибкам в районах со сложной структурой ландшафта [8]. Нейросетевые алгоритмы (PyTorch, TensorFlow и др.) автоматизируют построение ЦМР из оптических данных, но требуют обширных размеченных наборов материалов, которые редко доступны для удалённых или быстро меняющихся территорий.

Вторая задача – это оптимизация алгоритмов совмещения разнородных данных при обновлении ЦМР.

Для создания цифровых моделей рельефа на большие территории, как правило производится компиляция разнородных данных (например, Eu-DEM построена на основе SRTM, ASTER и картографических источников) [4]. При этом бесплатные квазиглобальные ЦМР обладают размером пикселя от 30 м и более. Коммерческие данные (например, World DEM) имеют разрешение 15 м и достаточно высокую точность порядка 2-4 метров, но они созданы в 2011–2015 году, то есть уже нуждаются в обновлении [7].

Совмещение сверхдетальных данных БВС (до 15 см/пиксель) со спутниковыми снимками высокого и среднего разрешения (0,3–30 м/пиксель) требует сложных алгоритмов сглаживания и сшивки, что увеличивает риски получения погрешностей при фотограмметрической обработке. Проблема усугубляется при работе с разновременными данными, например, использование съёмки двадцатилетней давности вместе с современными материалами БВС приводит к артефактам и выбросам в моделях из-за естественных изменений ландшафта. Отсутствие эталонных данных для верификации в зонах активных изменений, таких как карьеры, застройка, дополнительно снижает доверие к результатам.

Ключевым направлением оперативного обновления ЦМР является разработка адаптивных алгоритмов распределения значимости и иерархизации объектов, использующих мультикритериальный анализ для ранжирования участков по степени воздействия на экосистемы, гидрологию и инфраструктуру (рис. 2.). Это позволит сосредоточить ресурсы на зонах с максимальным риском, таких как оползневые склоны или районы вырубок. Интеграция открытых платформ (Google Earth Engine, GRASS GIS) для автоматического слияния спутниковых снимков, БВС-данных и векторных слоёв (OpenStreetMap) сократит время обработки и улучшит совместимость форматов.

Таблица 1. Пример приоритезации переходов классов объектов из одного в другой, где значение “0” - неприоритетный, “7” - самый приоритетный [8]

Исходный /Целевой	Дорога	Здания	Застроенная территория	Земли без растительности (пустынные участки)	Травяной покров	Лес	Вода
Дорога	X	7	4	4	1	1	0
Здания	1	X	5	7	3	3	0
Застроенная территория	3	7	X	7	3	3	0
Земли без растительности (пустынные участки)	3	7	5	X	2	2	0
Травяной покров	3	7	5	3	X	3	0
Лес	3	7	7	7	3	X	0
Вода	0	0	0	0	0	0	X

Внедрение ИИ-моделей, обученных на разновременных данных, минимизирует ложные срабатывания, вызванные сезонными изменениями или артефактами съёмки. Например, алгоритмы, анализирующие многолетние тенденции, например, динамику эрозии, могут отличать антропогенные изменения от естественных флуктуаций. Дополнительный потенциал связан с краудсорсингом данных через мобильные приложения, собирающие фото с известными координатами и LiDAR-сканы со смартфонов, что особенно актуально для мониторинга урбанизированных территорий с правовыми ограничениями на полёты БВС.

Выводы

Оперативное обновление ЦМР требует перехода от периодических съёмок к гибридным системам мониторинга. Ключевые задачи на ближайшее будущее это: оптимизация ресурсов за счёт таргетированного подхода, стандартизация методов слияния данных, развитие

инструментов с открытым исходным кодом для последующей обработки. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение автономности БВС, разработку алгоритмов с учётом региональных особенностей и создание нормативной базы для использования обновлённых ЦМР в управлении рисками и территориями.

Библиография

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 марта 2024 г. N 400 «Об утверждении Положения об обновлении государственных топографических карт и государственных топографических планов, а также масштабов, в которых они создаются».
2. Федеральный закон от 30.12.2015 г. № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
3. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. — 2nd ed. — Amsterdam [etc.]: Elsevier, cop. 2016. — XIX, 486 p.
4. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V. (2019). Statistical and visual quality assessment of nearly-global and continental digital elevation models of Trentino, Italy. Remote Sensing Letters. vol. 10, no 8., pp. 726–735.DOI:10.1080/2150704X.2019.1602790
5. Huang L, Ru A., Shengyin Z., Tong J., Hao H. (2020). A Deep Learning-Based Robust Change Detection Approach for Very High Resolution Remotely Sensed Images with Multiple Features. Remote Sensing, vol. 12, no. 9, 19 p. DOI:10.3390/rs12091441.
6. Lamboglia E., Cambon, G., Del Frate F., Mogha, V. P. (2024). The evolution of Earth Observation: exploring space sustainability through European case studies. International Journal of Sustainable Engineering, vol. 17, no. 1, pp. 632 – 641. DOI:10.1080/19397038.2024.2387427.
7. Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Borla Tridon, D., Bräutigam, B., Bachmann, M., et al. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 132, 119–139. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008.
8. White C.T. Reckling W. Petrasova A. Meentemeye, R.K. Mitasova H. (2022). Rapid-DEM: Rapid Topographic Updates through Satellite Change Detection and UAS Data Fusion. Remote Sensing, vol. 14, 26 p. DOI:10.3390/ rs14071718.

Подсекция 1.1. Геофизика и математическое моделирование

Применение ядерно-магнитного каротажа в сильном магнитном поле для качественной оценки смачиваемости

Картежников Е.Е.* (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, egor.kartezhnikov@mail.ru), Исайчева Е.Г. (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, isaycheva.eg@yandex.ru)

Аннотация

В настоящий момент значительная часть эксплуатируемых месторождений нефти и газа вступила в позднюю стадию разработки. Увеличение гидрофобизации коллектора в следствии адсорбции компонентов нефти в виде смол, асфальтенов и битума в процессе разработки приводит к снижению темпа отбора углеводородов (УВ), значительному увеличению обводненности продукции и в итоге к снижению конечных показателей извлечения углеводородного сырья (УВС).

Смачиваемость поверхности породы является важным параметром, от которого зависят основные показатели разработки месторождений. При оперативной интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) не всегда имеются возможности провести исследования на керновом материале для учета смачиваемости из-за ограниченности временных ресурсов.

Авторами доклада предлагается метод качественной оценки смачиваемости породы на основе интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в сильном магнитном поле с учетом типизации глин и содержания капиллярно-связанной воды.

Ключевые слова

Ядерно-магнитный каротаж в сильном магнитном поле, смачиваемость, типизация глин, капиллярно-связанная вода

Теория

Смачиваемость – это поверхностное явление, возникающее на границе соприкосновения фаз, одна из которых твердое тело, а другие – несовмещающиеся жидкости или жидкость и газ. Смачиваемость твердых тел характеризуется углом смачиваемости, зависящем от равновесного состояния сил поверхностного натяжения.

При движении многокомпонентных смесей (газ, конденсат, нефть) через горные породы происходит их селективное осаждение в емкостном пространстве в результате целого ряда процессов. Смешанная смачиваемость является видом гетерогенной смачиваемости, когда гидрофобные поверхности образуют сквозные пути по крупным порам, а мелкие остаются гидрофильными.

Смачиваемость зависит от минерального состава внутрипоровой поверхности. На смачиваемость влияют уровень карбонатности и наличие глинистых минералов приводит к изменению смачиваемости. Для коллекторов, содержащих газоконденсат, частичная гидрофобизация поверхности вероятна вследствие их «высушивания», выпадения конденсата в пористой среде при изменении первоначальных термодинамических условий в залежи.

Степень адсорбции УВ зависит от типа глинистых минералов, дисперсности, состава тяжелых фракций нефти, уровня водонасыщенности, типа обменного катиона. Изначально глины в нормальных условиях гидрофильны. В результате адсорбции тяжелых фракций нефти, они гидрофобизуются. Это явление приводит к изменению смачиваемости и сопровождается снижением набухания, снижению адсорбции поверхностно-активных веществ при обработке пласта, способности к катионному обмену и сокращению площади поверхности [3].

Количественный анализ структуры, динамики и топологии сетки водородных связей в слоях водных растворов на поверхности нескольких типичных глинистых материалов, проведенный по результатам молекулярно-динамического моделирования с помощью силового поля, показывает, что одни и те же силоксановые поверхности глин могут проявлять как гидрофильные, так и гидрофобные свойства в зависимости от термодинамических параметров состояния системы и состава водного раствора [2].

В последние годы все большую роль стали играть методы ядерно-магнитного резонанса (ЯМР).

Основоположником открытия ядерно-магнитного резонанса является физик-экспериментатор, профессор Казанского университета Евгений Константинович Завойский. Дата - 12 июля 1944 года, считается официальной датой открытия метода электронного парамагнитного резонанса, как одного из важнейших событий в физике XX столетия.

С изобретением каротажных приборов ЯМК, стало возможным применение сложных методик измерения параметров, характеризующих емкостные свойства пород-коллекторов в условиях их естественного залегания. В России с 2011 года применение ЯМК в сложнопостроенных разрезах в интервалах предполагаемой продуктивности коллекторов является обязательным [1].

Возможности ядерно-магнитного резонанса для изучения горных пород связаны с его обширными физическими и петрофизическими основами, что позволяет получать объемный спектр информации о свойствах пород. ЯМК базируется на прямой идентификации водородосодержания поровых флюидов, находящихся непосредственно в поровом пространстве пород. Измеряемыми величинами являются амплитуда и характер изменения сигнала ядерной намагниченности порового флюида в породе.

С помощью каротажных зондов производят замеры поперечного времени релаксации T_2. Изменения T_2 (спин-спиновая релаксация) определяются внутренними взаимодействиями в спиновой системе (1).

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2v}} + \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2d}}, \qquad (1)$$

где T_2 – время спин-спиновой релаксации (цикл CPMG); T_{2v} – время релаксации флюида, которое соответствует времени релаксации, измеренному в большой емкости, влияние объема можно не учитывать; T_{2s} – время T_2 на поверхности зерен; T_{2d} – время T_2 релаксации порового флюида вызванной диффузией в градиентном магнитном поле.

Для измерения релаксационной кривой T_2 используется последовательность радиоимпульсов. После каждого 180^0 импульса возникает сигнал спин-эхо. Релаксационная кривая является огибающей амплитуд сигналов спин-эхо (рис. 1). Обработка данных заключается в преобразовании релаксационной кривой в дифференциальное, а затем и интегральное распределение пористости по времени релаксации T_2 с использованием специальных математических процедур.

Распределение пористости по временам релаксации характеризуют дифференциальный и интегральный спектры T_2, которые качественно отражают распределение пористости по размерам пор.

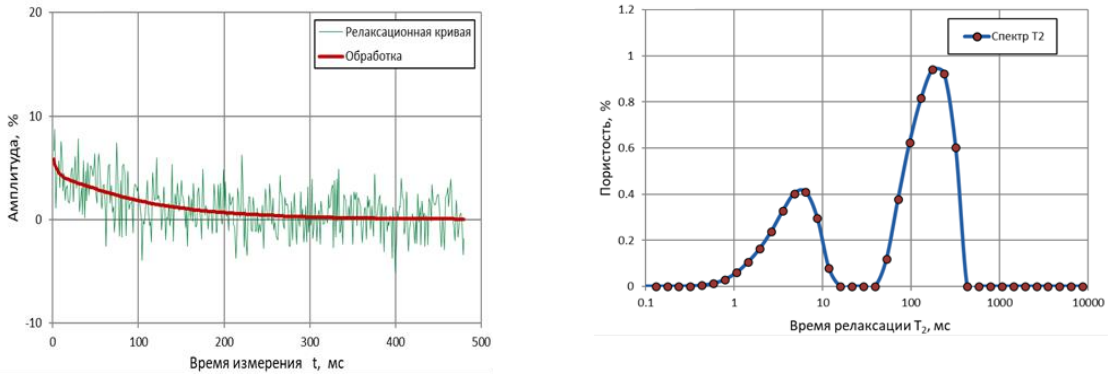


Рисунок 1. Преобразование релаксационной кривой в дифференциальное распределение пористости

Полученный сигнал спада ядерной намагниченности представлен сложным распределением T_2, который описывается уравнением Ф. Блоха (2),

$$\begin{aligned} echo(1) &= \phi_1 e^{\left[t(1)/T_{2,1}\right]} + \phi_2 e^{\left[t(1)/T_{2,2}\right]} + \phi_3 e^{\left[t(1)/T_{2,3}\right]} + \phi_m e^{\left[t(1)/T_{2,m}\right]} + noise \\ echo(2) &= \phi_1 e^{\left[t(2)/T_{2,1}\right]} + \phi_2 e^{\left[t(2)/T_{2,2}\right]} + \phi_3 e^{\left[t(2)/T_{2,3}\right]} + \phi_m e^{\left[t(2)/T_{2,m}\right]} + noise \\ echo(m) &= \phi_1 e^{\left[t(3)/T_{2,1}\right]} + \phi_2 e^{\left[t(3)/T_{2,2}\right]} + \phi_3 e^{\left[t(3)/T_{2,3}\right]} + \phi_m e^{\left[t(3)/T_{2,m}\right]} + noise \end{aligned} \quad (2)$$

где: $echo(m)$ – магнетизация, измеренная во время t; ϕ_m – собственная магнетизация i-ой компоненты релаксации; T_{2i} – постоянная спада i-ой компоненты поперечной релаксации.

C. Cao Minh ввел величину - параметр гидрофильности W, который меняется от 100% в случае гидрофильной породы до 0% в случае полной гидрофобизации. На рисунке 2 приводятся теоретические положения сигналов от воды и УВ, для трех основных групп вязкости нефтей и различных индексов смачиваемости. В гидрофильных порах пленка воды не позволяет УВ взаимодействовать с поверхностью зерен, поэтому нефтяной сигнал представлен, в основном, объемной составляющей (T_{2B}). В гидрофобных породах с W~0 ситуация будет прямо противоположной.

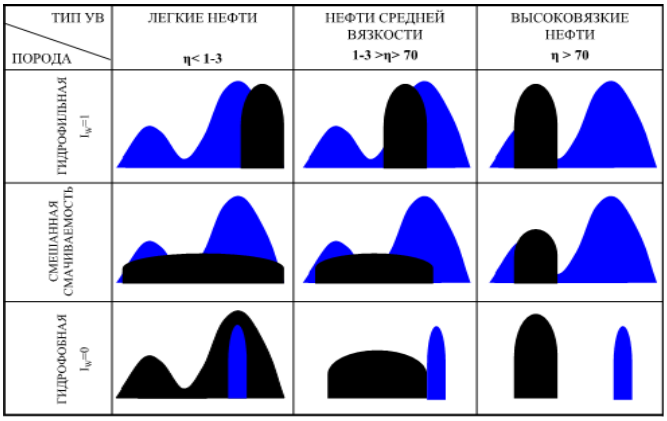


Рисунок 2. Положение сигналов T_2 воды (синее) и нефти (черное) в зависимости от вязкости УВ (η) и типа смачиваемости породы [4]

На рисунке 3 представлен фрагмент с результатами обработки и интерпретации ЯМК на примере одного из месторождений Западно-Сибирской НГП.

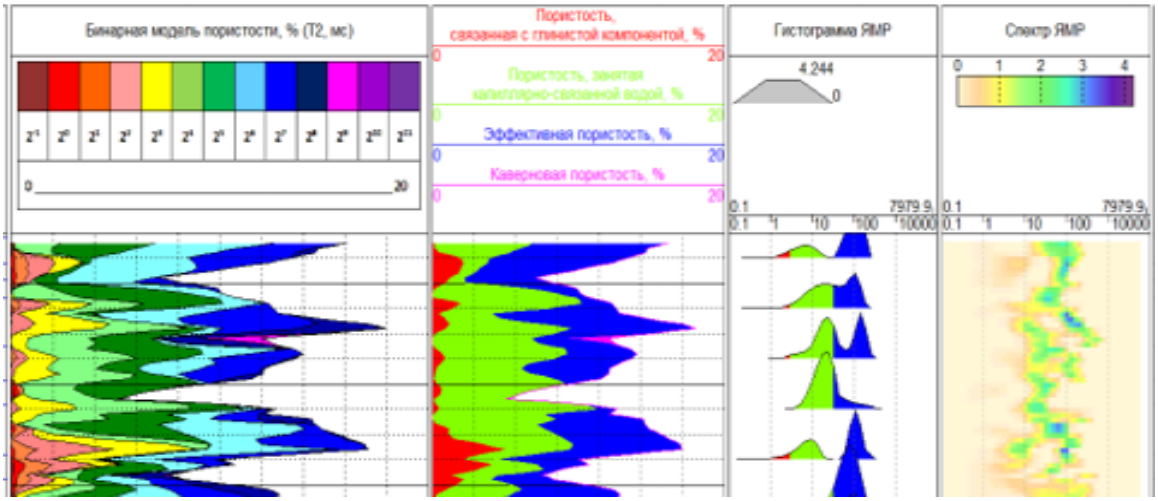


Рисунок 3. Фрагмент планшета с результатами обработки и интерпретации

В зависимости от количества, состава и состояния связанных вод находится молекулярная природа поверхности коллектора. Многие характеристики пласта зависят от первоначального распределения жидкостей в пласте. В результате моделирования выделены 4 типа глинистых минералов: смектит, гидрослюда, хлорит, каолинит, а также определено содержание капиллярно-связанной воды.

Выводы

Существует множество методов воздействия на нефтегазовый коллектор с целью получения притока УВС. Но какой бы метод не был применен, возникает задача по управлению смачиваемостью. Учет капиллярно-связанной воды и типизации глин по ЯМК позволяет охарактеризовать смачиваемость пород в условиях естественного залегания пород, что дает более реальные представления о свойствах коллектора при разработке нефтегазовых месторождений.

Библиография

1. ГОСТ «Р 53709-2009 Скважины нефтяные и газовые».
2. Калиничев, А. Г. Об условности понятия гидрофильности и гидрофобности поверхности глинистых материалов / А. Г. Калиничев // Физика водных растворов : Сборник трудов четвертой всероссийской конференции, Москва, 20–22 декабря 2021 года. – Москва: ООО «МЕСОЛ», 2021. – С. 30. – EDN ANGIPU.
3. Михайлов, Н. Н. Геологические факторы смачиваемости пород-коллекторов нефти и газа / Н. Н. Михайлов, К. А. Моторова, Л. С. Сечина // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2016. – № 3(51). – С. 80-90. – EDN VQZXCH.
4. Сынгаевский, П. Е. Глубоководные конусы выноса и турбидиты : Модели, циклостратиграфия и применение расширенного комплекса ГИС / П. Е. Сынгаевский, С. Ф. Хафизов, В. В. Шиманский. – Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2015. – 480 с. – ISBN 978-5-4344-0326-9. – EDN VMZVRD.

Оптимальный комплекс инженерно-геофизических исследований для уточнения инженерно-геологических условий при проектировании метро

Крячков И.В.* (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), pudov0100@mail.ru)
Бабуркин И.А. (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), ivan.mine999.0@mail.ru)

Аннотация

При проектировании сооружений необходимо выполнить инженерно-геофизические исследования с целью получения материалов комплексной оценки природных и техногенных условий территории в рамках инженерно-геологических изысканий, которые позволят разработать необходимую и достаточную проектную документации в соответствии с требованиями законодательства РФ и нормативно-технических документов.

Данный доклад описывает комплекс геофизических методов, который был проведен для уточнение инженерно-геологических условий на территории строительства метро.

Ключевые слова

Сейсморазведка, электротомография, инженерно-геофизические исследования, продольные волны, поперечные волны

Теория

Инженерно-геофизические исследования проводились для решения следующих задач: получения информации о скоростях продольных и поперечных волн в разрезе для оценки однородности грунтового массива; установления мощности, состава и условий залегания пород в разрезе; изучения рельефа подстилающих скальных пород; определения степени разрушенности пород; установления зон разуплотнения, дробления и тектонических нарушений, зон разуплотнения дисперсных покрывающих пород и других аномальных зон; уточнения инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки; определения коррозионной агрессивности грунтов; определения наличия блуждающих токов в земле.

В соответствие с поставленными задачами комплекс геофизических методов включает в себя электротомографию с поверхности земли, сейсморазведку МПВ-ОГП (поперечные волны (Y-Y) и продольные волны (Z-Z), измерение блуждающих токов [4].

Сейсморазведочные работы проводятся с целью получения информации о скоростях распространения в грунтах продольных и поперечных волн, а также для уточнения инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки.

Сейсморазведочные исследования проводились методом преломленных волн МПВ-ОГП на поперечных горизонтально-поляризованных (SH) и продольных (P) волнах. Регистрация колебаний производилась 2-мя положениями сейсмической косы длиной 46 м, общая протяженность одного сейсмозондирования (СЗ) равнялась 94 м. Шаг приёма составлял 2 метра. Пункты возбуждения упругих колебаний (ПВ) располагались через 2 метра.

На сейсмических разрезах по методу МПВ-ОГП выделяется единственная граница, приуроченная к кровле представленной суглинками с линзами водонасыщенного песка с вкл. до 10% гальки. Граница контрастная имеет местами наклон.

На глубинных разрезах, полученных по методу МОВ-ОГТ отчетливо выделяется граница в интервале глубин 43 - 47 м. При сопоставлении выделенной границы с и инженерно-геологическими данными можно сделать вывод, что данная граница приурочена к кровле

представленной сильновыветрелым известняком и щебнем известняка [2]. На разрезах по сейсморазведочным профилям СЗ-1 и СЗ-3 граница выделяется однозначно и контрастна по своей форме практически горизонтальна и прослеживается на всем протяжении профиля. Результаты, полученные по профилю СЗ-2 осложнены помехами, однако граница также прослеживается в указанном выше интервале глубин.

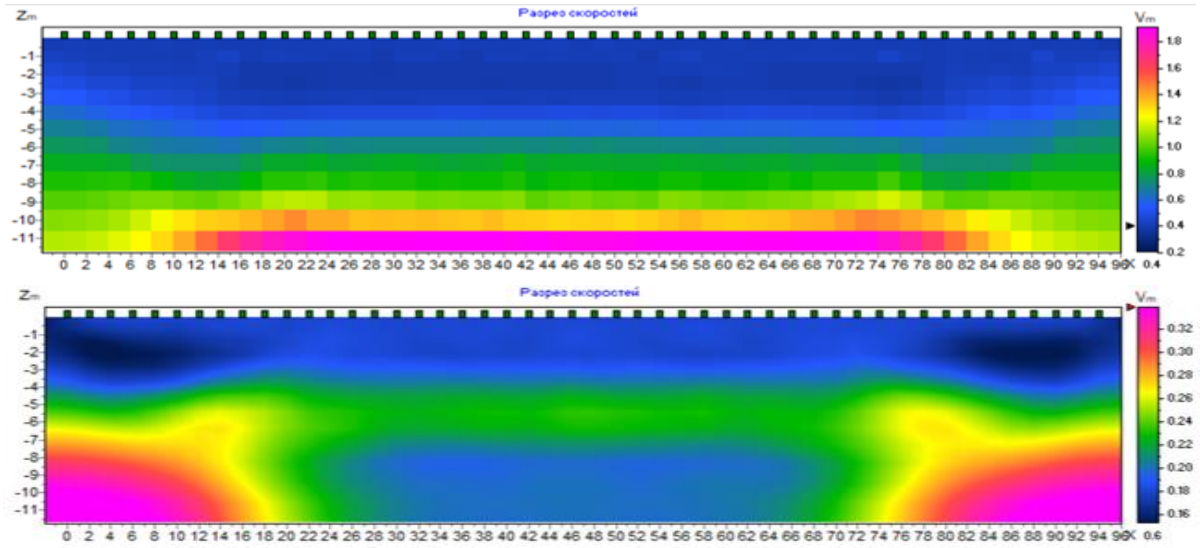


Рисунок 1. Сейсморазведочный профиль СЗ-1
сверху – продольные волны , снизу – поперечные волны

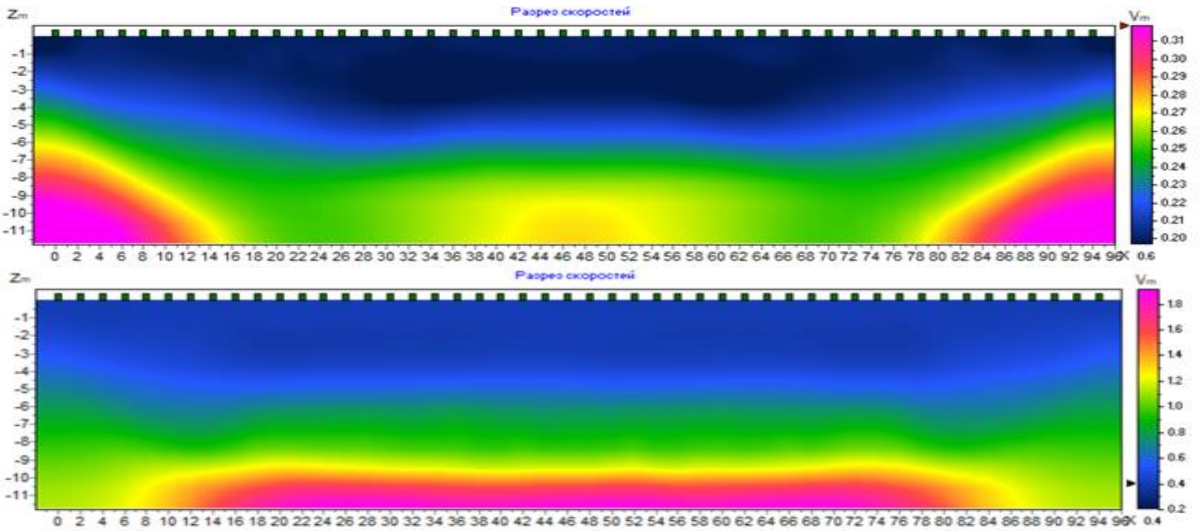
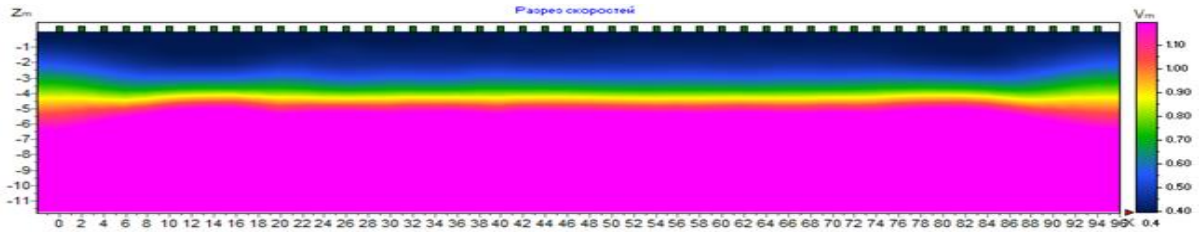


Рисунок 2. Сейсморазведочный профиль СЗ-2
сверху – продольные волны , снизу – поперечные волны



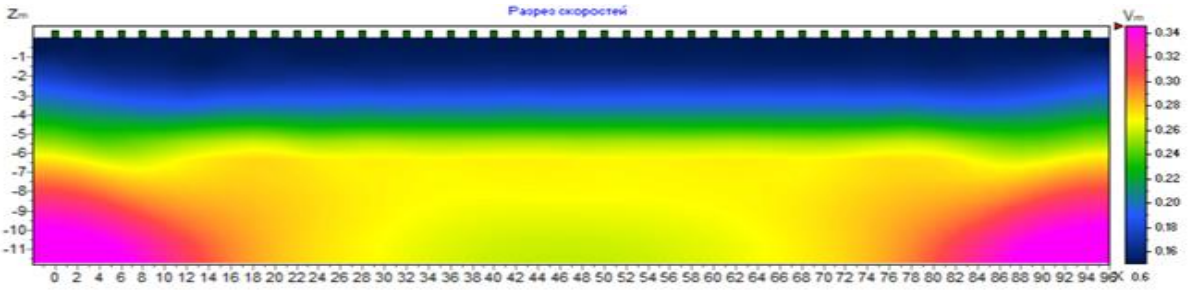


Рисунок 3. Сейсморазведочный профиль СЗ-3
сверху – продольные волны , снизу – поперечные волны

Электроразведочные работы проводились методом электротомографического зондирования (ЭТ). Электротомография является вариантом метода вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), широко использовавшегося при решении инженерных задач в течение нескольких десятилетий [1].

Обработка результатов работ методом электротомографии производилась в специализированной программе ZONDRES2D. Программа «ZONDRES2D» предназначена для 2.5-мерной интерпретации профильных данных электротомографии методом сопротивлений, вызванной поляризации и метода заряда. Удобный интерфейс и широкие возможности представления данных позволяют максимально эффективно решить поставленную геологическую задачу [3].

На разрезах удельного электрического сопротивления (рисунок 4-5) до глубины 20-25 м преобладают значения УЭС в интервале 30-80 Ом*м характерные для супесей и суглинков. Разрез УЭС в этом интервале глубин носит сложный характер с локальными аномалиями различной формы, что в первую очередь связано с неоднородностью грунтового массива.

Начиная с отметки 25 м и до 40-45 м наблюдается резкое снижение удельного электрического сопротивления до значений 15 Ом*м и ниже. Данные значения УЭС характерны для глин, что и подтверждают инженерно-геологические разрезы в указанном интервале глубин.

На глубине 40-45 м разрез характеризуется изменением УЭС до значений 100-300 Ом*м. По данным инженерно-геологических скважин в этом интервале расположена кровля известняков. Более низкие значений УЭС в этом интервале глубин характерны для наиболее выветрелых известняков. Форма границы не ровная с резкими перепадами это в первую очередь вызвано влиянием поверхностных условий на результаты измерений (строительный мусор, металлические конструкции, проведения сварочных работ и тд.).

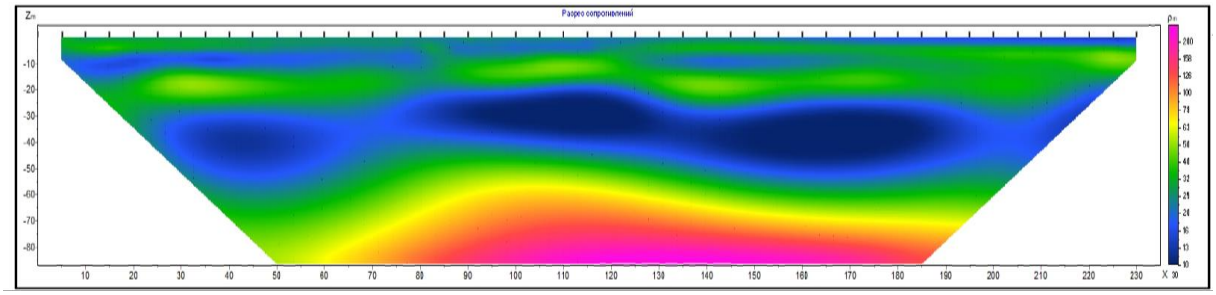


Рисунок 4. Разрез удельного электрического сопротивления Э-1

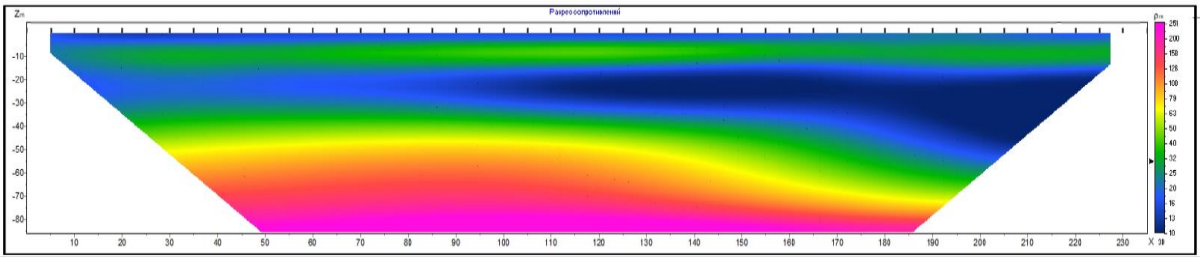


Рисунок 5. Разрез удельного электрического сопротивления Э-2

С целью определения опасности электро-коррозии подземных металлических сооружений проводилось измерение блуждающих токами (БТ). Метод заключается в измерении разности потенциалов ΔU между двумя электродами по двум взаимно перпендикулярным направлениям при разносе электродов на расстояние 100м. В ходе измерения блуждающих токов не было выявлено.

Выводы

На исследуемом участке был выполнен комплекс инженерно-геофизических исследований, который состоял из сейсморазведочных и электроразведочных работ. По результатам электроразведочных работ было определено удельное электрическое сопротивление грунтов, слагающих верхнюю часть разреза и состояние скальных грунтов. Результаты сейсморазведочных работ позволили проследить границу скальных грунтов и провести расчленение разреза. По результатам проведенных измерений блуждающих токов можно сделать вывод, что во всех точках наблюдения блуждающие токи отсутствуют.

Библиография

1. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д. Электротомография – высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе – 2004.
2. Грунтоведение, МГУ под редакцией В.П. Трофимова, Москва, 2005 г.
3. Инструкция ZondRes2D. 139 страниц – 2014.
4. Инструкция по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве, Правительство Москвы, Москомархитектура, Москва. 105 стр - 2004.

О геологической интерпретации вертикальных зон интенсивной сейсмической записи на временных разрезах МОГТ

Кузин А.М.* (Институт проблем нефти и газа РАН, amkouzin@ya.ru)

Аннотация

Дана корректная и аргументированная интерпретация зон вертикальной сейсмической записи. Описана история их открытия.

Изложены сейсмические, физические и геологические эффекты и явления, лежащие в основе возникновения таких вертикальных зон на временных разрезах МОГТ. Объяснена их возможная связь с нефтеносностью.

Ключевые слова

Отраженные волны, рассеянные волны, водонасыщенность геосреды

Источники финансирования

Статья написана в рамках выполнения государственного задания *Рег. номер Минобрнауки России - FMME-2025-0012.*

Теория

Зоны высокой интенсивности сейсмической записи (ЗВИСЗ) пронизывают осадочный чехол и кристаллический фундамент или только фундамент на значительную глубину (15-30 км). Особенно заметно они выделяются на фоне прозрачности сейсмической записи (рисунок 1).

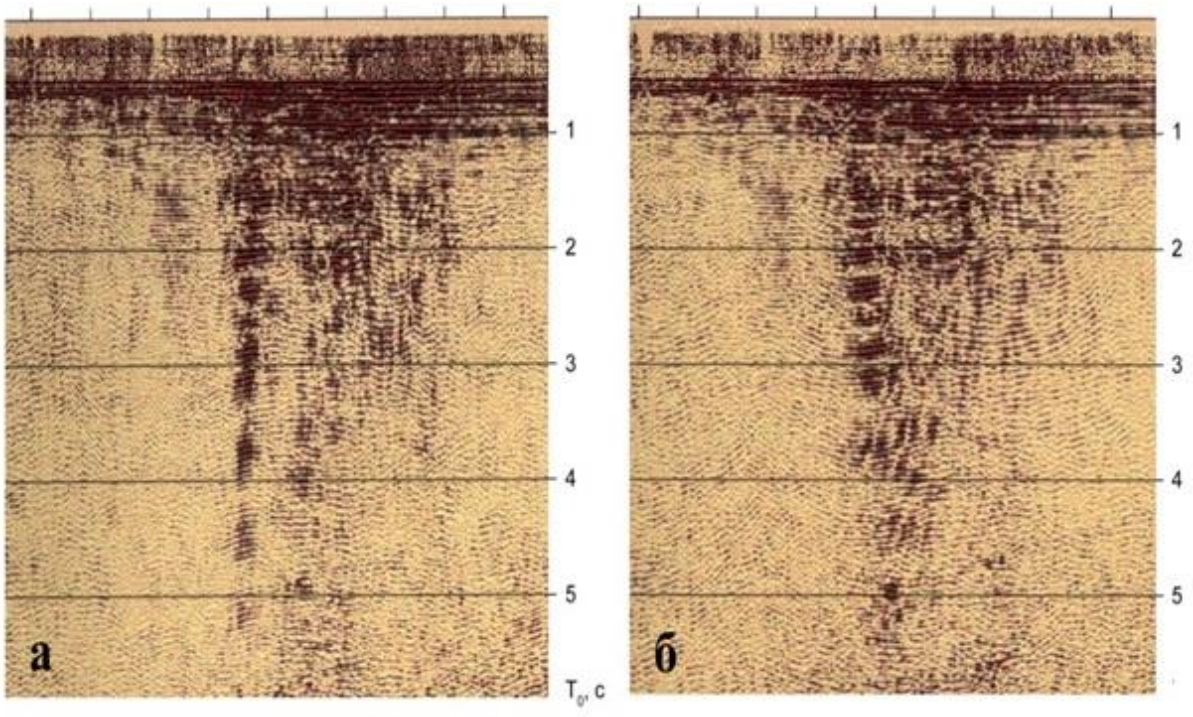


Рисунок 1. Вертикальная область интенсивной сейсмической записи.
Фрагмент временного разреза геотраверса МОГТ «Татсейс» (обработка ИГиРГИ).
а – временной разрез; б – мигрированный временной разрез.

В геологической интерпретации эти зоны стали определяться как «канализированные» системы перемещения флюидов из недр к земной поверхности или «вертикальные зоны деструкции». В публикациях ЗВИСЗ регулярно описываются как зоны вертикальной миграции глубинных флюидов, при этом обычно не приводится аргументации их возникновения - сейсмических эффектов и геологических (петрологических) явлений и процессов.

Ещё в 1973 году ЗВИСЗ были зарегистрированные при проведении сейсмоакустического профилирования и описаны в работе [1] под названием «звучащей записи». В качестве отличительных признаков такой записи были выделены следующие особенности: квазисинусоидальный характер записи, резко повышенная интенсивность, четкое разграничение начала и конца участков по простиранию профиля. ЗВИСЗ были прослежены на временном интервале от 100 до 450 мс после вступления прямой волны и на расстояниях по профилю от 50 до 500 м. В районе речных инженерно-геологических изысканий [1] было закартировано большое количество разрывных нарушений, ранее подобные динамические аномалии на Каспийском море в сводах структур с учетом данных бурения уверенно проинтерпретированы разрывными нарушениями.

Анализ волновой картины на рисунке 1 показывает следующее. Динамически интенсивная запись не нарушает структуру поля отраженных волн (рис.1а), сохраняется фазовая корреляция отражений. ЗВИСЗ можно сравнить с лучом фонарика, освещающего только фрагмент предмета. На мигрированном разрезе (рис. 1б) горизонтальные отражения не теряют горизонтальной формы, не только в кристаллическом фундаменте, но и в осадочном чехле. Следовательно, скорость суммирования и, соответственно, эффективная (средняя) скорость в этих зонах интенсивной записи не ниже, чем в соседних граничных областях разреза. Если бы скорость была ниже, на мигрированном разрезе появились бы выпуклые оси синфазности, отображающие антиклинальные структуры. Также следует отметить, что «вторжение глубинного флюида» за счет передачи вверх по разрезу аномально высокого давления должно было бы с большой вероятностью вызвать в осадочном чехле образование антиклинальных структур, которых на разрезе не наблюдается.

Появление ЗВИСЗ на временном разрезе является следствием резкого уменьшения эффекта рассеяния.. Экспериментальные данные по изучению рассеянных волн показывают, что жидкость существенно снижает эффект рассеяния в трещинно- пористой среде и способствует уменьшению затухания волны. Газ, наоборот, увеличивает [6]. Следовательно, для интенсивности сейсмической волны существенным фактором является фазовый состав флюида.

Геологическая природа образования ЗВИСЗ может быть объяснена инфильтрацией воды и её растворов в породы кристаллического фундамента. Доминирующим процессом при зеленокаменном метаморфизме пород основного состава является процесс хлоритизации и эпидотизации. Химическая реакция при этом процессе сопровождается значительным отрицательным объемным эффектом (-12 %), который способствует притоку воды из внешнего источника. Этот процесс закачки воды из внешнего источника был назван метаморфогенной инфильтрацией (М-инфильтрацией) [7]. Наиболее предпочтительными породами для возникновения процесса М-инфильтрации являются базиты. М-инфильтрация флюидов отличается от других механизмов движения флюидов тем, что для нее характерен повышенный вертикальный градиент флюидного давления, который возникает за счет декомпрессии порового пространства в области разгрузки потока. Поэтому даже при низкой проницаемости среды М-инфильтрация способна обеспечить проникновение водных растворов из осадочного чехла в глубокие горизонты земной коры [7]. При гидратации кислых и ультраосновных пород условия М-инфильтрации менее благоприятны: Их гидратация сопровождается (/приводит к) образованием в основном рыхлоупакованных минералов-гидратов – цеолитов, филлосиликатов и др., которые быстро залечивают пути миграции флюида. Вторичные преобразования таких пород нуждаются во внешней механической стимуляции или растворении матрикса

поступающим извне флюидом. Другие возможные механизмы инфильтрации перечислены и охарактеризованы в работах [3, 4].

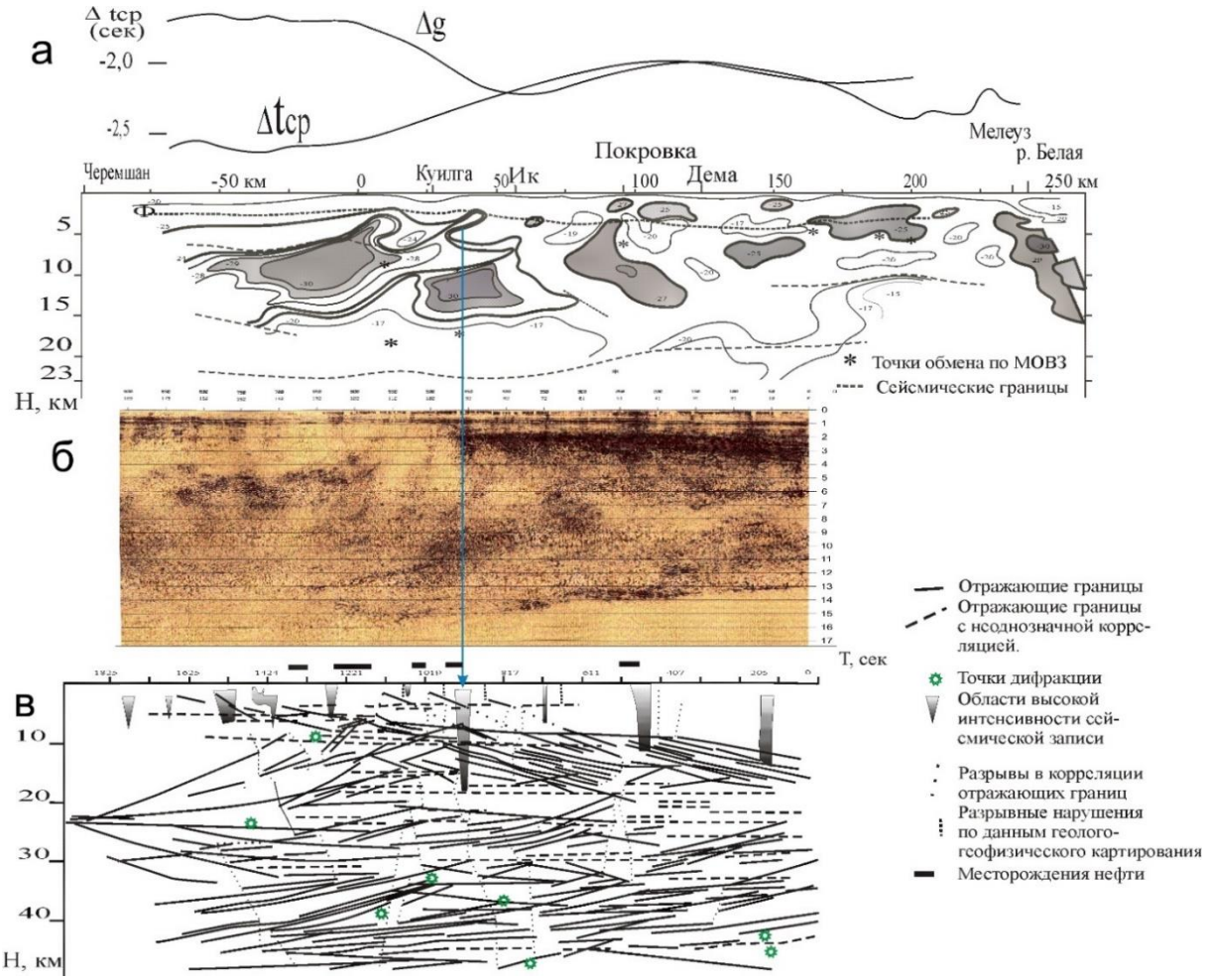


Рисунок 2. Комплексная интерпретация данных ГСЗ и МОГТ:
а – глубинный разрез по профилю ГСЗ «Черемшан – Мелеуз» временных аномалий Δt(R) первых коровых Р-волн; б – фрагмент временного разреза по геотраверсу «Татсейс»; в – глубинный разрез по этому фрагменту[3]

В качестве подтверждения природы ЗВИСЗ служат результаты математического моделирования [2], которое показало, что в вертикальной области, лежащей под месторождением, поровое давление выше литостатического. По данным расчетов зона аномально низкого литостатического давления уходит на глубину порядка 18 км. В таких условиях системы вертикальных трещин, заполненных водой, могут оставаться открытыми до глубин перехода от упругих деформаций к пластичным [2].

На рисунке 2 можно увидеть наглядное подтверждение предложенной интерпретации. Вертикальная зона интенсивной записи (рис.2б) на временном разрезе пространственно совпадает с «отростком» высокоскоростной аномалией Δt(R) и по глубине заканчивается на её подошве (H ≈ 20 км). Аномалия Δt(R) — это разница между наблюденным и теоретическим годографами, отнесенная к середине расстояния между точкой возбуждения и точкой регистрации. Совпадение ЗВИСЗ и области высокой скорости (по значениям Δt(R)) подтверждает возможность присутствия воды, в прочных, жестких структурах сохранение в ней флюида.

Только прочные породы могут обеспечить сохранность каналов миграции флюида за счет свой жесткости. Кроме того, в интрузивных телах основного состава вода снижает прочность основных пород сильнее, чем кислых, что благоприятно для образования пор и трещин в этих массивах.

Аналогичный вывод об основном составе пород в ЗВИСЗ был получен при изучении глубинного строения Астраханского свода. Отмечена корреляция между высотой поднятий ЗВИСЗ и положительными гравитационными аномалиями трансформант поля силы тяжести в редукции Буге (К = 0,7–0,9) [5].

Выводы

Вертикальные зоны интенсивной сейсмической записи являются зонами инфильтрации воды в породы консолидированной коры по разрывным нарушениям, представленным в основном зонами мелкой трещиноватости. Присутствие подобных зон в разрезе может рассматриваться как следствие растяжения земной коры. С месторождениями нефти зоны интенсивной сейсмической записи связаны только как часть конвективной гидротермальной системы и не могут рассматриваться как прямой поисковый признак.

Библиография

1. Азими Ш.А., Калинин А.В., Калинин В.В., Ковальская И.Я., Пивоваров Б.Л. Результаты акустического профилирования в среднем течении реки Оби // Разведочная геофизика. 1973. М.: Недра. Вып. 57. С. 74–80.

2. Гарагаш И.А., Николаевский В.Н., Степанова Г.С. Миграция и критерии аккумуляции углеводородов в системе тектонических разломов // Доклады РАН. 1992. Т. 324, № 6. С. 1169–1174.

3. Кузин А.М. Пространственно-фазовая локализация месторождений углеводородов и отображение конвергентности процессов флюидизации в геологической среде по сейсмическим данным / Сборник трудов «Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений. К 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина. ГЕОС, Москва, 2011. С. 276-301.

4. Кузин А.М. О некоторых общих свойствах флюида в геологических процессах, явлениях и закономерностях (к обоснованию единой системы геолого-геофизического изучения недр). Часть 2 // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. Электрон. науч. журн. 2015$_a$. Вып. 2(12). – Режим доступа: http://www.oilgasjournal.ru (Дата обращения 21.02.2024).

5. Пыхалов В.В., Рихтер Я.А. Аномальная земная кора Астраханского свода // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Сер. Науки о Земле. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 71–80.

6. Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г. Экспериментальное изучение рассеивания упругих волн на шероховатой границе раздела // Геология и геофизика. 1993. № 2. С. 103–111

7. Яковлев Л.Е. «Инфильтрация воды в базальтовый слой земной коры». (Тр. ГИН РАН; вып. 497), М.: «Наука», 1999, 200 с.

Оценка уклонения отвесной линии (УОЛ) от карьера Мурунтау

Лобанов А.М. (МГРИ, lobanovam@mgri.ru),*
Быков А.А. (МГРИ, artem_bykov_2003@list.ru),
Матюшенко А.А. (МГРИ, matiushenkoaa@mgri.ru)

Аннотация

Техногенные объекты, такие как карьеры, водохранилища, тоннели и другие, связанные с перемещениями больших масс горных пород, вызывают изменения силы тяжести и создают аномальные уклонения отвесных линий (УОЛ). В работе описана методика и результаты вычисления УОЛ на примере карьера Мурунтау. Полученные максимальные значения УОЛ оцениваются в диапазоне 9 – 12” , которые необходимо учитывать при геодезических и маркшейдерских работах.

Ключевые слова

Мурунтау, гравиметрия, нормальное поле силы тяжести, горизонтальная составляющая силы тяжести, референц-эллипсоид

Теория

Угол между отвесной линией и нормалью к общему земному эллипсоиду называется абсолютным уклонением отвесной линии. В высшей геодезии различают астрономо-геодезическое уклонение отвеса и гравиметрическое уклонение отвеса. Астрономо-геодезическим уклонением отвеса называется угол между отвесной линией и нормалью к поверхности референц-эллипсоида, а гравиметрическим УОЛ – угол между направлением нормального значения силы тяжести (вычисленной, например, по таблицам Р.Б. Бурдюкова [1]) и реальным направлением линии отвеса (направлением вектора силы тяжести в точке определения УОЛ).

Основным методом в настоящее время вычисления УОЛ остается гравиметрический метод. При этом для определения УОЛ в отдельных точках необходимо знать пространственное распределение поля всей Земли. В РФ практически все карты гравитационного поля в редукциях Буге или Фая были вычислены относительно референц-эллипсоида для которого были вычислены нормальные значения силы тяжести и представлены в таблицах Р.Б. Бурдюкова. Реальные измерения УОЛ сопряжены с ночными работами, требуется ясный небосвод и характеризуются низкой оперативностью. Также необходимо иметь дорогостоящую цифровую аппаратуру. Тем не менее, вопрос измерений УОЛ от различных геологических и техногенных объектов успешно развивается как за рубежом, так и в России [4,6,7,8]. В РФ лидером таких исследования является ФГУП ВНИИФТРИ, сотрудники которого разработали современную цифровую аппаратуру для измерения УОЛ, быстродействующие алгоритмы обработки измерений и успешно проводят геодезические исследования от геологических структур типа Московского грабена [6]. Успешный опыт работы этой организации по созданию аппаратуры и ее применения для конкретных задач, стимулирует развитие технологий измерений УОЛ, поиск новых способов оценки УОЛ от объектов, а также разработке новых приемов оценки УОЛ с применением хорошо разработанных в настоящее время в гравиметрии компьютерных программ решения прямых задач гравиметрии. Кафедра геофизики МГРИ имеет большой опыт в решении прикладных геологических задач и специализируется в подготовке высококвалифицированных инженеров в этой области. Имеющиеся на кафедре специалисты по гравиметрии и программированию предложили аналитический метод оценки аномальных значений УОЛ от различных геологических и техногенных объектов. К разработке представленной методики были привлечены студенты и молодые преподаватели кафедры.

Переход от гравиметрического уклонения отвеса к астрономо-геодезическому отклонению отвеса определяется формулой:

$$\xi_{а\text{-}г} = \xi_{гр} + 0{,}171'' \sin(2B) H^{\gamma}_{км}$$

где: $\xi_{а\text{-}г}$ - астрономо-геодезическое уклонение отвеса; $\xi_{гр}$ - гравиметрическое уклонение отвеса; B - геодезическая широта; $H^{\gamma}_{км}$ – нормальная высота в км.

Фактически разность между $\xi_{а\text{-}г}$ и $\xi_{гр}$ вызвана планетарными вариациями (ондуляциями) геоида, т.е. неравномерным распределением масс в глубинных частях Земли. В настоящее время тема мониторинга поверхности геоида является актуальной задачей для астрономов, климатологов, тектонистов и геодезистов. Учет влияния высот геоида от референц-эллипсоида учитывается при составлении мировых гравиметрических карт. Учет этих высот осуществляется путем введения поправки Брунса в аномалии силы тяжести. Амплитуды ондуляций геоида не превышают ± 100м, а по площади они занимают миллионы кв. км, поэтому эту разность можно игнорировать при решении прикладных задач. При решении прикладных геологических задач по данным гравиметрических съемок, практически не имеет значение какие аномалии использовать, чистые (с поправкой Брунса), или смешанные, без поправки Брунса. Поэтому можно принять гравиметрические УОЛ и реально измеряемые астрономо-геодезические УОЛ равными. Однако, при приведении нормальных значений силы тяжести к физической поверхности необходимо учесть, что вычисленные нормальные значения силы тяжести относятся к поверхности референц-эллипсоида, а реальные значения силы тяжести (и обычно вычисляемые) относятся к реальной физической поверхности вычислений УОЛ. Поэтому нормальные значения силы тяжести следует приводить к высотам реальной физической поверхности пунктов вычислений (вводя поправку Фая в значения нормального поля силы тяжести). Неравномерное распределение масс в Земле создают планетарные УОЛ, для вычисления которых необходимо иметь карты аномалий силы тяжести в редукции Фая и карты высот на большие территории. Технологии вычисления УОЛ больших территорий хорошо разработаны и описаны [2, 5,7].

В тоже время, плотностные локальные неоднородности в верхней части земной коры также создают УОЛ, которые необходимо учитывать при производстве геодезических и картографических работах. В последнее время, интерес к измерениям УОЛ от геологических и техногенных объектов значительно возрос [4,6,8]. Аномалии УОЛ, связанные с локальными геологическими и техногенными объектами на Земле невелики, они варьируют в пределах ± 8”, но интерес к этим аномалиям растет. Местные значения аномалий УОЛ могут превышать эти пределы. Так, аномалии УОЛ от Московского грабена измеренные сотрудниками ВНИИФТРИ достигают 12 секунд [6]. Поэтому разработка быстрых и удобных способов оценки УОЛ по данным результатов моделирования гравиметрических аномалий от геологических и техногенных объектов, является актуальной темой.

В представленной работе нами предложен способ оценки УОЛ на основании решения прямой задачи гравиразведки с вычислением горизонтальной составляющей гравитационной аномалии по компьютерной программе Gravmodel для модели золоторудного карьера Мурунтау. Современные геометрические параметры карьера Мурунтау взяты нами из информационного интернет-ресурса.

Тема карьера Мурунтау имеет прямое отношение к МГРИ. Место объекта и его проектные технические и эксплуатационные характеристики были разработаны с участием ученых МГРИ более 60 лет тому назад. Также, в начале 2000-х годов профессорско-преподавательский состав МГРИ активно участвовал в обучении инженерных кадров для Навоийского комбината, который и занимается эксплуатацией этого карьера.

Гравиметрическое уклонение отвеса от геологических структур, равно как и от техногенных объектов, создающих аномалии силы тяжести определяется тангенсом угла между реальной горизонтальной составляющей аномалии силы тяжести V_x и направлением нормального вектора силы тяжести в данной точке γ.

$$tgU_г = g_x / \gamma$$

где g_x - горизонтальная составляющая силы притяжения от модели геологического объекта.

Физико-геологическая модель карьера Мурунтау по меридиональному профилю представлена на рисунке 1. Линейные размеры взяты нами из интернет-ресурса, а дефект плотности -2,67 г/см^3. Вертикальная и горизонтальная составляющие силы тяжести вычислялись на профиле, проходящем через центр карьера, длиной 8 км с шагом вычисления 100 м. Графики Δg_x и Δg_z показаны над моделью карьера. Далее, с помощью таблиц Бурдюкова Р.Б. [1], нормальных значений силы тяжести для земного эллипсоида, используемого в настоящее время в гравиметрии, и по данным географической широты и долготы точек профиля, были определены значения γ. После введения поправки за высоту физической поверхности профиля в нормальные значения γ, были вычислены тангенсы углов как отношения g_x/γ, а затем сами значения УОЛ в секундах (показаны точками на кривой g_x). Масштаб для значений УОЛ справа в секундах. Приведенные результаты оценки УОЛ неоднократно проверялись. Вычисления УОЛ проводились только в плоскости меридиана, в плоскости первого вертикала УОЛ не оценивалось. Вычисления гравитационного поля проводилось по двумерной модели, учитывая вытянутую форму в широтном направлении плана самого карьера. Для более точных оценок УОЛ следует вычислять составляющие гравитационного поля для более адекватной модели.

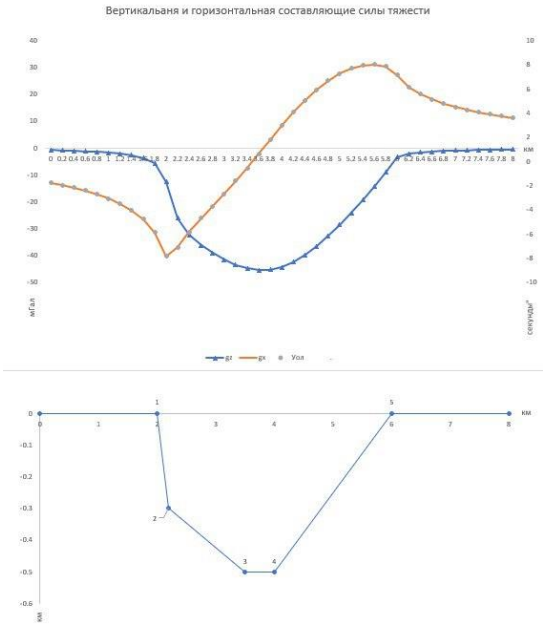


Рисунок 1. Схема разреза карьера Мурунтау с графиками g_x, g_z и ξ

Аналогичные вычисления УОЛ проводились нами также для модели Московской аттракции с целью сравнения результатов, полученных реальными вычислениями и измерениями ФГУП ВНИИФТРИ [6] и вычислениями по нашей методике. Результаты оказались в пределах допустимых отклонений.

Выводы

Предложенный способ быстрой оценки УОЛ от модели техногенного объекта представляет собой конвергенцию технологий астрономии, геодезии и гравиметрии. Вычисленные значения УОЛ для модели карьера Мурунтау оказались равными ± 10” , что по нашему мнению представляет интерес для высокоточных геодезических и маркшейдерских работ. Вычисления УОЛ сделаны только в меридиональной плоскости, в плоскости первого вертикала вычисления УОЛ не проводились, но они должны быть более интенсивны, учитывая вытянутость карьера в широтном направлении. Реальные значения УОЛ возможно получить лишь практическими, астрометрическими измерениями, которые могут в настоящее время осуществить сотрудники ФГУП ВНИИФТРИ. Выполненные исследования являются обоснованием для проектирования астрометрических работ на настоящем карьере.

Библиография

1. Бурдюков Р.Б. Таблицы нормальных значений силы тяжести. М. Гостоптехиздат 1961г.,114с.
2. Гравиметрия. Учеб.-метод. Комплекс для студентов специальности 1-56 0102 «Геодезия» под редакцией Г.А.Шароглазовой. Новополоцк, ПГУ, 2010.- 196с.
3. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. Наука, М. 1976, с. 264-270.
4. Кистерский А.П., Лапаева В.В., Нефедьев Ю.А., Кутленков М.В. Расчет малых величин уклонений отвесной линии, вызванных техногенными причинами. Журнал Георесурсы 2(34) 2010.
5. Конешов В.Н., Степанова И.О. «Использование метода S- аппроксимаций для определения уклонений отвесной линии и высот геоида». Гироскопия и навигация. Том 26, № 4 (103), 2018.
6. Кузьмин В.И. Гравиметрия. Новосибирск, СГГА, 2011, с. 15-20.
7. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Юзефович.П.А. Измерения уклонений отвеса на известной московской аттракции с помощью цифрового астроизмерителя. Астрономический журнал 2020, том 97, № 10, с. 873-880.
8. BURACHEK, V.; KRYACHEK, S.; et al.: Astrogeodetic Methodologie Evaluation for vertical Deflection in Oil and Gas Exploration: a Case Study in Ukrainian Deposit, Geod. List 2023, 4, 335-356.

Исследование взаимосвязи магматизма и денудационных процессов методом численного моделирования

Мягков Д.С. (ИФЗ РАН, dsm@ifz.ru)*

Аннотация

В работе рассматривается влияние аномальных напряжений горизонтального сжатия в Земной коре на режим распространения интрузий (даек, силлов, крупных магмоподводящих разломов). Тектонические и эрозионно-аккумулятивные процессы способны создать контрастное напряжённо-деформированное состояние в верхней коре с генерацией надлитостатических напряжений на уровне первых десятков МПа. Интрузии, при проникновении, также создают дополнительную нагрузку. Методом численного моделирования, на примере структур Норильского рудного узла, показано, что при формировании интрузий, геометрия распространения последних может контролируется аномальными напряжениями, генерация которых связана с экзогенными процессами.

Ключевые слова

Численное моделирование, геодинамика, магматизм, напряжённое состояние

Источники финансирования

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Теория

Важный механизм, способный объяснить генезис напряжений внутриконтинентальных орогенов, а также подвижных поясов вообще – механизм нагружения пород коры при формировании интрузий. Магматический расплав, проникая по каналам и подводящим разломам должен иметь минимальный уровень давления, превышающий величину минимального нормального горизонтального напряжения. При выполнения этого условия возможно продвижение интрузии в форме дайки с плоскостью перпендикулярной оси минимального горизонтального сжатия, но при этом превышение давления над минимальным горизонтальным сжатием, строго говоря, ограничены только параметрами очага и может достигать весьма существенных значений, порядка уровня тектонических напряжений и выше.

Тектонофизический анализ соотношения подробно представлен в статье [1], где показано, что уровень напряжений в теле интрузии в первую очередь зависит от соотношения давления в очаге с литостатическим давлением в окружающих породах и плотности магмы. При меньшей, чем во вмещающих породах, плотности магмы даже незначительное превышение давления в очаге (которое, в действительности, может значительно превышать литостатику) способно сформировать транскоровую систему интрузий, достигающее поверхности с последующим вулканизмом. Величина давления в расплаве в этом случае в приповерхностной зане может достигать первых десятков МПа.

В данной работе изучается влияние аномальных коровых напряжений на режим развития интрузий. Один из механизмов генерации аномальных напряжений - денудационный. Он рассмотрен в работе [2].

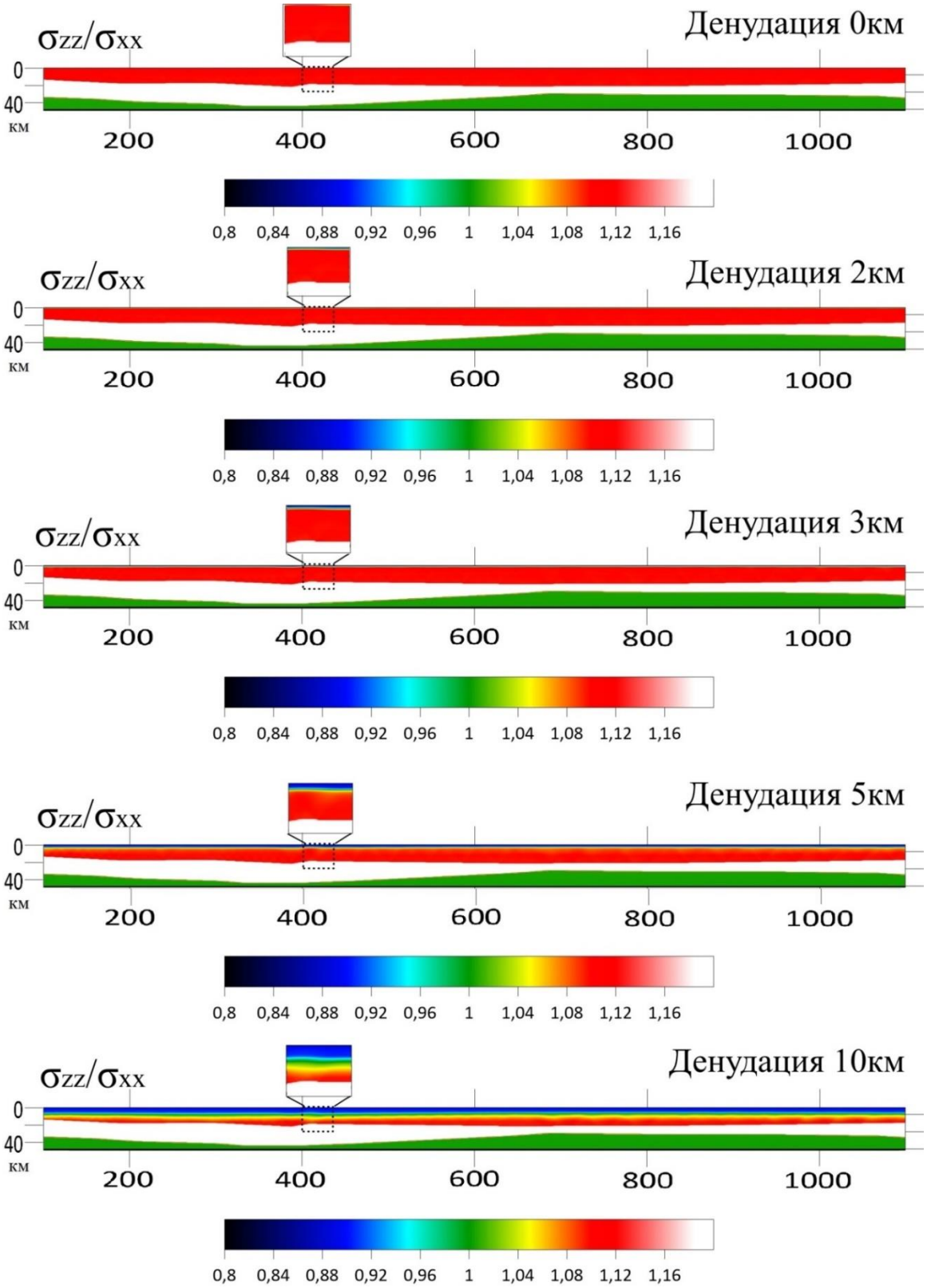


Рисунок 1. Результаты моделирования формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия для континентальной коры восточной Фенноскандии по меридиональному профилю для различной амплитуды денудации. Отношение вертикального и горизонтального нормального напряжения в модели для денудационного этапа нагрузки

На рис. 1 показан результат численного моделирования формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия за счёт экзогенных процессов. В модели коры Восточной Фенноскандии (вдоль профиля Рыбачий-Видлица, см. [3]) задаётся денудация поверхности с различной амплитудой – до 10 км. Показано ярко выраженное преобладание аномальных σ_{xx} напряжений в верхней части коры в области сноса геоматериала при достаточной амплитуде денудации (в среднем от 0.5 км). Это доказывает, что данный механизм генерации напряжений должен рассматриваться как один из ведущих, ответственных за формирования напряжённо-деформированного состояния в континентальной коре в геодинамических моделях, наряду с "классическими» эндогенными механизмами.

Рассматриваемые задачи решаются методом численного моделирования. В численной модели для расчёта применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Стефановым для применения в геомеханике [4]. Моделирование проводилось в лагранжевых координатах, тип механической задачи – плоская деформация. Тела модели рассматриваются как упругопластические, учитываются дилатансионные процессы. В отличие от классического подхода Уилкинса в данном подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского.

На примере численных моделей показано, что наличие области преобладания горизонтальных нормальных напряжений над вертикальными является достаточным условием для перехода системы даек к силлам. В качестве конкретного случая, рассматривается геодинамическая модель эволюции коры Норильского района при формировании норильского рудного узла (также см. [5]). Серия численных моделей показала, что эрозия Хантайско-Рыбнинского вала, вызвавшая денудацию не менее 3 км, привела к перестройке напряжённого состояния и формированию зоны преобладания горизонтального сжатия в верхних 3-5 км коры, что привело к переходу системы даек к силлам. Однако после достижения краёв области преобладания горизонтального сжатия, силл сформировал переход к новой системе даек, которые после излияния дали дополнительную вертикальную нагрузку, сформировав поле напряжения, в котором стало возможно возникновение вторичных интрузивных структур, сформировавших рудоносные тела Норильского рудного узла.

Выводы

Методом численного моделирования показана взаимосвязь геометрии комплекса даек и силлов в области развития интрузивного магматизма и напряжённого состояния, связанного с денудационными, тектоническими и самими магматическими процессами. Показано, что генерация аномальных напряжений горизонтального сжатия за счёт экзогенных процессов задаёт уровень перехода системы даек в силлы или иные латерально протяжённые интрузивные тела. Рассмотрено, на примере возможной модели формирования Норильского рудного узла, как последовательная смена типа напряжённого состояния на разных глубинных уровнях коры позволяет сформировать систему разновозрастных интрузий различного типа.

Библиография

1. Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник Камчатской региональной ассоциации "Учебно-научный центр". Серия: Науки о Земле. Т.: 4, №: 56. 2022. С. 41-58.

2. Ребецкий Ю.Л, Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины, Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 4. С. 263–280.

3. Shevtsov A. N., Hannibal A. E., Korotkova T. G., and Skorokhodov A. A. Results of 2d Inversion of Data from Deep Electromagnetic Probing With Industrial Power Lines (Fenics Experiment) // Seismic Instruments, 2022, Vol. 58, Suppl. 2, pp. S306–S314.

4. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8, № 3. С. 129–142.

5. Ребецкий Ю.Л., Войтенко В.Н., Мягков Д.С. Тектонофизика магматизма Норильского района // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2025. Материалы LVI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2025.С. 482–487.

Определение стратегии двумерной инверсии магнитотеллурических данных регионального профиля в Енисей-Хатангском прогибе

Наумова А.Н.* (Санкт-Петербургский горный университет, Naumova_AN@pers.spmi.ru), Давыдкина Т.В. (Санкт-Петербургский горный университет, Davydkina_TV@pers.spmi.ru), Янкилевич А.А. (Санкт-Петербургский горный университет, Yankilevich_AA@pers.spmi.ru)

Аннотация

Целью работы являлось определение стратегии двумерной инверсии для построения глубинного геоэлектрического разреза по магнитотеллурическим данным вдоль регионального профиля в Енисей-Хатангском прогибе. Определена размерность изучаемой среды, подобрано значение сопротивления однородного полупространства стартовой модели для двумерной инверсии, выбрана стратегия инверсии и построен геоэлектрический разрез до глубины 50 км. На разрезе выделены два структурных этажа – проводящий осадочный чехол и консолидированный фундамент повышенного сопротивления, в центральной части профиля выявлена аномалия повышенной электропроводности фундамента.

Ключевые слова

Магнитотеллурические методы, двумерная инверсия, однородное полупространство, Енисей-Хатангский прогиб

Источники финансирования

Исследование выполнено в рамках Государственного задания FSRW-2023-0002.

Теория

Данные были получены в 2015-2016 гг. при проведении магнитотеллурических работ вдоль регионального профиля, расположенного перпендикулярно простиранию Енисей-Хатангского прогиба (ЕХП). Переобработка выполнялась с помощью современного, отечественного программного комплекса Epi-Kit, в котором реализованы различные алгоритмы обработки данных, позволяющих эффективно бороться с помехами [2].

При выборе главных направлений тензора импеданса учитывалась геологическая информация и использовался метод фазового тензора - кривые были повернуты вкрест и вдоль простирания геоэлектрических структур на угол 37 градусов. В программе MT-Corrector выполнено удаление зашумленных участков передаточных функций с помощью амплитудно-фазовой коррекции и сплайн-аппроксимация. В результате последующей редакции получены магнитотеллурические кривые в диапазоне частот 0,001 – 317 Гц.

Коррекция статического сдвига и сглаживание данных проводилось в программе MTS-Prof (ООО «Северо-Запад») с применением экспоненциального низкочастотного фильтра.

Расчет эффективной глубины проникновения поля показал возможность получения достоверных геоэлектрических разрезов до глубины 50 км (0).

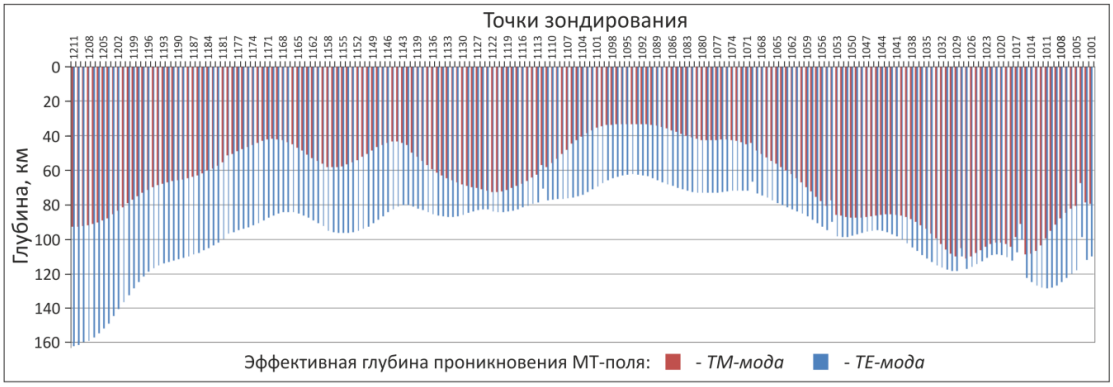


Рисунок 1. Глубина проникновения поля [составлено авторами]

Для обоснования проведения двумерной инверсии была определена размерность геоэлектрической среды с помощью программного обеспечения, разрабатываемого в Санкт-Петербургском горном университете. Рассчитывались параметры неоднородности N, Skews и Skewb, согласно предложенному М.Н. Бердичевским магнитотеллурическому тесту [1] и построены полярные диаграммы тензора импеданса, фазового тензора.

Двумерная инверсия проводилась в программе MT-2D Tools (ООО «Северо-Запад»), в которой реализован поэтапный подход, основанный на последовательности нескольких процессов инверсии, которые состоят из ряда итераций. Использовано прямоугольное разбиение сетки (по вертикали и горизонтали). Параметры вертикального разбиения определены с помощью расчета глубины проникновения поля на различных периодах. Толщина первой ячейки 80 метров, далее толщина ячеек увеличивались с глубиной в геометрической прогрессии с различными коэффициентами; глубина до нижней границы моделирования около 905 км. При выборе параметров горизонтального разбиения использовалась формула эффективной длины волны. Расстояние от крайних пикетов на профиле до границ модели 800 км, а максимальная ширина ячейки в пределах профиля - 800 м.

Для двумерной инверсии выбор стартовой модели играет решающую роль. Неправильное определение модели может привести к ложному результату, а в некоторых случаях и к невозможности решения обратной задачи. Поэтому определение оптимальной стартовой модели крайне необходимо для получения более корректного решения. При определении были опробованы различные варианты: однородное полупространство (ОПП), результат одномерной инверсии и слоистая модель, заданная с учетом априорной информации [3]. Инверсия с ОПП показала более корректный результат.

Комплексный анализ скорости изменения ошибки подбора на старте инверсии и полученного геоэлектрического разреза позволяет определить начальное удельное электрическое сопротивление ОПП (УЭС ОПП). При оптимальном выборе УЭС ОПП уменьшается время расчета инверсии за счет снижения количества итераций, необходимых для достижения заданной ошибки подбора [4].

Стратегия инверсии зависит от априорной информации, поскольку продольные и поперечные кривые удельного электрического сопротивления имеют различную устойчивость к влиянию приповерхностных искажений и по-разному аппроксимируют глубинные структуры. Инверсия продольных кривых дает более грубую оценку, при этом она более устойчива к влиянию приповерхностных неоднородностей. Поперечные кривые сильно подвержены статическим искажениям, однако при наличии проводящих разломов могут быть более информативны [1].

Для исследуемого профиля придерживались стратегии инверсии, состоящей из пяти этапов (0).

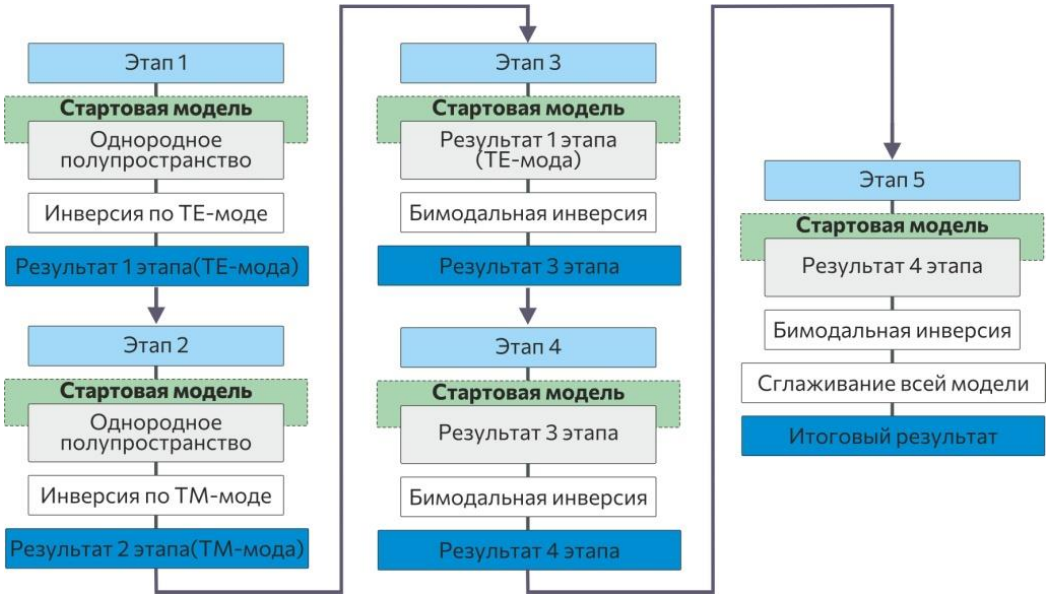


Рисунок 2. Стратегия инверсии [составлено авторами]

На первом и втором этапе проведена инверсия отдельно по ТМ и по ТЕ-моде. Результаты анализировались с учетом особенностей каждой моды и в качестве стартовой модели для следующего этапа был выбран результат инверсии по ТЕ-моде. На третьем этапе проведена бимодальная инверсия. Между этапами выполнялась коррекция сопротивления на краях и в нижней части модели, с использованием осреднения или дублирования результата за пределы профиля. На четвертом и пятом этапах в качестве стартовой модели принимался результат предыдущего этапа и проводилась бимодальная инверсия в диапазоне периодов до 1000 с. На каждом этапе производилось удаление высококонтрастных объектов, редактирование сопротивлений ячеек модели и общее сглаживание всей модели (усреднение результата с учетом соседних ячеек). Проведен контроль качества подбора при помощи визуальной проверки сходимости отдельных кривых и значений ошибки подбора.

Применение данной стратегии позволило получить двухъярусный геоэлектрический разрез до глубины 50 км (0).

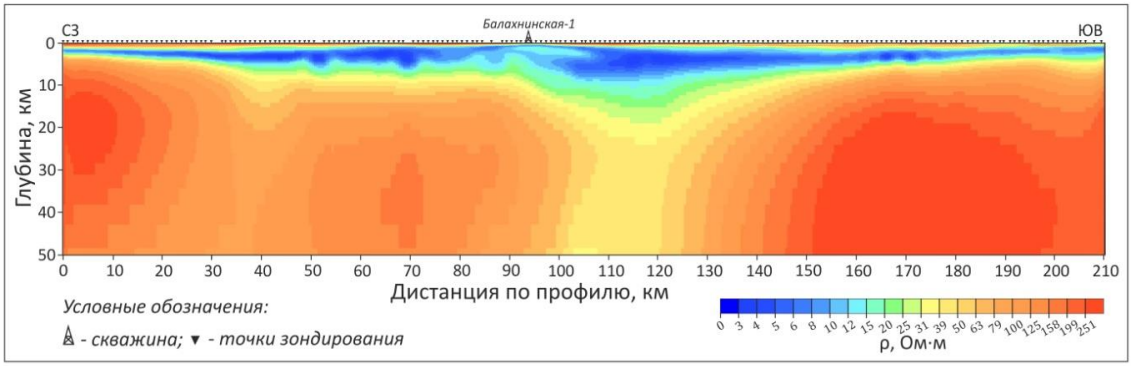


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез по профилю [составлено авторами]

Верхний ярус – проводящие осадочные породы. Наблюдается постепенное увеличение мощности осадков до 16 км в центральной части профиля. Нижний ярус – высокоомный фундамент - имеет блоковое строение, в нем выделяются две субвертикальные зоны пониженного удельного электрического сопротивления.

Выводы

Проведен анализ и переобработка магнитотеллурических данных, полученных вдоль регионального профиля, пересекающего Енисей-Хатангский прогиб. Определена размерность геоэлектрической среды, геометрия и оптимальное сопротивление одномерного полупространства для стартовой модели двумерной инверсии. Проанализирован результат решения обратной задачи отдельно по ТМ и по ТЕ-моде, учитывающий чувствительность поперечных и продольных кривых к влиянию приповерхностных искажений. Реализован поэтапный подход, основанный на последовательности нескольких процессов бимодальной инверсии.

Используемая пятиэтапная стратегия инверсии позволила получить геоэлектрический разрез до глубины 50 км, на котором четко выделяется два структурных этажа - проводящий осадочный чехол и высокоомный фундамент.

Библиография

1. Бердичевский М. Н. Модели и методы магнитотеллурики: монография / Бердичевский М.Н, Дмитриев В.И.; [пер. с англ. М. О. Назаренко]. Москва: Научный мир, 2009. 679 с. ISBN 978-5-91522-087-3.
2. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования / Д. В. Епишкин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2016. – № 4. – С. 40-46. – EDN XGVELJ.
3. Кризский В. Н. Об определении удельной электропроводности локального включения кусочно-постоянной изотропной среды / В. Н. Кризский, П. Н. Александров // Физика Земли. – 2023. – № 6. – С. 259-268. – DOI 10.31857/S0002333723060108. – EDN FQXPGK.
4. Наумова А.Н., Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А. К вопросу о выборе оптимального значения сопротивления однородного полупространства стартовой модели для 2D инверсии магнитотеллурических данных // Материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти А.П. Карпинского «Геология XXI века – передовые технологии и научно-методическое обеспечение регионального геологического изучения недр Российской Федерации».– 2024. – С.79-81

Гамма-каротаж, как инструмент оценки содержания KCl в калийных солях

Пономарев О.Б.* (ООО «ПроТех Инжиниринг, oleg.ponomarev@pte.eurochem.ru), Столбунов Р.А. (ООО «ПроТех Инжиниринг, StolbunovRA@pte.eurochem.ru), Иванов С.В. (ООО «ПроТех Инжиниринг, sergey.v.ivanov@pte.eurochem.ru)

Аннотация

Калийно-магниевые месторождения в России залегают на глубинах от 300 до 2000 метров. Разведка и эксплуатация таких месторождений технически сложны и требуют значительных финансовых вложений. Уменьшение затрат возможно за счёт перехода на бескерновое бурение с использованием геофизического опробования [3]. Рассмотрена возможность использования гамма-каротажа для оценки содержания KCl в горной породе.

Ключевые слова

Гамма каротаж, сильвинит, геофизическое опробование

Теория

Калийно-магниевые соли относятся ко 2 группе сложности строения [1] из-за активного участия процессов «соляной тектоники» в формировании залежей. Это приводит к образованию складчатых областей в пластах (рисунок 1).

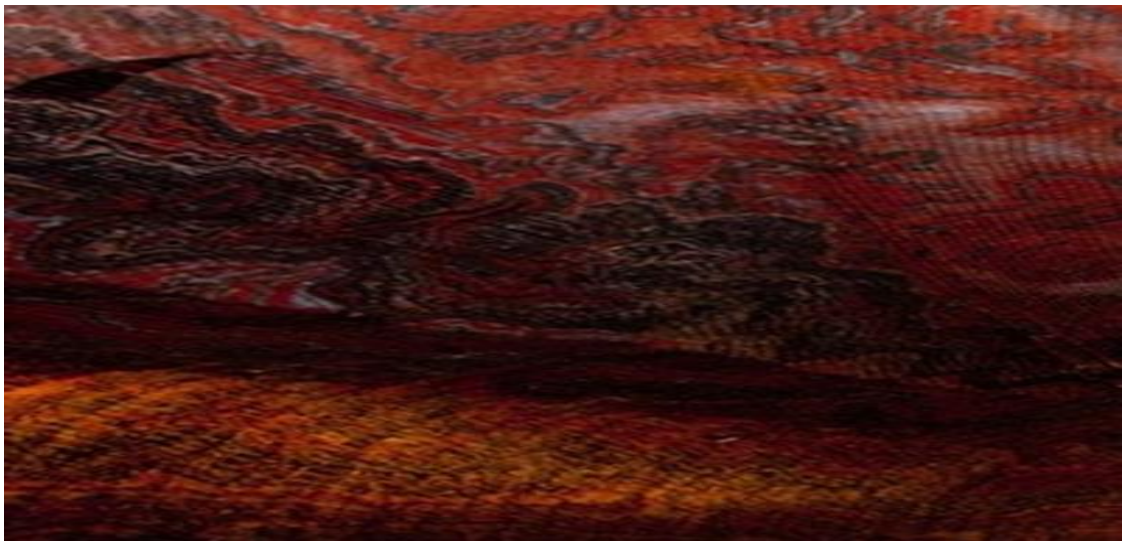


Рисунок 1. Следы интенсивной складчатости в разрезе соляной (калийно-магниевой) залежи

Проблематика

При проходке горных выработок комбайновыми комплексами возникают проблемы из-за изменения угла наклона продуктивного пласта [4], что ограничивает работу оборудования (рисунок 2). Для оценки положения рудного тела используются горно-буровые методы, которые дорогостоящи и трудоёмки. В таких условиях геофизические методы неразрушающего контроля становятся важным инструментом для определения качества полезного ископаемого.

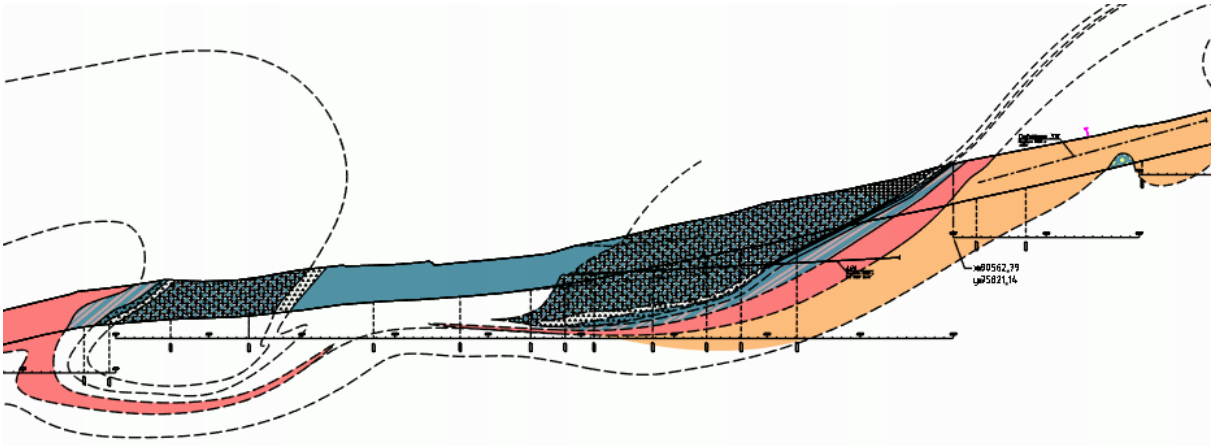


Рисунок 2. Зона выклинивания продуктивного пласта в ундулирующем замке синклинальной складки

Исходные данные

Эвапоритовые комплексы состоят из карбонатно-сульфатных отложений и хлоридно-магниевых пластов. Содержание KCl в породе варьируется и зависит от примесей. Основным методом определения содержания KCl является химический анализ, но геофизический каротаж также играет важную роль.

Калий в сильвините и карналлите содержит радиоактивный изотоп ^{40}K, который испускает гамма-излучение. Это позволяет использовать гамма-каротаж для оценки содержания KCl.

Постановка задачи

Основная задача — определить зависимость между интенсивностью гамма-каротажа и содержанием KCl в породе. Для этого используются различные виды каротажа:

Гамма-каротаж (ГК): регистрирует естественное гамма-излучение от ^{40}K [2].

Нейтрон-гамма каротаж (НГК): оценивает содержание хлора.

Гамма-гамма каротаж (ГГК): оценивает плотность породы.

Электрокаротаж (ЭК): изучает проводимость породы.

Гамма-каротаж является основным методом для оценки содержания KCl, так как он фиксирует ^{40}K, который коррелирует с KCl.

Предлагаемая методика

При разработке методики определения зависимости было проведено:

1. Анализ интервалов полезного ископаемого в которых было проведено опробование и химический анализ, для установления достоверности его принадлежности.
2. Анализ интенсивности гамма каротажа в выделенном по результатам опробования в выделенном интервале.
3. Сопоставление данных каротажа и содержания полезного компонента (KCl) в породе.

Для определения зависимости содержания (калия) от мощности экспозиционной дозы (кривая, в мкР/час) использовалось уравнение регрессии [3] общего вида (1)

$$Y = b*x + a \quad (1)$$

где Y – результативный показатель (в данном случае содержание KCl в %);

x – независимая переменная (фактор, мощность экспозиционной дозы в данном случае);

a и b представляют собой константы, их значения определяют положение и направленность прямой в осях координат.

Основным компонентом при определении зависимости принято содержание именно KCl (сильвинит) (рисунок 3), так как калий (K2O) содержащийся и в карналлите, и в бишофите, на данном этапе не представляет интереса.

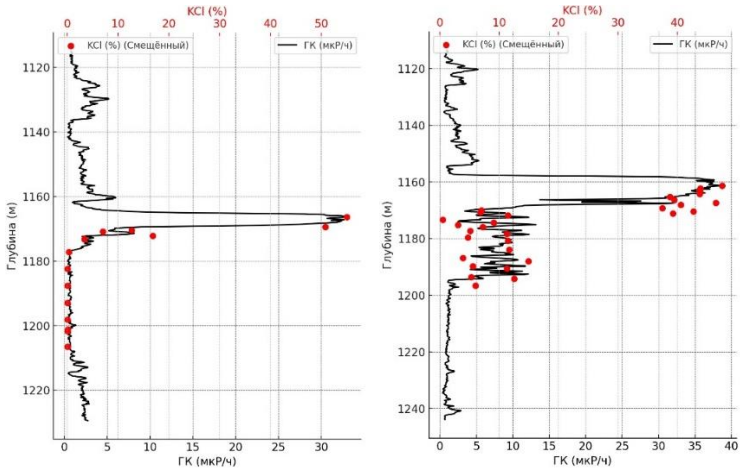


Рисунок 3. Сопоставление точек отбора с интенсивностью гамма-излучения

Результаты

На некоторых участках наблюдается высокая корреляция между данными гамма-каротажа и содержанием KCl (коэффициент корреляции Пирсона более 50%, коэффициент детерминации $R^2 > 0.28$). Пример удовлетворительной регрессионной модели с коэффициентом корреляции 72% представлен на рисунке 4.

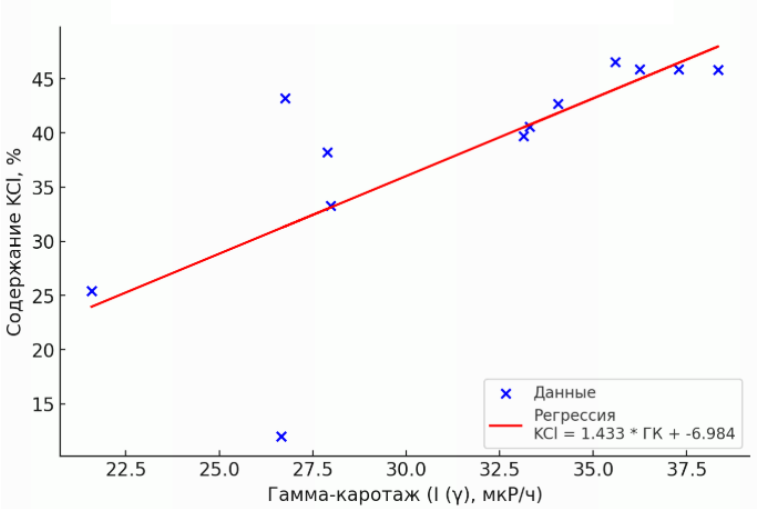


Рисунок 4. Пример регрессионной модели с положительным коэффициентом корреляции (72 %)

Однако, в некоторых случаях наблюдаются отрицательные корреляции (рисунок 5), что связано с особенностями опробования и литологическими особенностями пород.

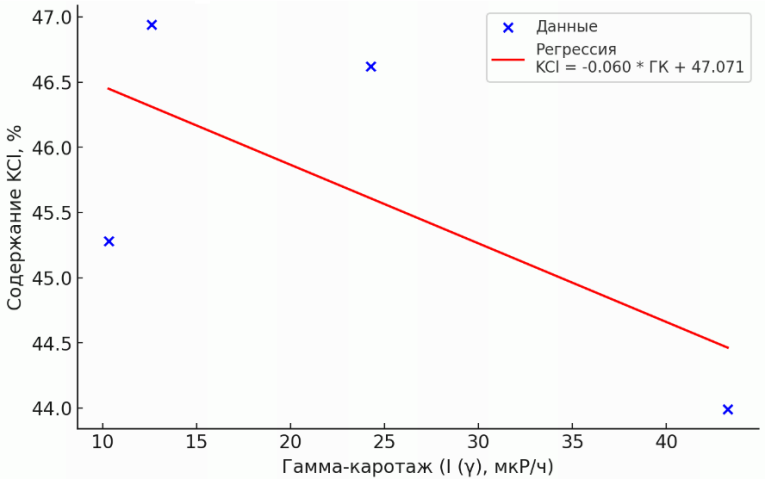


Рисунок 5. Пример регрессионной модели с отрицательным коэффициентом корреляции (-67 %)

Выводы

Несмотря на выявленные проблемы, ГК действительно может быть использован как оперативный метод для оценки рудоносности пород обладает потенциалом для использования в опережающем бурении и экспресс-оценке содержания в них KCl, однако, для этого необходимо учитывать литологические особенности и возможные смещения исходных данных. Стоит помнить, что связь между ГК и KCl не универсальна и зависит от конкретной геологии.

Библиография

1. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В. Механизм образования очагов газодинамических явлений в складчатых структурах калийных пластов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2024. – Вып. 1. – С.562-572.
2. Бачмага А.А., Фахрутдинов Е.Г. Опыт применения гамма-каротажа при исследовании рудных месторождений // Омский научный вестник. – 2009. – №1 (64). – С. 87-91.
3. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2007. – С.317.
4. Мерзляков Г.А., Жарков М.А. (ред.). Условия образования месторождений калийных солей: сборник научных трудов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. – С.193.

Тенденции изменения вызванной сейсмичности при продолжительным сильном антропогенном воздействии

Родкин М.В.*(ИТПЗ РАН, rodkin@mitp.ru; ИПНГ РАН),
Прохорова Т.В. (ИТПЗ РАН, tatprokh@mitp.ru),
Рукавишникова Т.А. (ИТПЗ РАН, rukavishnikova_t@mail.ru)

Аннотация

Вызванная сейсмичность может возникать при различных техногенных воздействиях, в частности при горных работах и при добыче УВ. И даже слабые вызванные землетрясения при отсутствии антисейсмических требований при строительстве и на слабых грунтах могут вызывать значительный ущерб. Контроль опасности вызнанной сейсмичности обычно предусматривает ограничение техногенного воздействия, если вблизи точки воздействия происходит сильное событие. Но это не обеспечивает безопасности, так как вызванные землетрясения могут происходить на большем расстоянии и существенно позже антропогенного воздействия. То есть, потенциальная опасность вызванной сейсмичности может оказаться больше, чем предполагается таким методом. С другой стороны, наблюдались случаи уменьшения вызванной сейсмичности при длительных техногенных воздействиях.

Рассмотрены примеры вызванной сейсмичности при горных работах, добыче традиционных и сланцевых УВ и в окрестности крупных водохранилищ. В большинстве этих случаев после роста вызванной сейсмичности имеет место спад сейсмической активности. Сначала происходит уменьшение доли более сильных событий, а затем и общее уменьшение числа землетрясений. Эффект уменьшения вызванной сейсмичности при длительном сильном антропогенном воздействии важен в практическом отношении; этот эффект может объясняться релаксацией исходных тектонических напряжений.

Ключевые слова

Вызванная сейсмичность, спад сейсмической активности со временем

Источники финансирования

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН и ИПНГ РАН (тема № 125021302095-2).

Теория

Постановка задачи

Проблема вызванной сейсмичности не нова [1, 3, 7 и др.]. Сильный рост сейсмичности регистрировался при заполнении водохранилищ, при горных и УВ разработках, при закачках технических вод. В отдельных случаях число землетрясений возрастало в сотни раз. В ряде работ к вызванной сейсмичности относили и наиболее разрушительное в Российской Федерации Нефтегорское землетрясение. Проведенные затем палеосейсмические исследования показали, однако, что сильные землетрясения происходили в районе Нефтегорска и ранее [5]. Известно также, что сильные землетрясения в слабосейсмичных областях случаются и там, где сильное антропогенное воздействие отсутствует [4].

Подчеркнём, что реальный рост сейсмичности следует отличать от кажущегося, связанного с улучшением сейсмологических наблюдений. При постановке крупных проектов, будь то разработка большого месторождения или сооружение крупного водохранилища, ставится локальная сеть сейсмических наблюдений. Уже одно это часто приводит к росту числа зарегистрированных слабых событий. В [2] показано, что в ряде случаев вывод о развитии вызнанной сейсмичности был некорректным, и рост числа сейсмических событий вполне

объясняется улучшением системы наблюдений и регистрацией взрывов, ошибочно трактуемых как землетрясения.

Вышесказанное демонстрирует сложность явления вызванной сейсмичности, но не ставит под вопрос существование этого явления. Примеров убедительного совпадения случаев антропогенной нагрузки и роста сейсмичности вполне достаточно [8, 9 и др.]. При этом уровень вызванной сейсмичности может быть весьма высоким и опасным. В частности, в области добычи сланцевой нефти в Оклахоме (США) поток слабых землетрясений в течение ряда лет превышал число событий в таком высокосейсмичном районе, как Калифорния. Естественно, возникает вопрос, означает ли это, что в области вызванной сейсмичности здесь так же следует ждать столь же сильных землетрясений, что систематически происходят в Калифорнии. Опасения подкрепляются тем, что в ряде случаев вызванные землетрясения вызывают существенный ущерб. Такой ущерб возможен и от слабых землетрясений, при отсутствие антисейсмических мероприятий и на слабых грунтах, на которых сейсмические воздействия проявляются особенно сильно. В ряде случаев это приводимо к прекращению ранее вполне успешных проектов.

С целью уменьшения опасности вызванной сейсмичности используются ограничения на интенсивность техногенных воздействий при возникновении более сильных событий. Сразу заметим, что эта методика не обеспечивает полной безопасности. Некоторые, предположительно вызванные землетрясения, происходят дальше от рудников, скважин или водохранилищ, и с большей задержкой по времени, чем это предполагается в рамках этой методики; при этом среди таких землетрясений могут быть и довольно сильные, т. е. опасность вызванной сейсмичности может оказаться выше, чем это обычно предполагается. С другой стороны, по данным длительного мониторинга вызванной сейсмичности в районе Ингури ГЭС, отмечается [6], что после периода роста вызванная сейсмичность уменьшилась и приблизилась к исходному уровню, несмотря на продолжение антропогенного воздействия.

Ниже обсуждаются тенденции проявления вызванной сейсмичности и опасности вызванной сейсмичности. Основное внимание уделяется тенденции возможного уменьшения вызванной сейсмичности при длительном сильном техногенном воздействии.

Результаты

Представим примеры изменения вызванной сейсмичности при длительном сильном техногенном содействии. На рис. 1 приведены данные об интенсивности потока событий $M \geq 2.7$ и объемам закачек вод и добычи нефти в Оклахоме (США). Видно, что резкий спад потока событий имеет место на фоне слабо меняющихся объемов закачек и добычи УВ. Ряд других случаев дает аналогичные результаты.

Для рассмотрения вызванной сейсмичности областей горнорудных комплексов (рассматривались примеры: Жезказган полиметаллический рудный комплекс (свинец, медь, иные компоненты), Сев-Уральский бокситовый бассейн и Сев-Кизеловский угольный бассейн), по областям горнорудных комплексов информация обычно менее полная. Часто имеются только отрывочные данные по объемам добычи. В некоторых случаях наблюдаются также непонятные вариации числа событий по времени суток. Но общий характер изменчивости сейсмичности указывает на тенденцию уменьшения активности со временем. На рис.2 приведены данные по изменениям b-value в районе горнорудного комплекса в Жезказгане. Четко видна тенденция роста со временем величин b-value (в терминах энергетических классов). В качестве достоверно регистрируемых событий были приняты горные удары с $K \geq 3.0$. Общая тенденция уменьшения доли сильных событий (рост b-value) осложнена тремя эпизодами уменьшения величин b-value, сопряженными с моментами возникновения трех сильнейших событий с $K=7.6$, 7.0 и 6.8.

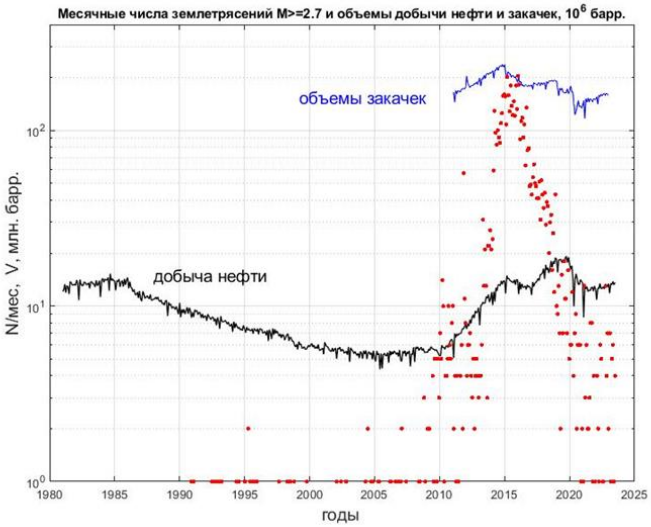


Рисунок 1. Число значимых событий в месяц (M≥2.7, красные точки) и суммарные объемы добычи нефти и закачек в Оклахоме

Результаты анализа по другим рассмотренным горнодобывающим областям дают качественно аналогичные результаты. Также, как и для Жезказгана, наблюдается тенденция роста величин наклона графика повторяемости со временем.

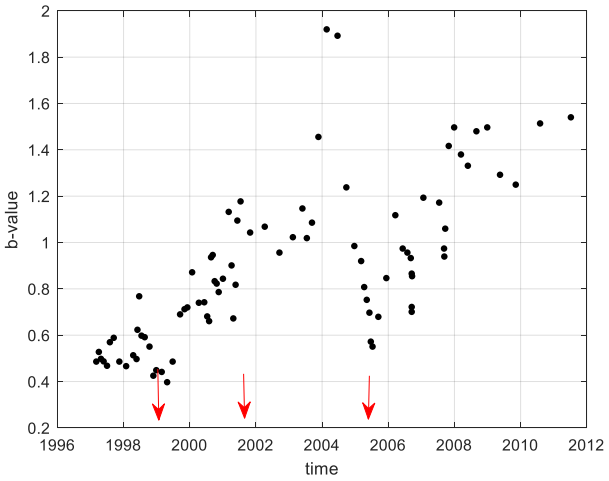


Рисунок 2. Жезказган b-value. Стрелками указаны моменты трех сильнейших событий (K=7.6, 7.0 и 6.8)

Заключение

Единообразным образом рассмотрен сейсмический режим ряда удовлетворительно обеспеченных статистическим материалом областей развития инициированной сейсмичности (районы крупных водохранилищ, интенсивной добычи традиционных и сланцевых УВ, и районы горнорудных предприятий). Во всех рассмотренных районах более или менее определенно выявляется ряд общих тенденций. После роста вызванной сейсмичности, даже и при продолжающемся сильном техногенном воздействии, может наблюдаться тенденция спада сейсмической активности. Для всего интервала времени роста и спада сейсмической активности характерна тенденция роста величин наклона графика повторяемости землетрясений,

эпизодически нарушаемая всплесками сейсмичности в связи с реализацией более сильных событий.

Следующий за ростом сейсмической активности спад числа значимых событий наблюдался и при уменьшении техногенной нагрузки, и при продолжающемся сильном техногенном стрессе. Можно предположить, что спад вызванной сейсмичности может быть связан с релаксацией естественных тектонических напряжений. Восстановление последних в условиях стабильных медленно деформируемых внутриконтинентальных областей, видимо, должно происходить достаточно медленно.

Каким образом, опасность вызванной сейсмичности может быть выше, чем это предполагается в рамках общепринятой методики уменьшения риска вызванной сейсмичности, ориентированной на снижение опасности от землетрясений, реализующихся в непосредственной близости от зон техногенного воздействия. С другой стороны, с течением времени, видимо, следует ожидать развития описанного выше общего спада инициированной сейсмичности. Полученные результаты представляются имеющими практический интерес, указывая на вероятно имеющее место систематическое уменьшение вызванной сейсмичности при длительном сильном техногенном воздействии.

Библиография

1. Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение. 2000. № 1. С. 4–15.
2. Годзиковская А.А. Местные взрывы и Землетрясения. Сейсмический режим в районах крупнейших ГЭС России. М.: ЦСГНЭО «Гидропроект». 2011. 123 с.
3. Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М.: МИР. 1979. 257 с.
4. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Варианты карт сейсмического районирования: 1937, 1957, 1968, 1997, 2012 – будет ли следующий? Информация 110104 // Вестник ОНЗ РАН/ 2011/ № 3, url: http://onznews.wdcb.ru/news11/info_110104.html
5. Рогожин Е.А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45-53.
6. Chelidze T., T. Matcharashvili, E. Mepharidze, N.Dovgal. Complexity in Geophysical Time Series of Strain/Fracture at Laboratory and Large Dam Scales: Review // Entropy. 2023. V. 25. N 3. P. 467. https://doi.org/10.3390/e25030467
7. Davis S., Frohlich C. (Did (Or Will) Fluid Injection Cause Earthquakes? - Criteria for a Rational Assessment // J. Seismological Research Letters. 1993. N 64. P. 207-224.
8. Krupnick, A., Echarte, I. Induced Seismicity Impacts of Unconventional Oil and Gas Development // RFF. Report. 2017. Goebel, T.H.W. 30 p.
9. Van der Baan K., Calixto F.J. Human-induced seismicity and large-scale hydrocarbon production in the USA and Canada // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. V. 18. № 7. P. 2467–2485.

Отклик вариаций полного электронного содержания ионосферы на основной толчок землетрясения у полуострова Ното 2024 года (по данным приемной станции mtka)

Рябова С.А.* (Институт физики Земли О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, riabovasa@mail.ru)

Аннотация

В ходе настоящего исследования выполнялся анализ вариаций полного электронного содержания ионосферы в период основного толчка землетрясения у полуострова Ното в 2024 году, крупнейшего землетрясения, произошедшего в Японии со времен землетрясения Тохоку в 2011 году, и самого смертоносного со времен землетрясения в Кумамото в 2016 году. По данным, полученным на японской приемной станции mtka, выделен характерный для ударных волн сигнал в виде *N*-волны, при этом площади положительной и отрицательной фаз с большой точностью совпадают.

Ключевые слова

Полное электронное содержание, ионосфера, ударная волна, землетрясение

Источники финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8).

Теория

Сейсмические события (землетрясения, сопровождаемые сейсмическими волнами), которым сопутствует ряд геофизических эффектов, таких как деформация и разрушение горных пород, генерация атмосферных волн, вариации атмосферного электрического поля, вызывают также отклик в нижней и верхней ионосфере (1, 2, 5−7). В последнее время появилось множество работ, посвященных исследованию аномальных вариаций полного электронного содержания (количество электронов, содержащихся в столбе единичного сечения с основанием у поверхности земли и до высоты пролета спутника или некоторой эталонной высоты) ионосферы в период землетрясений (3, 4, 8−10). Всплеск публикаций связан с развитием сети наземных приемников сигналов спутников навигационных систем, обеспечивающих радиопросвечивание ионосферы.

В настоящей работе по данным радиопросвечивания ионосферы посредством глобальных навигационных спутниковых систем проводится анализ и интерпретация специфических вариаций полного электронного содержания ионосферы, приуроченных к сильному землетрясению у полуострова Ното 2024 года.

Основные характеристики землетрясения

Землетрясение у полуострова Ното – крупнейшее землетрясение, произошедшее в Японии со времен землетрясения Тохоку в 2011 году (https://www.logicallyfacts.com/en/fact-check/misleading-photos-from-2011-2016-passed-off-as-visuals-of-recent-japan-earthquake), также это землетрясение самое смертоносное со времен землетрясения в Кумамото в 2016 году (https://www.aljazeera.com/news/ 2024/1/2/how-devastating-was-mondays-earthquake-in-japan).

Основной толчок землетрясения произошел 1 января 2024 года в 16:10 по местному времени (07:10 UT) в 6 км к северо-северо-востоку от города Судзу, расположенного на полуострове Ното в префектуре Исикава (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/executive). Японское

метеорологическое агентство оценило магнитуду в 7,6 (https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#11/34.103/135.176/&elem=int&contents=earthquake_map&lang=en). По данным Геологической службы США моментная магнитуда землетрясения составила 7,5 и глубина очага 10 км (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/ executive).

Форшок магнитудой 5,8 (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xj/executive) был зарегистрирован за четыре минуты до основного толчка, афтершок магнитудой 6,2 через девять минут после основного толчка (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xm/executive).

Японское метеорологическое агентство (https://www.data.jma.go.jp/eew/data/ltpgm/event.php?eventId=20240101161010) заявило, что зафиксировало максимальную сейсмическую интенсивность по шкале Меркалли X–XI (экстремальная), землетрясение такой интенсивности в Японии наблюдалось впервые с 2018 года. Максимальная интенсивность была зарегистрирована в городах Шика и Ваджима в префектуре Исикава. В Шике наблюдалось максимальное ускорение поверхностного грунта в 2826 галов, что близко к тому, которое было зарегистрировано во время землетрясения в Тохоку 2011 года и составило 2934 галла.

Фокальный механизм основного толчка соответствовал неглубокому обратному разлому вдоль плоскости с северо-восточным уклоном, уходящей на северо-запад или юго-восток идущей вдоль сходящейся границы между Охотской плитой и Амурской плитой (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/finite-fault?source=us&code=us6000m0xl_1).

Землетрясение состояло из двух субсобытий. Первое субсобытие магнитудой 7,3 пробило разлом под полуостровом, вызвав поднятие побережья. Второе субсобытие, идентичное по магнитуде, разорвало морской сегмент через 13 секунд после завершения первого субсобытия (https://www.yomiuri.co.jp/science/20240130-OYT1T50055/).

Геомагнитная обстановка

В ходе выполнения настоящих исследований была проанализирована геомагнитная обстановка в период, включающий время основного толчка. Анализ значений трехчасового геомагнитного планетарного Kp индекса и суточного Ap индекса за 1 января 2024 г. показал, что в период землетрясения у полуострова Ното не наблюдалось сильных возмущений, вызванных источниками солнечного происхождения.

Исходные данные

В настоящей работе для анализа отклика верхней ионосферы использовались данные спутников GPS, позволяющие определять вариации полного электронного содержания ионосферы. Для снижения влияния на вариации полного электронного содержания несейсмических факторов (возмущенное состояние геомагнитного поля, солнечная активность) и исследования ионосферного отклика только в акустическом диапазоне была применена полосовая фильтрация Баттерворта 7-го порядка.

При выборе GPS данных для исследования косейсмического отклика ионосферы был использован следующий критерий: в временном интервале за 5 мин до и 15 мин после основного толчка спутник должен находиться в радиусе 500 км от эпицентра. Этому критерию из 32 спутников GPS японской станции mtka удовлетворяли только два. Данные вариаций полного электронного содержания были с частотой следования 1 измерение в 30 секунд.

Вариации полного электронного содержания ионосферы по данным приемной станции mtka

В качестве примера на рис. 1 представлены отфильтрованные вариации полного электронного содержания ионосферы в диапазоне 61–1000 с. Как видно из данных, приведенных на рис. 1, возмущения плотности плазмы в F слое в ближней зоне имеют форму *N* волны. Время прихода импульса соответствует интервалу 9–10 мин после события. Видно, что форма импульса

для обоих спутников демонстрирует равенство площадей под положительной (0,0231) и отрицательной (0,0233) фазами.

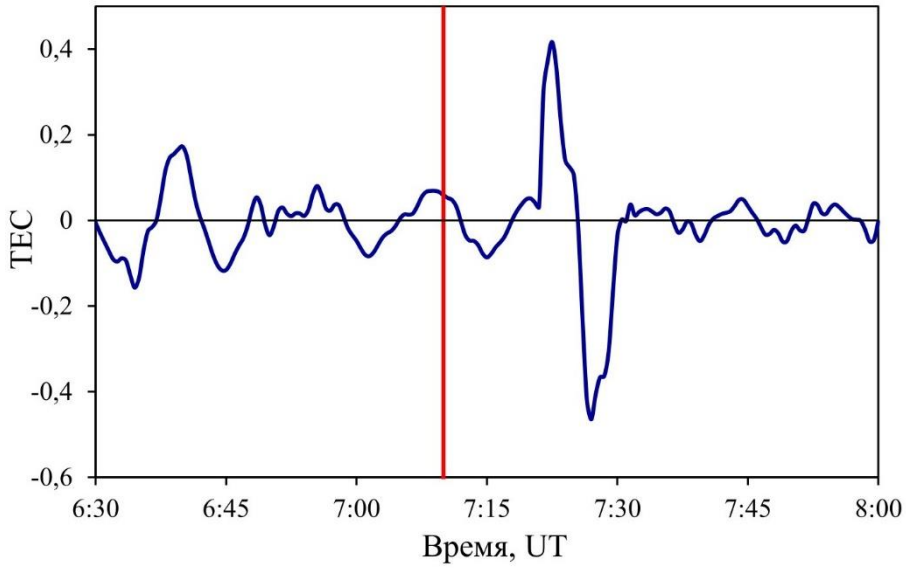


Рисунок 1. Отфильтрованные вариации полного электронного содержания ионосферы для пары приемная станция − спутник mtka-G26. Вертикальная линия – момент основного толчка землетрясения у полуострова Ното 2024 года

Зная амплитуду импульса, можно оценить энергию землетрясения. Для ее грубой оценки воспользуемся скейлингом, который следует из сопоставления с источниками известной энергии. После землетрясения в Тохоку с энергией $6{,}24 \cdot 10^{17}$ Дж вариации полного электронного содержания достигали 3 TECU. Поскольку энергия волны пропорциональна квадрату амплитуды, то для наблюдаемого на рис. 1 всплеска вариаций порядка 0,417 TECU приблизительная величина поверхностной энергии составит $1{,}21 \cdot 10^{16}$ Дж.

Выводы

В настоящей работе проведена обработка и анализ вариаций полного электронного содержания ионосферы, определенного по данным радиопросвечивания ионосферы посредством глобальных навигационных спутниковых систем в период основного толчка землетрясения у полуострова Ното. По данным, полученным на японской приемной станции mtka, выделен характерный для ударных волн сигнал в виде *N*-волны, при этом площади положительной и отрицательной фаз с большой точностью совпадают, а также оценена энергия землетрясения.

Библиография

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Тихонова А.В. Геомагнитный и ионосферный эффекты двух последовательных сильных землетрясений в Марокко 08.09.2023 г. // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515. № 1. С. 118–123. https://doi.org/10.1134/S1028334X23603395

2. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Тихонова А.В. Магнитный и ионосферный эффекты серии сильных землетрясений 02–03 апреля 2024 г. (Тайвань) // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 518. № 10. С. 125–130. https://doi.org/10.1134/S1028334X24602670

3. Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: регистрация ионосферных возмущений по данным GPS // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. № 8. С. 657–661.

4. Рябова С.А., Ольшанская Е.В., Шалимов С.Л. Отклик нижней и верхней ионосферы на землетрясения в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 153–162. https://doi.org/10.31857/S0002333723060182

5. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. М.: МИФИ. 2000. 448 с.

6. Черногор Л.Ф. Геомагнитные возмущения, сопровождавшие великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.

7. Riabova S.A., Shalimov S.L. Ionospheric response of earthquakes in the Philippines from November to December 2023 // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2024. Vol. 60. No. 6. P. 1016–1025. https://doi.org/10.1134/S1069351324701015

8. Sunil A.S., Bagiya M.S., Reddy C.D., Kumar M., Ramesh D.S. Post-seismic ionospheric response to the 11 April 2012 East Indian Ocean doublet earthquake. Earth, Planets and Space. 2015. Vol. 67. https://doi.org/10.1186/s40623-015-0200-8

9. Otsuka Y., Kotake N., Tsugawa T., Shiokawa K., Ogawa T., Effendy S.S., Kawamura M., Maruyama T., Hemmakorn N., Komolmis T. GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58. P. 159–165.

10. Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva A.S. Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. Vol. 108. P. 77–90.

Характерные времена реакции зоны стабильности поддонных газовых гидратов на на выпахивание поверхности морского дна при движении айсберга в северных морях

Суетнова Е.И. (ИФЗ РАН, elena_suetnova@mail.ru)*

Аннотация

Наблюдавшиеся в рельефе дна в некоторых регионах северных морей следы выпахивания приповерхностного слоя килями айсбергов [1, 2. 3, 4, 5] ставят вопрос о влиянии этих процессов на геофизические процессы в структуре дна вследствие изменения термобарических условий в среде морской коры. Особенно интересно выяснить продолжительность такого влияния на поддонные газовые гидраты наличие которых обычно предполагается в северных морях. В данной работе приводится математическая формулировка постановки нестационарной задачи изменения температуры и давления в слое осадков при мгновенном удалении с поверхности слоя мощностью L. Приводится пример решения который наглядно показывает длительность процесса изменения распределения температуры в осадках и тем самым длительность изменения глубины границы зоны потенциальной стабильности газовых гидратов в случаях наличия газосодержащего флюида под зоной произошедшего выпахивания морского дна

Ключевые слова

Поддонные газовые гидраты, математическое моделирование, характерные времена процесса эволюции зоны стабильности

Источники финансирования

Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН

Теория

Эрозия морского дна корнями движущихся айсбергов неоднократно наблюдалась в северных морях (рис.1).

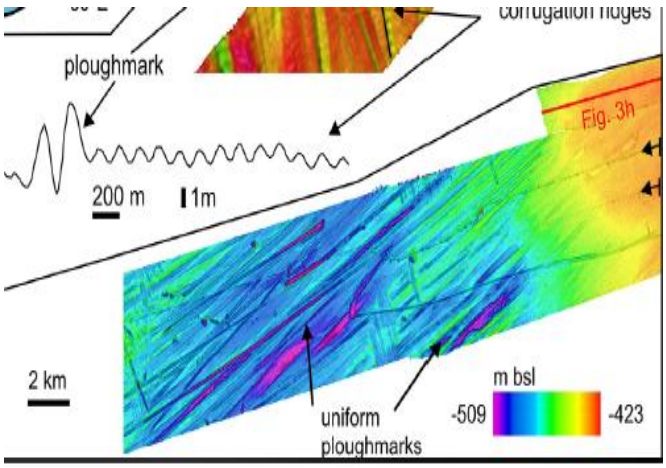


Рисунок 1. Следы эрозии морского дна в Барецевом море [3]

Исследование влияния эрозии на изменение температурного режима дна производится с помощью математического моделирования процесса изменения температуры среды дна вследствие эрозии на глубину L в определённый момент времени.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m \cdot V_f \cdot f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\text{Где } A_1 = \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho C} ;$$

f – температура; C – теплоемкость; vf – скорость фильтрации ρf – плотность, к – температуропроводность, t- время, z- координата, m- пористость .

Решая это уравнение аналитически получаем что изменение температуры в морском дне на глубине z1 после эрозии слоя мощности L при условии что начальный градиент температуры был равен ḅ определяется формулой

bL erf(z1/(2√(κ̄t̄))

Полученное решение позволяет нам определять положение новой зоны термобарической стабильности газовых гидратов[для каждого момента времени истории действия эрозии на тепловые условия в дне.

В случае гидростатического градиента порового давления в осадках до эрозии из решения уравнения следует что процесс эрозии не приводит к разложению газовых гидратов ниже поверхности дна и разложение только сопутствует разрушению в эродируемом слое.

Выводы

Полученный пример решения наглядно показывает длительность процесса изменения распределения температуры в осадках и тем самым длительность процесса изменения глубины границы зоны потенциальной стабильности газовых гидратов в случаях наличия газосодержащего флюида под зоной произошедшего выпахивания.

Библиография

1. Ottesen D., Dowdeswell J.A., Landvik J.Y., Mienert J. Dynamics of the Late Weichselian ice sheet on Svalbard inferred from high-resolution sea-floor morphology// Boreas. 2007. V. 36. P. 286–306.

2. Piasecka, E.D. and Winsborrow, M.C.M. and Andreassen, K. and Stokes, C.R. (2016) // Quaternary science reviews., 151 . pp. 212-227 2.

3. Karin Andreassen, Monica C.M. Winsborrow, Lilja R. Bjarnadóttir , Denise C. Rüther. Ice stream retreat dynamics inferred from an assemblage of landforms in the northern Barents Sea. Quaternary Science Reviews 92 (2014) 246-257.

4. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y.: Marcel Dekker. — 1998. — 705P.

Опыт применения повысотной аэромагнитной съемки с БВС для вычисления вертикального градиента геомагнитного поля

Таран Я.В. (ИФЗ РАН им.Шмидта, taran@ifz.ru),*
Алешин И.М. (ИФЗ РАН им.Шмидта, ГЦ РАН, ima@ifz.ru),
Холодков К.И. (ИФЗ РАН им.Шмидта, ГЦ РАН, keir@ifz.ru)

Аннотация

В последние десятилетия маловысотная аэромагнитная съемка получила новые перспективы развития благодаря использованию беспилотных измерительных комплексов. Современное навигационное оборудование позволяет регистрировать позицию регистратора с точностью до сантиметров, что открывает новые возможности для прямого вычисления вертикального градиента геомагнитного поля по результатам повысотной съемки.

Представлены результаты экспериментов в областях со спокойным аномальным магнитным полем, при наличии сильной техногенной помехи и в условиях высокоградиентного аномального поля. Результаты, полученные при измерениях на двух или трех высотных уровнях, сопоставлены с традиционным методом вычисления соответствующей трансфоманты магнитного поля.

Ключевые слова

маловысотная аэромагнитная съёмка, повысотная съёмка, БВС, БПЛА, беспилотный аэромагнитный комплекс

Источники финансирования

Исследования выполнены в рамках госзадания ИФЗ РАН и ГЦ РАН. Использовано оборудование ИФЗ РАН и ГЦ РАН, приобретённое благодаря программе по обновлению приборной базы в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

Теория

Сотрудиками ИФЗ РАН и ГЦ РАН в 2023-24 годах был произведен ряд экспериментов по многоуровневой маловысотной аэромагнитной съёмке с Беспилотными Воздушными Судами (БВС). Помимо решения непосредственных геолого-геофизических задач общей целью исследований являлась оценка перспектив возможности вычисления вертикального градиента по данным многоуровневой съемки.

Данная методика применялась ещё на заре развития аэромагнитных исследований в 60х годах XX века [4]. Вычисление вертикального градиента производится по формуле:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_n - T_k}{\Delta h_{kn}} \quad (1)$$

где Tn, Tk – величина аномального поля, Δhkn– разность между высотами положения измерителя в соответствующей точке. Однако позднее с развитием вычислительных мощностей она была вытеснена численным методом получения трансформант, как более точным. Соблюсти необходимые требования к качеству аэромагнитных данных в то время было крайне сложно.

Вычисленная вертикальная производная при этом обладает рядом недостатков. Полевые аэромагнитные данные как правило подвержены помехам, связанным с носителем и его полетными девиациями. Вычисление вертикальной производной значительно усиливает высокочастотные помехи, поэтому требуется применение дополнительных методик повышения

устойчивости вычислительных схем. Кроме этого, надежный результат можно получить только для структур, имеющих двумерное строение, в то время как для трехмерных вычисленные и непосредственно измеренные данные имеют существенные различия. Сложности возникают также и в разделении приповерхностных аномалий, так как из-за эффекта альясинга возможно разделить эффекты только от тех источников, расстояние до которых не меньше, чем расстояние между профилями(полетами) [3].

Современные технологии позволили вернуться к вычислению вертикального градиента по полевым данным [5]. Методика полевых градиентных измерений в целом ничем не отличается от обычной маловысотной аэромагнитной съемки с обтеканием рельефа. Основная сложность — выдержать постоянное расстояние между уровнями и обеспечить максимальный повтор схемы пролетов на разных уровнях. Для этого при установке полетных заданий на каждом уровне повторяется не только общая форма пролетов, но и расположение контрольных высотных точек. Задача точного позиционирования измерителя решается при помощи приёмника ГНСС, который устанавливается на измеритель и локальной наземной ГНСС-базы.

Съемка выполняется как правило на двух высотных уровнях, разница между которыми может составлять от 10 до 30 метров. Полученные данные проходят стандартную схему обработки – ввод поправок за вариации и нормальное поле, увязку профилей и уточнение пространственного положения измерителя. После этого по формуле (1) вычисляется вертикальный градиент аномального магнитного поля. При этом полученные данные относятся к высотной поверхности, которая повторяет по форме полевые и равна их среднему арифметическому.

Первые результаты экспериментов на опытных полигонах Михнево и ВлГУ были описаны в статье [1]. В дальнейшем исследования в областях со спокойным региональным магнитным полем были продолжены на участках над геомагнитными обсерваториями Климовская и Лебедевка. На каждом из них была выполнена съемка на двух высотных уровнях.

При съемке над массивом Вялимяки в Северном Приладожье съемка осуществлялась на трех высотных уровнях – 340, 370 и 400 метров над уровнем геоида. Такая стратегия позволила вычислить вертикальный градиент, относящийся к уровню 370 метров и сравнить его результаты с вертикальной производной аномального магнитного поля, вычисленной традиционными методами. Вычисление трансформанты выполнено в программе GravMagInv [3]. На рисунке 1 представлены результаты измерений. Вертикальный градиент и производная вычислены в одинаковых условиях – на основании полевых данных с базовой обработкой, без применения дополнительных фильтраций. Можно заметить, что вычисленный по полевым данным вертикальный градиент имеет более яркую амплитуду и значительно более свободен от влияния направления профилей полета измерителя. При этом в остальном они имеют схожую картину изолиний.

Кроме этого, были сопоставлены результаты вычисления вертикального градиента по данным двух уровней и вычисленные методом конечных разностей по всем трем уровням по формуле:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{T_3 - T_2}{\Delta h_{23}} + \frac{T_2 - T_1}{\Delta h_{12}}\right) (2)$$

Это позволило сделать выводы о возможном повышении качества вычисленного вертикального градиента путем увеличения количества уровней съемки. Оказалось, что полученные карты практически идентичны, то есть для вычисления вертикального градиента достаточно двух высотных уровней.

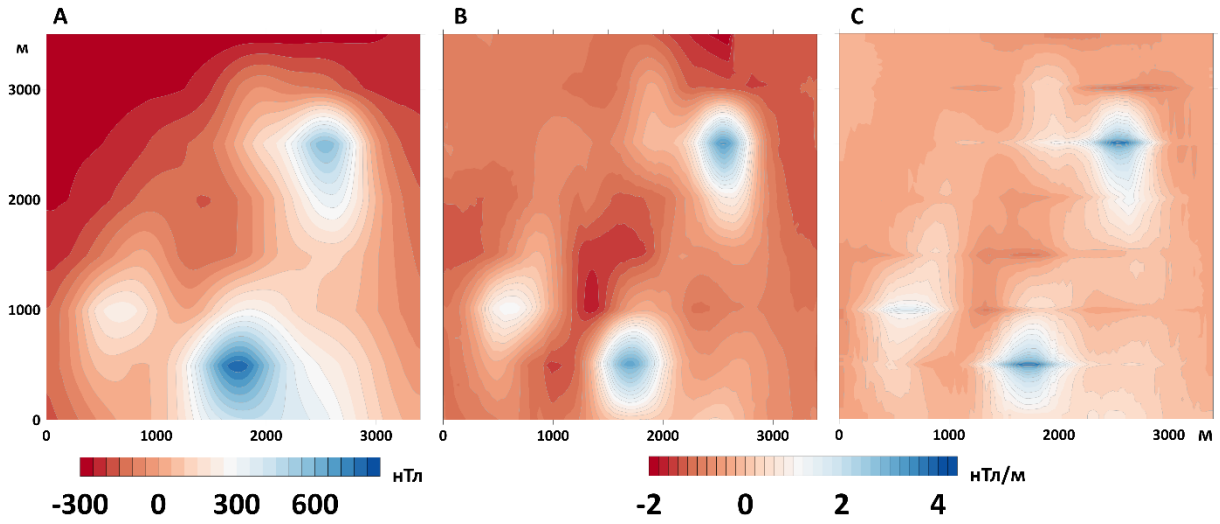


Рисунок 1. Результаты трехвысотной аэромагнитной съемки с БВС массива Вялимяки (Северное Приладожье). А – аномальное магнитное поле на среднем уровне; В – вертикальный градиент, вычисленный по данным верхнего и нижнего уровней: С – вертикальная производная аномального магнитного поля на среднем уровне

Выводы

Опыт вычисления вертикального градиента по данным повысотной магнитной съемки показал значительные плюсы этого метода относительно традиционного способа. Полученные карты более свободны от влияния полетных профилей и других высокочастотных помех. Общая картина аномалий более контрастная, что упрощает качественную интерпретацию. Исходные данные, по которым рассчитывается вертикальная производная, неизбежно осложнены неточностями модели нормального поля и допущениями при вычислении региональной составляющей. Метод определения вертикального градиента по данным повысотной съёмки естественным образом редуцирует обе эти составляющие и выглядит потенциально более выигрышным при переходе к количественной интерпретации.

При этом данная методика более требовательна к качеству данных - необходимо максимальное соблюдение полетных заданий без значительных девиаций носителя. Высотные поверхности должны быть разнесены на расстояние, превышающее возможное отклонение и максимально выдерживать постоянное расстояние между уровнями.

Благодарности

Авторы благодарят чл.-корр. РАН А. А. Соловьёва. А также сотрудников лаборатории 501 ИФЗ РАН, участвовавших в проведении полевых работ: Ф.В. Передерина, Д.К. Мокрова, Н.К. Розенберг.

Библиография

1. Алёшин И.М., А. А. Соловьёв А.А., К. И. Холодков К.И., Передерин Ф.В., Таран Я.В. Вертикальный градиент геомагнитного поля по результатам повысотной аэромагнитной съемки // Доклады Академии Наук. Науки о земле.2024. Т.520 № 1 2024 С.116-120.
2. Чепиго Л.С. GravMagInv. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022610137, 10.01.2022.
3. Cowan D. R., Baigent M., Cowan S. Aeromagnetic Gradiometers-a Perspective // Exploration Geophysics, 1995. №26(2–3), P 241–246.

4. Hood P. Gradient measurements in aeromagnetic surveying // Geophysics. 1965. № 30 (5). P. 891–902.

5. Kulüke C., Virgil C., Stoll J., Hördt A. A new system to measure the gradient vector of the magnetic field on unmanned aerial vehicles — data processing and field experiment // RAS Techniques and Instruments. April, 2022. V. 1. Iss. 1. P. 65–80.

6. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets // Geophysical Prospecting. 2020. № 68. P. 334–349.

Ранжирование геологических опасностей по результатам интерпретации геолого-геофизических данных на примере одного из месторождений Арктического шельфа

Тарасова В.С. (АО "МАГЭ", veronika.tarasova@mage.ru),*
Иванова О.В. (АО "МАГЭ", olga.ivanova@mage.ru)

Аннотация

В настоящее время освоение Арктического шельфа является актуальной задачей для восполнения минерально-сырьевой базы. Сложные геологические условия данного региона увеличивают риски при строительстве и эксплуатации скважин. Выявление геологических опасностей верхней части разреза и их ранжирование является важным этапом для целей инженерных работ.

Для ранжирования геологических рисков в данной работе была использована специализированная система, разработанная в АО «МАГЭ», позволяющая учитывать особенности проявления опасностей на сейсмических данных, а также степень их влияния во время бурения. На основе проведенных исследований были оконтурены потенциально опасные геологические объекты, проведено разделение по степени риска и составлена сводная карта их распространения. Полученные результаты ранжирования опасностей ВЧР позволили скорректировать положения поисково-оценочных скважин, выбранные на этапе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных.

Ключевые слова

Сейсморазведка, Арктический шельф, система, ранжирование, опасность

Источники финансирования

Нет

Теория

При подготовке процесса морского бурения необходимо учитывать возможные геологические опасности, распространенные в верхней части разреза. Игнорирование или недостаточный учет этих опасностей при установке буровой платформы или в процессе проходки скважины может привести к серьезным негативным последствиям для проекта. Это включает дополнительные затраты времени и ресурсов, а также потенциальные аварийные ситуации, которые могут повлечь за собой существенные расходы на их устранение.

ВЧР исследуемой площади осложнена большим количеством палеоврезов и палеодепрессий, являющихся потенциально опасными в большинстве районов Арктики. Основной целью работы является детальный анализ геологических условий территории и корректное применение стратегий управления рисками.

В ходе интерпретации данных 3D сейсморазведочных работ верхняя часть разреза была разделена на 4 динамически выраженных сейсмических комплекса (СК), с каждым из которых связаны определенные виды геологических опасностей. Для их выделения в волновом поле использовался структурный и динамический анализ.

В исследуемом разрезе выделены следующие виды геологических опасностей: палеоврезы и палеодепрессии (СК 1), области распространения предположительно мерзлых грунтов (СК 1), интервалы с повышенным содержанием газа в отложениях (СК 3, СК 4), разрывные нарушения (СК 2, СК 3, СК 4). Положению подошвы наиболее древней генерации палеоврезов и палеодепрессий соответствует ОГ Н3 (рисунок 1).

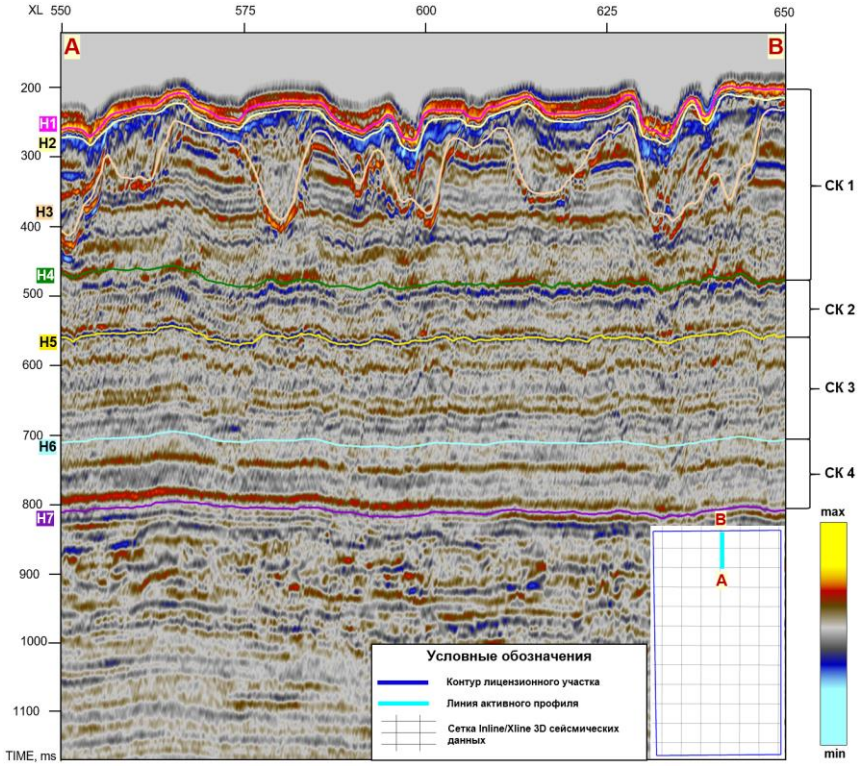


Рисунок 1. Выделение сейсмических комплексов в ВЧР на фрагменте временного разреза

Палеоврезы и палеодепрессии уверенно идентифицируются в волновой картине северной части площади. Южная часть площади имеет более сложное строение. Характер записи волновой картины осложняет наличие в разрезе более молодых генераций внутри древних. Оконтурить положение палеоврезов и палеодепрессий позволяет анализ каждого отдельного элемента вдоль/вкрест простирания с использованием куба атрибута Deep Steered Enhancement, а также слайсов 3D сейсмических данных, скоростей ВЧР и когерентности.

К областям распространения палеоврезов и палеодепрессий частично приурочены зоны распространения предположительно мерзлых пород, определяемые в волновом поле по ложному выгибанию вверх нижележащих осей синфазности, связанному с повышенными скоростями в описанных объектах.

Разрывные нарушения были прослежены с учетом анализа карт структурных атрибутов волнового поля: variance, chaos, amplitude contrast, ant-tracking.

Амплитудные аномалии, связанные с возможной повышенной газонасыщенностью, были выявлены в пластах H_6 и H_7 по результатам анализа AVO-атрибутов и кроссплотов Intercept – Gradient.

В 2021 году специалистами АО «МАГЭ» была разработана система ранжирования геологических опасностей на Арктическом шельфе, учитывающая особенности проявления опасностей на сейсмических данных.

Исходные данные для ранжирования выделенных опасностей включают в себя набор сейсмических и сейсмогеологических признаков, влияющих на повышение риска при бурении (таблица 1). По степени риска все выделенные геологические опасности делятся на 3 класса: 1 класс − низкая, 2 класс − средняя, 3 класс − высокая. Методика системы ранжирования геологических опасностей реализована с помощью алгоритма машинного обучения «random forest».

Таблица 1. Сейсмические и сейсмогеологические признаки для ранжирования опасностей

Сейсмические и сейсмогеологические признаки для ранжирования амплитудных аномалий по степени риска			
1	Субвертикальная зона потери корреляции по всей глубине разреза, не связанная с акустической тенью ("газовая труба")	2	Амплитудная аномалия «яркое пятно» с превышением над фоновыми значениями амплитуд более чем в 10 раз
3	Горизонт BSR	4	Аномалия типа «плоское пятно»
5	Полное экранирование нижележащей части разреза	6	Зона снижения акустической контрастности записи (зона осветления)
7	Снижение амплитуд отражений под аномалией (частичное экранирование нижележащей части разреза)	8	Отрицательная скоростная аномалия, установленная по результатам скоростного анализа
9	Признаки фокусированной разгрузки флюидов/газа на дне	10	Ослабление высокочастотной составляющей спектра отражений под аномалией
11	Признаки вертикальной миграции газа в вышележащую часть разреза	12	Признаки вертикальной миграции газа из нижележащей части разреза
13	Зона потери или ухудшения корреляции	14	Аномалия типа «тусклое пятно»
15	Приуроченность к разломам или тектонически ослабленным зонам	16	Установленная обратная полярность относительно донного отражения
17	Отрицательная скоростная аномалия, предполагающаяся по косвенным признакам (ложное прогибание нижележащих осей синфазности)		
Сейсмические и сейсмогеологические признаки для ранжирования разрывных нарушений по степени риска			
1	Проявление в современном рельефе дна	2	Приуроченность зон фокусированной разгрузки флюидов
3	Приуроченность аномалий, связанных с газонасыщением и признаками вертикальной миграции флюидов	4	Прослеживаемость по вертикали вплоть до основания изучаемого разреза (при глубинности исследований более 300 м)
5	Вертикальное смещения слоев более чем на 3 м на глубине менее 50 м от дна	6	Пространственная приуроченность к глубинным разломам
7	Прослеживаемость в верхней части разреза до глубин менее 50 м от дна	8	Значительная протяженность в плане (более 500 м)
9	Признаки оползневых процессов		
Сейсмические и сейсмогеологические признаки для ранжирования палеоврезов и палеодепрессий по степени риска			
1	Выраженность в рельефе	2	Мощность отложений палеоврезa более 50 м
3	Амплитудные аномалии в комплексе заполнения вреза, связанные с газонасыщенностью	4	Амплитудные аномалии, связанные с грубообломочным материалом в зоне тальвега
5	Расположение в приповерхностной части разреза (до 10 м от дна)	6	Приуроченность к тектонически ослабленным зонам
7	Приуроченность мерзлых отложений		

По результатам ранжирования каждому типу геологической опасности была присвоена одна из трех ожидаемых степеней риска. В разрезе исследуемой площади были выявлены палеоврезы и палеодепресии низкой и средней степеней риска; области распространения предположительно мерзлых пород средней и высокой степеней риска; разрывные нарушения

низкой и средней степеней риска; амплитудные аномалии, связанные с возможной газонасыщенностью, низкой степени риска.

Была построена сводная карта геологических опасностей, анализ которой показал необходимость коррекции положения скважин, выбранных на этапе выделения перспективных объектов в целевом интервале разреза (рисунок 2). По результатам совместного анализа карт геологических опасностей и перспективных объектов были рекомендованы оптимальные места для размещения поисково-оценочных скважин.

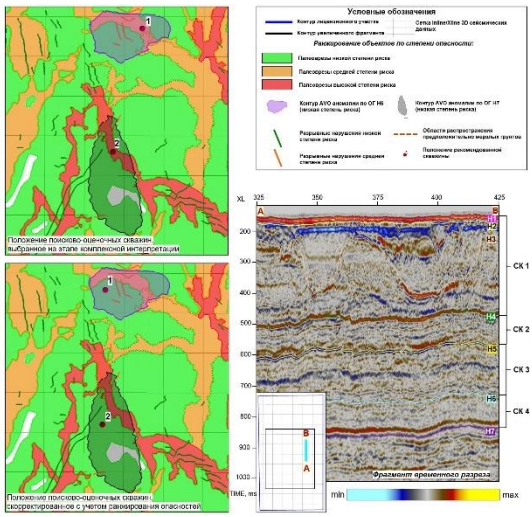


Рисунок 2. Коррекция положения поисково-оценочных скважин

Выводы

На основе проведенных исследований проведено ранжирование геологических опасностей ВЧР по степени риска и подготовлена их сводная карта. Полученные результаты позволили скорректировать положения поисково-оценочных скважин, выбранные на этапе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, и рекомендовать наиболее оптимальные области при их размещении.

Библиография

1. Ерж О.В. и др. Разработка системы ранжирования геологических опасностей на Арктическом шельфе. «Инженерная и рудная геофизика 2021» — Геленджик, Россия, 26 - 30 апреля 2021 г.

2. Кохан А.В. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124.

3. Росляков А.Г. и др. Использование данных 3D-сейсморазведки при выявлении и картировании геологических опасностей на шельфе Карского моря. «Инженерная и рудная геофизика 2021» — Геленджик, Россия, 26 - 30 апреля 2021 г.

4. Холмянский М.А. и др. Криолитозона северо-западного арктического шельфа России. Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 1, с. 3–12.

Сингулярно-спектральный анализ как инструмент дифференцирования зашумленных экспериментальных кривых забойного давления при гидродинамическом исследовании скважин

Бахмутский М.Л. (НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, mbakhmut@mail.ru)*

Аннотация

В работе предложен эффективный и точный метод дифференцирования зашумленных кривых изменения забойного давления, регистрируемых при гидродинамических испытаниях скважин. Метод основан на сингулярно-спектральном анализе временных рядов.

Ключевые слова

метод, дифференцирование, временные ряды, сингулярно-спектральный анализ

Источники финансирования

Работа выполнена за счет субсидии выделенной НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ на выполнение государственного задания по теме No.FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах».

Теория

В подавляющем большинстве случаев, гидродинамические исследования скважин основаны на измерении, последующем анализе и интерпретации кривых изменения (восстановления или падения) давления при изменении режима работы скважины.

Современный анализ результатов исследований основан на построении и анализе билогарифмического диагностического графика. Этот метод является общепринятым с 80-х годов 20-го века после работ Бурде (Bourdet) с сотрудниками и заключается в вычислении производной давления и построении диагностического log-log графика для кривой изменения давления и ее логарифмической производной в зависимости от логарифма времени испытаний. На рис. 1 приведен типичный (теоретический) график.

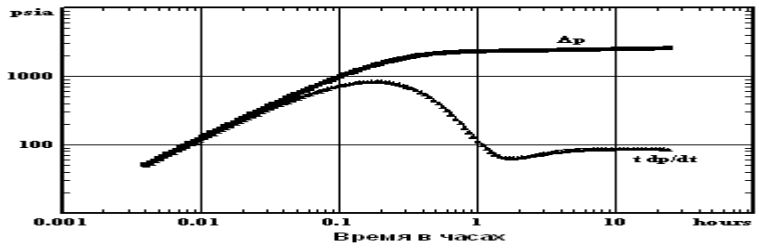


Рисунок 1. Типичный диагностический график

Этот график взят из учебника Стэнфордского университета [1]. По поведению производной мы можем судить о приемлемой модели пласта (наличие трещин, разломов, расстоянии до границ пласта, пригодности модели двойной пористости и т.д.). Вычисление производной давления является некорректной задачей, т.к. процедура дифференцирования данных усиливает любой шум (ограниченность точности приборов и посторонние шумы в полевых условиях). Поэтому типичный подход как в [1], так, и например, в учебнике [2] заключается в вычислении производной методом конечных разностей, разнося точки в которых

берется функция так далеко, чтобы разность значений функции значительно превышала амплитуду шумов. Однако в этом случае, во первых возникает произвол и, следовательно неверные значения производной и ошибки интерпретации, во вторых производная не может быть вычислена в точках близких к концу кривой изменения давления, т.е. там где она представляет наибольший интерес.

На рис. 2 приведен пример кривой восстановления давления скважины одного из месторождений Западной Сибири.

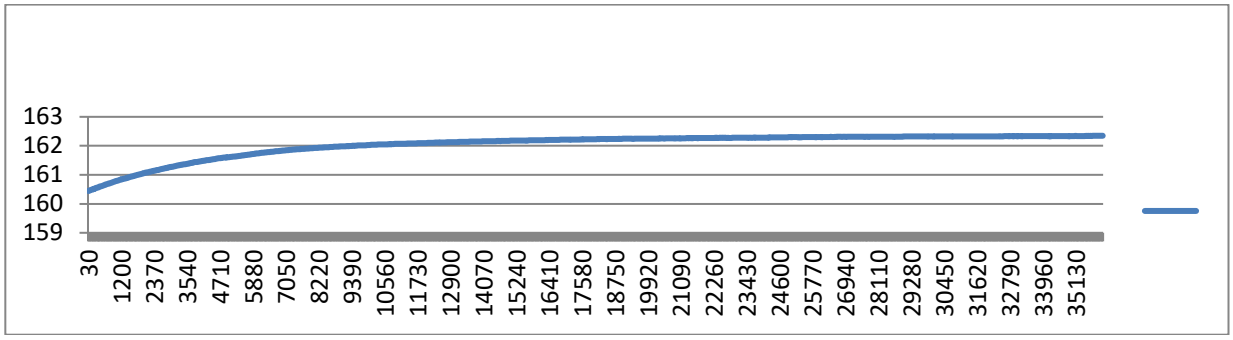


Рисунок 2. Кривая восстановления давления скважины одного из месторождений Западной Сибири. По оси ординат давление (в атмосферах), по оси абсцисс – время (сек)

Вычислим производную этой кривой по формуле $f_i' = \frac{f_{i+1}-f_{i-1}}{x_{i+1}-f_{i-1}}$. Такой алгоритм резко увеличивает амплитуду шума, однако значения шума не перестают быть случайными величинами. На рис.3 приведен график производной вычисленной по этой формуле.

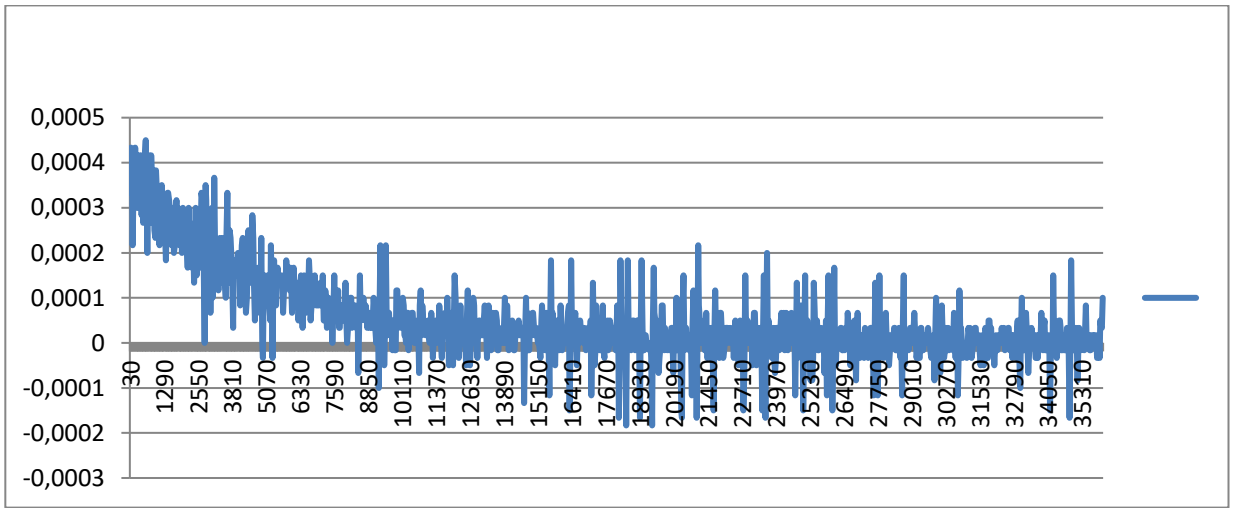


Рисунок 3. График производной вычисленной по формуле $f_i' = \frac{f_{i+1}-f_{i-1}}{x_{i+1}-f_{i-1}}$. По оси ординат производная давления (в атм./сек.), по оси абсцисс – время (сек)

Воспользуемся спектрально-сингулярным анализом(SSA) для выделения сигнала из шума. Метод SSA [3], [4] основан на построении по исходному временному ряду так называемой траекторной матрицы и ее аппроксимации при помощи сингулярного разложения матриц. Поэтому его можно рассматривать как исследование временного ряда хорошо известным в статистике методом главных компонент (другое название – метод естественных ортогональных

функций). В докладе приводятся детали метода, здесь же приведем некоторые результаты. На рис.4 приведены 10 наибольших сингулярных чисел (из более 600).

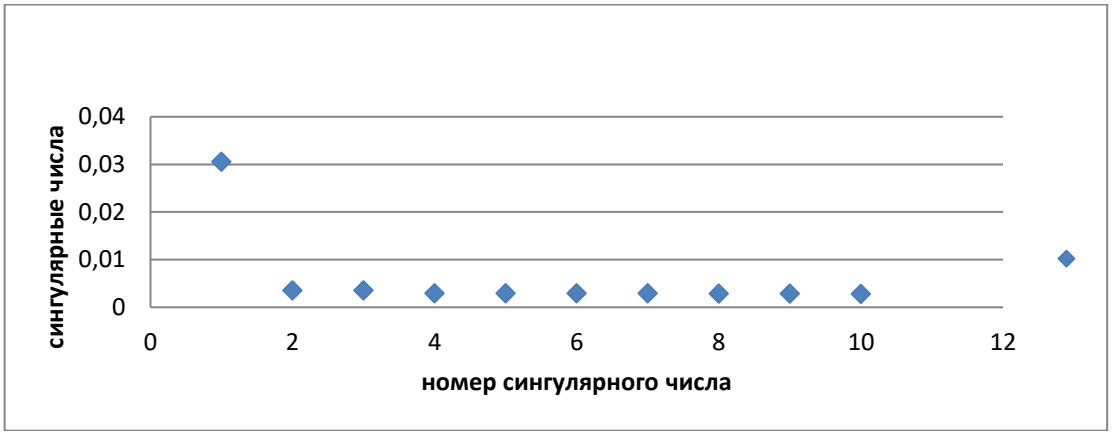


Рисунок 4. 10 максимальных сингулярных чисел (из более 600)

Легко видеть, что первое сингулярное число резко выделяется, остальные медленно и монотонно убывают. На рис. 5 приведен график производной, восстановленной по первой (с максимальным сингулярным числом) сингулярной тройке.

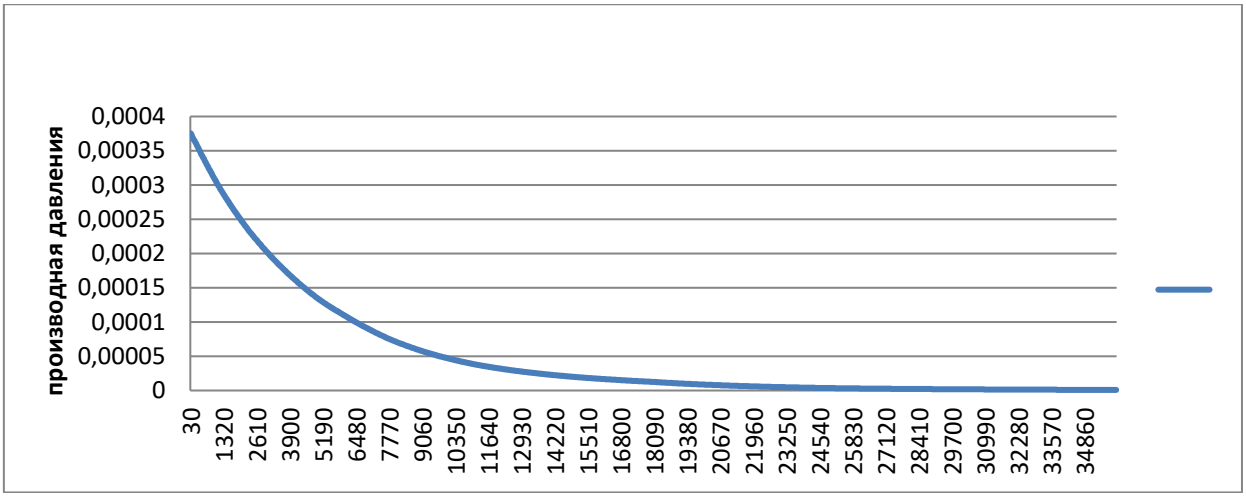


Рисунок 5. производная давления, восстановленная по первой тройке

Если мы восстановим траекторную матрицу и по ней производную по всем сингулярным тройкам, то мы получим исходную производную (рис.3). Взяв сингулярную тройку с максимальным сингулярным числом, мы получим значение производной без шума. На рис.6 приведен график производной, восстановленный при помощи двух сингулярных троек.

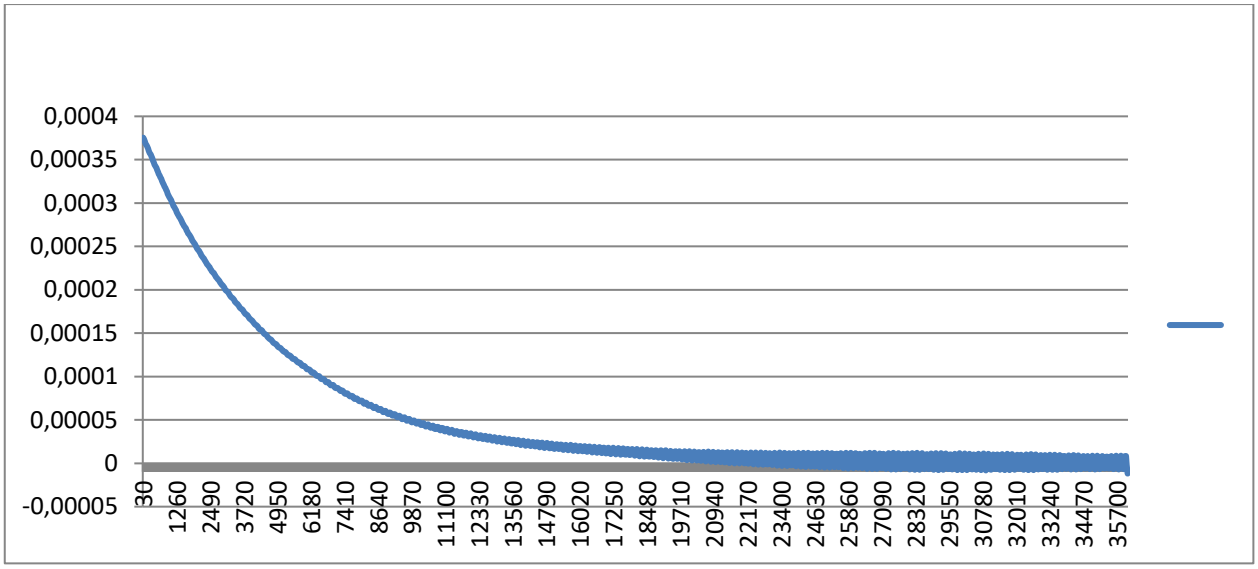


Рисунок 6. Производная, восстановленная при помощи двух сингулярных троек

Видно появление шумовой компоненты. На рис.7 приведен график производной, восстановленный при помощи трех сингулярных троек.

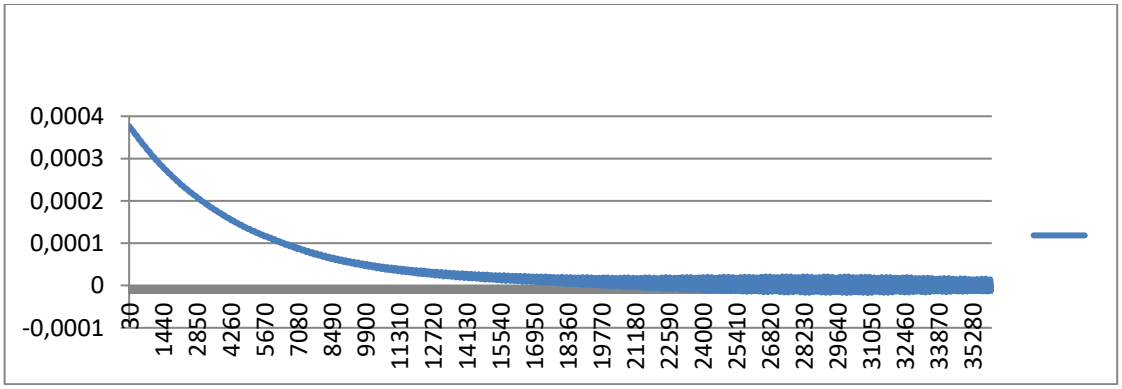


Рисунок 7. Производная, восстановленная при помощи трех сингулярных троек

Исходная кривая воспроизводится более точно, т.е. шум усиливается.

Выводы

Применение SSA позволяет корректно вычислять производные зашумленных кривых.

Библиография

1. Roland N. Horne, Modern Well Test Analysis. A Computer-Aided Approach, Petroway, 2002
2. Калиткин Н.Н., Численные методы, Санкт-Петербург, «БХВ-Петербург», 2011г.
3. Vautard R., Yiou P., Ghil M. Singular-spectrum analysis. A toolkit for short noisy chaotic signals // Physica D. – 1992 – V.58. – P. 95-126.
4. Бахмутский М.Л. Сглаживание и фильтрация больших временных рядов при гидродинамическом прослушивании скважин // Геофизика. – 2018 – № 3 – С. 120-127.

Нормализация гамма-каротажа скважин месторождения X Кыулонгкого басейны, Вьетнам

Буй Т.Н.* (Ханойский университет горного дела и геологии, buithingan@humg.edu.vn),
Лэ Н.А. (Ханойский университет горного дела и геологии, lengocanh@humg.edu.vn),
Нгуэн Д.М. (Ханойский университет горного дела и геологии, nguyenduymuoi@humg.edu.vn),
Нгуэн Т.Т.Х. (Ханойский университет горного дела и геологии, nguyenthithuhang@humg.edu.vn)

Аннотация

В рамках данного исследования был проведен статистический анализ и построены гистограммы данных гамма-каротажа скважин месторождения X в Кыулонгком бассейне, Вьетнам. Был выполнен процесс нормализации гамма-каротажа скважин с применением статистического метода.

Ключевые слова

Гамма-каротаж, гистограмма, нормализация, распределение данных

Теория

Гамма-каротаж – это один изи самых пополярных и полезных инструментов для определения интервалов песчанистых и глинистых фаций. Гамма-каротаж измеряет естественную радиоактивность горных пород и данные отображаются в единицах API. Однако записи гамма-каротажа могут содержать неточные показания, вызваные различными факторами, такими как плохая калибробка, влияние окружаюшей среды, состав горной породы [1]. Нормализация гамма-каротажа играет важную роль в обеспечении точности измерений. Этот процесс включает перемасштабирования или перекалибровки каротажных данных таким образом, чтобы они соответствовали другим данным каротажа из других скважин на месторождении [4]. Таким образом, нормализация каротажных диаграмм позволяется улучшить интерпретацию данных геофизических исследований скважин, и более точной оценке свойств пласта, что в свою очередь помогает принимать обоснованные решения при разработке месторождений [3].

Предоставленный набор данных содержит записи гамма-каротажа для 5 скважин месторожения X на шельфе басейна Кыулонга во Вьетнаме. Данные включают: название скважины, глубину измеренную, данные проведенного каротажаю. Статистический анализ гамма-каротажа скважын представлен в таблице 1.

Таблица 1. Статистический анализ гамма-каротажа скважин

Параметры статистики	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Медиана	Максимум
Скв. D1	97.16297	14.08558	55.4329	96.492	151.0794
Скв. D2	92.16468	19.852345	43.8808	92.213	145.1107
Скв. D3	110.46347	22.731965	68.3704	106.2066	235.8541
Скв. D4	95.22454	21.130573	48.2156	95.4534	153.6039
Скв. D5	87.32127	17.794376	35.3095	86.9508	147.3498

Диаграмма гамма-каротажа (ГК) скважин представлена на рисунке 1. Все кривые ГК представлены в диапазоне от 0 до 200 API. На каротажном графике более высокое значение ГК указывает на более глинистую формацию, в то время как более низкое значение ГК свидетельствует о более песчаной формации.

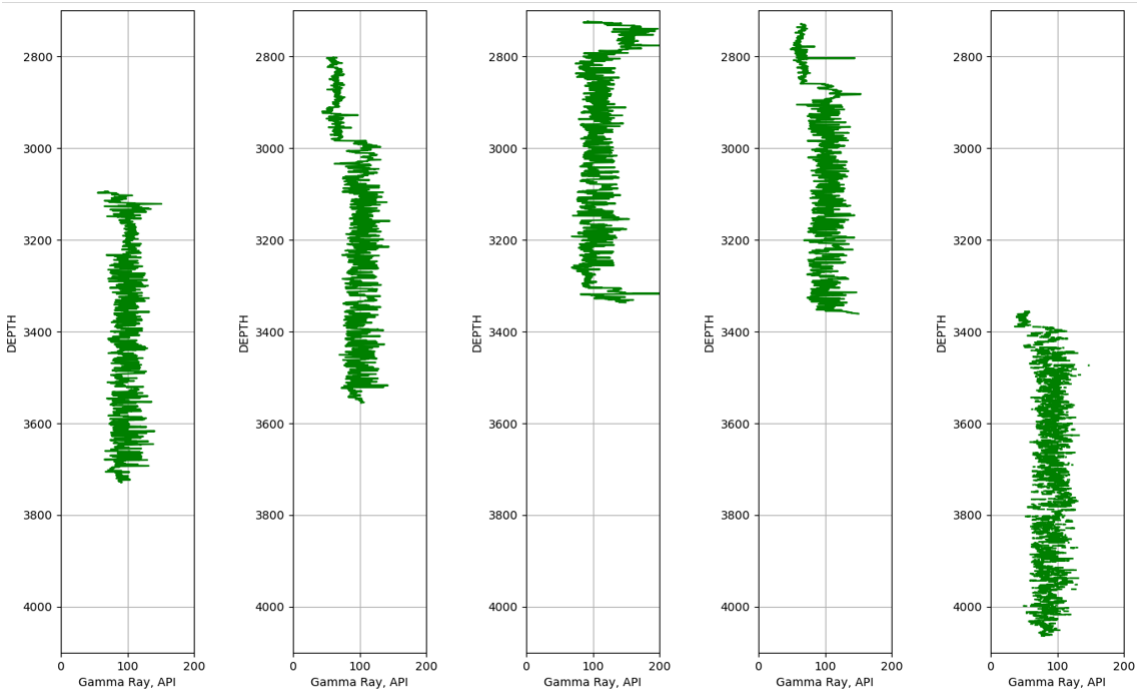


Рисунок 1. Диаграмма гамма-каротажа скважин

Гистограммы широко используются в исследовательском анализе данных. Гистогамма гамма-каратожа позволяет более точно оценить распеделение заначений в наборе данных и выделить разные геофизических интерпретационные параметры для определения характеристики резервуара. В частности, песчаники обычно содержат небольшое количество радиоактивных элементов, что ограничивает на гамма-излучение. В результате чистый песчаник с низким значением ГК отображается на гистограмме влево, в то время как сланцевый песчаник и глинистый сланец отклоняются вправо.

Дополнительно к гистограмме в форме столбцов, мы также можем добавить ядерную оценку плотности, представляющую собой линию, отображающую распределение данных. Ядерная оценка плотности (ЯОП)/Kernel density estimation (KDE) – это непараметрический способ оценки плотности случайной величины. Гистограмма гамма-каротажа скважины D1 представлена на рисунке 2. На гистогарамме отображены основные параметры статистики скважины. Распределение данных гамма-каротажа по всем пяти скважинам исследуемой территории показано на рисунке 3. Согласно Shier (2004), мы использовали статистический метод, основанный на анализе гистограмм данных ГК, для определения опорной скважины и скважины, которые необходимо стандартизировать в этом исследовании. На рисунке 3 видно, что скважина D1 можно выбрать как опорную, так как гистограмма которой находится в центре распределения гистограмм других скважин. Остальные 4 скаважины рассматриваются как объекты для нормализации. Нормализация выполняется путем корректировки кривой таким образом, чтобы 10-й и 90-й процентили были одинаковыми в каждой скважине. В статистике,

процентили P10 и P90 указывают на значения, которые разделяют упорядоченное распределение данных на десятые (P10) и девяностые (P90) процентили [2].

P10 (10-й процентиль): Это значение, которое превышают 10% значений выборки. То есть 10% данных находятся ниже этого значения.

P90 (90-й процентиль): Это значение, которое превышают 90% значений выборки. То есть 90% данных находятся ниже этого значения.

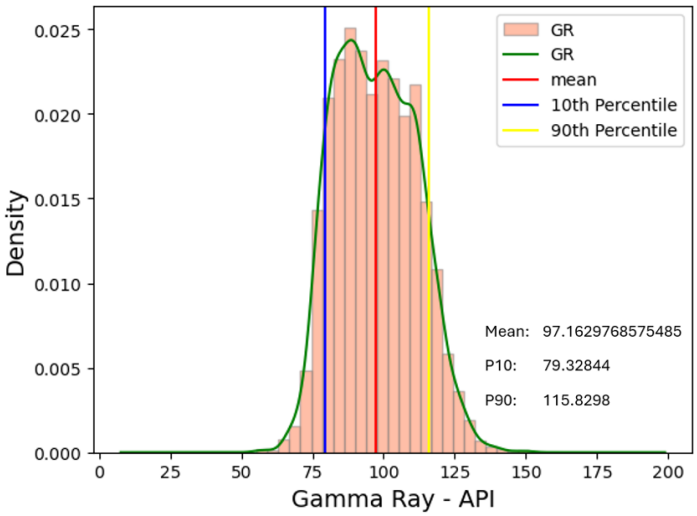


Рисунок 2. Гистограмма гамма-каротажа скважины D1

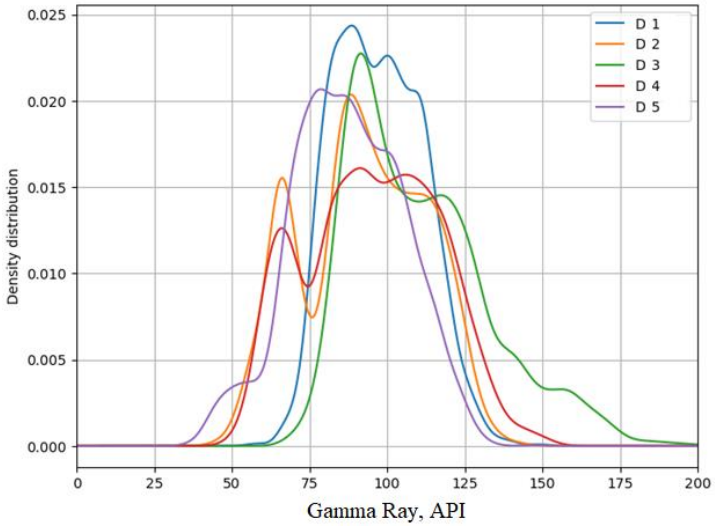


Рисунок 3. Распределение данных гамма-каротажа скважин (до нормализации)

Согласно Shier (2004), используется следующая нормализованная функция:

$$V_{norm} = R_{min} + \frac{(R_{max} - R_{min})(V_{log} - W_{min})}{(W_{max} - W_{min})} \quad (1)$$

где для каждой кривой гамма-каротажа:
V_{log} - ненормализованные значения

V_{norm} - нормализованные значения
R_{min} - заначение 10-й процентиля опорной скважины
R_{max} - заначение 90-й процентиля опорной скважины
W_{min} - заначение 10-й процентиля каждой скважины
W_{max} - заначение 90-й процентиля каждой скважины
Результат нормализации кривой ГК скважин по опорной скважине показан на рисунке 4.

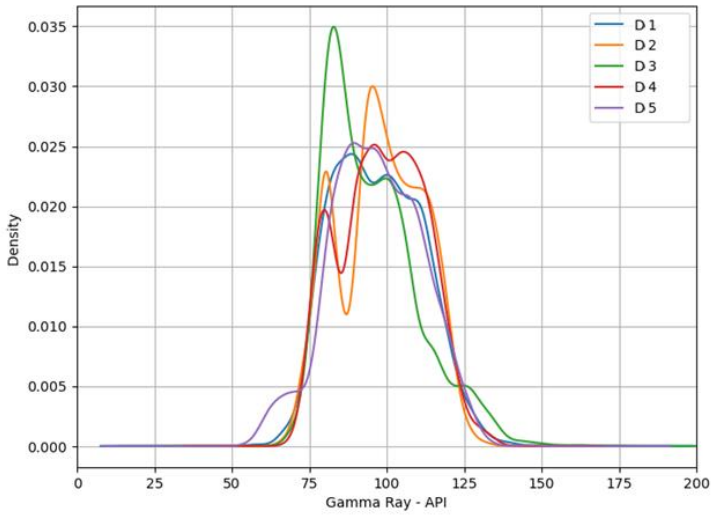


Рисунок 4. Распределение данных гамма-каротажа скважин (после нормализации)

Выводы

Таким образом, в пределах исследуемой месторождения скважина D1 была выбрана в качестве опорной и наборы данных остальных четырех скважин были нормализованы по этой скважине.

Благодарности (на ваше усмотрение)

Авторы приносят благодарность Ханойскому университету горного дела и геологии за поддержу данного исследования (под номером T24-13).

Библиография

1. Aly, A. M., Hunt, E. R., Pursell, D. A., & McCain, W. D. (1997). Application of Multi-Well Normalization of Open Hole Logs in Integrated Reservoir Studies. SPE Western Regional Meeting. doi:10.2118/38263-ms
2. Ma, Y. Z. (2019). Statistical Analysis of Geoscience Data. Quantitative Geosciences: Data Analytics, Geostatistics, Reservoir Characterization and Modeling, 49–75. doi:10.1007/978-3-030-17860-4_3
3. Quartero, E. M., Bechtel, D., Leier, A. L., & Bentley, L. R., (2014). Gamma-ray normalization of shallow well-log data with applications to the Paleocene Paskapoo Formation, Alberta. Canadian Journal of Earth Sciences, 51(5), 452–465. doi:10.1139/cjes-2013-0148
4. Shier D. E. Well log normalization: Methods and guidelines Petrophysics 45, 268–80, 2004.

Новый взгляд на физику планеты Земля

Данилов В.И. (Институт Физики Земли, danvlad@bk.ru)*

Аннотация

Внешние гравитационные силы, такие как влияние Луны и Солнца, вызывают тектонические подвижки коры, что, в свою очередь, приводит к землетрясениям и процессам горообразования. Эти же силы способствуют образованию экваториальных течений в океанах, воздействуют на воздушные потоки в атмосфере, формируют приливные явления и даже оказывают влияние на временные аномалии.

Кроме того, гравитационное воздействие играет ключевую роль в формировании магнитного поля Земли, поддержании внутренней температуры планеты и создании условий, необходимых для существования жизни. Таким образом, комплексное взаимодействие гравитационных сил с земными структурами и процессами определяет климат, геологическую активность и устойчивость биосферы, делая Землю уникальным местом для жизни. Как это происходит и показано в этом докладе.

Ключевые слова

Геофизика, геомагнетизм, геотектоника, экваториальные течения, горообразование

Источники финансирования

Работа выполнена за свой счет, в свободное время.

Устранение ложных предположений и гипотез.

Сначала надо избавиться от неверно принятых некоторых постулатов.

Перечислим их, не вдаваясь в подробное раскрытие.

1. Спутники на свои планеты не падают и не промахиваются. Движение по орбите происходит под действием ускорения криволинейного движения, а не свободного падения.
2. «Сила Кориолиса» – это фиктивная, виртуальная, ни на что не действующая «сила». Это понятие используется при смене системы координат.
3. Конвекции в теле планеты нет и быть не может. Все гео «теории», построенные с использованием этого понятия, не имеют права на существование.
4. Нет в физике такого явления как «геодинамо». Магнитное поле создается электрическим током или постоянным магнитом.
5. Источником поддержания высокой температуры внутри планеты сомнительно считать ядерную реакцию (радиогенная гипотеза).
6. Прилив воды в океане не соответствует, а даже противоположен, приливу (горбу) коры Земли.

Предлагаемая физика внутреннего строения планеты

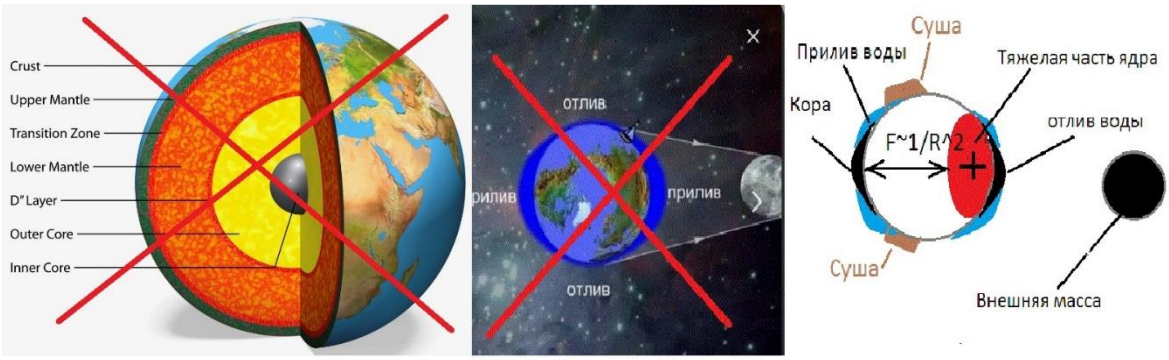


Рисунок 1. Слева принятая структура и модель взаимодействия Земли с внешней массой, справа предлагаемая

Для исследования использовались следующие данные и явления:

1. графики гравитационных сил [1], с наложенными на них положениями внешних влияющих масс (Солнца и Луны).
2. Формы и направления магнитных полей планет. Графики сезонных изменений естественных импульсов магнитного поля Земли.[2]
3. Направления основных экваториальных ветров, течений и противотечений.[3].
4. Уровни океана, прилива и отлива, совмещенные с измеренными силами притяжения.[4].

В процессе исследования графиков поведения гравитационных сил в течении года, выявилась закономерность, вызванная движением массы внутри планеты. Обнаружилась зависимость силы притяжения не только от внешних масс Луны и Солнца, но и от притянутых ими внутренних масс планеты. Силы притяжения от этих масс имели явную зависимость от взаимного расположения Солнца и Луны и от их расположения относительно пункта измерений. Выявлены сезонные гармоничные колебания, вызванные сменой угла наклона оси вращения Земли.

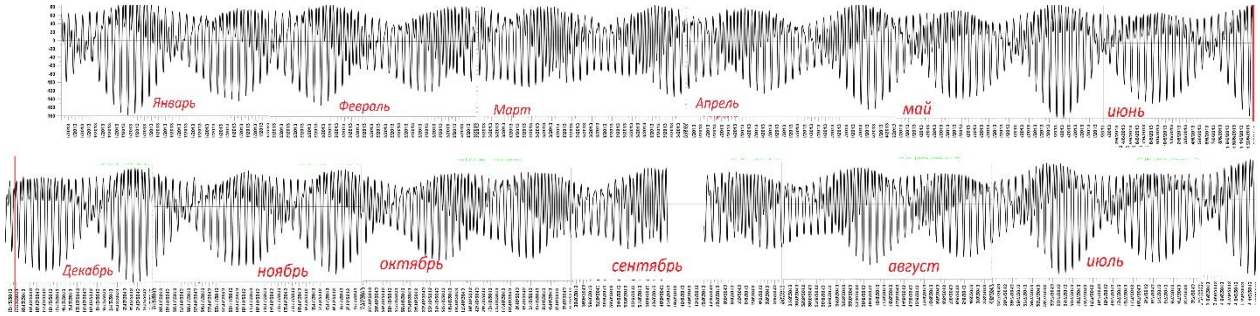


Рисунок 2. Поведение гравитационных сил до 22 июня и зеркальное отображение после, район побережья Японского моря , 2013 год

Очень хорошо видно почти идеальное совпадение значений до 22 июня (дня Летнего Солнцестояния) и зеркального отображения после, что свидетельствует о повороте спирального движения в сторону Южного полушария, а так же повороте 22 декабря наоборот, в сторону Северного. Так же уменьшение амплитуды в весенние и осенние месяцы.

Предложенная и доказанная, на примерах из окружающей нас жизни, наблюдаемых природных явлений, результатов измерений и аналогичных проявлений на других планетах и Солнце, новая физика, а вернее подход к происходящему, позволила объяснить многие явления на планете. В их число входят - геотектонические подвижки, горообразование, основные экваториальные течения и ветра, приливы в океане, магнитное поле планеты, сейсмические проявления, сдвиги астрономического времени. На других планетах это дифференцированное движение различных зон, цикличность пятен на Солнце, различие в формах, направлениях и значениях магнитных полей планет.

Предложенный подход заставляет пересмотреть принятое представление внутреннего строения планет, источников нагрева их содержимого, влияющее на климат. Раскрываемое взаимное влияние планет приводит к объяснению поведения планет – например, почему Луна и многие спутники в Солнечной Системе вращаются повернувшись одной стороной к своим планетам.

Этот подход может помочь в раскрытии загадки образования нефти в Земле, формировании залежей природных ископаемых. Наверное, это только начало большого числа открытий с его помощью, правда, при этом, придется пересмотреть многие сформировавшиеся убеждения.

Выводы

Исходя из результатов исследования, приходится признать ошибочность ныне принятого представления структуры планеты и объяснения, на этой основе, происходящих на, и внутри, ее, геофизических процессов. Предложенное новое представление позволяет, на примере порядка десятка наблюдаемых явлений, по-другому их объяснить. Причем это может быть показано на простых примерах, не вводя допущений и не реальных предположений. И это только начало. Профильные специалисты, несомненно, смогут добавить примеров из своих областей. Этот подход поможет по-другому взглянуть на процесс появления природных ископаемых на планете, а, следовательно, и путей их поиска.

Предлагаемая физика показывает общую причинно-следственную связь, казалось – бы, независимых природных явлений и позволяет одной причиной объяснить сразу несколько, что уменьшает возможности манипуляции данными, придумывая для каждой планеты и для каждого явления свои скрытые, не существующие, на вроде ныне принятой конвекции, механизмы.

Благодарности

Выражаю благодарность д.ф.-м.н. Моргунову Виталию Александровичу, за то, что в свое время, заинтересовал этой областью науки.

Посвящаю моему внуку Ярославу, с надеждой, что в школе он будет изучать физику уже с учетом изложенного материала.

Библиография

1. ВЕСТНИК КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2015. № 3. ВЫПУСК № 27 З.Н.Прошкина, М.Г.Валитов, Р.Г.Кулинич, Т.Н.Колпащикова ИЗУЧЕНИЕ ПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА ОТ КОНТИНЕНТА К ЯПОНСКОМУ МОРЮ
2. Ю.П. Малышков, С.Ю. Малышков “ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И СЕЙСМИЧНОСТИ, ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С ДВИЖЕНИЕМ ЯДРА ЗЕМЛИ” // Геология и геофизика,- 2009- т. 50- № 2- с. 152—172
3. Гарецкий Р.Г. Добролюбов А.И. «Приливные дискретно-волновые движения и дрейф континентов». Геотектоника 2006, N1, с. 3-13

4. Данилов В.И. «Последствия взаимного влияния планет» ж. "Геофизический вестник" N3 2017 стр 11.

Учет динамики коэффициента сжимаемости порового пространства при закачке и отборе газа на Увязовском ПХГ

Кузьмин Д.К. (ИФЗ РАН, dimak1292@mail.ru)*

Аннотация

Рассмотрены результаты исследования влияния знакопеременных изменений пластового давления на объемную сжимаемость пластов хранения газа. Разработана и практически апробирована методика оценки изменения вертикальных смещений земной поверхности над подземным хранилищем газа, учитывающая динамику коэффициента сжимаемости порового пространства во времени. Установлено, что поправка в амплитуде смещений значительна и указывает на необходимость использования данной методики при оценке ожидаемых оседаний и поднятий при эксплуатации ПХГ

Ключевые слова

Моделирование, сжимаемость, вертикальные смещения, пластовое давление

Источники финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Теория

Обеспечение надежных и бесперебойных поставок газа с действующих и проектируемых подземных хранилищ газа требует сложных технологических подходов, что обеспечивается повышением их наукоемкости и безопасности. Для обеспечения безопасного увеличения объёмов закачки и отбора газа на ПХГ необходимо повышение эффективности их эксплуатации за счет учета влияния геомеханических процессов. Значительный диапазон разброса величин коэффициентов сжимаемости сильно влияет на адекватность оценок просадок земной поверхности подземных хранилищ газа.

Объектом исследований является Увязовское ПХГ, созданное в 1998г в коллекторах щигровского горизонта верхнего девона - водоносном пласте антиклинальной структуры. Расположено в пределах Окско-Цнинского вала Русской плиты и в плане имеет вид правильного овала с размерами 20 на 4 км вдоль его длиной и короткой оси. Отбор газа из ПХГ за сезон 2022/2023г ожидается ~5 млрд.м^3. Пласт-коллектор состоит из двух песчаных пачек, разделенных глинистым пропластком. Толщина верхней песчаной пачки «щигры-1», являющейся основным пластом-коллектором, изменяется до 25 м. Схематический профиль строения пласта-коллектора Увязовского ПХГ приведен на рисунке 1 [1].

Основной объект закачки и хранения газа на Увязовском ПХГ сложен переслаиванием песчаников, алевролитов с подчиненными прослоями глинистых алевролитов. Верхняя часть пласта (щигры 1) толщиной до 11-30м (в среднем 15м) сложена песчаниками мелкозернистыми, хорошо сортированными, сильно алевритистыми, обогащенными крупноалевритовым материалом, глинистая фракция составляет в среднем 5-10%. Нижняя часть пласта (щигры 2) толщиной до 30-35 м (в среднем 20 м) сложена однородными мелкозернистыми песчаниками с глинистостью менее 5%. Минерально-петрографический состав верхней и нижней частей пласта полностью идентичен.

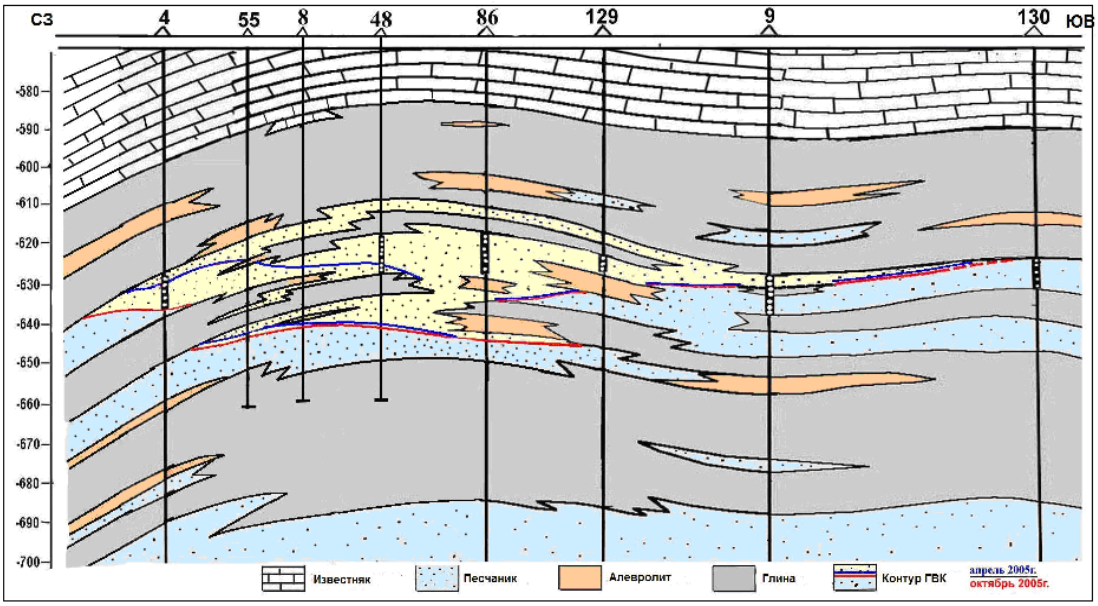


Рисунок 1. Схематический профиль Увязовского ПХГ вдоль длинной оси структуры

В статье [1] были исследованы 22 образца алевролитов крупнозернистых Увязовского ПХГ, имевшие в атмосферных условиях пористость от 18.4% до 38.1% и проницаемость от 148 до 3035 мД, изготовленные из керна, отобранного с глубины 765-810 метров. Анализ зависимости плотности от пористости исследованных образцов в атмосферных и пластовых условиях проводилось по методике [2]. При этом непосредственно измерялся объём поровой жидкости, выдавливаемой из образца при увеличении его всестороннего обжатия, что позволило рассчитать не только изменения пористости, но и объёмные деформации образца и его порового пространства. Они рассчитывались с учетом того, что коэффициент сжимаемости скелета горной породы на несколько порядков превосходит коэффициент сжимаемости порового пространства [3, 11-12].

Оценка коэффициента сжимаемости при т.н. дифференциальном подходе (предполагает оценку изменения значений коэффициентов сжимаемости в выбранном интервале изменения эффективного давления, например, при отборе или закачке газа на ПХГ) основана на данных об изменении объема порового пространства на отдельных участках изменения эффективного давления. Известно, что с увеличением эффективного давления коэффициент поровой сжимаемости уменьшается и наоборот.

Исследованные 22 образца в работе [1] показали следующие результаты зависимости: при изменении пластового давления с 5 до 10 МПа, коэффициент сжимаемости увеличился с $3{,}4 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ 1/МПа.

В данной работе автором предложено рассчитать вертикальные смещения земной поверхности в периоды отбора и закачки газа на Увязовском ПХГ, например, при изменении пластового давления на 5МПа. Ожидаемые величины оседания и поднятия земной поверхности рассчитываются на основе генетической модели деформируемого пласта-коллектора [12-15]. Эта модель была успешно апробирована на ряде сухопутных и шельфовых нефтегазовых месторождений [4-10; 16-17]. На основе геологического профиля (рис. 1), были определены геометрические параметры ПХГ: длина пласта 20 км., ширина пласта 4 км., средняя глубина залегания 800м, эффективная мощность пласта 35м. Результаты моделирования показаны на рисунке 2.

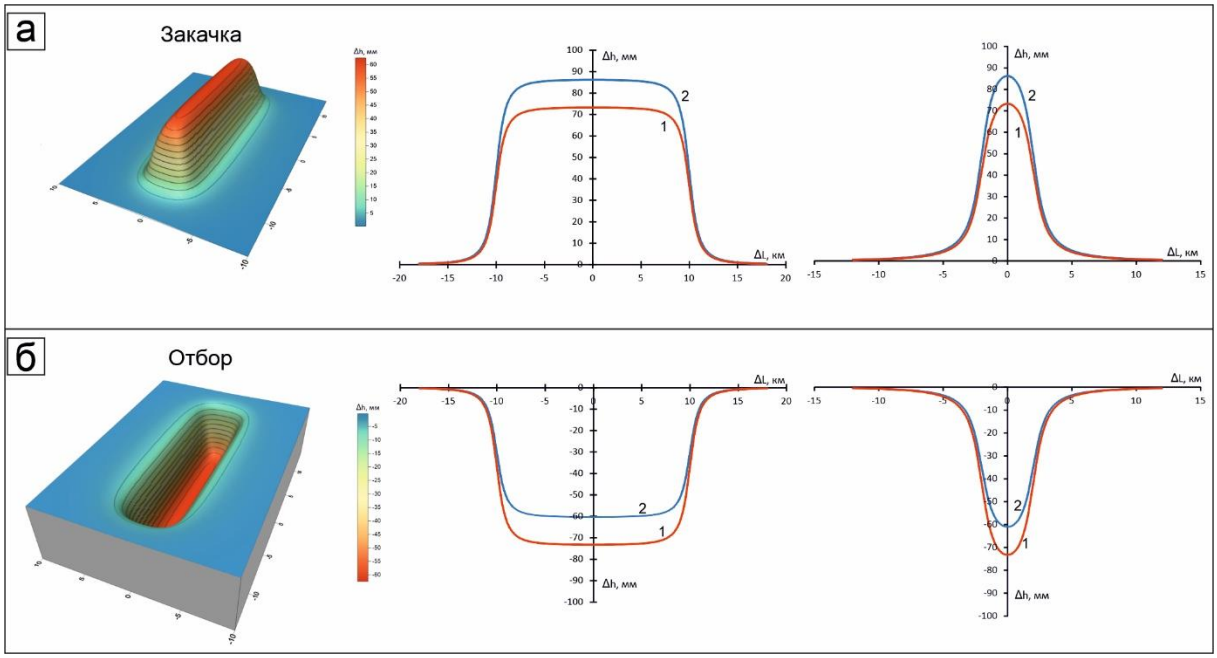


Рисунок 2. Циклические вертикальные смещения при закачке (а) и отборе (б) газа на Увязовском ПХГ, а также сечения вдоль и вкрест простирания пласта

Расчёт вертикальных смещений производился для двух вариантов, в первом из которых не учитывалась динамика коэффициента сжимаемости за время изменения пластового давления на 5МПа – красные кривые. Во втором случае (синие кривые) приведены оценки вертикальных смещений с учетом изменения коэффициента сжимаемости на $\pm 0{,}6 \cdot 10^{-3}$ 1/МПа. Как видно из рисунка 2, разность амплитуд в вертикальных смещениях между обоими случаями составляет порядка 14 мм.

Выводы

Полученные результаты указывают на необходимость учитывать временную динамику такого параметра как коэффициент сжимаемости порового пространства при расчете ожидаемой оценки смещений земной поверхности на Увязовском подземном хранилище газа. Предложенный подход может быть использован и на других аналогичных объектах.

Благодарности

Автор с благодарностью посвящает эту работу памяти Виталия Семеновича Жукова, который внес существенный вклад в экспериментальные исследования петрофизических свойств горных пород.

Библиография

1. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка сжимаемости порового пространства коллекторов Увязовского ПХГ // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. №3. С. 5-20.
2. Жуков В.С., Люгай Д.В. Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий / М.: Газпром ВНИИГАЗ. 2016. 56 с.
3. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного Института. 2021. Т. 251. № 5. С. 658-666. DOI 10.31897/PMI.2021.5.5

4. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка влияния разработки Чаяндинского месторождения на просадки земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. №1. С. 73-84.

5. Kuzmin D.K., Kuzmin Y.U. O., Zhukov V.S. Assessment of ground surface subsidence during Chayanda field development with regard to changes in petrophysical parameters of oil and gas reservoirs // Eurasian mining. 2022. №2 (38). С. 11-15.

6. Zhukov V.S., Kuzmin D.K., Kuzmin Y.O., Pleshkov I.V. Comparison of forecast estimates of seabed subsidence of the Yuzhno-Kirinskoye field / // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Yuzhno-Sakhalinsk, 06–10 September 2021 Yuzhno-Sakhalinsk, 2021. P. 012019. DOI 10.1088/1755-1315/946/1/012019.

7. Кузьмин Ю.О., Кузьмин Д.К., Фаттахов Е.А. Сравнительный анализ результатов измерений донными и платформенными инклинометрами на месторождении Северного Каспия // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. №4. С. 55-66.

8. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., Ломоносов М.Д. Анализ современных деформационных процессов на газонефтяном месторождении Центральной Азии // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. №3. С. 20-32.

9. Кузьмин Д.К. Метод вычислений градиентов смещений земной поверхности для оценки геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 3. С. 78-98.

10. Конырбаев Д.К., Кузьмин Ю.О., Кузьмин Д.К., Шыракбаев Д.А., Суесинов Д.Ж. Анализ результатов геодинамического мониторинга на месторождении п-ова Бузачи, Республика Казахстан // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. №3. С. 110-141.

11. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Сопоставление подходов к оценке сжимаемости порового пространства // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1006 – 1017.

12. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно - аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: МГГУ. N 9. 2002, С. 48-55.

13. Кузьмин Ю. О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С. 103-121.

14. Кузьмин Ю. О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3-18.

15. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 5-65.

16. Кузьмин Ю. О., Дещеревский А. В., Фаттахов Е. А., Кузьмин Д. К., Казаков А. А., Аман Д. В. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 53.№3. С. 31 – 41.

17. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К., Казаков А.А., Аман Д.В. Анализ результатов деформационных наблюдений системой инклинометров на месторождении им. В. Филановского // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 4. С. 86–94.

О причинах возникновения электромагнитной эмиссии (ЭМИ) в процессе нагружения горной породы

Лементуева Р.А. (ИФЗ РАН, lraifz2@mail.ru),*
Лось В.Ф. (ИФЗ РАН, lvf47@mail.ru)

Аннотация

Представленный доклад посвящен анализу результатов длительного деформирования (сутки и более) образцов горных пород в лабораторных условиях. Получены данные, позволяющие оценить роль тока абсорбции [3] и его изменений в зависимости от характера напряженного состояния в зоне наблюдений.

Ключевые слова

Деформации , электромагнитное излучение, ток абсорбции, поляризуемость

Введение

Было опубликовано свидетельство об открытии нового типа излучения [Соболев и др. 1989]. Однако природа возникновения этого явления ЭМИ остается не полностью исследованной.

При электроразведочных работах в шахтах неоднократно наблюдали импульсы различной частоты, показывающие изменение тока абсорбции, полученные с помощью аппаратуры (МСВП) [2] и аппаратуры для регистрации ЭМИ [5. 6].

Для выяснения природы ЭМИ проводились лабораторные эксперименты с помощью аппаратуры , разработанная ранее для натурных наблюдений. Эксперименты также были оборудованы аппаратурой для регистрации различных физических параметров.

Один из экспериментов по изучению взаимосвязи электрофизических параметров был проведен на модели из бетона (рис.1а, рис 1б) с концентраторами напряжений при одноосном сжатии [4].

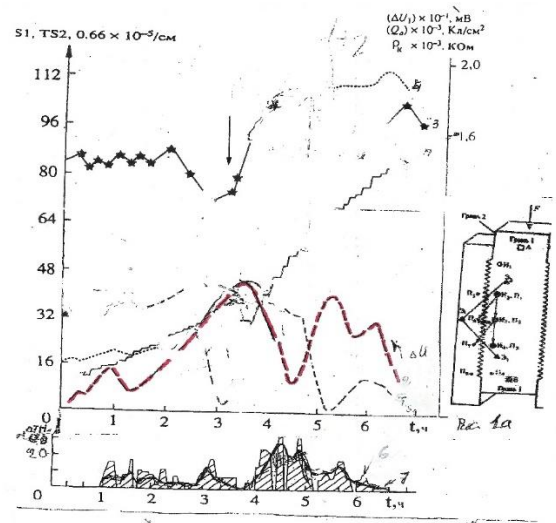


Рис.1б. Зависимость потенциала (ΔU) -2, «поляризуемости» среды (заряда Qa) - 1, величины тензометрических компонент (датчики: поперечной продольной деформации Ts1, Ts2) – 4 и 5, гистограмма АС – 6, вариации ЭМИ - 7,

В период подготовки сдвига в модели отмечался значительный рост заряда абсорбции Q_a. Падение Q_a сопровождалось появлением значительных всплесков ЭМИ. Как оказалось, это не являлось случайностью, и в другом эксперименте (ниже) это подтвердилось.

По-видимому, это было обусловлено процессами образования микротрещин происходящими при развитии деформации в зоне зацепления.

ЭМИ на этом рисунке по частоте и времени возникновения совпадает с акустической эмиссией (АС).

В следующем эксперименте применялся образец из бетона с концентраторами напряженного состояния Рис 2а и рис 2б.

В эксперименте ЭМИ регистрировалось в процессе всего наблюдения с помощью антенны и аппаратуры [5]. Появление отрывных и сдвиговых микро и крупномасштабных трещин контролировалось методом УЗП.

Наибольшие изменения отмечены, когда наблюдались деформации максимального сдвига (рис 2б).

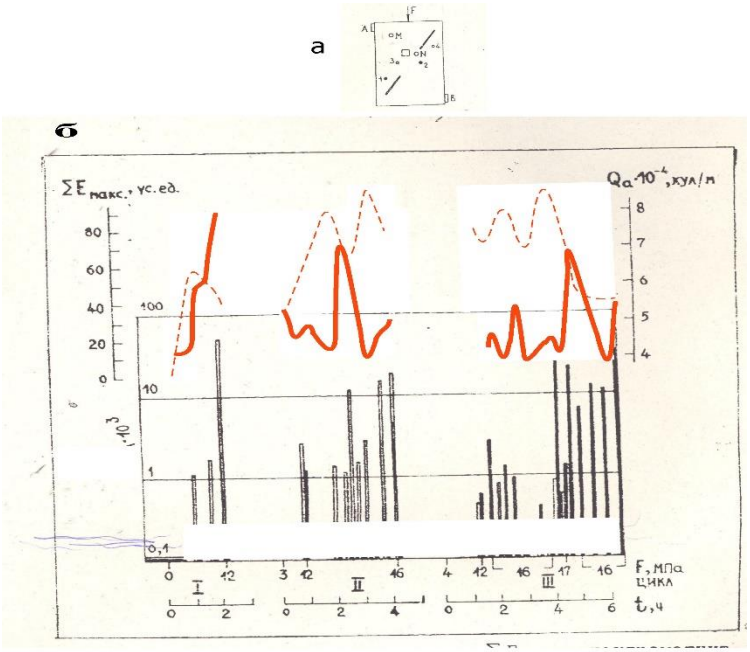


Рисунок 2, рисенок 2б. Образец из бетона с концентраторами напряженного состояния; б – изменение ЭМИ и Qa, график 3 показывает изменение коэффициента К= Vp/Vs.
Понижение заряда абсорбции в результате закрытия трещин приводит к увеличению ЭМИ

Отмечено, что возникновения ЭМИ (max) приурочено к моменту значительного понижения заряда абсорбции. Выявлено, что максимальные всплески ЭМИ приурочены к сдвиговым подвижкам возле концентраторов .

Из рис 2б видно, что локальное уменьшение Qa на всех этапах разрушения предшествует возникновению пяти «всплесков» ЭМИ, а значительные амплитуды К отражают состояние деформации сдвига (повышенный коэффициент К) на контакте концентраторов.

Коэффициент К характеризовал интенсивность динамики процесса разрушения.

Предполагается, что сигналы АС явились одной из причин возникновения ЭМИ. (ЭМИ и АС происходят одновременно при возникновении трещин и деформационных сдвигов)

Рост заряда тока абсорбции (Qa)-являлся следствием интенсивной поляризуемости в зоне концентраторов .

Подобные явления были отмечены также в ходе экспериментов на образцах из шахты, где проводились электроразведочные работы.

Выводы

1. При развитии трещин любого порядка локально возрастает поляризуемость горной породы, что приводит к возникновению тока абсорбции и соответственно заряда абсорбции.(Так как ЭМИ регистрировалось именно в зоне активного трещинообразования).

В лабораторных экспериментах как и в натурных (шахты) условиях было обнаружено, что акустическая эмиссия и максимальное значение ЭМИ регистрировались синхронно при падении ΔU и заряда абсорбции. .

2. Наиболее вероятным источником электромагнитных импульсов (ЭМИ), регистрируемых в лабораторных экспериментах являются возникновение и перемещение электрических зарядов. Это явление является следствием появления вторичных токов и увеличения поляризуемости (при нагружении, вплоть до разрушения горной породы).

Отмечено, что при взрывах в шахтах (выявление слоев с полупроводниковыми минералами) наблюдалось (300 м от взрыва) возникновение ЭМИ как следствие появления значительных вторичных токов.

Библиография

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука,. 2003. 270с

2. Бобровников Л.З., Орлов Л.И., Попов В.А. Многоканальная станция метода вызванной поляризации // Электроразведочная аппаратура: Справ. М.: Недра, 1986. С.79-85.

3. Сидоров В.А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Физика Земли. 1987. № 10. С.67

4. Демин В.М., Лементуева Р.А., Майбук Ю.З. и др.1998, 8,М. Недра

5. Лось В.Ф., Лементуева Р.А,, Ирисова Е.Л. Изучение электромагнитного излучения (ЭМИ) в лабораторных исследованиях и особенности применяемой аппаратуры. Сейсмическая аппаратура М. 2011, т 44, с-38.

6. Лось В.Ф. и др 1986, Демин В.М , Лементуева Р.А, Понятовская В.И., Взаимосвязь электрических и электромагнитных полей с деформацией и ультразвуковым прозвучиванием на образцах горных пород.//Физика земли 1986 №7 с. 45-56 М. Наука

Методы выделения потенциально геоопасных районов на основе цифровой модели рельефа дна

Либина Н.В. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, libina.nv@ocean.ru),*
Ковачев С.А. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, kovachev@ocean.ru)

Аннотация

Геоморфометрические методы анализа цифровых моделей рельефа (ЦМР) дна позволяют выявлять линеаменты регионального масштаба, уклоны, кривизну, участки экстремального изменения формы рельефа и ряд других параметров влияющих на формирование опасных процессов на дне.

Ключевые слова

Геоморфометрические методы, цифровая модель рельефа дна, геологические опасности, линеаменты, кривизна рельефа

Источники финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0019.

Теория

К реальным и потенциальным геологическим опасностям на морском дне относятся такие процессы, как: землетрясения, оползни, обвалы, проседания морского дна, неустойчивость морского дна, мутьевые потоки, многолетнемерзлые, газонасыщенные и газогидратонасыщенные грунты, газопроявления, экзарация, абразия, литодинамические процессы, миграция донных наносов и песчаных волн, выходы скальных пород [3, 4, 5 и др].

Некоторые явления могут происходить как самостоятельно, так и в следствии других процессов. Например, землетрясения могут служить триггером, запускающим оползневые процессы, просадки грунта, резкое изменение литодинамических процессов, выбросы флюидов, усиление газопроявления и др. Любое опасное геологическое явление может повлечь за собой ряд негативных процессов, которые, аккумулируясь, увеличат непредсказуемое воздействие и возрастание георисков.

К числу наиболее сложных задач морских исследований и изысканий относится проблема картирования на морском дне активных тектонических разломов большой протяженности и определения расчетных значений сейсмогенных подвижек и смещений по разрывам [5]. С учетом того, что Черное, Каспийское, Берингово, Охотское, Японское моря и море Лаптевых относятся к сейсмоопасным районам задача выделения активных разломов весьма актуальна, как сама по себе, так и при оценки сейсмической опасности и разработке моделей зон возникновения очагов землетрясений указанных акваторий.

В морских условиях отсутствует возможность использовать линеаментный анализ по данным дистанционного зондирования земной коры. Перспективными можно считать применение методов моделирования на основе анализа цифровых моделей рельефа дна и геофизических полей. В частности могут применяться геоморфометрические методы, высокочастотные фильтры выделения пороговых значений, экстремальных, градиентных участков дна, где могут проявляться потенциально опасные геологические явления. Геоморфометрический анализ ЦМР дна позволяет выявлять линеаменты регионального масштаба, уклоны, кривизну, участки экстремального изменения формы рельефа и ряд других параметров, влияющих на формирование опасных процессов на дне.

До недавнего времени геоморфометрический анализ на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) дна не имел широкого применения из-за недостатка или низкой надежности цифровой

батиметрии большинства морей. Тем не менее, регулярное обновление генеральной батиметрической карты океанов General Bathymetric Chart of the Oceans – GEBCO (GEBCO), цифровой батиметрии арктических морей International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO), создание новых батиметрических карт на основе многолучевого эхолотирования создает условия для применения геоморфометрического анализа для регионального масштаба на основе батиметрической модели.

Выделение линеаментов (разломов) регионального масштаба в принципе не требует ЦМР высокой детальности. В связи с этим можно использовать ЦМР с низкой дискретностью сетки (от 1 до 5 км), или предварительно выполнить фильтрацию детальной ЦМР дна фильтром низкой частоты (ФНЧ) для сглаживания локальных отклонений рельефа.

Для выделения линеаментов по ЦМР дна Баренцева, Печерского [1], Каспийского морей и моря Лаптевых [2] мы применяли методы геоморфометрического анализа рельефа: теневой анализ и выделение килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа дна. Расчеты выполнялись на прямоугольной сетке. В качестве исходных данных для геоморфометрического анализа рельефа арктических морей и прилегающей части суши использовались соответствующие фрагменты ЦМР IBCAO v. 4.2 [9], для Каспийского моря – ЦМР «Caspy-30’’» [8]. Выделение килевых форм рельефа дна проводилось после расчета профильной (вертикальной) и плановой (горизонтальной) кривизны, морфометрических величин, основывающихся на производных второго порядка функции ЦМР и описывающих выгнутые и вогнутые формы рельефа, т.е. гребневые и килевые формы [6]. На карте кривизны строились только значения отрицательных форм кривизны соответствующие килевым формам рельефа. Далее по ним выделялись предполагаемые линеаменты

Все расчеты и построения линеаментов (возможных разломов) производились при помощи программного комплекса Surfer Golden Softwarev. Для геоморфометрических расчетов также могут использоваться модули анализа данных программных комплексов геоинформационных систем (ГИС). Перспективными также представляются методы расчета расчленения рельефа и фильтры выделения краевых эффектов.

На рисунке 1 показаны карты выделения килевых форм рельефа дна, полученных по профильной кривизне для ЦМР дна Печерского моря различной дискретности.

Результаты выделения линеаментов по распределению профильной и плановой кривизны рельефа приведены на рис. 2. На рисунке 2а показана 3D карта рельефа дна Баренцева моря с выделенными черным килевыми формами, что отчетливо демонстрирует блочное строение земной коры акватории. На рисунке 2б приведена карта Каспийского моря, на которую нанесены линеаменты, полученные в результате анализа ЦМР, эпицентры землетрясений из каталога [10], данные донных сейсмологических наблюдений Института океанологии РАН, активные разломные зоны по данным [7]. Эпицентры землетрясений проявляют активные разломные зоны и могут применяться для верификации результатов выделения линеаментов.

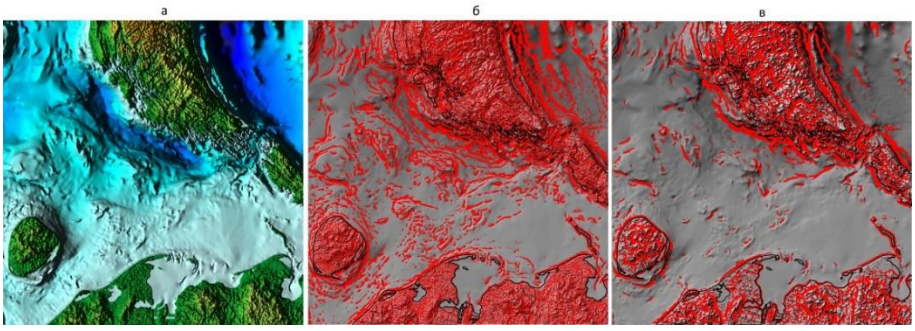


Рисунок 1. Выделение килевых форм рельефа дна по профильной кривизне

а) Карта рельефа Печерскрго моря и побережья;
б) и в) теневые карты рельефа дна с отрицательными (килевыми) формами профильной кривизны (показаны красным цветом), береговая линия показана черным цветом, б – шаг дискретизации ЦМР 500 м, в – 2000 м.

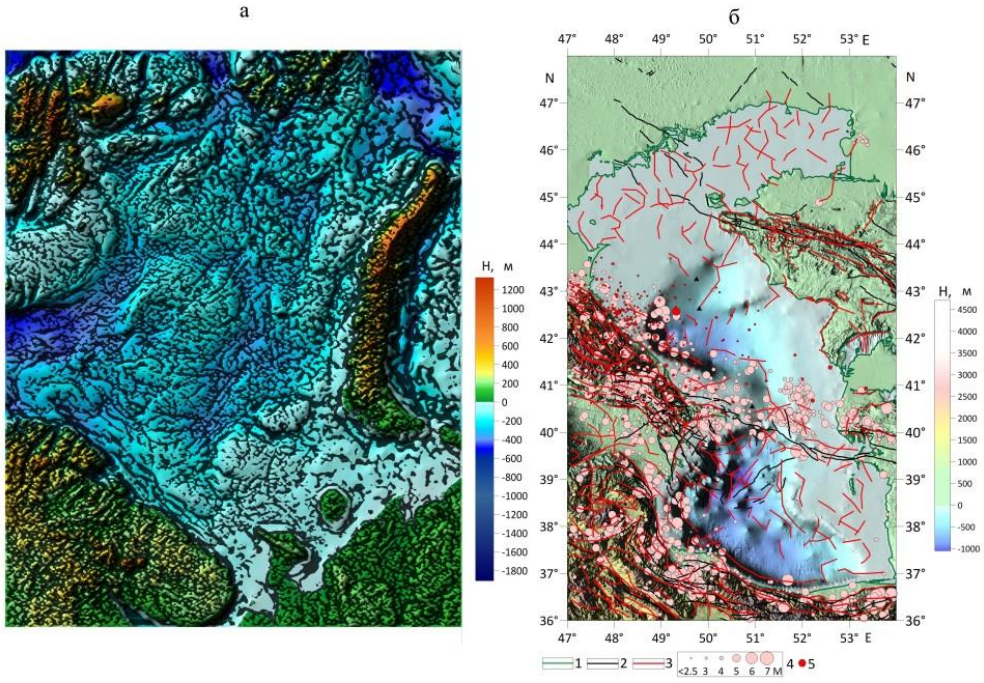


Рисунок 2. Выделение линеаментов по картам килевых форм кривизны рельефа дна (профильной и плановой кривизне).
а) Карта килевых форм рельефа дна Баренцева моря;
б) Карта Каспийского моря с выделенными по ЦМР линеаментами, эпицентрами землетрясений и активными разломными зонами.
1) береговая линия; 2) активные разломные зоны по данным [7]; 3) выделенные линеаменты; 4) эпицентры землетрясений по данным каталога USGS [10]; 5) эпицентры землетрясений, зарегистрированных донными станциями ИО РАН в 2004–2006 гг.

Перспективами развития методов выявления линеаментов по ЦМР дна могут служить: комплексирование с выделением линеаментов по аномалиям геофизических полей; эксперименты в выборе методов фильтрации и геоморфометрического анализа для выбора оптимального комплекса. Геоморфометрический анализ позволяет также рассчитывать уклоны, кривизну, участки экстремального изменения формы рельефа и ряд других параметров влияющих на формирование опасных процессов на дне. Карты геоморфометрических характеристик рельефа, рассчитанных по данным ЦМР, позволяют перейти от оконтуривания опасных и потенциально опасных участков к количественной цифровой оценке и совместному анализу различных факторов.

Применение одних и тех же методов анализа в зависимости от масштаба (дискретизации) карты могут использоваться для решения различных задач. Так вычисление кривизны рельефа по низкочастотным картам, или картам с низкой дескретизацией, как один из методов используется для выделения линеаментов (разломов). Вычисление кривизны рельефа по картам высокой дискретизации позволяет получить характеристики для геоморфологического анализа и оценки локальных изменений рельефа дна.

Выводы

Результаты исследования показали, что геоморфометрические методы анализа ЦМР дна могут применяться для выявления крупных линеаментов. Совместное использование результатов геоморфометрического анализа с данными о распределении эпицентров землетрясений позволяет выделить активные разломные зоны и может оказаться весьма перспективным при оценке сейсмической опасности на шельфе для идентификации зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ).

Библиография

1. Ковачев С.А., Либина Н.В. Оценки исходной сейсмичности для шельфовых сооружений на примере Печорского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 1. С. 165-175.

2. Либина Н.В., Крылов А.А., Рукавишникова Д.Д., Ковачев С.А., Баранов Б.В.// Выделение линеаментов в Лаптевоморском регионе геоморфометрическими методами: приложение к оценке сейсмической опасности // Геоинформатика. 2024. № 4. С. 70-82.

3. Колюбакин, А.А., Миронюк, С.Г Росляков А.Г., Рыбалко А.Е., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. 2016. № 10-11. С. 38-51.

4. Мазарович, А. О. Реальные и потенциальные геологические опасности на ложе, склонах и шельфе Мирового океана. Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 8, С. 719–731.

5. Миронюк С.Г., Клещин С.М. Опыт применения геофизических методов с целью идентификации морских геологических опасностей // ГеоИнжиниринг. 2010. Т. 1. №8. С. 48-54.

6. Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. № 8(2). С. 458-473.

7. Active Faults of Eurasia Database (AFEAD) – URL: http://neotec.ginras.ru/index/datamap/AFEAD_J39_Map.html; /AFEAD_K39_Map.html; /AFEAD_L39_Map.html.

8. Caspy-30’’ – URL: http://caspi.ru/HTML/025/ind-02.html.

9. IBCAO: International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean. – URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean.

10. USGS. Search Earthquake Catalog. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/.

Исследование осадочного чехла методом сейсмостратиграфического анализа (на примере сейсмических разрезов переходной зоны от Южно-Каспийского бассейна к Средне-Каспийскому бассейну)

Намазлы Н.Э. (Институт Геологии и Геофизики Министерства Науки и Образования Азербайджана, nurlannamazli@outlook.com)*

Аннотация

В данной работе рассматриваются особенности тектоно-стратиграфического строения переходной зоны между Южно-Каспийской и Средне-Каспийской впадинами. Основной метод исследования — сейсмостратиграфический анализ, применённый для интерпретации осадочного чехла региона. Были выявлены ключевые геологические особенности, такие как несогласия, клиноформы и зоны выклинивания, которые могут играть важную роль в формировании неантиклинальных ловушек углеводородов. Анализ динамики сейсмических отражений позволил уточнить палеогеографические условия осадконакопления и выявить структурные элементы, важные для нефтегазовой геологии.

Ключевые слова

Южно-Каспийская впадина, Средне-Каспийская впадина, сейсмостратиграфия, тектонические структуры, нефтегазоносность, палеогеография

Теория

Южно-Каспийская впадина (ЮКВ) и Средне-Каспийская впадина (СКВ) образуют сложную переходную зону, расположенную в тектонически активном регионе. Западный фланг этой зоны, являющийся морским продолжением мегантиклинория Большого Кавказа, характеризуется интенсивными деформациями осадочного чехла и сложной геологической историей [8].

Происхождение ЮКВ остаётся предметом дискуссий, и в научной литературе предложено несколько гипотез. Одна из них рассматривает впадину как реликт окраинного моря, существовавшего в мезозое, трансформированного вследствие процессов рифтинга и последующего задугового спрединга. Эта гипотеза подтверждается геофизическими исследованиями, фиксирующими погребённые вулканические структуры и их связь с разломными зонами [7,11].

Альтернативная точка зрения объясняет формирование ЮКВ процессами закрытия мезозойского океана Тетис, что сопровождалось развитием складчатых структур и активной тектоникой сближения литосферных плит [6]. В то же время, ряд исследований указывает на возможную связь ЮКВ с процессами меридионального рифтинга и гравитационного прогибания коры, вызванного фазовыми переходами мафических пород в нижней части земной коры [2].

Сейсмические данные показывают наличие захороненных рифтовых структур, субдукции тонкой океанической коры под осадочный чехол, а также сложных аккреционных комплексов, формировавшихся в условиях интенсивной тектонической активности [3,5]. Эти процессы сыграли ключевую роль в эволюции региона и формировании благоприятных условий для аккумуляции углеводородов [1,4].

ЮКВ продолжает оставаться объектом детальных геолого-геофизических исследований, направленных на уточнение её тектонического строения, осадочного комплекса и нефтегазоносного потенциала.

Для достижения поставленных целей использовался метод сейсмостратиграфического анализа [10,12-14]. Были изучены данные сейсмических профилей и скважин, что позволило выделить границы сейсмостратиграфических комплексов и интерпретировать структурные

особенности осадочного чехла. Также применялись методы анализа динамики сейсмических отражений, что позволило детально исследовать стратиграфические несогласия и литологические границы. Дополнительно проводилось сравнение данных сейсмических фаций и седиментологических характеристик образцов керна.

Выявлено десять основных сейсмостратиграфических комплексов, начиная с юрских и заканчивая четвертичными отложениями (рис. 1) [9]. Важнейшие особенности включают:

- Клиноформные структуры в меловых отложениях, свидетельствующие о трансгрессиях и регрессиях моря.
- Несогласные напластования (onlap, toplap), указывающие на колебания уровня моря.
- Зоны выклинивания, формирующие потенциальные ловушки углеводородов.
- Глубинные разломные структуры, создающие благоприятные условия для аккумуляции углеводородов.
- Региональные несогласия, позволяющие реконструировать тектонические события региона.

Данные указывают на сложную историю осадконакопления и тектонических процессов в регионе, что согласуется с существующими моделями. Анализ временных разрезов позволил выделить локальные зоны с потенциальными залежами углеводородов.

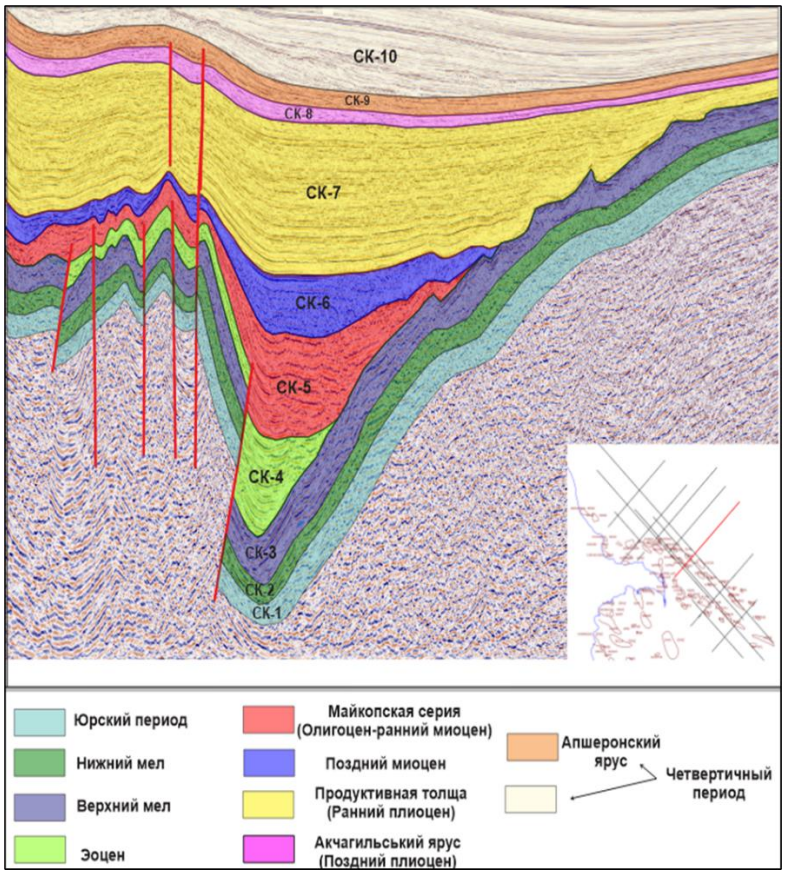


Рисунок 1. Сейсмические комплексы (СК) на сейсмическом разрезе в пределах района исследований

Выводы

Исследование позволяет выделить структурные особенности переходной зоны между Южно-Каспийской и Средне-Каспийской впадинами и оценить её нефтегазовый потенциал. Основные выводы:

- Сейсмостратиграфический анализ подтвердил наличие разломных зон и стратиграфических несогласий, которые играют важную роль в формировании нефтегазовых ловушек.
- Анализ клиноформных структур и зон выклинивания позволяет определить перспективные участки для дальнейших геологоразведочных работ.
- Будущие исследования должны быть направлены на уточнение стратиграфических границ и динамики осадконакопления для оптимизации разведочных работ в регионе.
- Результаты анализа могут быть полезны для моделирования процессов нефтегазообразования и прогнозирования залежей углеводородов.

Библиография

1. Abdullayev N. A., Kadirov F., Guliyev I. S. (2015). Subsidence history and basin-fill evolution in the South Caspian Basin from geophysical mapping, flexural backstrip-ping, forward lithospheric modelling and gravity modelling. Geological Society, London, Special Publications, 427, 175-196. DOI: https://doi.org/10.1144/SP427.5
2. Artyushkov E. V. (2007). The formation of the South Caspian Depression as a result of phase transitions in the lower part of the continental crust. Doklady Earth Scienc-es, 416 (5), 647-652. DOI: https://doi.org/10.1134/S1028334X07080016
3. Brunet M.F., Korotaev M.V., Ershov A.V., Nikishin A.M. (2003). The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling. Sedimentary Geology, 156 (1-4), 119-148. DOI: https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00285-3
4. Green T., Abdullayev N., Hossack J., Riley G., Roberts A. (2009). Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan. Geological Society, London, Special Publications, 312, 241-260. DOI: https://doi.org/10.1144/SP312.12
5. Kaz'min V.G., Verzhbitskii E.V. (2011). Age and origin of the South Caspian Basin. Oceanology, 51, 131–140. DOI: https://doi.org/10.1134/S0001437011010073
6. Knapp C.C., Knapp J.H., Connor J.A. (2004). Crustal-scale structure of the South Caspian Basin revealed by deep seismic reflection profiling. Marine and Petroleum Geology, 21, 1073–1081. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.04.002
7. Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. (2002). Active Tectonics of the South Caspian Basin. Geophysical Journal International, 148 (2), 214-245. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01588.x
8. Мамедов П.З. Сейсмостратиграфические исследования в Апшеронском архипелаге с целью расчленения осадочного чехла и выявления неантиклинальных ловушек // Сб. ИГАНА СССР, М., 1988. 46-48.
9. Mammadov P.Z., Namazli N.E., Mammadova L.P., Nasirova N.I. (2023). Study of unconformity surfaces and discontinuities in the transition zone from the Middle Cas-pian Basin to the South Caspian Basin using seismostratigraphic analysis method. ANAS Transactions, Earth Sciences, Special issue, 54-56. DOI: https://doi.org/10.33677/ggianasconf20230300013
10. Mitchum R. M. Jr., Vail P. R., Thompson S. III. (1977). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 1: Overview. In: C.E. Payton (ed.), In Seismic Stratigraphy–Applications to Hydrocarbon Exploration, Volume 26 (pp.5–52). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, Memoir. DOI: https://doi.org/10.1306/M26490C3
11. Sengör A.M.C. (1990). A new model for the late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolu-tion of Iran and implications for Oman. In: A.H.F. Robertson, M.P. Searle, A.C. Ries (ed.), The Geology and

Tectonics of the Oman Region, Volume 49 (pp. 797–831). London: Geological Society, Special Publications. DOI: https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.049.01.49

12. Sheriff R.E. (1980). Seismic Sequence Analysis: The Geologic Models. In: Seismic Stratigraphy (pp. 45-67). Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-6395-8_3

13. Vail P. R. (1987). Seismic stratigraphy interpretation procedure. In: A.W. Bally (ed.), Atlas of seismic stratigraphy, Volume 1 (pp.1-10). Tulsa, Oklahoma: American Asso-ciation of Petroleum Geologists.

14. Veeken P. C. H. (2007). Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Charac-terisation. Amsterdam: Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1017/S0016756808004329

Гибридный метод поиска в текстовых данных с использованием графов и эмбеддингов

Настасенко С.А.* (МГРИ, snastasenko99@gmail.com),
Савотченко С.Е. (МГРИ, savotchenkose@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается подход к объединению векторных и графовых баз данных для улучшения поиска и извлечения информации в текстовых базах данных. Предложенный метод позволяет учитывать семантические связи между текстовыми эмбеддингами, что расширяет возможности традиционных текстовых поисковых систем.

В отличие от известных решений, таких как GraphRAG от Microsoft, в данном исследовании не используется агентный подход (AG), а работа ведется напрямую с текстом. Документы разбиваются на абзацы и предложения, после чего сохраняются их связи в графовой базе данных, что позволяет учитывать контекст и подстраивать выдачу под различные категории пользователей.

Ключевые слова

Векторные базы данных, графовые базы данных, семантический поиск, обработка естественного языка

Теория

Информационный поиск — это процесс извлечения релевантных данных из больших текстовых коллекций. В современных системах поиска выделяют два основных подхода: поиск по ключевым словам и семантический поиск.

Поиск по ключевым словам основан на точном совпадении слов в запросе. Этот метод широко используется в традиционных поисковых системах и требует наличия заранее подготовленной базы данных. Однако он не учитывает синонимы, контекстные значения слов и сложные зависимости внутри текста, что снижает его эффективность при обработке естественного языка.

Семантический поиск, напротив, направлен на поиск информации с учетом смысла запроса. Он использует модели обработки естественного языка (NLP) и векторные представления текста. Векторизация позволяет представить слова, фразы и целые документы в многомерном пространстве таким образом, что семантически схожие объекты оказываются близко друг к другу. Это позволяет находить релевантные результаты даже в том случае, если запрос не содержит точного вхождения искомых слов.

Основу семантического поиска составляют декодеры — нейросетевые архитектуры, которые преобразуют текст в эмбеддинги, то есть многомерные векторные представления. Декодеры могут быть основаны на трансформерах, таких как BERT, T5, GPT и их аналоги, которые анализируют текст, учитывая смысловые связи между словами. В отличие от более простых моделей, они способны понимать контекст и находить смысловые аналогии, что делает их ключевыми инструментами для семантического поиска.

Векторные представления, созданные такими моделями, сохраняются в векторных базах данных. Эти базы позволяют быстро находить похожие объекты по близости в многомерном пространстве. Однако сам по себе векторный поиск не учитывает логические связи внутри документа, поэтому его можно комбинировать с графовыми базами данных, которые хранят семантические отношения между текстовыми фрагментами. Такой подход позволяет улучшить качество поиска, особенно в случае длинных и сложных текстов.

Одной из ключевых проблем семантического поиска является процесс сопоставления эмбеддингов. Поиск схожих эмбеддингов осуществляется следующим образом: сам поисковый

запрос превращается в эмбеддинг, а затем система находит ближайшие к нему эмбеддинги из базы. Однако здесь возникает сложность, связанная с тем, что поисковый запрос, как правило, содержит намного меньше слов, чем документы, на основе которых заранее подготовлены эмбеддинги. В результате сопоставление между ними оказывается несбалансированным, и система может находить схожесть по частям запроса, которые не являются релевантными для пользователя.

Один из способов решить эту проблему — использование Augmented Retrieval, который расширяет поисковый эмбеддинг дополнительным контекстом. Это может быть достигнуто за счет добавления к запросу дополнительной информации, например, сгенерированной нейросетью, данных из внешних источников или релевантных фрагментов из базы. Таким образом, итоговый эмбеддинг запроса становится соизмерим по количеству слов с документами в базе, что повышает точность поиска.

Однако использование Augmented Retrieval несёт в себе риск искажения исходного смысла запроса. Дополнительная информация, автоматически добавляемая к поисковому эмбеддингу, может содержать не те акценты или даже изменить общий смысл поиска. В результате система может выдавать не релевантные ответы для пользователя.

Таким образом, основная проблема заключается в том, как сбалансировать обогащение запроса и сохранение его исходного смысла. Современные исследования направлены на поиск методов, позволяющих адаптировать поисковый эмбеддинг, но при этом не терять ключевую информацию, содержащуюся в исходном запросе.

Также одной из проблем является то, что ближестоящие эмбеддинги не всегда несут одинаковый смысл. Векторизация текста строится на многомерном представлении слов и фраз, где близость определяется на основе статистических и контекстных признаков. Однако это не гарантирует, что два близко расположенных эмбеддинга действительно связаны по ключевому смыслу. Например, векторное пространство может разместить рядом термины, которые часто встречаются в схожих контекстах, но несут разное значение. Это приводит к тому, что поиск может выдавать результаты, схожие скорее по второстепенным характеристикам (грамматическим структурам, стилистическим особенностям, общим фонетическим или тематическим признакам), а не по содержательному смыслу, что снижает точность поиска.

Эту проблему можно решить с помощью графовых баз данных, которые учитывают не только схожесть эмбеддингов, но и их взаимосвязи в текстовом пространстве. В отличие от векторного поиска, где ключевым критерием является расстояние между точками в многомерном пространстве, графовая модель строит связи между текстовыми фрагментами, фиксируя логические, семантические и причинно-следственные отношения. Это позволяет не только находить близкие по смыслу документы, но и отсеивать нерелевантные результаты, которые случайно оказались рядом в векторном пространстве. Таким образом, комбинация векторного и графового поиска даёт более точные результаты, поскольку дополнительно анализирует смысловые связи, а не только математическое расстояние между эмбеддингами.

Объединение векторных и графовых баз данных позволяет создать более точную и контекстно-зависимую систему поиска текстовой информации. Векторные базы данных обеспечивают быстрое извлечение схожих текстовых фрагментов на основе эмбеддингов, однако не всегда учитывают взаимосвязь между элементами текста. Графовые базы данных, в свою очередь, позволяют моделировать сложные отношения между фрагментами текста, но не всегда эффективны в обработке больших объемов данных.

В предложенном методе текстовые документы обрабатываются с использованием алгоритмов обработки естественного языка (NLP), разбиваются на логические фрагменты (предложения, абзацы) и индексируются в векторной базе данных. Одновременно с этим создается графовая структура, где вершины представляют собой фрагменты текста, а рёбра моделируют их логические и смысловые связи. При поисковом запросе сначала выполняется

векторный поиск для быстрого извлечения релевантных текстовых элементов, после чего графовая база используется для уточнения контекста и выдачи более точных результатов.

Данный подход позволяет:

1) улучшить качество поиска текстовой информации за счет использования связей между фрагментами текста;

2) подстраивать результаты под потребности различных пользователей, учитывая их контекст;

3) эффективно комбинировать структурированные и неструктурированные текстовые данные.

На Рисунке 1 представлен общий алгоритм работы системы.

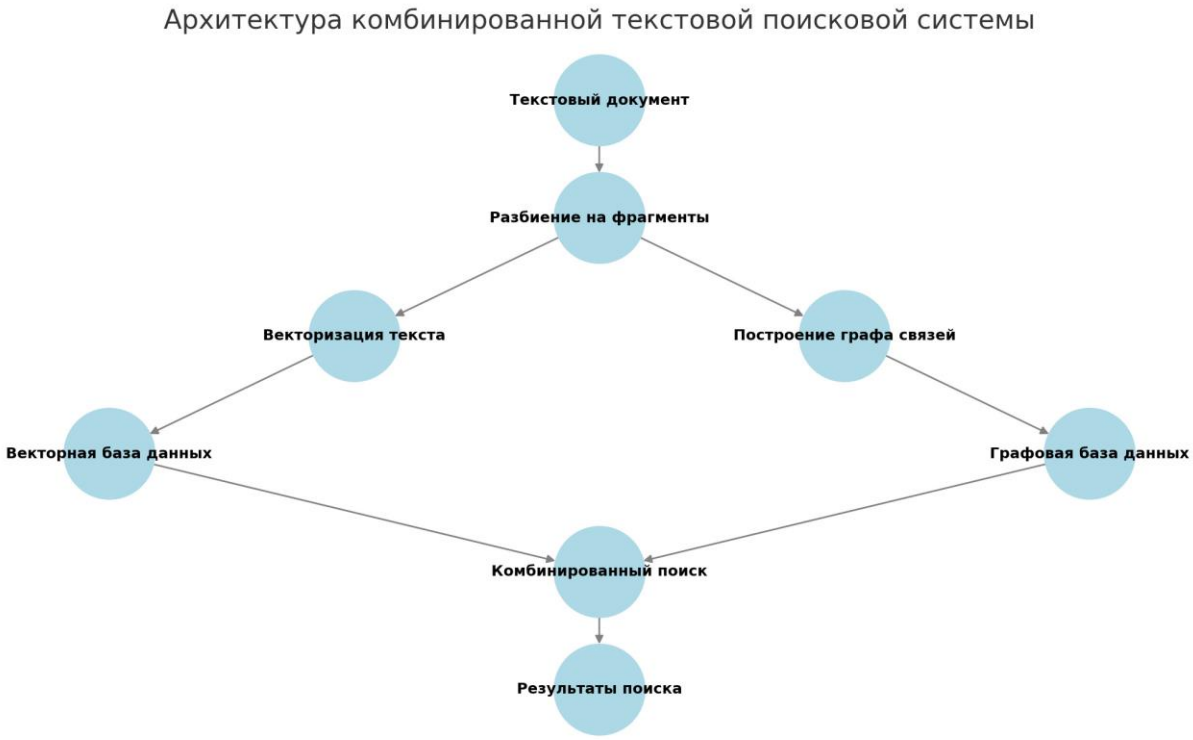


Рисунок 1. Общий алгоритм работы поисковой системы

Выводы

Комбинирование векторных и графовых баз данных позволяет учитывать семантические связи при поиске текстовой информации. Использование графовых структур для моделирования взаимосвязей между фрагментами текста улучшает качество поиска и снижает количество нерелевантных результатов. Разработанный метод может быть адаптирован под различные задачи, включая персонализированный поиск и анализ текстовых данных.

Библиография

1. James Jie Pan, Jianguo Wang, Guoliang Li. "Survey of Vector Database Management Systems." arXiv preprint arXiv:2310.14021 (2023). https://arxiv.org/abs/2310.14021

2. Toni Taipalus. "Vector Database Management Systems: Fundamental Concepts, Use-Cases, and Current Challenges." arXiv preprint arXiv:2309.11322 (2023). https://arxiv.org/abs/2309.11322

3. Yikun Han, Chunjiang Liu, Pengfei Wang. "A Comprehensive Survey on Vector Database: Storage and Retrieval Techniques, Challenges." arXiv preprint arXiv:2310.11703 (2023). https://arxiv.org/abs/2310.11703

4. Zhi Jing, Yongye Su, Yikun Han. "When Large Language Models Meet Vector Databases: A Survey." arXiv preprint arXiv:2402.01763 (2024). https://arxiv.org/abs/2402.01763

Определение области влияния микросейсмического события на массив горных пород в процессе сейсмомониторинга угольных шахт и рудников

Романевич К.В.* (АО ВНИМИ, ИГД СО РАН, romanevichkirill@yandex.ru),
Мулев С.Н. (АО ВНИМИ, info@vnimi.ru),
Иванов Д.А. (АО ВНИМИ, info@vnimi.ru)

Аннотация

В работе проведено численное моделирование влияния микросейсмических событий на напряжённо-деформированное состояние (НДС) массива горных пород. Задача рассматривалась в плоской постановке для трёх значений энергии сейсмособытий: 4, 33 и 112 кДж. Установлено, что максимальные отклонения главных напряжений в массиве зависят от объёма очага сейсмособытия, его расположения относительно горной выработки и степени снижения упруго-прочностных свойств пород в зоне очага. Отклонения главных напряжений наблюдаются на расстояниях 20-100 м и более от контура области сейсмособытия в зависимости от направления и компоненты напряжений. Эти данные необходимо учитывать при оценке устойчивости пород, окружающих горные выработки.

Ключевые слова

Массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмособытие, сейсмомониторинг, численное моделирование, GITS, Fidesys

Источники финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, https://rscf.ru/project/23-17-00148/.

Теория

Нормативными документами по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях склонных и опасных по горным ударам, а также инструкциями по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных и рудных месторождений предусмотрено выполнение регионального прогноза динамических явлений по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям. Этот вид прогноза проводится на шахтах и рудниках для выявления зон активизации сейсмических и геодинамических процессов во вмещающих массивах и основан на мониторинге горных пород системами, состоящими из совокупности технических средств, предназначенных для реализации функций регистрации, сбора, отображения, хранения и анализа информации (системами сейсмомониторинга – шахтными сейсмостанциями).

В настоящее время на ряде шахт и рудников России функционируют системы сейсмомониторинга GITS, производства АО ВНИМИ. В результате автоматизированного круглосуточного мониторинга вмещающих массивов горных пород формируются каталоги сейсмической активности с фиксацией в них координат и энергий всех динамических проявлений горного давления, происходящих в контролируемых зонах и проявляющихся в форме микросейсмических событий.

По силе и характеру динамические проявления горного давления на шахтах и рудниках, подразделяются на горно-тектонические удары, собственно горные удары, микроудары, толчки и стреляния. К внешним признакам, характеризующим склонность массива к динамическим проявлениям горного давления, относятся интенсивное заколообразование, шелушение пород (руд), а также акустические звуковые импульсы (хруст, щелчки, треск) на контуре горных выработок. Количество регистрируемых сейсмособытий при подземной разработке рудных и

нерудных месторождений достигает десятков и первых сотен событий различной энергии в сутки.

В ходе накопления базы данных о микросейсмических событиях и анализа этих данных выполняется определение количественных оценок параметров динамических явлений, возникающих в контролируемом массиве горных пород, оценка и районирование сейсмической активности шахтных полей, прогнозирование подготовки и развития процессов хрупкого разрушения напряженного массива горных пород, сопровождающихся сейсмическими проявлениями.

Программное обеспечение системы мониторинга GITS позволяет выгружать из баз данных информацию о событиях за требуемый период времени и осуществлять анализ этой информации, с помощью таких функций как визуализация положения гипоцентров событий на горизонтальных и вертикальных планах шахты (рудника или карьера), визуальная идентификации событий на карте с помощью цветовой дифференциации по энергии, а также по давности события, просмотр графиков статистик – количества событий и их энергии в определенный период времени, классификация различных типов сейсмических событий с использованием методов машинного обучения [3] и др.

Конечным результатом интерпретации является генерация карт сейсмической активности по различным критериям [1,2] с настраиваемыми параметрами и определение удароопасных областей в виде прогнозных карт сейсмической активности, совмещенных с планами горных работ (рис.1).

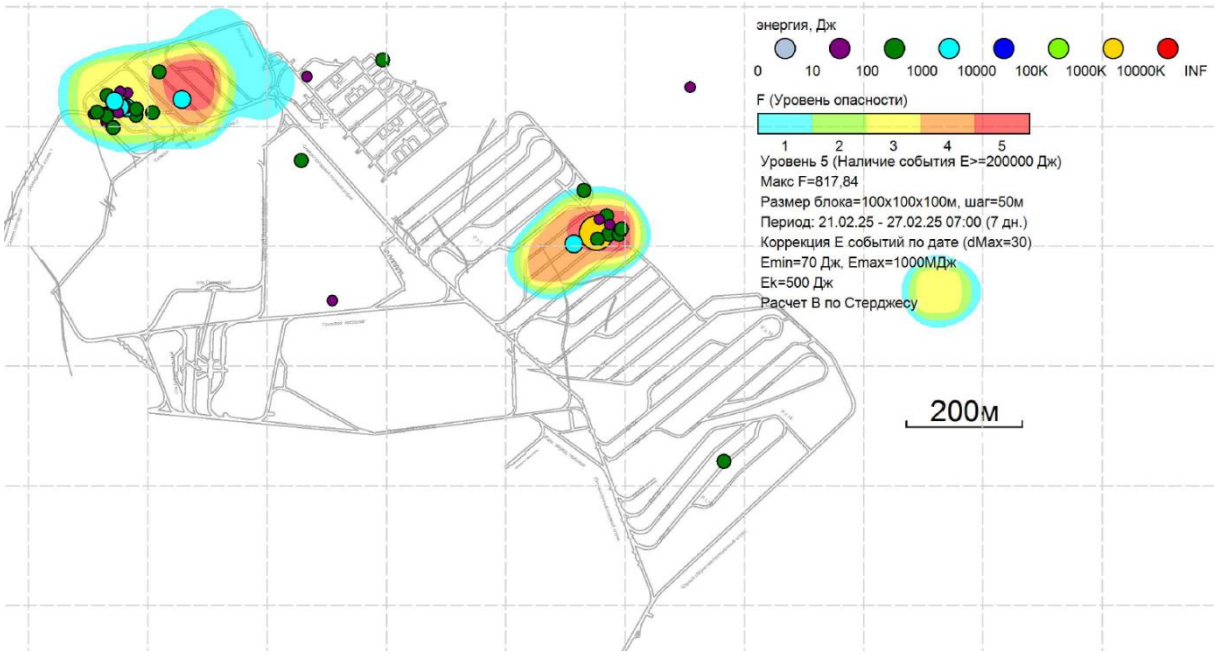


Рисунок 1. Пример карты сейсмической активности, совмещенной с планом горных работ рудника. Точками показаны единичные сейсмические события за одни сутки, цветом показана рассчитанная зона сейсмической активности по методике ВНИМИ [2]

Одной из важнейших задач анализа сейсмических данных, поступающих в ходе сейсмомониторинга шахты или рудника с системы шахтной сейсмостанции является определение области действия очередного микросейсмического события в массиве. Это позволяет на качественном уровне оценивать влияние события на устойчивость горных выработок, попадающих в зону влияния сейсмособытия.

Очаг сейсмособытия представляет собой зону деформаций массива, которая может быть охарактеризована объемом разрушенного материала, и чем больше энергия в очаге, тем больше его размеры. Рассматриваются также различные формы очага (близкая сфере, эллипсу, плоскости, линии и т.п.). Для оценки размера очага при различных его формах используют следующие эмпирические формулы (1-3):

$$r = 1.85 * Ec^{0.186}, \text{м (сфера)}; \quad (1)$$

$$L = 2.9 * Ec^{0.24}, \text{м (плоскость)}, \quad (2)$$

$$W = 2.0 * Ec^{0.21}, \text{м (плоскость)}, \quad (3)$$

где Ec – сейсмическая энергия события, r – радиус сферы, охватывающий зону неупругих деформаций, L – длина разрыва, W – ширина разрыва.

В рамках данной работы было выполнено определение области влияния микросейсмического события заданной энергии и формы на массив горных пород. Моделирование проводилось в программном комплексе «Fidesys». Задача рассматривалась в плоской постановке.

С учетом формул 2-3 было выполнено моделирование параметров очага сейсмособытия, а также моделирование массива горных пород. Для моделирования влияния сейсмособытий на изменение НДС массива горных пород были выбраны три значения энергии сейсмособытий: 4, 33 и 112 кДж.

Область сейсмособытия моделировалась условно в виде прямоугольника шириной соответственно 11,4, 17,8 и 23,0 м и длиной соответственно 21,2, 35,2 и 47,3 м в зависимости от принятой расчетной схемы, выработка – сводчатой формы, высотой и шириной 5 м. Относительно данной выработки рассматривались различные варианты формирования зоны сейсмособытия, в которой моделировалось уменьшение упруго-прочностных показателей породы в 10 и 100 раз относительно характеристик нетронутого массива. Массив представлен скальной горной породой со следующими характеристиками: модуль упругости – 50 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,25, плотность – 2700 кг/м3.

Размеры модели относительно оси X и Y составляют 250 м. По верхней поверхности модели было задано давление в 8 МПа, а также учтен вес пород в самой модели с помощью задания гравитационных сил. По приложенным нагрузкам и геометрии модели можно сказать, что проходка выработки осуществляется на глубине около 420 м. По боковым и нижней граням модели заданы граничные условия, запрещающие их поступательное перемещение.

Область сейсмособытия располагается на расстоянии 5 м от контура горной выработки. Зона сейсмособытия в зависимости от расчетной схемы моделировалась сбоку, сверху и снизу относительно выработки (рис.2).

Для сопоставления полученных результатов была рассмотрена модель массива горных пород с выработкой без учета формирования сейсмособытия.

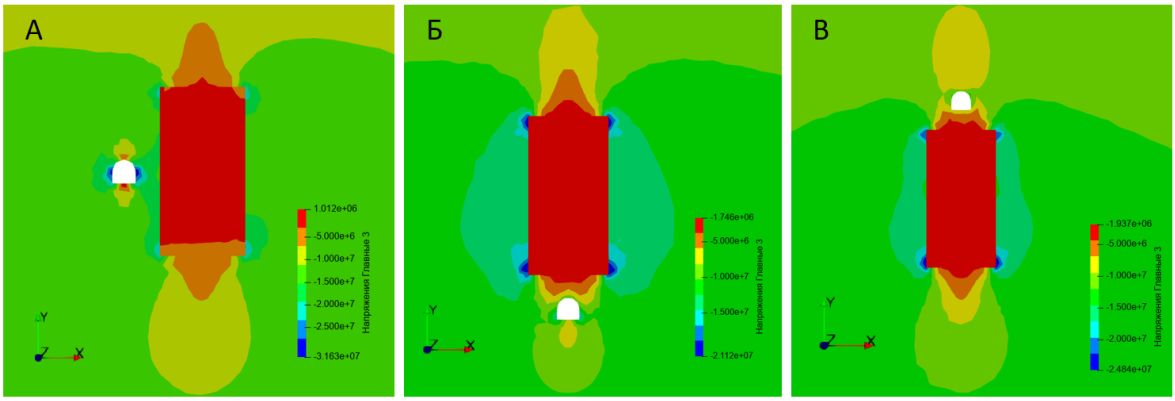


Рисунок 2. Моделирование НДС массива горных пород с выработкой и сейсмособытия в форме разрыва шириной 11,4 и длиной 21,2 на расстоянии 5 метров от выработки (А – сейсмособытие в стороне от выработки; Б – сейсмособытие над выработкой; В – сейсмособытие под выработкой) – распределение главных напряжений (σ3). В программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными

Отклонения главных напряжений наблюдаются на расстояниях 20-100 м и более от контура области сейсмособытия в зависимости от направления и компоненты напряжений, что указывает на значительное влияние зон, в которых произошли сейсмические события на НДС массива.

Выводы

Проведённый анализ результатов моделирования и расчета показал, что максимальные отклонения главных напряжений в массиве горных пород зависят от объёма очага сейсмособытия, его расположения относительно выработки и степени снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании. На данном этапе выявлена качественная зависимость, в дальнейшем в процессе моделирования необходимо рассмотреть различные формы очага и комбинации его параметров, а также различные параметры массива горных пород. Это позволит установить количественные взаимосвязи и определять зону и степень изменения НДС массива в момент регистрации сейсмособытий системой сейсмомониторинга.

Библиография

1. Еременко, А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 12-22. – DOI 10.15372/FTPRPI20220102

2. Питаль М.Н., Мулев С.Н. Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации. ВНИМИ, СПб, 2024. 117 с.

3. Романевич К.В., Мулёв С.Н. Автоматизация классификации сейсмических событий при сейсмомониторинге угольной шахты с использованием машинного обучения. Горная промышленность. 2023;(5S):00–00. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-00-00

4. Сидоров М.С., Лебедев И.М., Мулев С.Н., Тюхрин В.Г. Обеспечение геодинамической безопасности на угольных шахтах. Горная промышленность. 2024;(3S):37–43. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-37-43

Численное моделирование формирования систем «жидкость-жидкость-газ» при смешивании нефти с диоксидом углерода

Селезнева Д.В.* (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, selezneva.dv20@physics.msu.ru)

Аннотация

Для расчета трехфазных равновесий многокомпонентных систем, состоящих из углеводородов и углекислого газа, был разработан программный модуль, использующий алгоритм минимизации энергии Гиббса.

Этот подход позволяет исследовать фазовые равновесия бинарных и тернарных смесей, в том числе находящихся в состоянии «жидкость-жидкость-газ». В рамках программы применяются два уравнения состояния: Пенга—Робинсона (PR EOS) и Соаве—Редлиха—Квонга (SRK EOS). Оба уравнения состояния дают схожие результаты численного моделирования фазовых равновесий, что подтверждает возможность использования данных моделей для исследования трехфазных равновесий. Это позволяет детально анализировать изменения количества фаз в зависимости от состава системы, давления и температуры.

Ключевые слова

Многокомпонентные смеси, фазовые равновесия, закачка диоксида углерода, уравнение состояния, трехфазные системы

Теория

В последние годы в нефтегазовой отрасли наблюдается растущий интерес к применению технологии закачки диоксида углерода в пласты. Этот метод позволяет увеличить эффективность добычи нефти за счет снижения вязкости нефти при смешении с диоксидом углерода, что облегчает ее движение. Также проекты по закачке диоксида углерода в пласт набирают популярность в рамках тренда на углеродную нейтральность нефтегазовой промышленности. Однако эффективность данной технологии зависит от множества факторов, в том числе от фазового поведения смесей углекислого газа и углеводородов.

При добавлении углекислого газа в углеводородную смесь изменяется ее фазовое поведение, что может привести к образованию до трех фаз: двух жидких и одной газовой. Это создает дополнительные сложности при расчете фазового равновесия, поскольку требуется учитывать взаимодействия между всеми тремя фазами. В данной работе для анализа таких трехфазных систем используется метод прямой минимизации энергии Гиббса, который позволяет преобразовать исходную нелинейную задачу в задачу линейного программирования, упрощая ее решение и программную реализацию. [1,2]

Для расчета фазовых равновесий многокомпонентных смесей углекислого газа и углеводородов в настоящей работе применяются два уравнения состояния: Пенга-Робинсона и Соаве-Редлиха-Квонга Использование этих уравнений состояния дает схожие результаты численного моделирования фазовых равновесий, в том числе при исследовании систем типа «жидкость-жидкость-газ» (см. Рис. 1,2).

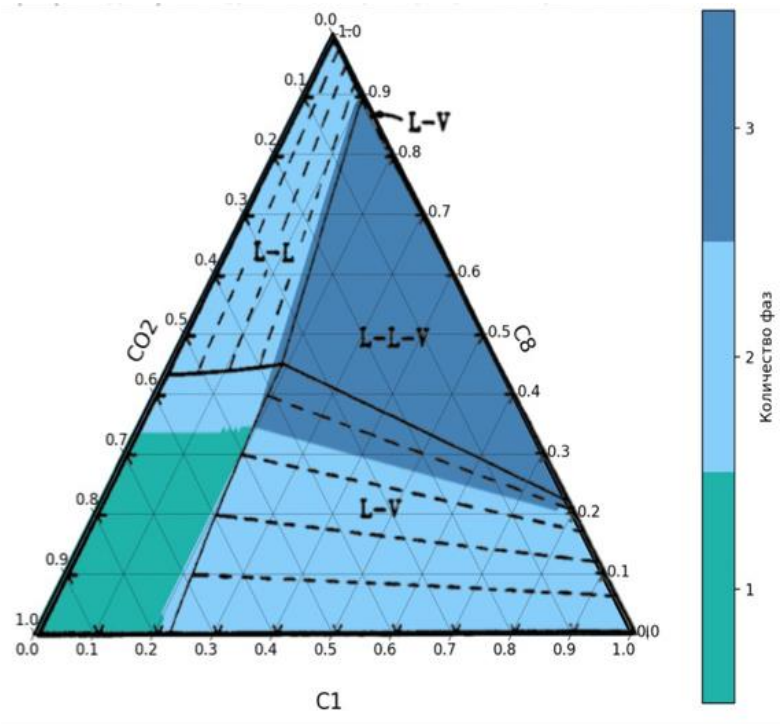


Рисунок 1. Тернарная фазовая диаграмма, полученная УС Пенга-Робинсона для смеси CH_4, C_8H_{18}, CO_2

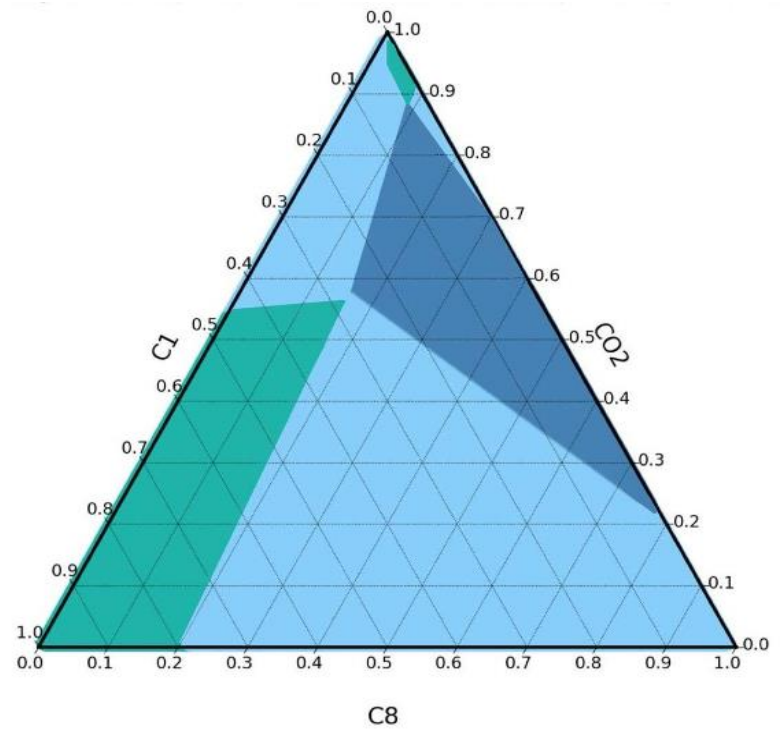


Рисунок 2. Тернарная фазовая диаграмма, полученная УС Соаве-Редлиха-Квонга для смеси CH_4, C_8H_{18}, CO_2

Это подтверждает эффективность этих кубических уравнений состояния при исследовании трехфазных равновесий. Полученные результаты, такие как количество фаз, их

состав и плотности, сравниваются с данными из научной литературы [3,4], что позволяет оценить точность и надежность использованных методов расчета для решения задач о численном моделировании фазовых равновесий в многокомпонентных системах. (Таблица 1)

Таблица 1. Вязкости фаз системы

	Двухкомпонентная система CH_4, C_8H_{18}, мПа*с	**Трехкомпонентная система УС ПР CH_4, C_8H_{18}, CO_2, мПа*с**	**Трехкомпонентная система УС СРК CH_4, C_8H_{18}, CO_2, мПа*с**
z_1=0.1	0.5509	0.4605	0.1942
		0.2485	0.1393
z_1=0.5	0.0085	0.0095	0.00952
	0.5438	0.3980	0.17223
		0.22611	0.1308
z1=0.8	0.0085	0.00936	0.00926
	0.5438	0.4877	0.2132

Выводы

В настоящей работе было показано, что метод прямой минимизации энергии Гиббса применим для расчетов фазовых равновесий трехкомпонентных смесей углеводородов с диоксидом углерода. Результаты работы программы были качественно схожи с результатами другого способа численного моделирования.

Для расчетов была разработана специализированная программа на Python с использованием библиотеки scipy. Эта программа позволяет определить количество и плотности фаз, которые формируются при введении диоксида углерода в смесь углеводородов, решая задачу линейного программирования.

При расчётах вязкости для двух- и трёхкомпонентных систем с участием диоксида углерода установлено, что его закачка способствует формированию жидких фаз с пониженной вязкостью по сравнению с исходной углеводородной смесью. Это свидетельствует о том, что возникновение трехфазного равновесия может значительно улучшить условия добычи углеводородов, что подчёркивает практическую ценность моделирования таких систем для оптимизации технологических процессов.

Библиография

1. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. - М.: «Грааль», 2002.
2. Исаева А.В., Доброжанский В.А., Хакимова Л.А., Подладчиков Ю.Ю. Численное моделирование фазовых равновесий многокомпонентных углеводородных систем с помощью прямой минимизации энергии // Газовая промышленность № 2 (812), 2021, 20-29с.
3. D.Y. Kuan, P.K. Kilpatrick, M. Sahimit, L.E. Scriven, H.T. Davis Multicomponent CO2/Water Hydrocarbon Phase Behavior Modeling: A Comparative Study // SPE Reservoir Engineering 1(01), January 1986, 61-72.
4. F.M. Orr Jr., A.D. Yu, C.L. Lien Phase Behavior of CO2 and Crude Oil in Low-Temperature Reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal 21(04), August 1981, 480-492.

Нелинейные уравнения на графах: применение к моделированию сейсмических процессов и других геофизических явлений

Тедеев А.А. (МГРИ, alan.tedeev2013@gmail.com)*

Аннотация

Анализ на графах, особенно на взвешенных графах, является важным направлением в математике, компьютерных науках и прикладных исследованиях. Графы представляют собой мощный инструмент для моделирования сложных систем, где вершины графа соответствуют объектам, а рёбра — связям между ними. Взвешенные графы (Рисунок 1), где каждому ребру присвоен определённый вес, позволяют учитывать интенсивность, стоимость или другие характеристики связей, что делает их особенно полезными в реальных приложениях. Нелинейные уравнения на графах — это активно развивающееся направление, которое объединяет методы теории графов, математического анализа и численных методов. Такие уравнения используются для описания сложных динамических процессов, где взаимодействия между элементами системы носят нелинейный характер.

В работе рассматриваются нелинейные уравнения на графах, описывающие процессы распространения и затухания в неоднородных средах. Основное внимание уделено дискретным p-Лапласовым параболическим уравнениям с неоднородной плотностью. Получены точные оценки временного затухания решений, универсальные границы и условия исчезновения решений за конечное время.

Результаты работы могут быть применены в геофизике для моделирования сейсмических процессов, распространения загрязнений в почве и воде, а также для анализа сетевых систем в геофизике. Предложенные методы основаны на энергетических оценках, неравенствах Соболева и Гальярдо-Ниренберга, что делает их применимыми для широкого класса задач математического моделирования.

Ключевые слова

Графы, p-Лапласиан, сейсмические процессы, математическое моделирование, неоднородные среды

Теория

Постановка задачи

Рассматривается задача Коши для дискретных p-Лапласовых параболических уравнений с неоднородной плотностью:

$$\rho(x)\frac{\partial u}{\partial t}(x,t) - \Delta_p u(x,t) = 0,\ x \in V,\ t > 0,$$

где V — множество вершин графа G, $\rho(x)$ — функция плотности, а Δ_p — дискретный p-Лапласиан. Начальные условия задаются в виде:

$$u(x,0) = u_0(x) \geq 0,\ x \in V$$

Граф G предполагается бесконечным, связным и с локально конечной степенью вершин.

1. Основные результаты

Оценки затухания решений: для неотрицательных решений задачи Коши получены точные оценки временного затухания, зависящие от геометрии графа и поведения функции плотности $\rho(x)$. В частности, доказано, что:

$$\left(\omega^{(-1)}(\|u(t)\|_\infty^{p-2}\, t)\right)^{N-p} \|u(t)\|_\infty^{p-1}\, tM(0) \le C,$$

где $M(0)$ — начальная масса решения, а ω — функция, определённая через $\rho(x)$.

Универсальные границы: для случая $p > 2$ доказано, что решения затухают со временем с универсальной скоростью:

$$= \|u(t)\|_\infty \le Ct^{-1/(p-2)},$$

где константа C не зависит от начальных данных.

Исчезновение решений за конечное время: для $1 < p < 2$ показано, что решения могут исчезать за конечное время при определённых условиях на начальные данные и параметры задачи. Получена оценка:

$$\sum_{x\in V} \rho u^{1+\theta}(x,t) d_w(x) \le \left(\sum_{x\in V} \rho u_0^{1+\theta}(x,t) d_w(x) - C^* t\right)_+^{(1+\theta)/(2-p)}$$

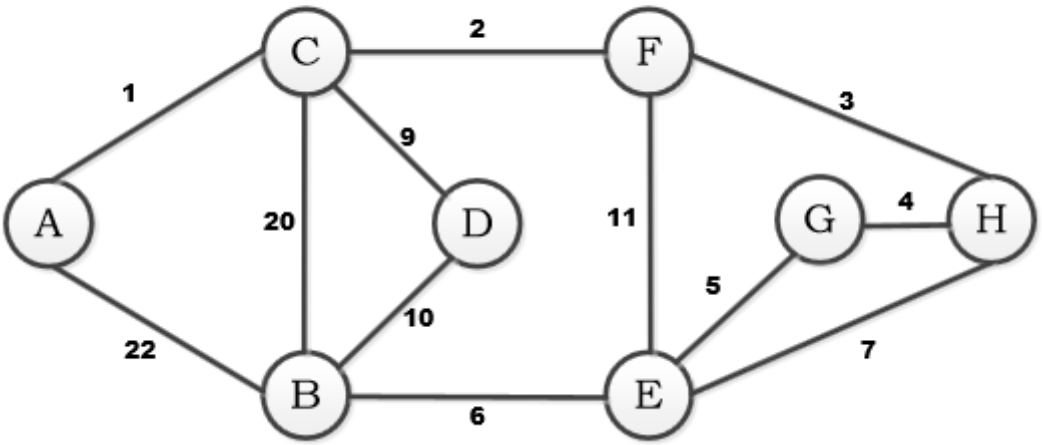


Рисунок 1. Пример взвешенного графа

Приложение в геофизике.

Моделирование сейсмических процессов: графы могут быть использованы для

моделирования распространения сейсмических волн через сложные геологические структуры. Уравнения, рассмотренные в работе, могут описывать, как энергия распространяется через сеть разломов или как затухают сейсмические волны в неоднородных средах. Например, можно рассмотреть, как изменения в одной части сети (например, из-за землетрясения) влияют на всю систему.

Распространение загрязнений: модели на графах могут быть применены для

анализа распространения загрязнений в почве или воде. Узлы графа могут представлять собой участки среды, а рёбра — каналы, по которым происходит перенос вещества.

Климатические системы: графы могут быть использованы для моделирования

климатических процессов, где узлы представляют регионы или климатические зоны, а рёбра — взаимодействия между ними (например, перенос тепла или влаги).

Пример. В качестве частного примера рассмотрим применение полученных результатов к моделированию сейсмических процессов. Пусть граф G представляет собой сеть разломов в земной коре, а функция $u(x,t)$ описывает распределение энергии сейсмических волн в узлах графа. Модель может описывать, как энергия распространяется через сеть разломов (Рисунок 2) и затухает со временем. Полученные оценки затухания решений позволяют спрогнозировать, как быстро энергия сейсмических волн будет рассеиваться в зависимости от геометрии сети и свойств среды, что может быть полезно для оценки последствий землетрясений и разработки стратегий снижения рисков.

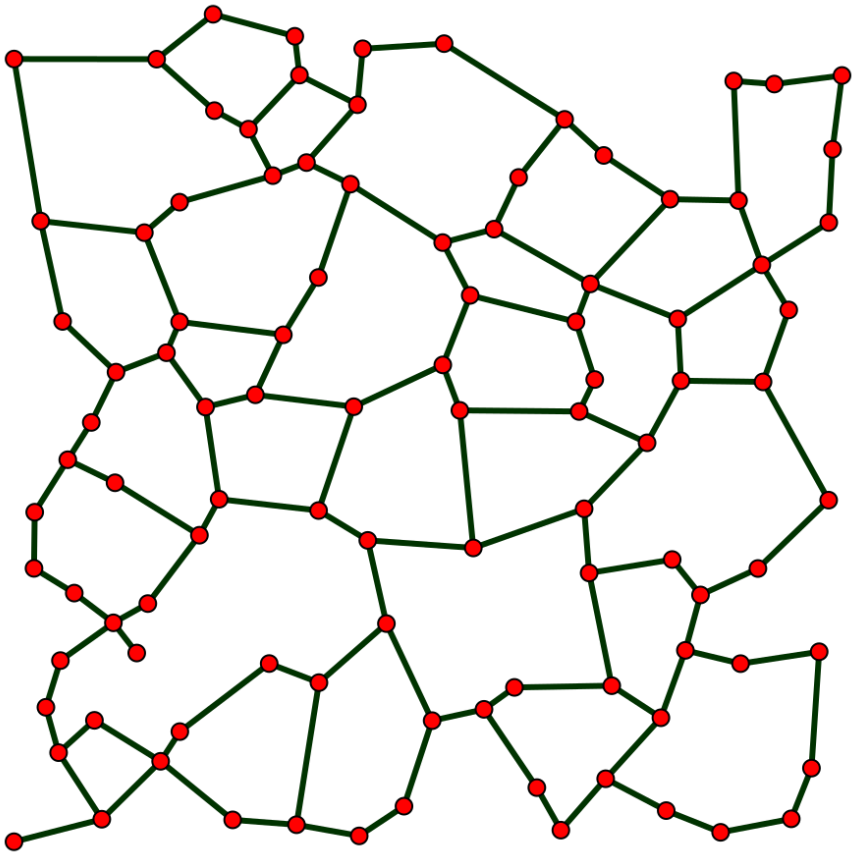


Рисунок 2. Граф, отображающий схему сети разломов

Выводы

Полученные результаты предоставляют новые инструменты для анализа нелинейных уравнений на графах, которые могут быть применены в геофизике для моделирования сложных процессов, таких как распространение сейсмических волн, диффузия загрязнений и климатические изменения.

Оценки затухания решений и универсальные границы позволяют прогнозировать поведение систем в неоднородных средах, что важно для задач управления ресурсами и прогнозирования природных явлений.

Явление исчезновения решений за конечное время (для $p < 2$) может быть полезно для анализа катастрофических событий, таких как землетрясения или распространение загрязнений, где важно контролировать время жизни решения.

Анализ на графах, особенно в контексте нелинейных уравнений, представляет собой мощный инструмент для моделирования сложных систем. С развитием вычислительных методов и увеличением объёмов данных, которые можно представить в виде графов, эта область продолжает активно развиваться и находить новые применения в науке и технологиях. Результаты могут быть использованы для разработки численных моделей, которые могут быть применены в реальных задачах геофизики

Благодарности

Автор выражает признательность коллегам и наставникам за поддержку, оказываемую на протяжении всего исследовательского процесса.

Библиография

1. Кобрунов, А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных [Текст]: учеб. пособие / А.И. Кобрунов. – Ухта: УГТУ, 2007. - 286 с.: ил.
2. Cizma, D., Linial, N. Geodesic Geometry on Graphs. *Discrete Comput Geom* 68, 298–347 (2022). https://doi.org/10.1007/s00454-021-00345-w
3. Eisner, L. & Arrowsmith, Stephen & Le Calvez, Joel & Rutledge, James. Graph Theory for Seismic Analyses. *AGU Spring Meeting Abstracts*, 2005.
4. Eppelbaum, Lev. Theories of Probability, Information, and Graphs in Applied Geophysics. 10.37247/PAAM.1.2020.18, 2020.
5. Grigor'yan, A. Introduction to Analysis on Graphs. *University Lecture Series*, 2018.
6. Stankovic, Ljubisa & Mandic, Danilo & Dakovic, Milos & Kisil, Ilya & Sejdic, Ervin & Constantinides, A. An Example-Driven Introduction to Data Analytics on Graphs. 10.48550/arXiv.1903.11179, 2019.

К перспективе разработки комплекса электромагнитных методов высокого разрешения при поисках месторождений пресных подземных вод

Турсунметов Р.А. (ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», tursunmetov45@mail.ru), Исмаилов Б.Ж. (ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО»),*
Гафуров Т.А. (ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО»),
Хасанбаев Х.Ф. (ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО»)

Аннотация

В статье рассматриваются особенности поиска и оценки запасов пресных подземных вод в Узбекистане, где сложные гидрогеологические условия требуют применения усовершенствованных геофизических методов. Описаны ограничения традиционных методов, таких как ВЭЗ, и предложены новые подходы, включая электромагнитные технологии и моделирование фильтрационного потока с учётом анизотропных свойств. Уточнены методы оценки минерализации и коэффициента фильтрации, а также механизм электрической анизотропии. Результаты демонстрируют эффективность комплексного подхода, основанного на методах ВЭЗ и ЧЭМЗ.

Ключевые слова

подземные воды, электромагнитные методы, электрическая анизотропия, фильтрационные потоки, геоэлектрическая модель

Теория

Обеспечение населения качественной питьевой водой — одна из ключевых социальных задач. В Республике Узбекистан осуществляется обеспечение питьевой водой населённых пунктов. Однако поиск и разведка подземных вод осложняются локальным распространением водоносных горизонтов и нехваткой информации о природных источниках их питания. Такие месторождения часто характеризуются сложными гидрогеологическими условиями из-за изменчивости мощности водоносных горизонтов, фильтрационных свойств водовмещающих пород и ограниченного распространения водоносных горизонтов. В условиях глобального потепления роль подземных вод в обеспечении питьевой водой становится особенно важной. Идентификация пресных подземных вод в горных районах усложняется разрывно-блоковой тектоникой, которая влияет на размещение полезных ископаемых и вызывает резкие изменения литологического состава [3]. Многолетние исследования подтверждают, что распространение пресных подземных вод связано с взаимодействием неотектонических процессов с разрывно-блоковой тектоникой раннего заложения.

Традиционные методы, такие как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), ограничены рядом факторов, включая отсутствие опорного горизонта, частое чередование маломощных высоко- и низкоомных прослоев, неоднородность литологического состава водоносных горизонтов, пеструю минерализацию подземных вод и влияние принципа эквивалентности при определении параметров водоносных горизонтов. Также к традиционным методам относятся круговые ВЭЗ, результаты которых позволяют получить диаграммы кажущегося сопротивления, характеризующие электрическую анизотропию, вызванную движением подземных вод [2]. При формировании значения кажущегося сопротивления по большой оси можно выделить два компонента: первичное электрическое сопротивление (p_l) и вторичное сопротивление, обусловленное течением фильтрационного потока. Для расчёта используется удельное электрическое сопротивление (УЭС), связанное с поверхностной проводимостью ($p_{пп}$), которое определяется через значения p_l и p_n, — где p_n характеризует УЭС пористой среды при отсутствии движения подземной воды, рассматриваемые как параллельные

проводники. Напряжённость электрического поля по большой оси включает две части: одна — из значения ρ_l, отражающая сопротивление в потоке воды, другая — сопротивление водной среды, экспериментально установленное. Это позволяет оценить минерализацию водоносного горизонта. Соотношение p_n/p_{nn} сильно коррелирует с коэффициентом фильтрации водоносного горизонта. Численные значения затем корректируются на основе экспериментальных данных [4]. Однако механизм формирования эллипса анизотропии для практических целей ещё не установлен.

С учётом этих ограничений, нами были усовершенствованы традиционные методы и привлечены электромагнитные технологии, использующиеся в структурной и рудной геофизике. Мы разработали геоэлектромагнитную модель фильтрационного потока подземных вод, описывающую двухфазную и трёхкомпонентную среду, где твёрдая фаза состоит из скелетных и глинистых частиц, а жидкая фаза представлена водной средой. В модели учтены как физические свойства, так и процессы, связанные с движением подземных вод. Водоносный горизонт может состоять из чередующихся высоко- и низкоомных прослоев, отличающихся фильтрационными свойствами. Для литологического расчленения используются результаты ВЭЗ, уточняемые данными других электроразведочных методов. На следующем этапе исследования целесообразно привлекать методы вызванной поляризации, поскольку поляризуемость, в основном, зависит от наличия глинистых частиц, определяющих степень поляризуемости водоносного горизонта.

Применение данных методов позволяет сформировать геоэлектрическую модель фильтрационного потока подземных вод. При использовании ВЭЗ исследуется не только электрическое сопротивление водоносных горизонтов, но и анизотропные свойства фильтрационных потоков, проявляющиеся в виде электрической анизотропии. Коэффициент фильтрации можно оценить через поляризуемость, исследуемую методом вызванной поляризации. Апробация метода частного электромагнитного зондирования показала, что глубина залегания низкоомных водоупоров может быть точно определена на основе его интерпретации. Метод ЧЭМЗ позволяет одновременно изучать электрические и магнитные составляющие электромагнитного поля электрического диполя, что особенно важно при изучении разрезов, характеризующихся чередованием маломощных высоко- и низкоомных прослоев.

Сильное проявление магнитной составляющей связано с низкоомными глинистыми отложениями, которые служат водоупорами. Это позволяет точно определить глубину залегания таких отложений с помощью кривых ВЭЗ. Таким образом, изучение анизотропных свойств фильтрационного потока, вызванных движением подземных вод, представляет собой важную часть гидрогеологических исследований.

Особое внимание следует уделить эффекту анизотропии фильтрационного потока, который наблюдается при движении подземных вод в однородной геологической среде. Этот эффект связан с капиллярной системой и образованием поверхностных токов в диффузионных слоях около капилляров. Электрическая анизотропия проявляется в том, что сопротивление вдоль направления потока больше, чем в перпендикулярном направлении, что позволяет оценить коэффициент анизотропии фильтрационного потока. Для более точного анализа анизотропии фильтрационного потока подземных вод применяется совмещение методов ВЭЗ и ЧЭМЗ, что позволяет исследовать структуры движения подземных вод. Совместный анализ электрической анизотропии с использованием этих методов помогает выявить латеральные потоки воды, что особенно важно для изучения притоков подземных вод из боковых источников. Ниже рассмотрим в качестве примера участок Гальвасай, расположенный в предгорной речной долине, Ташкентской области.

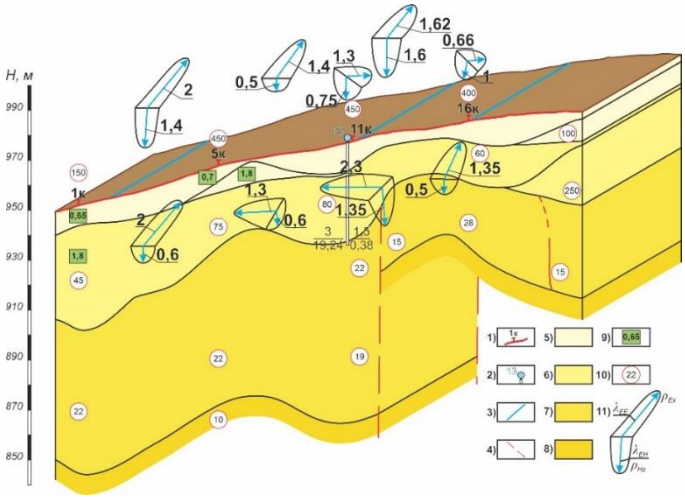


Рисунок 1. Блок-схема по профилю [1].
1) Профиль; 2) Скважина — справа: в числ. – уровень ПВ (м), в знам. – минерализация ПВ (г/л); слева: в числ. – дебит (л/с), в знам. – понижение (м); 3) Боковые саи; 4) Предполагаемые тектонические нарушения; Q-отложения: 5) Валун. галечники с гравий. заполнителем;
6) Гравийно-галечник. отложения с суглин. заполнителем; N-отложения: 7) Алевролиты;
8) Переслаивание песчаников, глин, конгломератов; 9) Поляризуемость; 10) УЭС;
11) Векторная диаграмма КС метода ЧЭМЗ ($\lambda_{EE} = \rho_{Ex}/\rho_{Ey}$, $\lambda_{EH} = \rho_{Hz}/\rho_{Ex}$)

В геологическом строении исследуемого участка присутствуют отложения неогеновой и четвертичной систем. Неогеновая система включает средний миоцен аксарайской свиты с песчаниками, глинами и гравелитами, а также верхний и нижний миоцен с разнообразными красно-коричневыми породами, включая конгломераты и алевролиты. Четвертичные отложения представлены аллювиальными, пролювиально-делювиальными и лессовидными суглинками, а также конгломератами и галечниками. Нижнее и среднее плейстоценовое звенья характеризуются конгломератами, покрытыми лессовидными суглинками, а голоцен — террасами и поймами рек.

На первом этапе был составлен геоэлектрический разрез с использованием метода ВЭЗ для установления литологического состава. В качестве опорного горизонта использовались низкоомные алевролиты, кровля которых была установлена методом ЧЭМЗ. Разрез разделён на 4 зоны с различными значениями электрического сопротивления и морфологией отложений Q. Зона в верхней части (до ПК-16к) имеет глубину 22 метра и характеризуется низкими значениями сопротивления (50-60 Ом*м). Центральная зона проявляет мощное перетекание из бокового сая, без влияния на речную долину. В третьей зоне наблюдается уменьшение мощности отложений Q и продолжение движения подземных вод в западном направлении. Западная зона характеризуется монотонным снижением подошвы отложений Q и перетеканием водных потоков в речную долину. Проницаемые отложения в речной долине распределены неравномерно, и их водоносный горизонт зависит от литологического состава, который определяется методом ВЭЗ.

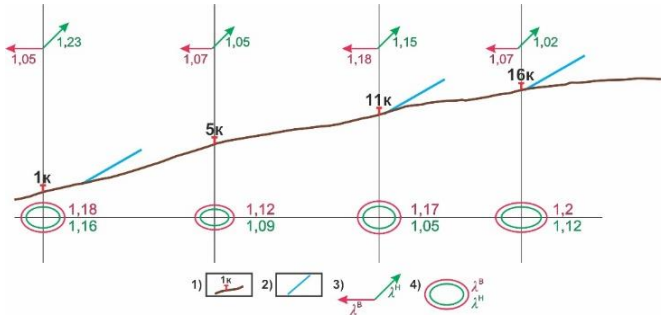


Рисунок 2. Диаграммы по профилю [1].
1) Профиль и пункты наблюдений; 2) Боковые саи вдоль русла; 3) Показатели нелинейного параметра; 4) Круговая диаграмма кажущихся сопротивлений ($\lambda^{В}$ – коэффициент анизотропии верхнего горизонта, $\lambda^{Н}$ – коэффициент анизотропии нижнего горизонта)

Выводы

1. Для изучения литологического состава разреза и проницаемости водоносных горизонтов используется метод ВЭЗ с учётом наличия глинистых прослоев.
2. Степень однородности водоносных горизонтов оценивается с использованием совокупной интерпретации данных ВЭЗ и ЧЭМЗ.
3. Для оценки минерализации и коэффициента фильтрации водоносных горизонтов применяются результаты исследования механизма анизотропных свойств фильтрационного потока.
4. Совместное использование методов ВЭЗ и ЧЭМЗ позволяет более эффективно изучать структуру фильтрационных потоков подземных вод, включая латеральные потоки из боковых источников.

Библиография

1. Турсунметов Р.А., Кадырходжаев А.А., Хасанбаев Х.Ф., Исмаилов Б.Ж. Опыт применения электромагнитных исследований при выявлении особенностей распространения водоносных горизонтов в условиях речной долины / “Актуальные проблемы наук о Земле” // Мат-лы рес. науч. конф-ции /Под ред. проф. Х.Д.Ишбаева. - НУУз им. Мирзо Улуғбека. -Ташкент: НУУз., 2024. - С. 192-196.
2. Турсунметов Р.А. Методика высокоразрешающего комплекса электромагнитных исследований при выявлении пресных подземных вод локального распространения // Мат-лы междун. науч.-практ. конф. «Питьевые подземные воды «Изучение, использование и информационные технологии». Ч. 2. – Моск. обл., 2011. - С. 94-104.
3. Nouradine H., Schamper C., Valdes D. et al. Integrating geological, hydrogeological and geophysical data to identify groundwater resources in granitic basement areas (Guéra Massif, Chad) // Hydrogeol J. – 2024. - № 32. – P. 759-784. - https://doi.org/10.1007/s10040-024-02766-2.
4. Rakhimjan Tursunmetov, Azam Kadirkhodjaev, Bakhtiyar Ismailov, Timur Gafurov, Valentine Tyo, Khasan Khasanbaev Modern geoelectric model of groundwater filtration flows and its search value / T24 – Geophysics. Session 7 - General Topics // 37th International Geological Congress 2024.

Определение геологических структур, связанных с зоной золотого оруденения в районе Нонгшон – Дананг (Вьетнам), по атрибуту дисперсии магнитного поля

Фан Т. Х.* (Ханойский горно-геологический университет Вьетнама,* phanthihong@humg.edu.vn*),
Нгуен Тхи Ту Ханг (Ханойский горно-геологический университет Вьетнама,* phanthihong@humg.edu.vn*),
Нгуен Ту Туй (Ханойский горно-геологический университет Вьетнама,* phanthihong@humg.edu.vn*)

Аннотация

В статье представлены результаты исследований по применению метода статистической оценки признаков в окне «живой» формы на материалах магнитного аномального поля для определения структур, связанных с глубинным золотоносным оруденением, на участке Нонгшон – Дананг (Вьетнам). Система разломов в районе исследования определяется расширенным диапазоном максимальных значений атрибута дисперсии магнитного поля, система разломов в районе развита преимущественно в юго-восточном, юго-западном и субширотном направлениях.

Ключевые слова

Нонгшон - Дананг, Вьетнам, магнитное поле, статистика, КОСКАД-3D

Теория

Район Нонгшон – Дананг расположен в центральной части Вьетнама. Согласно геологическим данным, представленным на рисунке 1, исследуемый район характеризуется сложными геологическими структурами с выходами золотоносных руд на поверхность (рис.1).

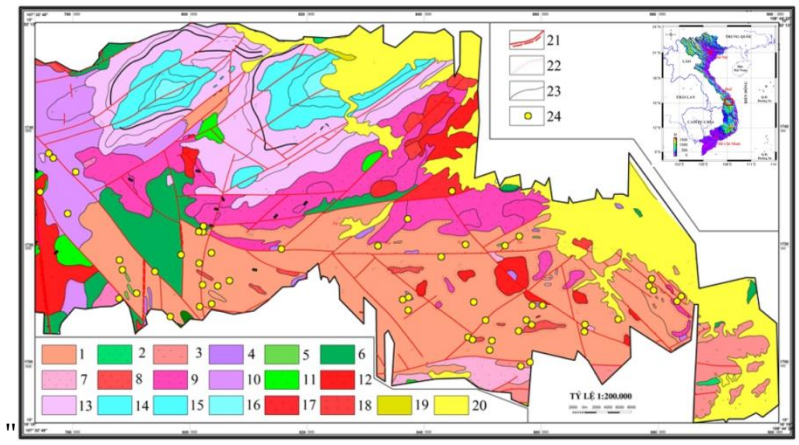


Рисунок 1. Расположение района исследований и схема геологического строения района Нонгшон – Дананг (Вьетнам). (24 - точка минерализации золота)

В этом районе открыто, изучено и оценено множество рудников и месторождений, некоторые из которых введены в эксплуатацию. Эти месторождения характеризуются геофизическими аномалиями, наблюдаемыми на поверхности. Преобразование физических свойств горных пород является важным условием для изучения геологических объектов с применением комплекса геофизических методов. Минерализованные руды в этом районе часто обладают низкой магнитной восприимчивостью ($7.3 \times 10^{-3} \div 7.5 \times 10^{-3}$ СИ), что позволяет четко отличать их от интрузивных пород, а также от гранитов палеозоя и поздней юры [1]. Глубинные

геологические структурные границы определяются диапазонами максимальных значений дисперсионного свойства магнитного аномального поля при увеличении размеров окна [2, 3, 4].

В данной работе мы используем источник данных по магнитным аномалиям, измеренным с помощью МАП-4 с чувствительностью ±1нТл. При использовании компенсации постоянной составляющей магнитного поля самолёта зарегистрированная погрешность измерений составляет ±10,5 нТл [1] (рис. 2).

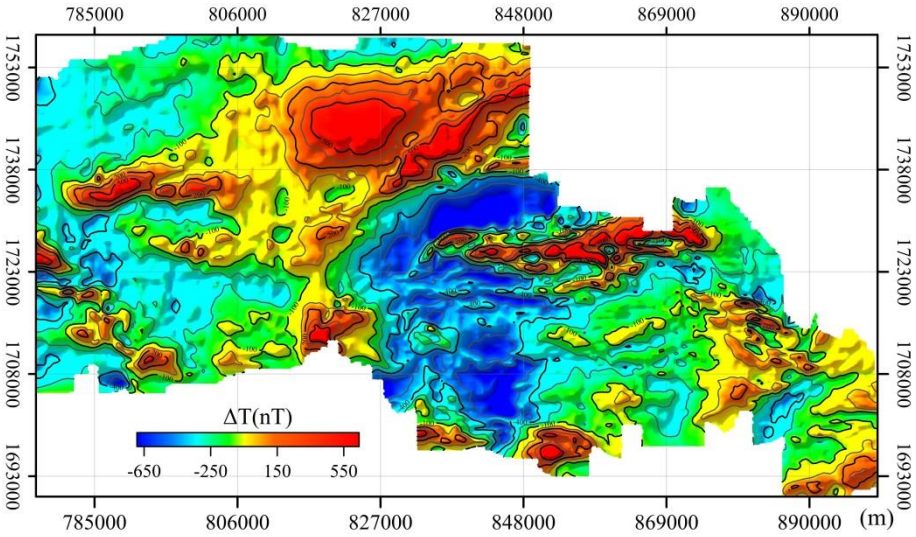


Рисунок 2. Схема аномального магнитного поля после приведенное к полюсу в районе Нонгшон – Дананг (Вьетнам)

Анализ рисунка 2 показывает, что аномальное магнитное поле в районе исследования имеет амплитудный диапазон от -700 нТл до 600 нТл. В этом районе наблюдается крупная полоса отрицательной магнитной аномалии с амплитудой от -700 нТл до -250 нТл в северо - западном направлении, разделённая на два отдельных блока положительных аномалий на северо-западе и юго-востоке с амплитудами от 150 нТл до 600 нТл. Одновременно на территории района выявлено множество локальных положительных магнитных аномалий с амплитудами от 100 нТл до 250 нТл, сосредоточенных на юго-западе и юге исследуемой территории

Метод определения систем тектонических нарушений, связанных с зонами золотого оруденения

В данной работе используется метод оценки статистических свойств магнитных аномалий при увеличении размеров окна для определения границ систем тектонических разломов и анализа геолого-структурных тенденций в исследуемой области. Система разломов определяется линейно расширенными диапазонами максимальных значений дисперсионного свойства аномалии потенциального поля [2, 3, 4]. Дисперсионное свойство магнитного поля вычисляется по следующей математической формуле:

$$D = \sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \left(\Delta f_{ij} - \overline{\Delta f} \right)^2 \qquad (*)$$

Где: $D(\sigma^2)$ - значение дисперсии аномалии магнитного поля (нТл^2); Δf_{ij}- значение аномалии магнитного поля в i-й точке измерения линии j; $\overline{\Delta f}$ - среднее значение аномалии магнитного поля; n- количество линий измерения, m- количество точек измерения на линии.

Результаты определения систем тектонических нарушений, связанных с зонами золотого оруденения

Для анализа геологических структур, связанных с зоной золотого оруденения, мы рассчитываем дисперсионное свойство аномального магнитного поля по формуле (*), используя увеличивающиеся размеры окон, соответствующие глубинам: z = 0 м, z = 720 м, z = 1560 м, z = 2280 м. Полученные результаты представлены на рисуне 3.

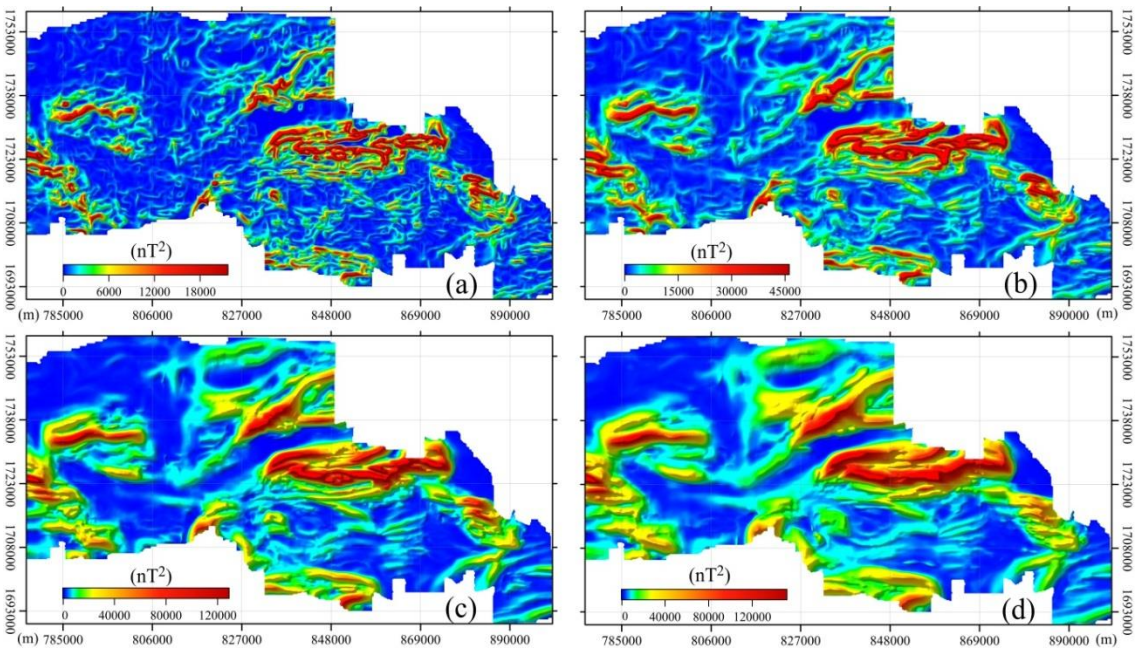


Рисунок 3. Результаты оценки дисперсионных свойств магнитного аномального поля в плоскости наблюдения (z = 0 м) (а); на глубине (z = 720 м) (б); (z = 1560 м) (в); (z = 2280 м) (г) в районе Нонгшон – Дананг (Вьетнам)

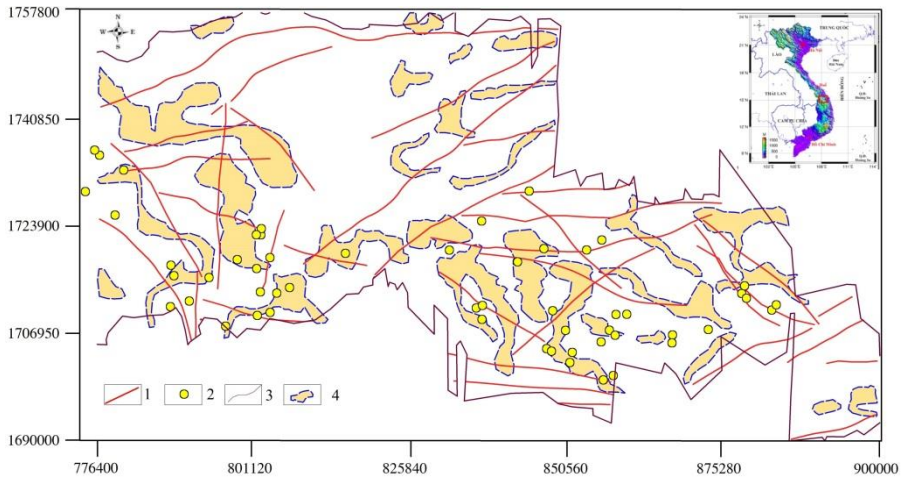


Рисунок 4. Результаты определения системы тектонических разломов, связанных с зоной золотого оруденения в районе Нонгшон – Дананг (Вьетнам)

Система разломов в данном районе определяется по расширенному максимальному диапазону атрибута дисперсии магнитной аномалии (рис. 3), обозначенному красной полосой. Результаты определения системы разломов в этом районе представлены на рисунке 4.

Выводы

Анализ рисунка 4 показывает, что основная система разломов в данном районе преимущественно развивается в северо-восточном – юго-западном, северо-западном – юго-восточном и субширотном направлениях. Для западного и восточного регионов характерно пересечение субширотных, северо-западно – юго-восточных и северо-восточно – юго-западных систем разломов, создающих сложные геологические структуры. Эти структуры обладают потенциалом золотого оруденения и выходят на поверхность рельефа. Для северных и центральных районов характерны крупные региональные системы разломов, формирующие неоднородные региональные блоки. Их развитие преимущественно ориентировано в субширотном и северо-восточно – юго-западном направлениях. Системы разломов в южном регионе развиваются главным образом в субширотном направлении.

Благодарности (на ваше усмотрение)

Автора хотела бы поблагодарить научно-технический проект Ханойского университета горного дела и геологии Вьетнама в 2025 году, код T25-08.

Библиография

1. Нгуен Ч. Л. и др. Измерение полета по гамма-спектру в масштабе 1: 50.000, и измерение гравитационного поля в масштабе 1:100 000 в центральном Вьетнаме. Федерация физики и геологи, Главное управление геологии и минералов Вьетнама, 2000. - 250 с. во Вьетнаме.
2. Никитин А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации. Учебное пособие, 2017. - Москва 127с.
3. Фан Т. Х, Петров А. В., До М.Ф. Геологическое районирование центральной части въетнама по результатам интерпретационной обработки данных магниторазведки с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D». Разведка и охрана недр. - 2021. С 27-33.
4. http://www.coscad3d.ru/index.php

Structural and Morphological features of Upper Cretaceous, offshore Cameroon

*Anh Ngoc Le * (Hanoi university of Mining and Geology, lengocanh@humg.edu.vn)*

Annotation

Located in Kribi-Campo sub-basin on the present day deep-water continental margin slope, the study area covers an area of 1500 km^2, and contains a sedimentary section up to 6.5 km thick, ranging in age from Upper Cretaceous to Recent. Drilling results from the, Sanaga Sud field located on the continental shelf, reveal an eroded, palaeo-topographic high composed of Lower Cretaceous sands and shales, overlain by Upper Cretaceous (Maastrichtian) shales. The absence of most the Upper Cretaceous (Cenomanian to Campanian) to Cenozoic (Palaeocene to Oligocene) section is interpreted to be due to structural uplift, with the missing sequences eroded and transported seaward to be deposited in the deep water area. 3D seismic data used in this study covers the deep water section of the basin, and provides an opportunity to investigate the structural and morphological features of the basin in upper Cretaceous, bring a better understanding of the basins stratigraphic evolution.

The interpretation was carried out using 3D seismic data. Interpretation was undertaken in TWT, and depth conversion undertaken using an average velocity of 2600 m/s for the Cretaceous, based on analysis of regional well data. There are number of faults have been detected in the upper Cretaceous sequence including two sets of N120 and N30 faults. N30 faults set shows a great effect on the stratigraphic evolution while the N120 faults set tends to die out below the upper Cretaceous sequence.

Keywords

Growth faults, Cameroon, 3D seismic, Upper Cretaceous, West Africa

Theory

The Kribi-Campo sub-basin formed during the breakup of Africa and South America, began in the Late Jurassic and lasting until the onset of seafloor spreading in Albian-Cenomanian time (Dailly, 2000) (Fig. 1). The basin is classified as an Atlantic–type marginal sag basin.

Controls of deep crustal structure on basin structural configuration are shown on Fig. 1 & 2. This is the major fracture zone formed by continental extension: the Kribi Fracture Zone (KFZ) to the southeast of the study area and marked as Kribi high. The Kribi high shows the main control on basin profile (Le, 2021). It acts as basin boundary to the southeast creating the high and low geometry in the Upper Cretaceous (Fig. 3).

Faults have been detected in the basin, striking N30 and N120, with average spacing of 2 km and maximum offset of 140 ms. The faults are planar in geometry and dipping mainly southwest with steep dips of c. 40 – 50^o (Fig. 2). N120 faults are perpendicular to the transform trend and terminated abruptly at the KFZ. N30 faults are parallel to the transform trend developed close to the KFZ. They are interpreted to be mostly normal faults. In the cross-section, the N30 faults do not die out below the top Lower Cretaceous sequence like the N120 fault set. They penetrate almost all of the Upper Cretaceous sequence (Fig. 4). Further analysis reveals that the N30 faults decrease offset upwards from ~100 ms to ~20ms TWT (Fig. 4). N30 faults are interpreted as growth faults.

The observations that both N30 and N120 are presented in the syn-rift sequence (Lower Cretaceous), and most of N120 die out within syn-rift sequence, and terminating at some point of the fracture zone or located closely to it suggests that both fault sets may relate to rifting stage during the basin opening and have close relationship between the evolution of the fracture zone and the normal faults. Similar normal faults characteristics have been documented in the Niger delta (Briggs et al., 2009), Rio-Muni basin (Dailly, 2000), Gabon basin (Mbina Mounguengui and Guiraud, 2009). The development of N30 into the Upper Cretaceous are possibly the results of slow thermal subsidence, and gravity collapse tectonic process on the subsiding passive margin.

In summary, the basin has been characterized by three main structures:

- The NE - SW Kribi high located in southeast of the study area and composes of thick lower Cretaceous sequence overlain by Upper Cretaceous sequence.
- The N30 faults parallel to the KFZ and developed in Lower and Upper Cretaceous.
- The N120 faults perpendicular the KFZ and all die out in the syn-rit sequence (lower Cretaceous).

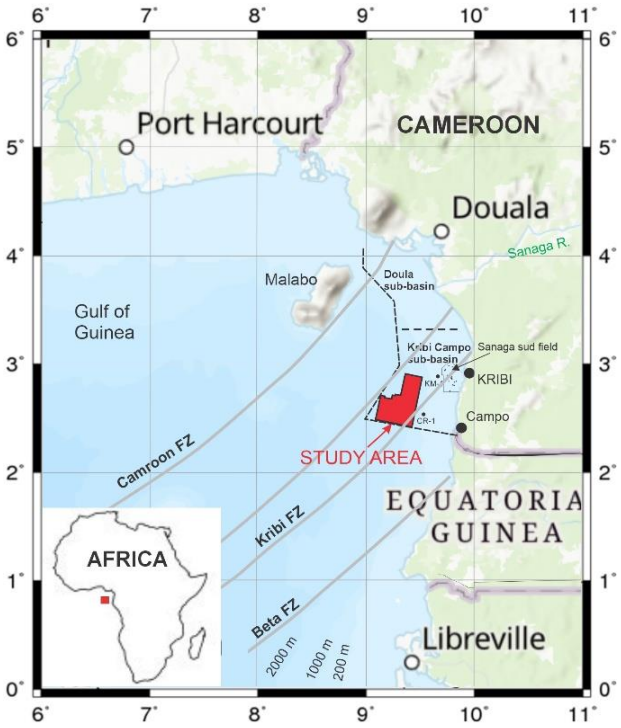


Figure 1. Bathymetry map of the continental slope on the Cameroon margin. It shows the location of the study area, and the number of wells that have been drilled within the basin and the location of the fracture zone system (Le et al., 2015). The coast line map is extracted from National Centers for Environmental information (NCAA) (https://www.ncei.noaa.gov/maps/grid-extract/)

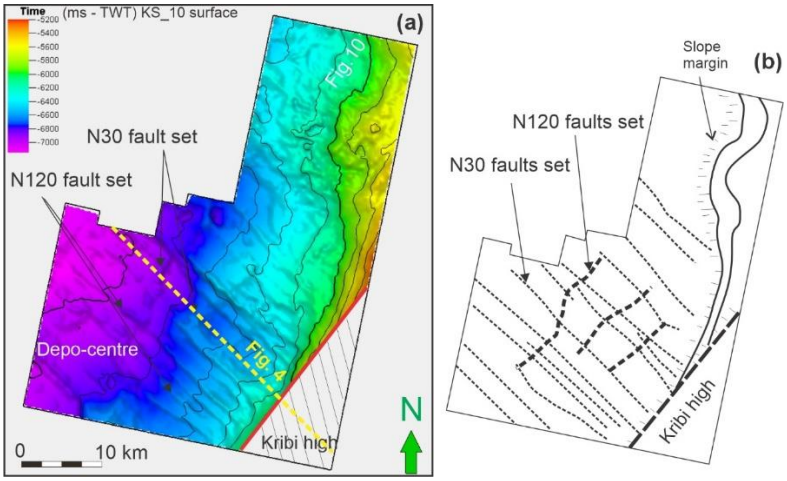


Figure 2. (a) 2D map of the basal surface illustrates for the two main fault sets i.e., N120 and N30. Line interpretation is shown in (b). N120 faults terminated in the KS_10; N30 faults develop into the Upper Cretaceous

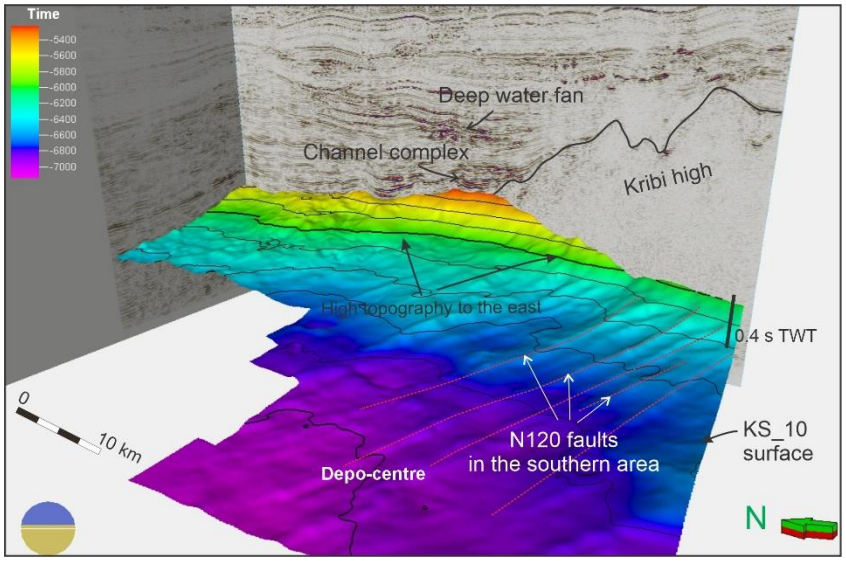


Figure 3. 3D view of inline-crossline and the key surface KS_10 showing a comprehensive view of the data and associated features

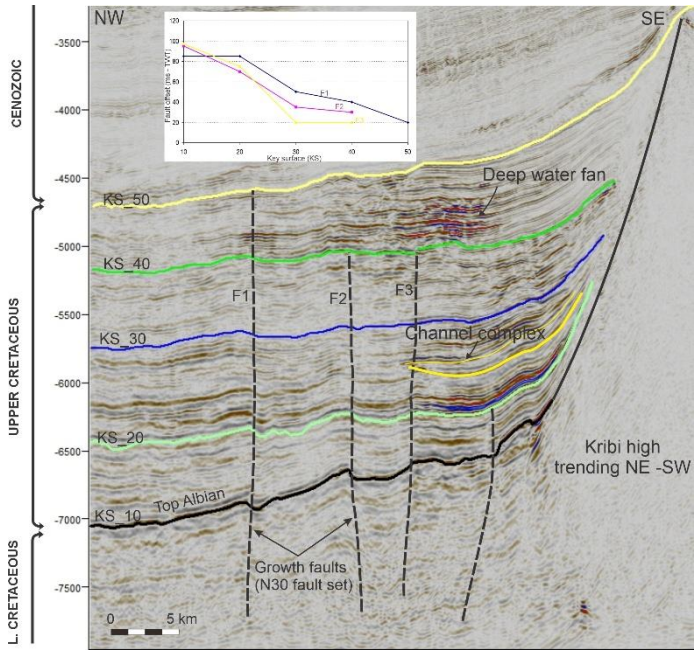


Figure 4. NW– SE seismic section perpendicular to the N30 faults illustra
ting for growing faults in the Upper Cretaceous which subtle controls the deposition of sands in these lower sequences. The graph is a Cross-plot of growth fault vs. the key surfaces reveals the decrease of the fault throw upwards, an evidence for the interpretation of growth faults. (See figure 2 for the seismic line location)

Conclusions

The Upper Cretaceous sedimentation filled the low which is bounded by the eroded paleo-topography high to the southeast (Kribi high). There are two faults sets are detected in the Upper Cretaceous including N120 and N30 faults. The role of these faults in post-rift deposition varies significantly. While N120 faults show less control on post-rift deposition as they all die out in the Lower Cretaceous, N30 growth faults may have some effect on the geometry and distribution of channel, fan deposits in the Upper Cretaceous.

Bibliography

1. Briggs, S. E., Cartwright, J. & Davies, R. J. (2009) Crustal structure of the deepwater west Niger Delta passive margin from the interpretation of seismic reflection data. Marine and Petroleum Geology, 26 (6)**,** 936-950.

2. Dailly, P. (2000) Tectonic and stratigraphic development of the Rio Muni Basin, Equatorial Guinea: The role of transform zones in Atlantic Basin evolution. IN Mohriak, W. & Talwani, M. (Eds.) Atlantic rifts and continental margins. Washington, DC, American Geophysiscal Union, 105-128.

3. Le, A. N. (2021). Evolution of Deep-Water Sinuous Channel Offshore Cameroon, West Africa, Using 3D Seismic Data. The Iraqi Geological Journal, 12-19.

4. Le, A. N., Huuse, M., Redfern, J., Gawthorpe, R. L., & Irving, D. (2015). Seismic characterization of a Bottom Simulating Reflection (BSR) and plumbing system of the Cameroon margin, offshore West Africa. Marine and Petroleum Geology, 68, 629-647.

5. Mbina Mounguengui, M. & Guiraud, M. (2009) Neocomian to early Aptian syn-rift evolution of the normal to oblique-rifted North Gabon Margin (Interior and N'Komi Basins). Marine and Petroleum Geology, 26 (6)**,** 1000-1017.

Геолого-факторное моделирование

Сикорский В.А.* (МГРИ, sikorskyva@mgri.ru)

Аннотация

При геолого-геофизической съемке объектом исследования является геологическое пространство, которое и необходимо исследовать с целью построения геологической карты – модели, отражающей состав, строение и историю его формирования.

Целью геолого-факторного моделирования является функция, которая отражает объект исследования. С одной стороны, это может быть геофизическое или геохимическое поле, с другой - некоторая абстрактная математическая функция - модель, характеризующая один из атрибутов геологического пространства.

Выделенные на этапе создания модели факторные представления применяются для дальнейшей расшифровки площадной структуры исследуемого геологического объема.

Ключевые слова

Геолого-факторное моделирование, факторно-информационная матрица, математическая модель

Теория

Целевая функция геолого-факторного моделирования представляется в виде линейной функциональной зависимости от некоторых факторов – функции отклика. Будем рассматривать абстрактные факторы, варьирующие на двух уровнях со значениями +1 и -1. Если задать число факторов k, принимающие значения +1 или -1, то количество разновидностей горных пород N, которые с их помощью могут быть однозначно определены, равно:

$$N=2^k \quad (1)$$

Например, восемь разновидностей горных пород могут быть однозначно определены тремя факторами. При создании функции отклика будем учитывать влияние не только самих факторов, но и их взаимодействий. Тогда при наличии трех факторов модель можно представить в виде:

$$Y = \alpha_1 x_0 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2 x_1 + \alpha_4 x_1 + \alpha_5 x_2 x_3 + \alpha_6 x_1 x_2 x_3 + \alpha_7 x_1 x_3 + \alpha_8 x_3 \quad (2)$$

где Y – функция отклика,

α_i - коэффициенты модели, отражающие горные породы, i =1-8

x_n - факторы модели, n=1,2,3

Заменяя факторы и их взаимодействия функциями u_i, получим:

$$Y = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3 + \alpha_4 u_4 + \alpha_5 u_5 + \alpha_6 u_6 + \alpha_7 u_7 + \alpha_8 u_8 = \sum_{i=1}^{8} \alpha_i u_i \quad (3)$$

или в матричной форме:

$$[\mathbf{Y}]_{8x1} = [\mathbf{U}]_{8x8}\,[\mathbf{a}]_{8x1} \quad (4)$$

здесь $[\mathbf{Y}]_{8x1}$ - вектор - столбец целевой функции,

$[\mathbf{a}]_{8x1}$ - вектор- столбец коэффициентов,
$[\mathbf{U}]_{8x8}$ - расширенная факторно - информационная матрица (рис. 1).

$$[U] = \begin{bmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & + & + & + & - & - & - & - \\ + & + & - & - & - & - & + & + \\ + & + & - & - & + & + & - & - \\ + & - & - & + & + & - & - & + \\ + & - & - & + & - & + & + & - \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & - & + & - & + & - & + & - \end{bmatrix}$$

Рисунок 1. расширенная факторно-информационная матрица (отображены только знаки при единицах)

Для нахождения коэффициентов α в представлении функции отклика (3) необходимо решить систему уравнений (4). Решением этой системы является выражение:

$$[\,\alpha\,]_{8x1} = [\,U\,]^{-1}_{8x8}\ [\,Y\,]_{8x1} \qquad (5)$$

которое можно получить в виде:

$$\alpha_i = \frac{1}{8}\sum_{j=1}^{8} u_{ij}\, y_i \qquad (6)$$

Таким образом, рассмотренная теория, с одной стороны, позволяет известную функцию (например, геофизическое поле), изменяющееся на $N=2^k$ уровнях, где k- число факторов (в нашем случае N=8, k=3), представить в виде линейной комбинации 3-х факторов и их взаимодействий, а с другой - по известным факторам создать модель геологического пространства в виде модели геологической карты.

Далее, при построении геолого-факторной модели, решаются два типа задач:

1. прямая, решение которой осуществляется при анализе геолого-геофизических данных на опорных геологических профилях;
2. обратная, решаемая при обработке площадных геолого-геофизических полей исследуемой территории.

При решении прямой задачи для получения факторного представления геофизических полей сначала определяют средние уровни геофизического поля F над каждой горной породой на опорной скважине или опорном профиле.

После получения средних значений поля над каждой разновидностью горных пород геофизическое поле представляется в виде линейной комбинации ортогональных базисных геологических функций. Например, для двух полей:

$$F\mathrm{cp}_i = \sum_{j=1}^{4} \alpha_j\, u_{ij} \qquad i=1,2 \qquad (7)$$

Коэффициенты α_j вычисляются по формулам (5).

На рис.2 приведены графики значений поля F_{1cp} и F_{2cp} по опорному профилю, на котором выделено четыре разновидности горных пород. Горные породы обозначаются для краткости натуральными числами

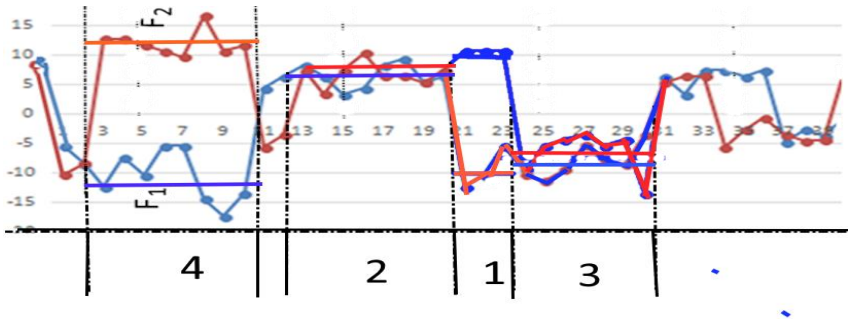


Рисунок 2. Факторное представление геофизических полей F_1 (синий цвет), F_2 (красный цвет), измеренных по опорному профилю. Цифры 1-4 – горные породы

На основе полученных факторных представлений геофизических полей при «обучении» модели на стадии прямой задачи, определяют значения факторов – для решения обратной задачи.

В зависимости от конкретных условий, решение задачи определения значений факторов может осуществляться различными способами. В нашем случае нахождение факторов на каждом пикете рядового профиля основано на решении системы “m” уравнений с “m” неизвестными.

В нашем случае нахождение факторов на каждом пикете рядового профиля основано на решении системы “m” уравнений с “m” неизвестными.

Полученные значения коэффициентов позволяют записать целевую функцию, которая и является математической моделью исследуемого геологического пространства. Заменяя ортогональные геологические функции факторами и их взаимодействиями, получим геолого-факторное представление математической модели геологического пространства.

Пример результата выделения пород 1 и 4 для случая двух факторов приведен на рисунке 3.

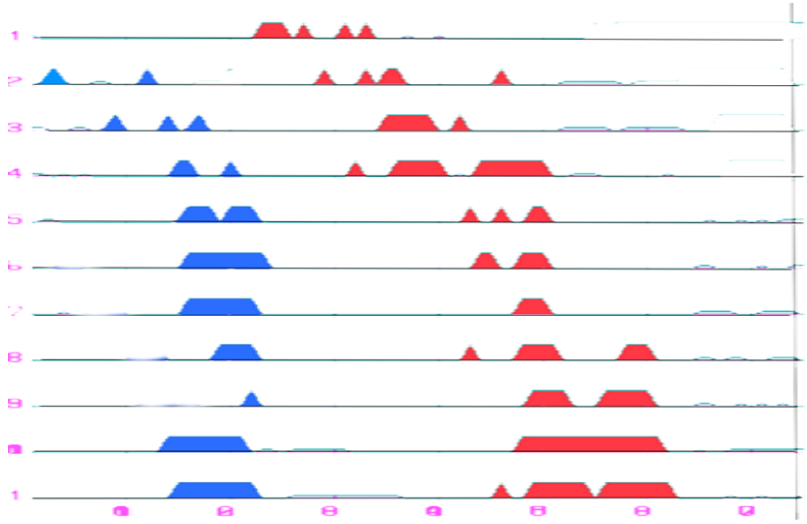


Рисунок 3. Выделение пород 1(синий цвет) и 4 (красный цвет) по профилю для модели с двумя факторами

Выводы

Геолого-факторное моделирование позволяет получить представление геофизических полей и их взаимодействие в виде целевой функции отклика. Нахождение коэффициентов полученных систем уравнений легко алгоритмизируется благодаря матричному представлению данных. Решение обратной задачи в факторном пространстве применяется для расшифровки геолого-геофизических данных.

Библиография

1. Васильев А. А. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юрайт, 2023. 225 с.
2. Девис Дж.С. Статистика и анализ геологических данных / Дж. Девис; Пер. с англ. В.А. Голубевой, Под ред. д-ра геол.-минерал. наук Д.А. Радионова. — Москва : Мир, 1977. — 572 с
3. Тагаев Е.А, Глатко Я.С., Глатко С.А., Кулешов А.М., Паничкин И.О. Методика геодинамического районирования на основе факторного анализа пространственных данных. Горная промышленность. 2025;(1):97–101. Источник: https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-97-101
4. Черткова Е. А. Статистика. Автоматизация обработки информации. М.: Юрайт, 2024. 196 с.

Построение физико-геологической модели по результатам проведения комплекса геофизических методов с целью поисков золото-серебряного оруденения на участке Красный

Абрамов Г.А.* (МГРИ, a8ram4ik@yandex.ru),
Новиков П.В. (МГРИ, novikovpv@mgri.ru)

Аннотация

На территории Чукотского автономного округа проводились полевые работы, нацеленные на поиск золото-серебряного месторождения. Полевые работы проводились методом электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП). По результатам работ был подобран комплекс геофизических методов для дальнейших поисков золото-серебряного месторождения и построена физико-геологическая модель.

Ключевые слова

Комплекс геофизических методов, поиск месторождения, физико-геологическая модель, золото-серебряное месторождения, электротомография

Источники финансирования

За проведение полевых работ бригады отвечала компания ООО «Северо-Запад».

Теория

Геологическая характеристика района.

Стратифицированные образования в пределах исследуемых площадей представлены юрскими, меловыми и четвертичными отложениями.

Отложения *берриасского* яруса (K_1b) сложены преимущественно темно-серыми мелкозернистыми полимиктовыми песчаниками и алевролитами с редкими прослоями гравелитов и аргиллитов, в основании разреза – горизонт конгломератов. В границах площадей берриас откартирован в бортах долины реки, на юго-западе и юге площади. Мощность отложений – до 430-480 м.

Валанжинский ярус (K_1v) обнажается в бассейне реки и, более локально, в верховье реки. В составе отложений яруса преобладают грубозернистые полимиктовые песчаники, гравелиты и мелкогалечные конгломераты с прослоями алевролитов, аргиллитов и ракушечников. Мощность – от 50 м до 200-300 м.

Готеривский ярус (K_1g) откартирован в верховьях рек и сложен переслаивающимися вулкано-терригенными песчаниками, алевролитами и мелкогалечными конгломератами. Мощность отложений яруса составляет 300-450 м.

Интрузивные образования в границах площадей прорывают и метаморфизуют осадочные и вулканогенные образования верхней юры и мела и имеют позднемеловой возраст. Среди интрузивных пород на рассматриваемых территориях распространены гранодиориты (□□K), диориты (□K_2) и гранодиорит-порфиры (□□□K_2). Гранодиоритами и в меньшей степени диоритами сложен ряд различных по размеру штоков и крупный Оконайтовский массив, захватывающий своим северо-западным флангом северо-восточный фрагмент нашей площади. Контакты интрузий с вмещающими породами сопровождаются широкими зонами ороговикования.

В металлогеническом отношении площади расположены на юго-западе золото-серебряной металлогенической зоны, что характеризует территорию работ перспективной на выявление золото-медно-молибден-порфирового, золотого и золотосеребряного типов проявлений.

Предшественниками на рассматриваемых площадях и непосредственной близости от них выявлены пункты минерализации золота, серебра, меди, цинка, молибдена и других элементов. Содержания золота достигают 0.1 – 0.45 г/м^3. Непосредственно в контурах площадей наибольшие содержания золота составили 1.8 г/т. Вторичные кварциты центра площади характеризуются также максимальными концентрациями серебра (>100 г/т).

Минерализация потенциально золоторудных объектов геологически приурочена к приконтактовым зонам (до 5 км) интрузивных массивов и субвулканических тел. Золотосеребряные объекты геологически приурочены к приконтактовым частям субвулканических тел в вулканогенных толщах.

На рисунке 1 представлены псевдоразрезы кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости полученные в результате полевых работ.

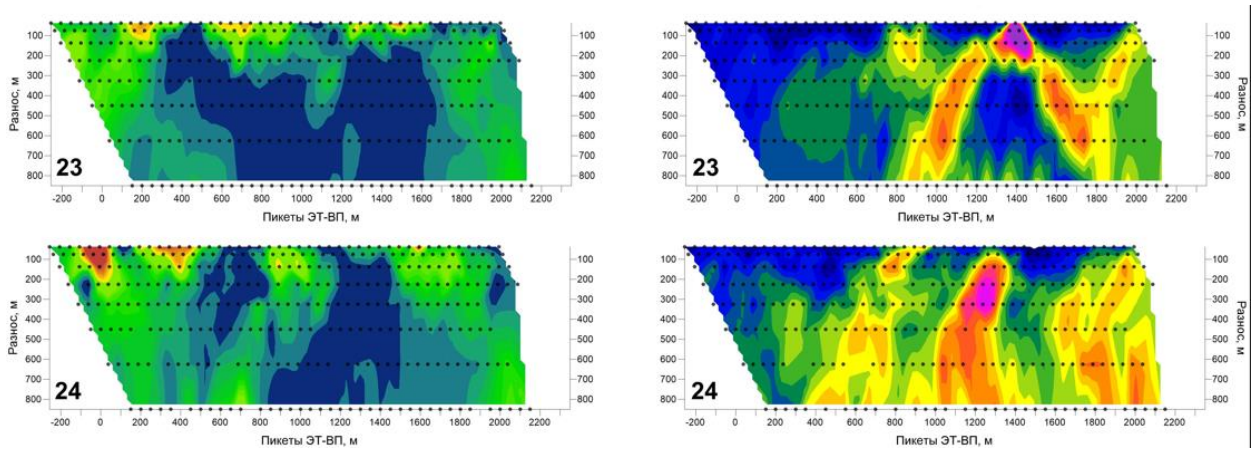


Рисунок 1. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости

Физические свойства горных пород представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства горных пород

Разности пород	σ, г/см^3	æ, *10^{-5} ед.СИ	ρ, Ом*м	η, %
Гранодиориты	2,7	300	2000	4
Песчаники и гравелиты	2,3	80	300	1
Песчаники и алевролиты	2,1	20	200	1
Конгломераты	2,2	90	1000	2
Вкрапленные руды	4,1	200	50	10

По геологической характеристике района, разрезам кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости и физическим свойствам горных пород построена петрофизическая модель месторождения (Рисунок 2).

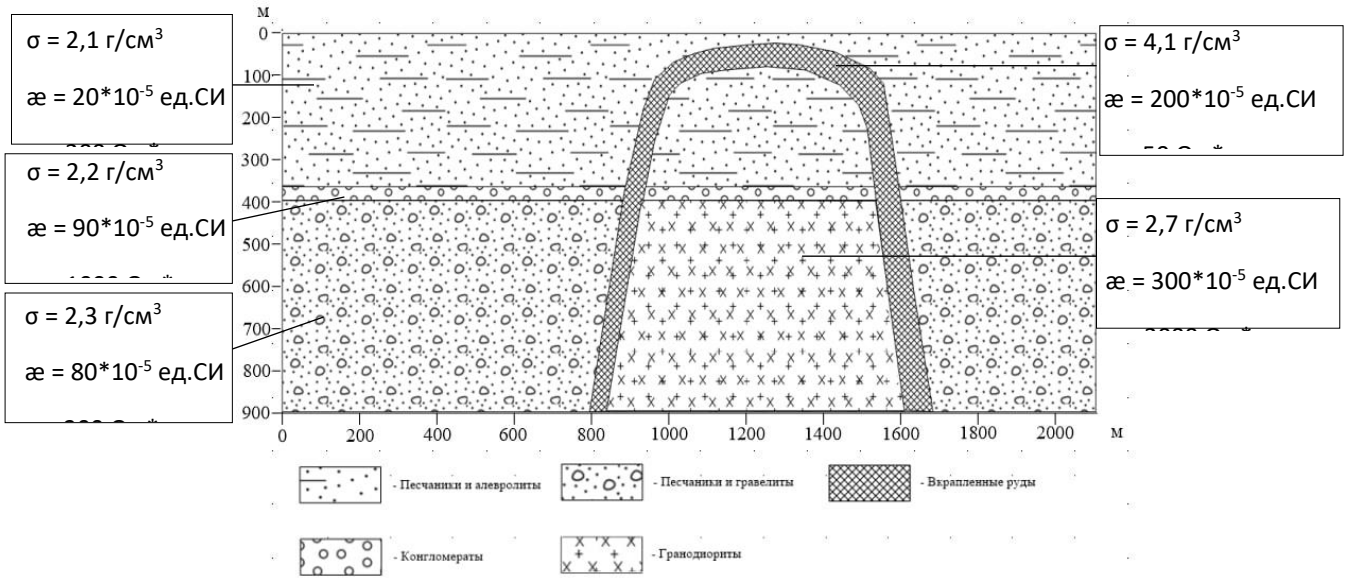


Рисунок 2. Петрофизическая модель месторождения

Из физических свойств горных пород выделяется резкая контрастность гранодиоритов, песчаников с гравелитами и приуроченных к их контакту вкрапленных руд по плотности, магнитной восприимчивости, поляризуемости и удельному электрическому сопротивлению.

По петрофизической модели, геологическим и физическим данным горных пород сформирована и построена физико-геологическая модель месторождения (Рисунок 3).

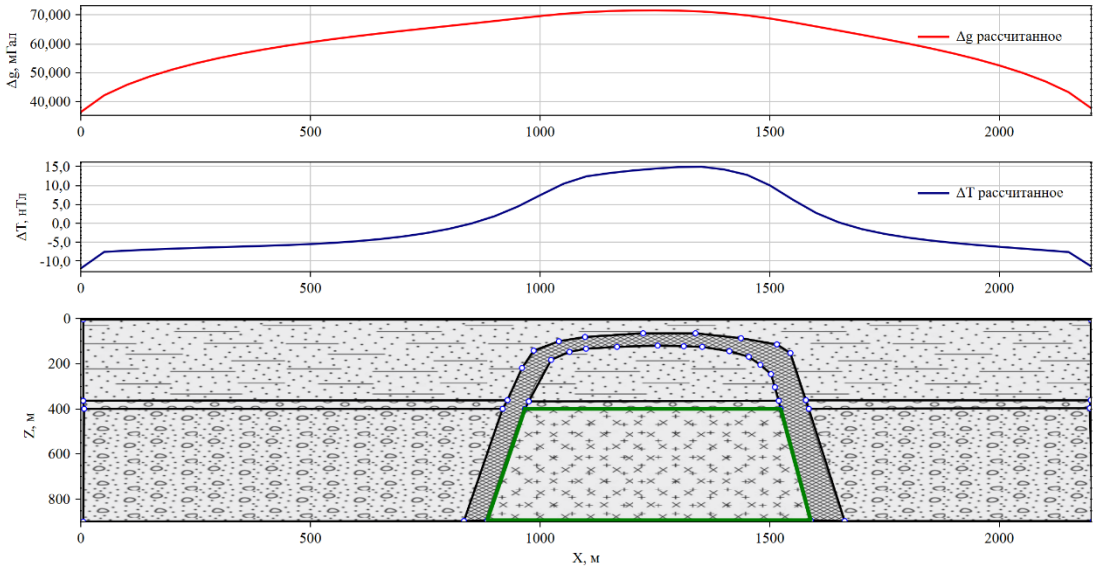


Рисунок 3. Физико-геологическая модель месторождения

В результате построения физико-геологической модели месторождения с применением гравиразведки и магниторазведки наблюдаются повышенные значения гравитационного и магнитного поля над гранодиоритами, к которым приурочено золото-серебряное оруденение, следовательно эти методы подходят в комплекс геофизических методов для поиска данного месторождения.

Выводы

Полученные данные по геологии, петрофизике и электроразведке позволили сформировать и построить физико-геологическую модель месторождения. Комплекс методов, включающий в себя электроразведку, магниторазведку и гравиразведку подходит для поисков золото-серебряного оруденения в данных геологических условиях.

Библиография

1. Лобанов А.М. Гравиразведка. Краткий курс. / Учебное пособие для студентов геологических специальностей. - М.: 2017 г. - 78 с.
2. Морозов О.Л. Геологическое строение и тектоническая эволюция Центральной Чукотки. - М.: ГЕОС, 2001. - 201 с.
3. Новиков К.В. Магниторазведка. Часть 1. / Учебное пособие для студентов геофизической специальности. - М., 2013 г.
4. Электроразведка**:** учебное пособие [Электронный ресурс] /авт. - сост.: А.А. Иванов, К.В. Новиков, П.В. Новиков. - М.: МГРИ, 2019. - 80 с.

Определение параметров земной коры по данным сети «Нефтегаз-сейсмика» (Южное Предуралье)

Астаскевич А.И.* (МГРИ, Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, sashajedi@ifz.ru),
Алёшин И.М. (Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, ima@ifz.ru),
Нестеренко М.Ю. (Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения, n_mu@mail.ru)

Аннотация

Основным методом изучения глубинного строения земной коры на территории Южного Предуралья был метод ГСЗ. Данный метод позволяет получить двумерный сейсмический разрез до мантийных глубин. В качестве источников обычно используется атомные или мощные химические взрывы. Для реализации применения метода ГСЗ необходимо вложение больших экономических и временных ресурсов. По данным ГСЗ профиля «Батолит-2» [Атлас, 2013] глубина границы Мохо в районе работ может достигать 40-43 км.

Альтернативным методом для определения параметров земной коры является метод функции приёмника [Винник, 2019]. Источником сейсмических волн в методе функции приёмника являются удалённые землетрясения.

Мониторинговая сеть «Нефтегаз-сейсмика» позволяет регистрировать как локальные, так и удалённые сейсмические события, необходимые для применения метода приемных функций.

Ключевые слова

Южное Предуралье, «Нефтегаз-сейсмика», функция приёмника, метод Жу и Канамори, мощность земной коры, отношение сейсмических скоростей

Источники финансирования

Работа выполнена в рамках государственных заданий, № 075-00273-24-00 ИФЗ РАН, и № 122011900412-7 Отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН, утверждённых Минобрнауки России.

Теория

В состав сети «Нефтегаз-сейсмика» входит 13 станций (11 стационарных и 2 передвижных» [Нестеренко и др., 2023]. Широкополосная станция ORR зарегистрирована как федеральная. Данная станция зарегистрировала 29 удаленных сейских событий. (Рисунок 1) необходимой магнитуды с эпицентральными расстояниями от 30 до 90 градусов.

Для каждого события была рассчитана индивидуальная функция приёмника. Чтобы выделить слабый полезный сигнала необходимо просуммировать приёмные функции множества событий.

В методе инверсии функции приёмника [Алёшин, 2021] построение скоростного разреза сводится к решению задачи по подбору таких параметров среды, чтобы минимизировать разрыв между синтетической функции $PRF^{(syn)}(m;t)$ и наблюдённой суммарной функцией (2).

$$S(m)^2 = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (PRF^{(syn)}(m;t) - \overline{PRF}(t))^2 \, dt, \quad (1)$$

t_1, t_2 – границы интервала времени, в котором производится сравнение, начальный момент времени соответствует приходу основной фазы (Pp).

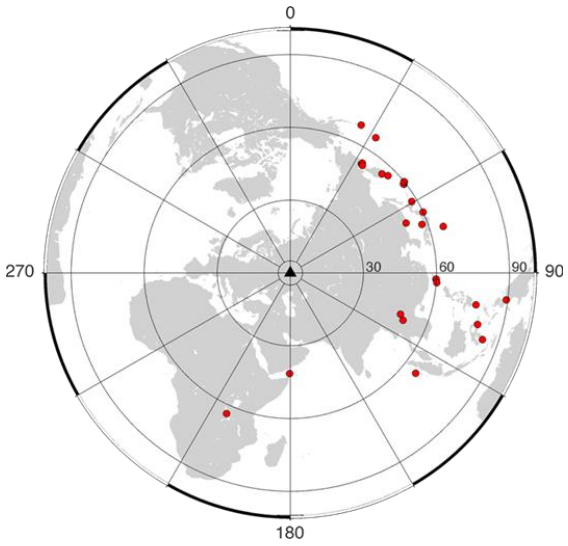


Рисунок 1. Распределение отобранных сейсмических событий. Чёрный треугольник – сейсмическая станция; красные круги – эпицентры землетрясений

Скоростной разрез (Рисунок 2) характеризуется двумя границами, на которых происходит резкое изменение скоростей: контакт осадочного чехла и кристаллического фундамента (5-7 км), Мохоровичича (35-37 км).

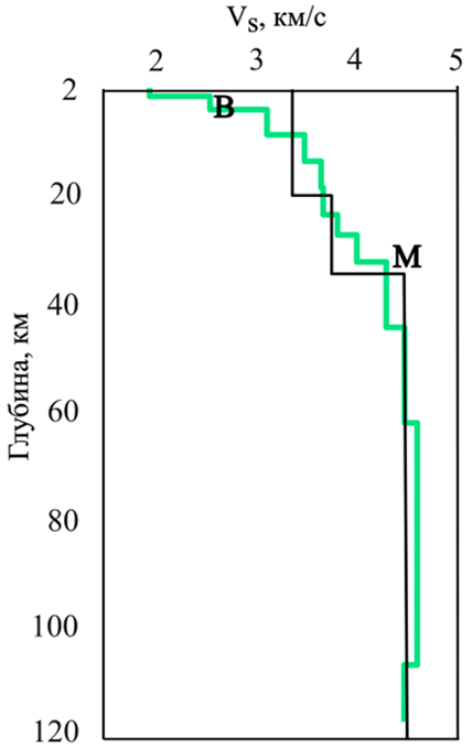


Рисунок 2. Скоростной разрез под станцией ORR. Зеленым цветом показан подобранный скоростной разрез; черный цвет - разрез по модели IASP91. Буквой B отмечена границы контакта садочного чехла и фундамента, M – граница Мохо

Для уточнения результатов, полученных методом функции приёмника, был использован метод Жу и Канамори [Zhu, Kanamori, 2000]. Данный метод позволяет оценить мощность земной коры и отношение упругих скоростей V_P/V_S по функциям приёмника нескольких событий.

Суть метода сводится к расчёту времён прихода фаз обменных волн для пула значений коэффициента $k = V_P/V_S$ и глубин H (км). Таким образом функция S (2) будет принимать максимальное значение при совпадении t_1, t_2, t_3 с наблюдёнными временами вступления.

$$S(H,k) = \sum_{i=1}^{N} w_1 \cdot PRF(t_1) + \sum_{i=1}^{N} w_2 \cdot PRF(t_2) - \sum_{i=1}^{N} w_3 \cdot PRF(t_3), \quad (2)$$

N – количество функций приёмника, совпадающее с числом зарегистрированных событий. Весовые коэффициенты w_i выбирались априорно. В настоящей работе, следуя оригинальной статье, были заданы веса равными 0.6, 0.3 и 0.1.

Решение, полученное методом Жу и Канамори, характеризуется двумя равноправными максимумами (Рисунок 3).

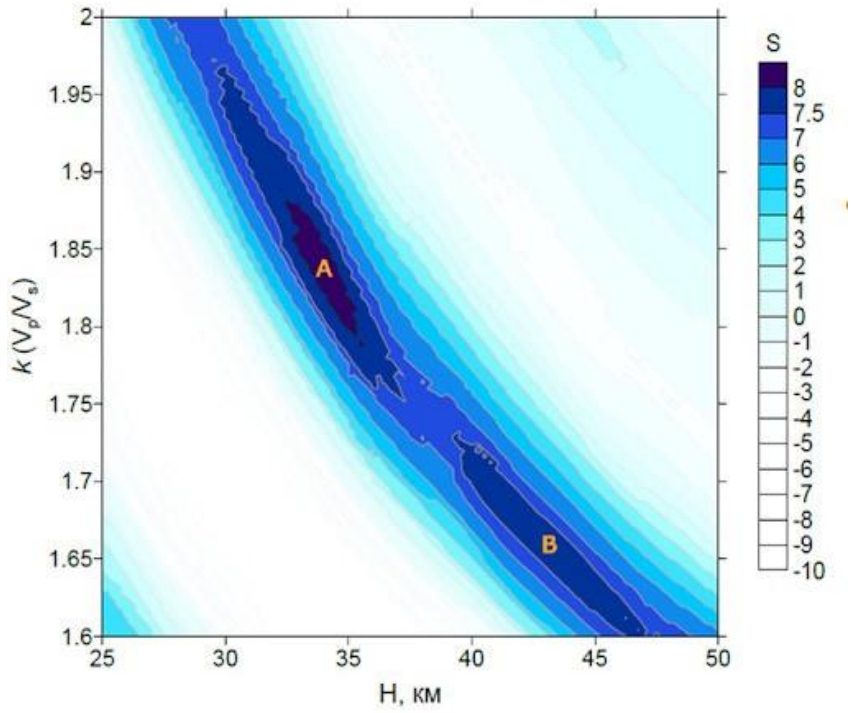


Рисунок 3. Значения функции (2), рассчитанные для станции ORR. По горизонтальной оси отложена мощность коры H в километрах; на вертикальной оси приведены значения отношения скоростей продольных и поперечных волн

Первый из них (A) соответствует параметрам κ = 1.84, H = 34 км, что согласуется с оценкой, полученной в работе [Алешин и др., 2023]. Значения, задаваемые вторым максимумом (B), таковы: глубина H = 43 км и κ = 1,66, что совпадает с результатами ГСЗ.

Выводы

Методом инверсии приёмных функций определено, что мощность осадочного чехла приблизительно равна 5-7 км, мощность коры – 35 км, а отношение V_P/V_S = 1,72. Оценка средних параметров коры методом Жу и Канамори даёт две пары возможных значений мощности коры H и отношения V_P/V_S: H = 34 км, V_P/V_S = 1.84 и H = 43 км, V_P/V_S = 1.66. Первая пара соответствует решению, полученному методом инверсии приёмных функций, вторая – ГСЗ. Решение, полученное методом функции приёмника, говорит в пользу меньшей мощности земной коры.

Однако для окончательного решения проблемы, требуется дополнительные исследования с привлечением большего набора данных.

Библиография

1. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год». Электронное издание. URL: http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic. С-Пб., ВСЕГЕИ. 2013. – С. 45–47.

2. Алёшин И.М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. № 1. Т. 496. С. 74–77.

3. Алешин И.М., Гоев А.Г., Нестеренко М.Ю., Астаскевич А.И. Кора и верхняя мантия Южного Предуралья по приемным функциям // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVII Международной сейсмологической школы, Ташкент, Республика Узбекистан, 11–15 сентября 2023 года. Отв. редактор А.А. Маловичко. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2023. – С.6

4. Винник Л.П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27.

5. Нестеренко М.Ю., Алёшин И.М., Гоев А.Г., Капустина О.А., Астаскевич А.И. Оренбургская региональная сеть «Нефтегаз-сейсмика» // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 2. С. 5 17. DOI: 10.21455/si2023.2-1

6. Zhu L., Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2000. – Vol. 105. – №. B2. – P. 2969 2980.

Корреляция опорных и целевых отражающих горизонтов в пределах южного борта Терско-Каспийского прогиба с целью выявления нефтегазоперспективных объектов

Бадиков Р.Р.* (МГРИ, raaf4476@gmail.com),
Калинин М.Б. (МГРИ, Mikhail00010@outlook.com)

Аннотация

В данной работе проведена корреляция отражающих горизонтов (ОГ) по временным разрезам PostSTM на Бенойско-Черногорском участке. ОГ характеризуются разной полярностью и динамикой отражений, что позволяет выделить их временные интервалы. Отмечены зоны неуверенной корреляции и сложности волнового поля, возникающие в точках изломов профилей.

Ключевые слова

Бенойско-Черногорский участок, обработка и интерпретация геолого-геофизической информации, отражающий горизонт

Теория

Корреляция отражающих горизонтов выполнялась по временным разрезам PostSTM, так как в целом эти разрезы более информативные, чем временные разрезы PSTM. В пределах Бенойско-Черногорского участка было выполнено прослеживание семи ОГ:

- горизонт N_1s- вблизи кровли сарматского яруса;
- горизонт N_1ch – вблизи кровли чокракских отложений;
- горизонт Mkp– вблизи кровли майкопских отложений;
- горизонт F_3 – вблизи кровли эоцена;
- горизонт K_2 – в подошве эоцена- кровле мела;
- горизонт K_1- вблизи кровли нижнего мела;
- горизонт J_3- вблизи кровли верхнеюрских отложений;

ОГ N_1s приурочен к кровле сарматского яруса, представленного преимущественно глинистыми отложениями с прослоями песчаников и мергелей и отождествляется с отражением отрицательной полярности. Горизонт прослежен на временах 980-2865 мс.

ОГ N1ch - отождествляется с верхней песчанистой частью чокракского горизонта в миоцене, корреляция условно выполнена по отрицательной фазе, так как она является более динамически выраженной. Горизонт прослеживается на временах 690-3545 мс.

ОГ Mkp приурочен к переходу от песчанистой части чокрака к майкопским отложениям, представленным преимущественно глинами с прослоями песчаников и алевролитов и сопоставляется с отражением отрицательной полярности. Местами отражение интерференционное. Горизонт прослежен на временах 910-4085 мс.

ОГ F_3 отождествляется с кровлей эоцена, характеризуется интенсивным экстремумом, связанным с переходом от глинистых пород к толще мергелей и глинистых известняков. Корреляция условно выполнена по отрицательной фазе, так как она является более динамически выраженной. Горизонт прослежен на временах 935-4945 мс.

ОГ K_2 приурочен к переходу к более высокоскоростным карбонатным породам в низах эоцена-кровле мела, корреляция условно выполнена по более динамически выраженной отрицательной фазе. Местами отражение интерференционное. Горизонт прослеживается на всей территории участка в интервале времен 885-5005 мс.

ОГ K_1 – реперный горизонт, отождествляется с кровлей терригенной толщи нижнего мела, характеризуется интенсивным экстремумом отрицательного знака, который формируется при переходе от карбонатной толщи в терригенную. Горизонт прослеживается во временном интервале 650-5260 мс.

Отражающий горизонт J_3 приурочен к кровле юры, представленной известняками, доломитами и ангидритами и находится в сложной волновой картине, местами акустические границы слабо выражены. Горизонт условно отождествляется с отражением отрицательной полярности, местами отражение интерференционное. Горизонт прокоррелирован в интервале времен 1220-5640 мс.

Также фрагментарно в западной части площади выполнена корреляция ОГ J_3пс, который относится к кровле «подсолевой» верхней юры. Пример корреляции ОГ показан на Рисунок 3 на профиле 022424, который проходит с запада на восток по всей площади работ.

Особенностью волновой картины Бенойско-Черногорского участка является более уверенное прослеживание на временных разрезах неогеновых высокочастотных отражений. В нижнем комплексе корреляция отражающих горизонтов F_3, K_2, K_1, J_3 менее уверенная, местами есть зоны неуверенной корреляции. Две зоны неуверенной корреляции выделяются в западной части, предположительно связанные с высокоамплитудными нарушениями и выходами карбонатных пород верхнего мела на поверхность.

В северо-восточной части Бенойско-Черногорского участка выделяется зона неуверенной корреляции, которая возможно связана с увеличением мощности олистостромовой миатлинской толщи в низах майкопских отложений (Рисунок 4). Зона хорошо коррелирует с картой толщин нижнемайкопских отложений, построенной по скважинам (Рисунок 4).

Также, характерной особенностью волнового поля являются осложнения волновой картины, приуроченные к точкам изломов профилей, которые прослеживаются на всем интервале разреза, что учитывалось при интерпретации сейсмических данных. Исходя из этого, на графические приложения с временными и глубинными сейсмическими разрезами добавлено положение общих средних точек в плане.

На временных разрезах видны выходы пород различного возраста (от неогенового до мелового) на поверхность. На Рисунок 5 представлен профиль 022309, а также его сопоставление с геологической картой Бенойско-Черногорского участка.

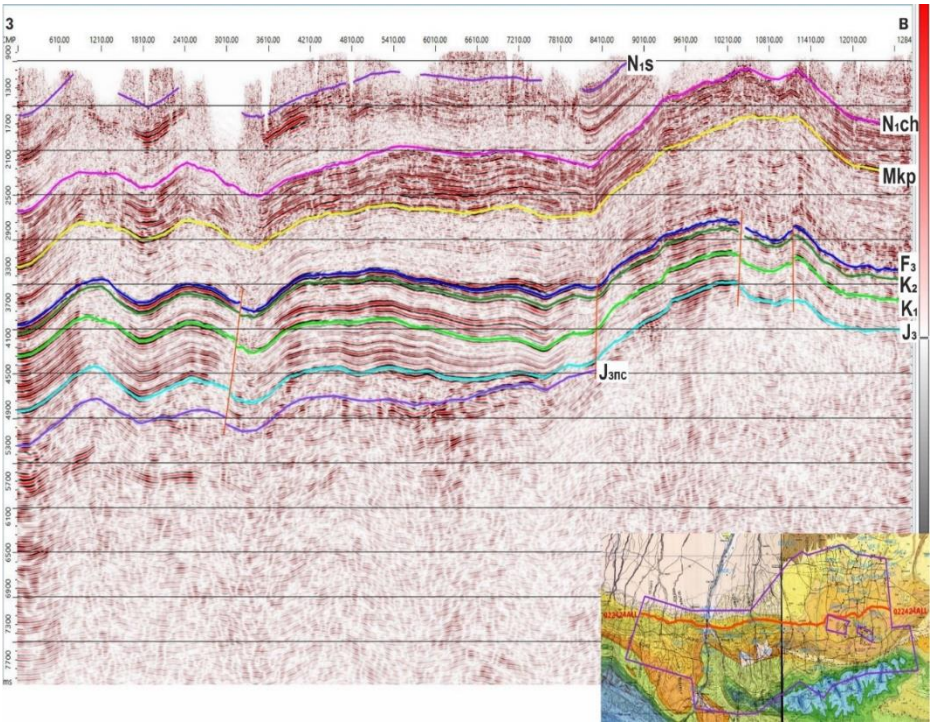


Рисунок 3. Пример корреляции ОГ на временном разрезе PostSTM по профилю 022424

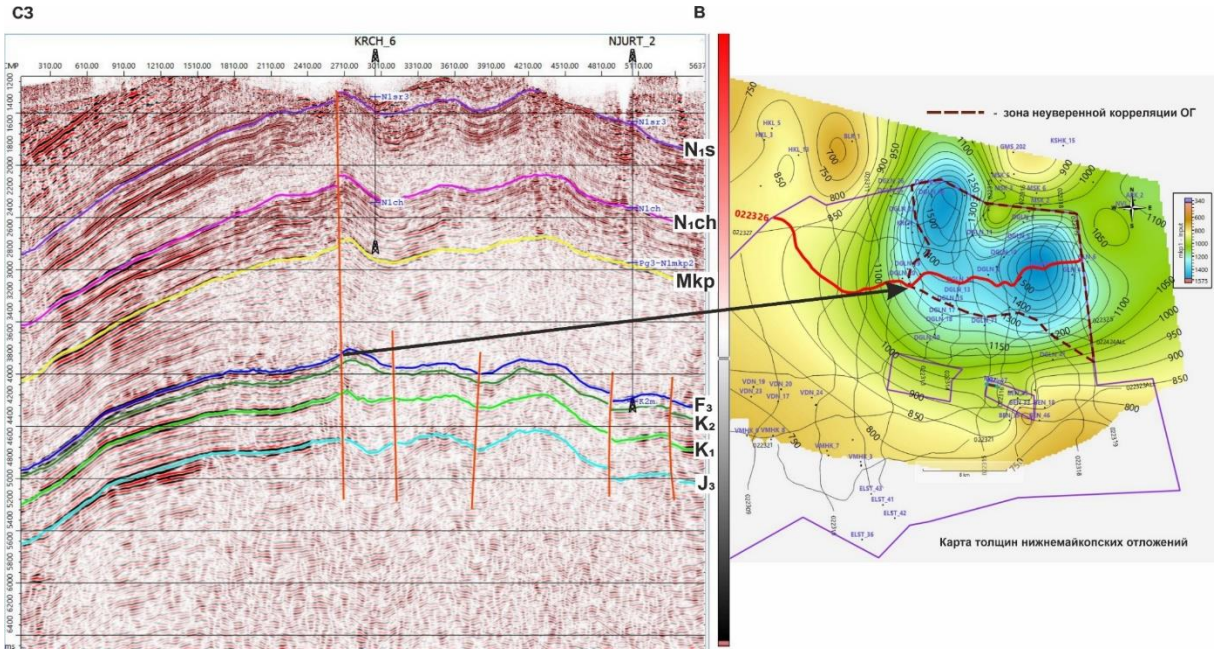


Рисунок 4. Зона неуверенной корреляции на временном разрезе PostSTM по профилю 022326 и ее сопоставление с картой

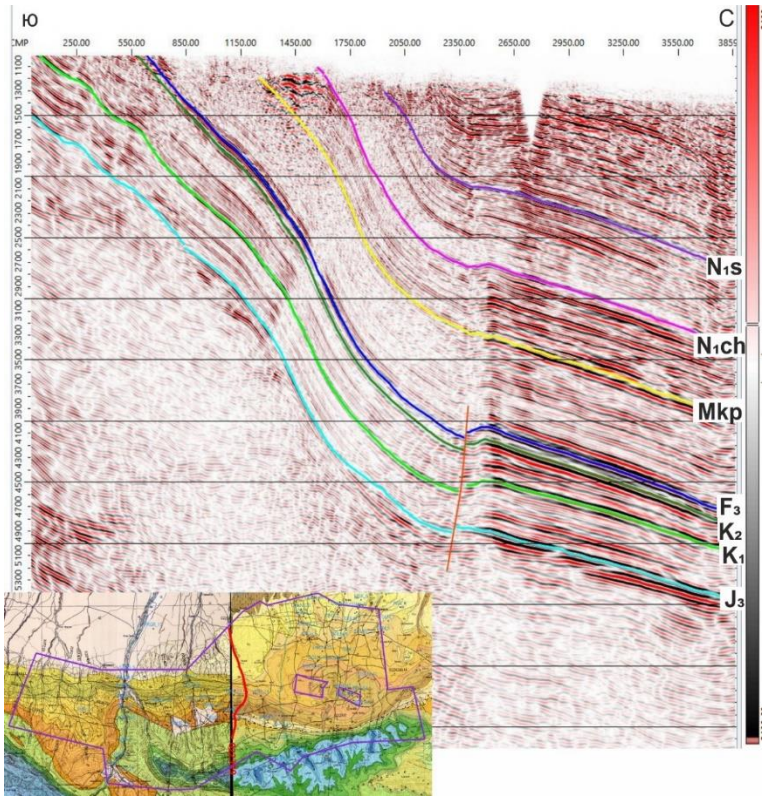


Рисунок 5. Пример корреляции ОГ на временном разрезе PostSTM по профилю 022309

Выводы

По временным разрезам на Бенойско-Черногорском участке проведена корреляция ОГ. Прослежено семь ОГ которые характеризуются разной полярностью и динамикой отражений.

Отмечены зоны неуверенной корреляции и сложности волнового поля, возникающие в точках изломов профилей. По этим данным далее можно выполнить выделение и детальное трассирование тектонических нарушений, построение карт изохрон, построение карт интервальных скоростей и построение карт изопахит (толщин) основных интервалов разреза.

Библиография

1. Дукаев А.А. Геологоразведочные работы на нефть и газ на территории Чеченской республики: состояние и перспективы развития. Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук № 3 (7), 2021. С 34-40.
2. Кузин А.М. О геологической интерпретации данных сейсмических наблюдений на основе моделирования процессов распространения упругих колебаний. Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 3 (22). С. 21.
3. Соборнов К.О. Вдвиговые деформации южного борта Терско-Каспийского прогиба: строение, формирование и нефтегазоносный потенциал. Геология нефти и газа №6 2019 г.

Физико-геологическая модель археологического объекта в Великом Новгороде

Болонина А.В.* (МГРИ, bangelokv@gmail.com),
Новиков П.В. (МГРИ, novikovpv@mgri.ru)

Аннотация

Геофизические методы в настоящее время активно применяются в археологических исследованиях. Они позволяют обнаружить скрытые под землей сооружения до археологических раскопок. Основными факторами, определяющими актуальность использования геофизики в археологии, являются возможность оперативного получения предварительных данных о расположении археологических объектов исследований, оценки из размеров и формы, принцип сохранения памятников, возможность существенного сокращения финансовых расходов и трудозатрат [2].

В данной работе рассмотрены такие геофизические методы, как: гравиразведка, магниторазведка и электроразведка.

Ключевые слова

Археологические объекты, магниторазведка, гравиразведка, электроразведка

Теория

Геофизические работы проводились в г. Великий Новгород, в Юрьеве монастыре, расположенном в 1 км восточнее «Витославлиц» на берегу реки Волхов (Новгородская обл., г. Великий Новгород, Юрьевское ш, д. 10) на выявленном объекте археологического наследия «Культурный слой ансамбля Юрьева монастыря», XII–XIX вв.

Для нахождения остатков фундамента Юрьева монастыря можно воспользоваться такими методами, как: гравиразведка, магниторазведка и электроразведка.

Геологический разрез показан на рисунке 1.

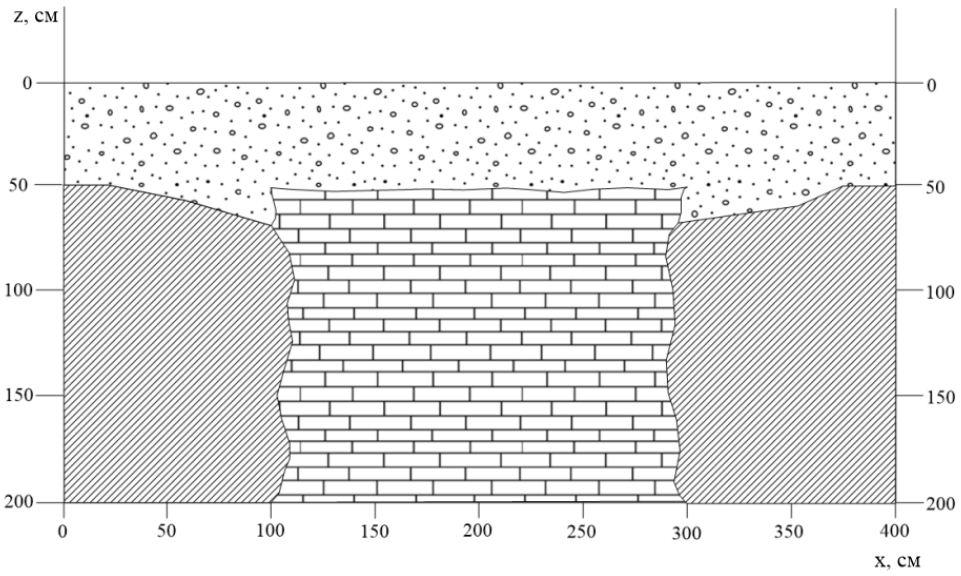


Рисунок 1. Геологический разрез

Петрофизическая модель приведена на рисунке 2.

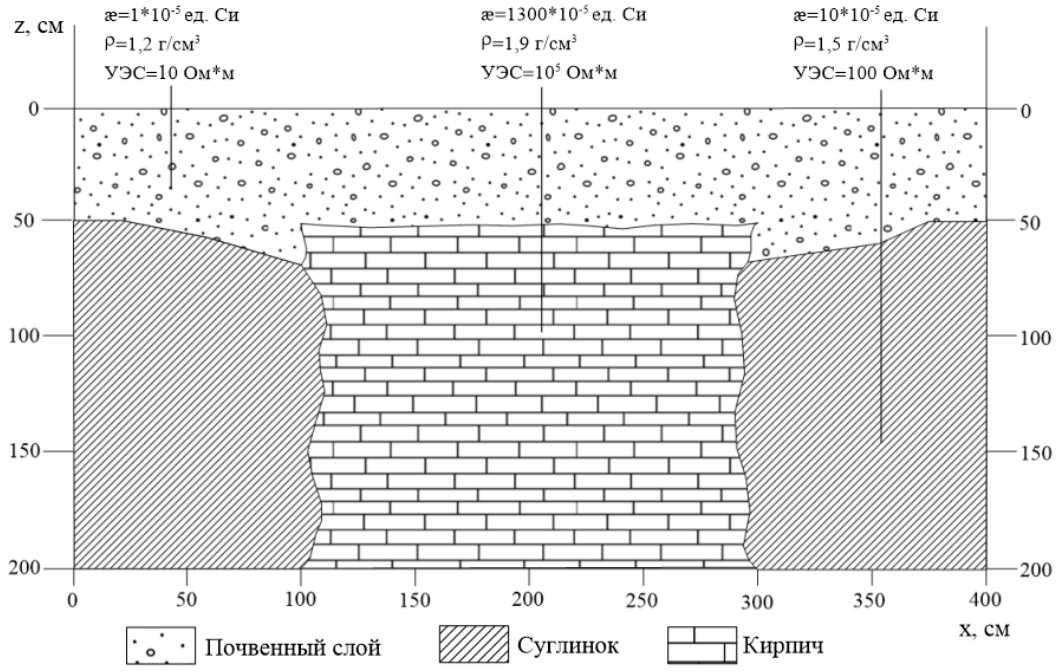


Рисунок 2. Петрофизическая модель

Применительно к археологическим памятникам суть метода сводится к определению аномалий плотности подстилающих напластований в заданных точках наблюдения. По полученным в результате гравиразведки графикам и картам аномалий представляется возможным определять границы распространения культурного слоя, отличающегося рыхлостью структуры, относительно незатронутых антропогенным воздействием напластований, а также проследить, сохранившиеся в грунте, остатки конструкций, выполненных из плотных строительных материалов [4]. Физико-геологическая модель методом гравиразведки проиллюстрирована на рисунке 3.

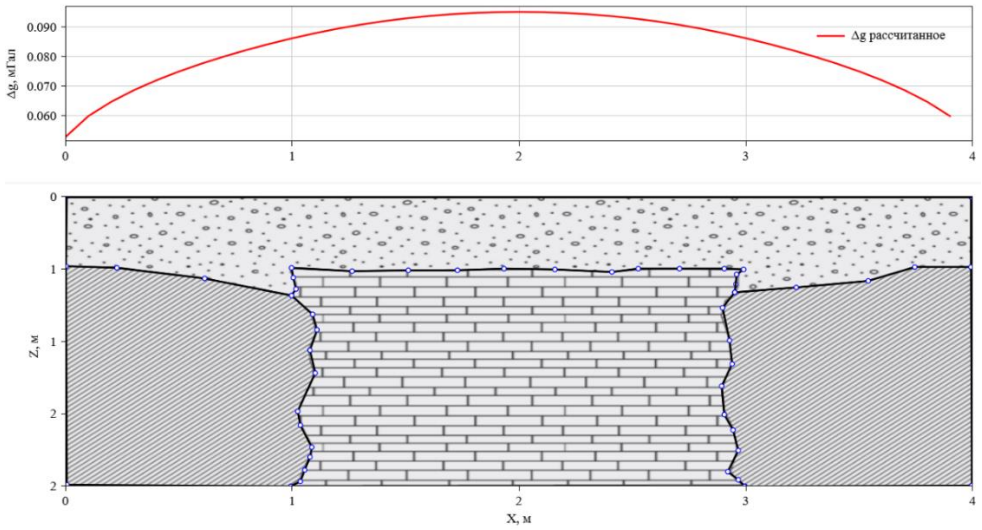


Рисунок 3. Физико-геологическая модель (гравиразведка)

Магниторазведка основана на измерении магнитного поля Земли и выявлении его аномальной составляющей, которая определяется изменением естественной структуры верхних слоев грунта ввиду наличия в них объектов археологии. Археологические объекты характеризуются магнитными свойствами, отличающимися от магнитных свойств вмещающей среды. В соответствии с этим магниторазведка однозначно фиксирует местоположение объектов, которые подвергались термическому воздействию в древности [3]. Физико-геологическая модель методом магниторазведки представлена на рисунке 4.

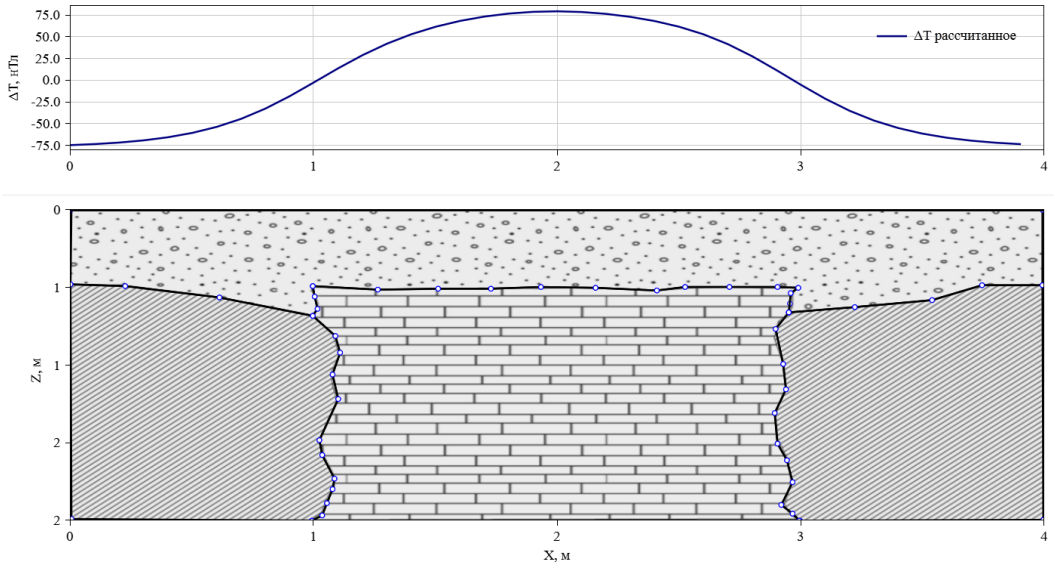


Рисунок 4. Физико-геологическая модель (магниторазведка)

Электроразведка основана на изучении электрических свойств археологических объектов в среде, вмещающей эти объекты. Возможность практического применения электрометрических методов для изучения грунта, обусловлена тем, что вмещающие грунты и объект, погруженный в них, различаются по удельному электрическому сопротивлению. Электрические методы базируются на изучении особенностей формирования естественных и искусственных электрических полей в среде и характер их взаимодействия со средой [3]. Физико-геологическая модель методом электроразведки изображена на рисунке 5.

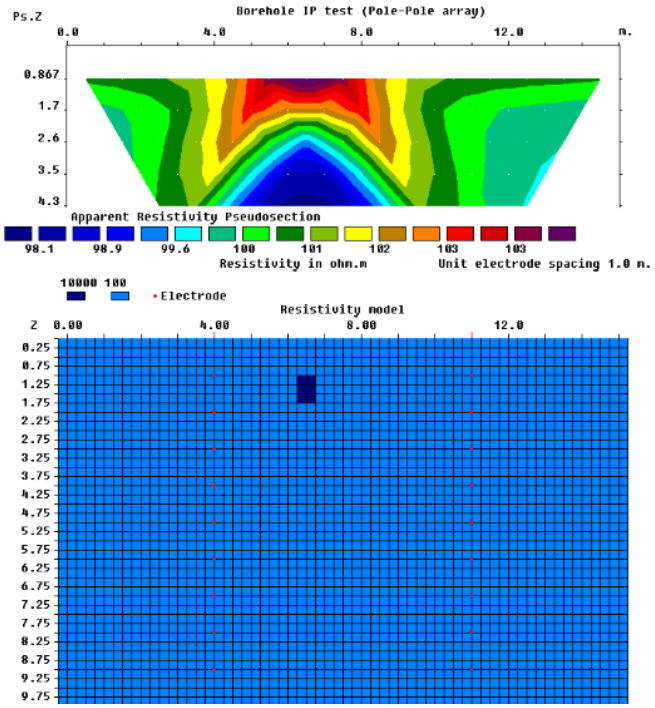


Рисунок 5. Физико-геологическая модель (электроразведка)

Выводы

Исходя из физико-геологических моделей, сделан вывод, что для нахождения археологического объекта в Великом Новгороде можно использовать магниторазведку и электроразведку.

Библиография

1. Геомагнитные исследования печей для обжига строительной керамики Кондуйского городка // Мультидисциплинарные исследования в археологии. 2018. № 2. С. 20-39.
2. Журбин, Игорь Витальевич. Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения: дис. доктор исторических наук: 07.00.06 – Археология. Москва. 2006. 267 с.
3. Журбин И.В., Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения: Монография/Отв. ред. М.Г. Иванова. Ижевск: Удмуртский институт истории, языка и литературы УрО РАН, 2004. 152 с.:ил.
4. Материалы междисциплинарной научной конференции «АРХЕОЛОГИЯ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ В ИЗУЧЕНИИ КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ» / Товарищество научных изданий КМК. – Москва: 2018. – 220 с.

Особенности строения Великой Дайки по данным магниторазведки

Виноградова Н.С.* (МГРИ, vinogradushka@mail.ru),
Иванов А.А. ((МГРИ, ivanovaa@mgri.ru)

Аннотация

Зимбабве обладает значительными запасами полезных ископаемых, однако большинство приповерхностных месторождений уже истощены. В связи с этим возникает необходимость в открытии новых месторождений или доразведке уже известных, но находящихся на больших глубинах. Ключевую роль в таких исследованиях играют геофизические методы. Территория Республики Зимбабве была изучена в ходе аэромагнитной съемки масштаба 1:100 000, проведенной в 1980-х годах на высотах более 300 метров, а также гравиметрической съемки, которая характеризовалась неравномерным распределением точек наблюдений и низкой точностью топографической привязки, часто выполняемой с использованием автомобильного одометра. Такая точность недостаточна для выявления локальных перспективных объектов, однако позволяет оценить геологическое строение территории и определить ее металлогеническую специализацию [1].

Работа посвящена обработке полевых данных магниторазведки, выполненной на территории Зимбабве и количественной интерпретации по линии профиля пересекающем Великую дайку.

Ключевые слова

Республика Зимбабве, геофизические исследования, магниторазведка, интерпретация данных

Геологическое строение Республики Зимбабве характеризуется сложной структурой, сформированной в результате длительных геологических процессов. Основным элементом является архейский кратон Зимбабве, который занимает восточную часть страны и представляет собой крупный фрагмент древней континентальной коры возрастом более 2,5 миллиардов лет. Площадь кратона составляет около 0,25 млн км². Кратон Зимбабве окружен протерозойскими мобильными поясами (протогеосинклинальными прогибами), которые сформировались в более поздние геологические эпохи [2].

Великая Дайка Зимбабве – это один из наиболее значительных интрузивных комплексов в мире, представляющий собой крупное линейное магматическое тело, протянувшееся на расстояние около 550 км с северо-востока на юго-запад через территорию Зимбабве. Ширина дайки варьируется от 3 до 12 км. Великая дайка сложена преимущественно ультраосновными и основными породами, такими как перидотиты, пироксениты, нориты и габбро. Внутри дайки наблюдается четкая слоистая структура (расслоенность), обусловленная дифференциацией магмы в процессе ее остывания (рис.1) [3].

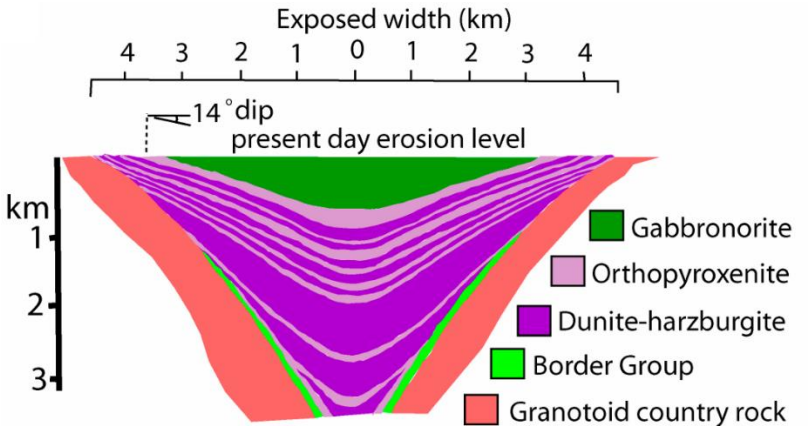


Рисунок 1. Разрез Великой Дайки [3]

Великая Дайка известна своими богатыми месторождениями хромитов, платиноидов и поэтому ее изучение, в том числе геофизическими методами является крайне актуальным.

Территория Республики Зимбабве покрыта аэромагнитной съемкой, выполненной в период 1983 – 1991 г.г. с шагом 1 км между профилями, по результатам которой были построены карты магнитного поля пересчитанного к полюсу и некоторых его трансформант. Количественная интерпретация данных магниторазведки или не выполнялась, или отсутствует в открытом доступе. Литературные источники [4, 5] ссылаются на результаты качественного анализа фрагментов этих карт.

Перед автором стояла задача обработки исходных данных магнитной съемки, увязки между собой отдельных площадей съемки в единую карту магнитного поля, удалении региональной составляющей и количественной интерпретации по профилю, пересекающему Велику Дайку.

Исходные данные магнитного поля были обработаны, различные площади были увязаны друг с другом с применением Oasis Montaj. На рис. 2 представлена полученная карта магнитного поля.

Следует отметить, что магнитное поле характеризуется заметным региональным трендом, практически линейным, по направлению с юга на север. В центральной части карты отчетливо прослеживается вытянутая локальная аномалия С-СВ простирания, пересекающая практически всю территорию Зимбабве, приуроченная к Великой Дайке и ее сателлитам.

Дальнейшая обработка заключалась в исключении регионального фона и пересчете магнитного поля к полюсу. В результате была построена карта, представленная на рис. 3. На этой карте отчетливо прослеживаются основные региональные структуры строения территории – пояс Лимпопо, пояс Замбези, пояс Магонди и многочисленные дайки.

Для дальнейшей количественной интерпретации был выбран участок расположения Великой Дайки, где в окрестностях магнитной аномалии от дайки наблюдается наиболее “спокойное” магнитное поле. На рисунке 3 красной линией показан интерпретационный профиль.

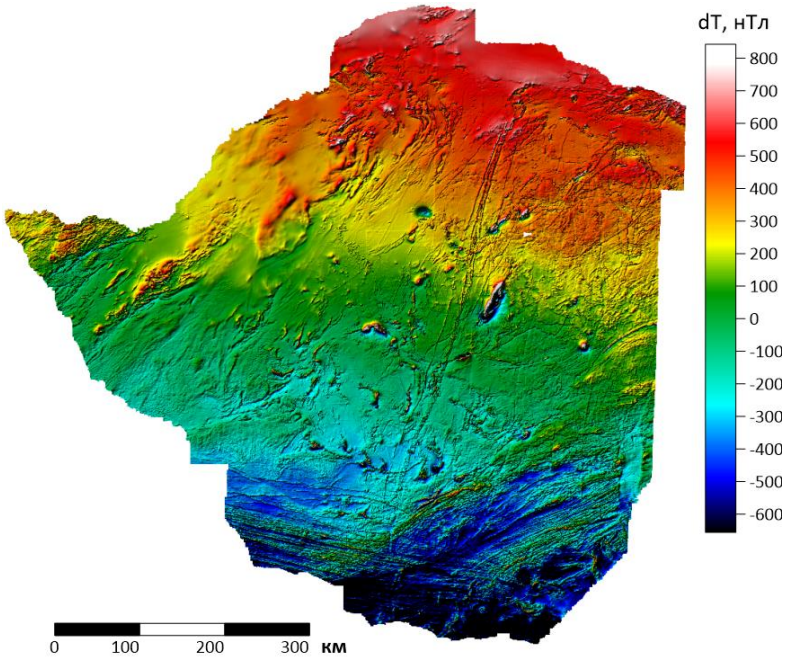


Рисунок 2. Карта магнитного поля Зимбабве

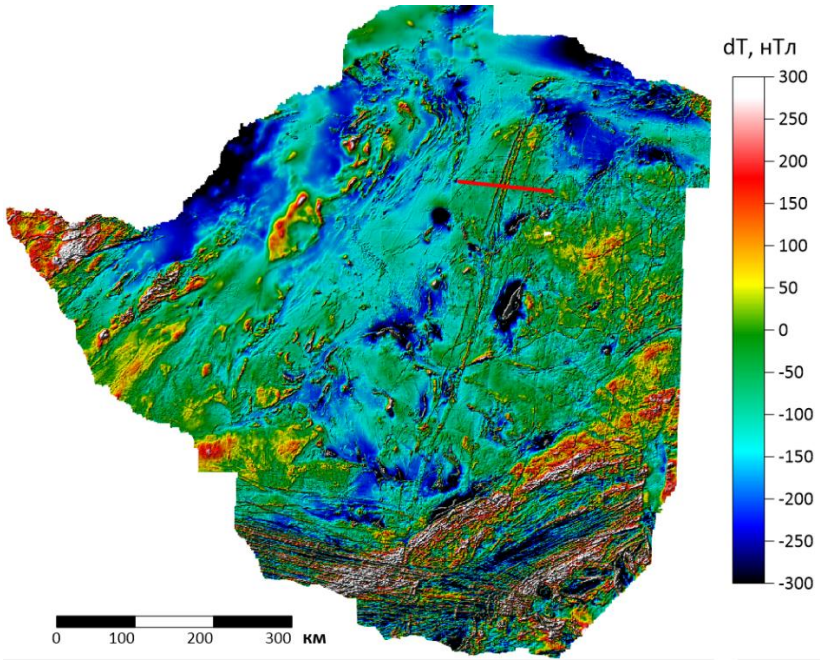


Рисунок 3. Карта магнитного поля, после удаления тренда и пересчета к полюсу. Красная линия – интерпретационный профиль

Количественная интерпретация по профилю (рис. 4), показала основные особенности строения Великой Дайки.

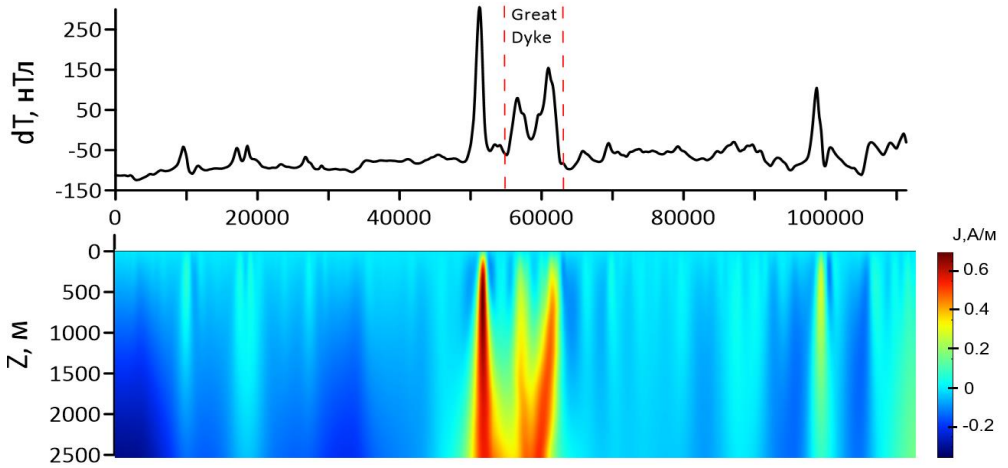


Рисунок 4. Карта магнитного поля, после удаления тренда и пересчета к полюсу. Красная линия – интерпретационный профиль

В поперечном разрезе дайка представляет собой конус, в широкой части которого находятся слабомагнитные породы. Слева от Великой Дайки, наблюдается вертикальная дайка-сателлит, обладающая более высокими значениями намагниченности.

Выводы

Дальнейшее изучение Великой Дайки геофизическими методами по плотной сети наблюдений открывает большие перспективы для понимания ее геологического строения, поиска новых месторождений и оценки ресурсного потенциала. Комплексный подход с использованием современных технологий и интеграции данных позволит значительно продвинуться в изучении этого уникального геологического объекта.

Библиография

1. Виноградова Н.С., Иванов А.А. Особенности тектонического строения территории Зимбабве по данным магниторазведки // Разведочная геофизика и геоинформатика: Материалы 5-ой всероссийской научно-практической конференции, Москва, 13 марта 2024 года. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2024. – С. 146-149. – EDN MWTOTC.

2. Игнатов П.А., Малютин С.А., Иванов А.А. [и др.] Кольцевые и линейные золоторудные районы Зимбабве и оценка остаточных ресурсов золота // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2023. – Т. 65, № 6. – С. 14-25. – DOI 10.32454/0016-7762-2023-65-6-14-25. – EDN KQZUZG.

3. Chaumba, Jeff. Hydrothermal Alteration in the Main Sulfide Zone at Unki Mine, Shurugwi Subchamber of the Great Dyke, Zimbabwe: Evidence from Petrography and Silicates Mineral Chemistry. Minerals. 2017:7. 127.

4. Oswald Gwavava, Rubeni T. Ranganai. The geology and structure of the Masvingo Greenstone Belt and adjacent granite plutons from geophysical data, Zimbabwe Craton. // South African Journal of Geology 2009:112(3-4):277-290. DOI: 10.2113/gssajg.112.3-4.277

5. Rubeni T. Ranganai. Gravity and Aeromagnetic Studies of the Filabusi Greenstone Belt, Zimbabwe Craton: Regional and Geotectonic Implications. // International Journal of Geosciences. 2012:3(05):1048-1064. DOI: 10.4236/ijg.2012.35106

Результаты электроразведочных работ для выделения рудной залежи на Площади 1 (Красноярский край)

Гузенков А.А. (МГРИ, artemguzenkov23@gmail.com),*
Матюшенко А.А. (МГРИ, matiushenkoaa@mgri.ru)

Аннотация

Электроразведочные методы широко используются при поиске полезных ископаемых. В данной статье будет рассмотрено использование таких методов как электротомография и аудиомагнитотеллурическое зондирование для выделения зон распространения рудных залежей. Комплекс данных методов позволит достичь большой глубинности и высокой точности.

Ключевые слова

Электротомография, аудиомагнитотеллурическое зондирование, рудная залежь

Теория

Электроразведка – совокупность методов изучения строения земной коры и поисков месторождений полезных ископаемых, основанных на изучении естественных или искусственных электромагнитных полей. Физическая сущность электроразведки заключается в изучении зависимости электромагнитного поля, естественного или искусственного от электрических (а иногда и от магнитных) свойств среды, на которую это поле действует.[1]

Электротомография (ЭТ) это современная методика геофизических исследований методом сопротивлений, нацеленная на интерпретацию в рамках двумерных и трехмерных моделей.

Методы магнитотеллурического зондирования (МТЗ) основаны на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли – магнитотеллурического поля (МТ-поля). Естественное электромагнитное поле содержит колебания различной частоты. АМТЗ – это **высокочастотная модификация магнитотеллурического зондирования (МТЗ)**, применяется для **малоглубинных, но более детальных исследований**. [2]

На участке работ измерения были проведены методами ЭТ и АМТЗ по одним и тем же профилям. На основании полученных данных проведена двумерная инверсия и построены глубинные модели удельного электрического сопротивления и поляризуемости. Геоэлектрические разрезы использовались для построения обобщенных геологических моделей.

Работы в модификации глубинной электротомографии выполнялись с использованием комбинированной осевой установки (методика разработана компанией ООО «Северо-запад») (Рисунок 1). На малых разносах она соответствует трехэлектродной установке Шлюмберже (влияние дальнего питающего электрода незначительно), на больших разносах – обычной дипольной осевой установкой, на средних разносах – несимметричной четырехэлектродной установкой. [3]

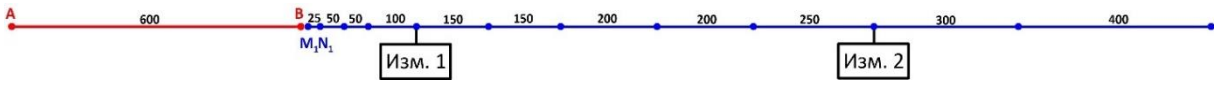


Рисунок 1. Комбинированная осевая установка

Измерения проводились на 11 приемных каналах одновременно. Было использовано две приемные косы (измеритель №1 – 7-канальная, измеритель №2 – 4-канальная), коммутируемые с приборами ИМВМ-8 (производство ООО «Северо-Запад») через многожильный кабель. Для возбуждения электрического поля в зависимости от условий заземления применялись

генераторы тока «ВП-1000м» (производство ЗАО НПЦ «Солитон-НТТ») Управление процессом измерений выполнялось через программное обеспечение для регистратора «Octopus» в смартфоне. Аппаратура представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. а) ИМВМ-8, б) ВП-1000м

В процессе работ методом АМТЗ применялась крестообразная установка с центральным заземлённым электродом (Рисунок 3). Установка ориентировалась на магнитный север и восток. Склонение восточное ≈ 17^0. Линии электрических датчиков выкладывались по буссоли. Магнитные датчики выставлялись по уровню и буссоли. [4]

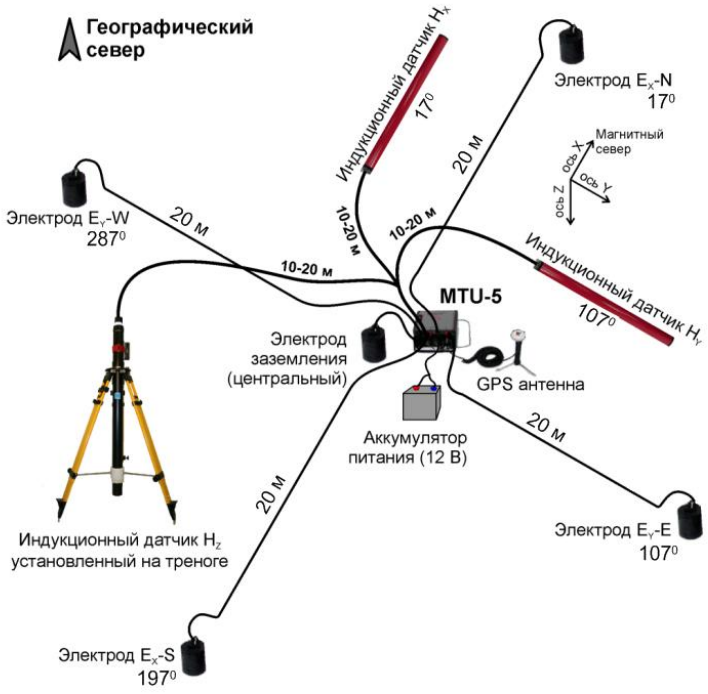


Рисунок 3. Схема установки для измерений методом АМТЗ

Преобразователи напряженности двух компонент (Ex, Ey) электромагнитного поля (ЕМ) представляли собой две заземленные электрические линии MN, длиной 40 м каждая и неполяризующиеся графитовые электроды. Сопротивления заземлений, в подавляющем

большинстве, составили менее 5 кОм. Преобразователи трех магнитных компонент (Hx, Hy, Hz) естественного ЕМ поля – индукционные магнитные датчики АМТС-30.

Регистрация МТ-поля осуществлялась 24-х разрядным АЦП в частотном диапазоне 1 - 10000 Гц. В ходе интерпретации использовались данные в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц.

Для обработки полевых данных ЭТ-ВП и вычисления амплитуды сигнала и кажущейся поляризуемости использовалась сертифицированная программа «IP Pro», разработанная в ООО «Северо-Запад».

Процесс обработки сигналов ЭТ-ВП в программе «IP Pro» сводился к следующим действиям:

1) Просмотр и оценка качества записи. Выбор диапазона записи, который войдет в обработку.

2) Проверка этикеток записей, при необходимости – редактирование этикеток.

3) Задание параметров обработки сигнала.

4) Запуск пакетной обработки для всех записей, полученных на одном профиле.

По окончании обработки на экран выводились все рассчитанные параметры с оценкой погрешности в цифровом виде.

Обработка данных АМТЗ, полученных станциями «Phoenix» велась с использованием комплекса программ, разработанного компанией «Phoenix Geophysics Ltd» и ООО «Северо-Запад» проводилась в три этапа:

1) В программе «EPI-Kit» (ООО «Северо-Запад») просматривались временные ряды МТ-поля для оценки качества материала.

2) На втором этапе обработки в программе «EPI-Kit» рассчитывались функции взаимной корреляции всех компонент поля.

3) Третий этап – интерактивная обработка, которая производилась в программе «MT-Corrector» (ООО «Северо-Запад»).

Следующим этапом являлась интерпретация методов ЭТ-ВП и АМТЗ, в результате которой были получены псевдоразрезы кажущихся сопротивлений по каждому профилю с выделенными крупными аномальными областями. На рисунках 4-5 представлены разрезы УЭС.

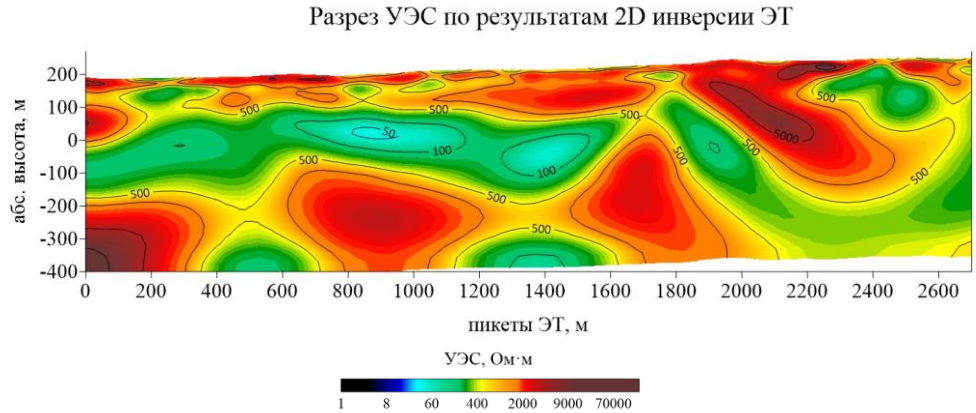


Рисунок 4. Псевдоразрез кажущегося сопротивления (вверху) и для частоты 0.3 Гц методом ЭТ

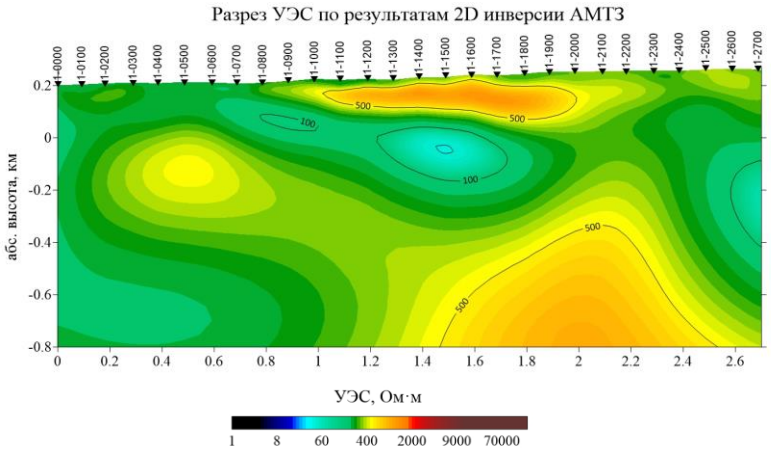


Рисунок 5. Глубинный псевдоразрез УЭС, построенные по результатам автоматической 2D инверсии данных АМТЗ

Выводы

Комплексирование электроразведочных методов ЭТ и АМТЗ позволило выделить крупные аномальные области, в которых предположительно находится рудная залежь.

Комплексирование методов сопротивления, к которым относится электротомография, с индукционными зондированиями, безусловно, повышает возможности по обнаружению и изучению объектов высокого сопротивления. Согласование результатов геометрических зондирований на постоянном токе (электротомография) и электромагнитных зондирований (АМТЗ) является одной из наиболее актуальных задач в современной рудной электроразведке.

Это связано с тем, что методы постоянного тока позволяют получить информацию о поперечном сопротивлении высокоомных слоев, но ненадежны при определении глубин, а методы переменного тока позволяют устойчиво определить некоторые глубины, но не содержат информации о сопротивлении высокоомных слоев. Комплексирование двух разных типов зондирований позволяет расширить круг решаемых геологических задач. Невязки подбора данных ЭТ и АМТЗ одной моделью УЭС были получены низкие, что говорит о высоком качестве полевых данных.

Библиография

1. Электроразведка: учебное пособие /авт. - сост.: А.А. Иванов, К.В. Новиков, П.В. Новиков. - М.: МГРИ, 2019. - 80 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И./ Модели и методы магнитотеллурики; Изд. Научный мир; Москва, 2009 г. – 680 с.
3. Геофизика: учебник / В. И. Костицын, В. К. Хмелевской; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – 428 с.
4. Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка, Л.: Недра. – 1984. – С. 352.

Моделирование материалов гравиразведки на Восточно-оренбургской площади

Дятлов Е.Е.* (МГРИ, mcha1s@mail.ru),
Чепиго Л.С. (МГРИ, chepigols@mgri.ru)

Аннотация

Комплексного гравиметрического моделирование метод подбора, выполненное с использованием программного комплекса GravMagInv и применённое для решения обратной задачи, позволило создать трёхмерную геолого-геофизическую модель исследуемой площади. Моделирование основывалось на данных гравиразведки, сейсморазведки, бурения и информации о физических свойствах горных пород. В процессе моделирования учитывались латеральные и вертикальные изменения плотности, а также исключались краевые эффекты.

Построение модели включало формирование структурного каркаса на основе опорных горизонтов и задание непрерывных распределений плотности для каждого слоя. Наиболее значимый гравитационный эффект был выявлен в слое P1in – P1fl, что обусловлено его неглубоким залеганием, высокой мощностью и плотностной контрастностью.

Результаты моделирования позволяют проводить детальное сравнение расчётного гравитационного поля с наблюдённым, что повышает точность интерпретации геологического строения исследуемой территории.

Ключевые слова

Восточно-Оренбургская, гравиразведка, геоплотностная модель

Теория

Комплексное гравиметрическое моделирование выполнялось при помощи программного комплекса GravMagInv. Данное программное обеспечение позволило провести геолого-геофизическое моделирование в трёхмерном варианте методом подбора, являющимся косвенным способом решения обратной задачи.

Суть этого метода состоит в том, что приняв геологическую модель рассматриваемой площади, подбирают физические и структурные параметры среды таким образом, чтобы рассчитанный суммарный гравитационный эффект от геологических объектов совпал (в пределах точности измерения) с наблюдённым полем.

Наиболее удобным подходом в данном случае является решение обратной задачи методом подбора, состоящим из ряда следующих этапов:

– выделение из наблюдённого поля аномальной части, соответствующей изучаемому объекту;

– выбор корректных параметров модели для решения прямой задачи;

– определение параметров модели первого приближения;

– оценка достоверности полученных результатов путём сопоставления расчётного поля с исходным полем силы тяжести.

Используемые в методе подбора модели соответствуют принятым геологическим гипотезам о строении изучаемого объекта и допускают в процессе подбора свободное изменение параметров в межскважинном пространстве. Изменение плотности учитывается как по латерали (внутри одного слоя модели), так и с глубиной (для модели в целом). Чтобы исключить краевой эффект в расчётном гравитационном поле, площадь модели расширяется по сравнению с площадью съёмки.

Трёхмерное гравитационное моделирование позволяет проводить непосредственное сравнение вычисленного гравитационного эффекта с наблюдённым полем по всей площади. В процессе моделирования подбор параметров геологических объектов считается законченным,

если разность между теоретически вычисленным и исходным полями становится несистематической и её среднеквадратическое отклонение не превышает точности съёмки.

Создание геолого-геофизической модели основывалось на информации, полученной по результатам гравиразведки, сейсморазведки, бурения, а также на информации о физических свойствах горных пород, слагающих исследуемую площадь.

Геолого-геофизическая модель состоит из структурного каркаса и модели непрерывного распределения физических свойств. Для формирования структурного каркаса модели использовались следующие геолого-геофизические материалы: структурные карты по основным опорным горизонтам (Табл. 1), данные о литолого-стратиграфическом разрезе и физических свойствах горных пород, слагающих исследуемую площадь, данные и результаты геофизических исследований скважин

Таблица 1. Основные опорные горизонты трёхмерной плотностной модели

№	Индекс	Отдел, свита, горизонт
1	-	Поверхность рельфа
2	H_1	Подошва неоген-четвертичных отложений
3	P_2t	Кровля татарского яруса верхней перми
4	P_2kz (Кз)	Кровля нижнеказанского подъяруса
5	P_1in (Кн)	Кровля иреньского горизонта кунгурского яруса нижней перми
6	P_1fl ($Кн_2$)	Кровля филипповского горизонта кунгурского яруса нижней перми
7	P_1ar (Акп)	Кровля карбонатной пачки артинского возраста нижней перми

Перечисленные в таблице 1 структурные поверхности, по данным сейсморазведочных работ, были использованы в качестве основных поверхностей для построения каркаса 3D модели.

Все границы слоев модели описаны регулярными прямоугольными матрицами абсолютных отметок с шагом 100 м (данный шаг в два раза меньше шага гравиметрических наблюдений), что позволило повысить точность моделирования распределения плотностей в области крутых склонов соляных массивов.

Всем грид-поверхностям модели были заданы одинаковые параметры: размер грид-сетки, размер ячейки, единица измерения, общее начало координат и проекция. Грид-файл, выбранный в качестве индекс-грида, использован как эталон, с которым сравнивались все остальные грид-сетки.

Создание многослойной модели позволяет детально учитывать как латеральное изменение плотности в определенном пласте, так и изменение плотности с глубиной.

После построения геометрического каркаса в модель планируется ввести непрерывные распределения плотности в виде грид-сетки, для каждого слоя модели, за исключением первого и второго слоев (в этих слоях плотности были заданы постоянными).

Для каждого из стратиграфических горизонтов был определён геологически обоснованный диапазон возможных вариаций плотности. Для горизонтов осадочного чехла (от H_1 до P_1ar) на начальном этапе моделирования плотность пород была задана постоянной и близка к среднему значению плотности комплекса пород (Табл. 2).

Таблица 2. Средние значений плотностей, принятых на начальном этапе моделирования

№ слоя	Слой модели	Плотность, г/см^3
1	Поверхность рельефа – H_1	1.9
2	H_1 - P_2t	2.1

3	P_2t - P_2kz	2.2
4	P_2kz – P_1in	2.4
5	P_1in – P_1fl	2.23
6	P_1fl – P_1ar	2.65
7	P_1ar - C_2b	2.63

Наиболее значимый по величине гравитационный эффект наблюдается от слоя P_1in – P_1fl. Это обусловлено сравнительно неглубоким залеганием, большой мощностью и высокой плотностной контрастностью.

На данном этапе был простроен каркас 3D модели на основании сейсморазведочных работ, которые были использованы в качестве основных поверхностей (Рисунок 1).

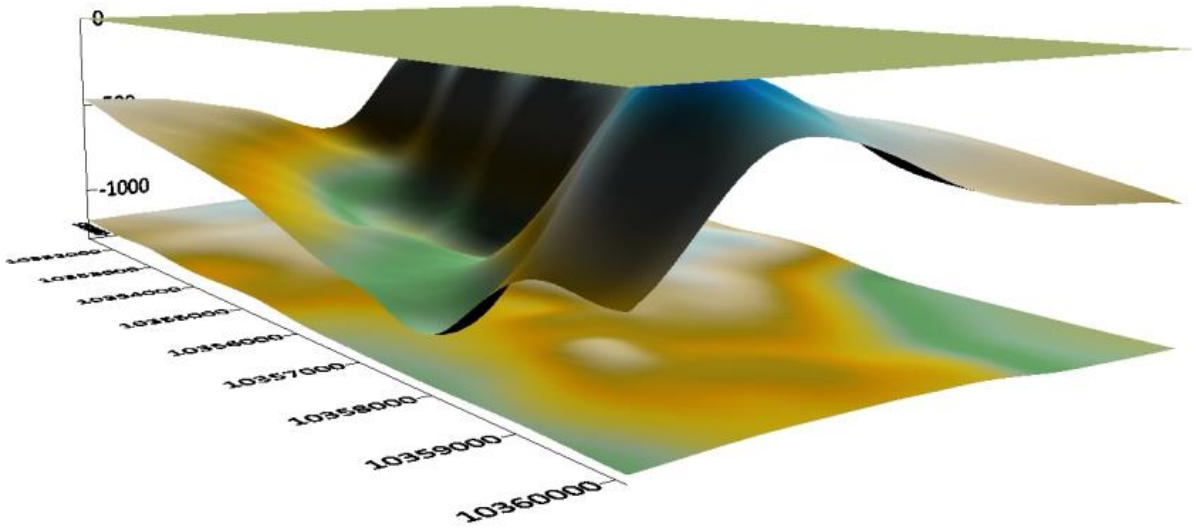


Рисунок 1. Каркас 3D модели

Выводы

В ходе работы были получен каркас объёмной многопластовой скоростной-плотностной модель разреза с постоянной плотностью внутри слоя в осадочном чехле.

На основе построенного каркаса 3D модели в будущем планируется получить результирующие карты с более точными распределениями плотностей по основным горизонтам, представленным в модели с учетом гравиметрических карт локальных аномалий силы тяжести.

Также в процессе прохождения преддипломной практики были получены навыки использования программного пакета GravMagInv, QGIS, ArcGIS, Golden Software Surfer.

Библиография

1. Бережная Л.Т., Телепин М.А., Чернов А.А. Обработка данных гравиразведки и магниторазведки на ПЭВМ / Руководство геофизика. – М., НПГП «Нефтегеофизика», 1992.
2. Драгунов А.А. Нефтегазопоисковые структурно-геологические исследования. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 190 с.
3. Инструкция по гравиразведке / Единые технические требования. – М., Недра, 1980, 80 с.
4. Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. – М., 1996, 46 с.

5. Никитин А.А, Петров А.В. «Теоретические основы обработки геофизической информации» учебное пособие – Москва, Издательство 2008, 112 стр.
6. Соколов А.Г. Уточнение строения фундамента в пределах Соль-Илецкого выступа. Бюллетень Оренбургского научного центра УрОРАН (электронный журнал), 2014 г., № 2.

Геомагнитное изучение подводных гор Батиметристов в Восточной Атлантике

Имаров Г.С.* (МГРИ, imarovgrigorij@gmail.com),
Иваненко А.Н. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук - ИО РАН, ivanenko.an@ocean.ru),
Чепиго Л.С (МГРИ, chepigols@mgri.ru)

Аннотация

В рамках 66 рейса НИС «Академик Иоффе» на территории Восточной Атлантики реализованы комплексные геолого-геофизические исследования, направленные на получение новых данных о строении, процессах формирования и развития океанической коры. Выполнение морской магнитной съемки в районе подводных гор Батиметристов позволяет построить карту аномального магнитного поля (АМП) и проанализировать природу источников магнитных аномалий этой структуры.

Ключевые слова

Гидромагнитная съемка, подводные горы, вулканизм, интерпретация

Источники финансирования

Работы отряда в составе экспедиции определены темой Государственного задания № FMWE-2024-0019 «Геоморфология, геофизика и биогеохимия морского дна с учетом особенностей литосферы арктического бассейна, переходной зоны от Тихого океана к Евразии, отдельных районов Атлантического и Индийского океанов, морей России».

Теория

На востоке Приэкваториальной Атлантики в северо-западном обрамлении поднятия Сьерра-Леоне расположены горы Батиметристов, простирающиеся в юго-западном направлении (Рисунок 1), что противоположно направлению движения Африканской плиты, в связи с чем в [4] их считают треками горячих точек. Горы Батиметристов состоят из двух параллельных цепей гор длиной около 500 км. Эти цепи на юго-западном окончании пересечены двумя субширотными (200–300 км) цепями вулканов, приуроченными к зонам палеотрасформов.

Драгирование подводных гор позволило предположить возраст их формирования в промежуток от раннего до среднего эоцена [2]. Ранний эоцен, это время мощного магматического импульса, который продолжается до наших дней и который привёл к формированию островов Зелёного Мыса и подводных гор Батиметристов. Одной из причин, которая могла привести к активизации магматической активности в рассматриваемом районе и формированию цепи подводных гор может быть подъём крупного мантийного плюма, расположенного под Западной Европой и Северной Африкой [1].

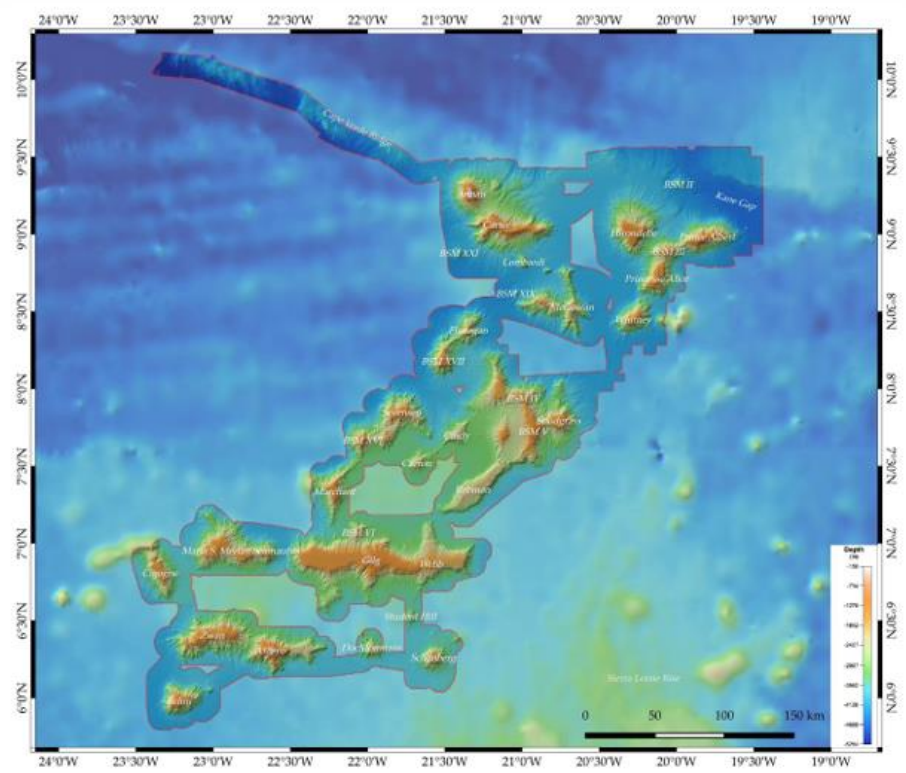


Рисунок 1. Батиметрическая карта подводных гор к северу от возвышенности Сьерра-Леоне [3]

Данные о модуле полного вектора магнитного поля Земли (МПЗ) регистрировались при помощи квантового магнитометра Geometrics-882 с частотой измерения 0,5 Гц (Рисунок 2). Магнитометр работает по принципу оптической накачки паров цезия. Магнитометр вырабатывает выходной сигнал с частотой прецессии (Ларморовской частотой) ядер атомов цезия, составляющей 3.49872 Гц на нТл. Ларморовская частота находится в прямой зависимости от интенсивности внешнего магнитного поля.

Магнитная съёмка на полигонах выполнялась по системе параллельных галсов с межпрофильным расстоянием 10-12 километров на скорости 10 узлов с обязательным секущим профилем в середине основных галсов. Обработка включала полуавтоматическое редактирование навигационных и магнитных данных, удаление случайных выбросов, сглаживание кривых.



Рисунок 2. Магнитометр Geometrics G-882

В 66 рейсе НИС «Академик Иоффе» была выполнена магнитная съемка над серией подводных гор северной оконечности цепи. На рисунке 3 представлены карта рельефа и карта

аномального магнитного поля. Трехмерная модель рельефа с наложенным АМП приведена на рисунке 4.

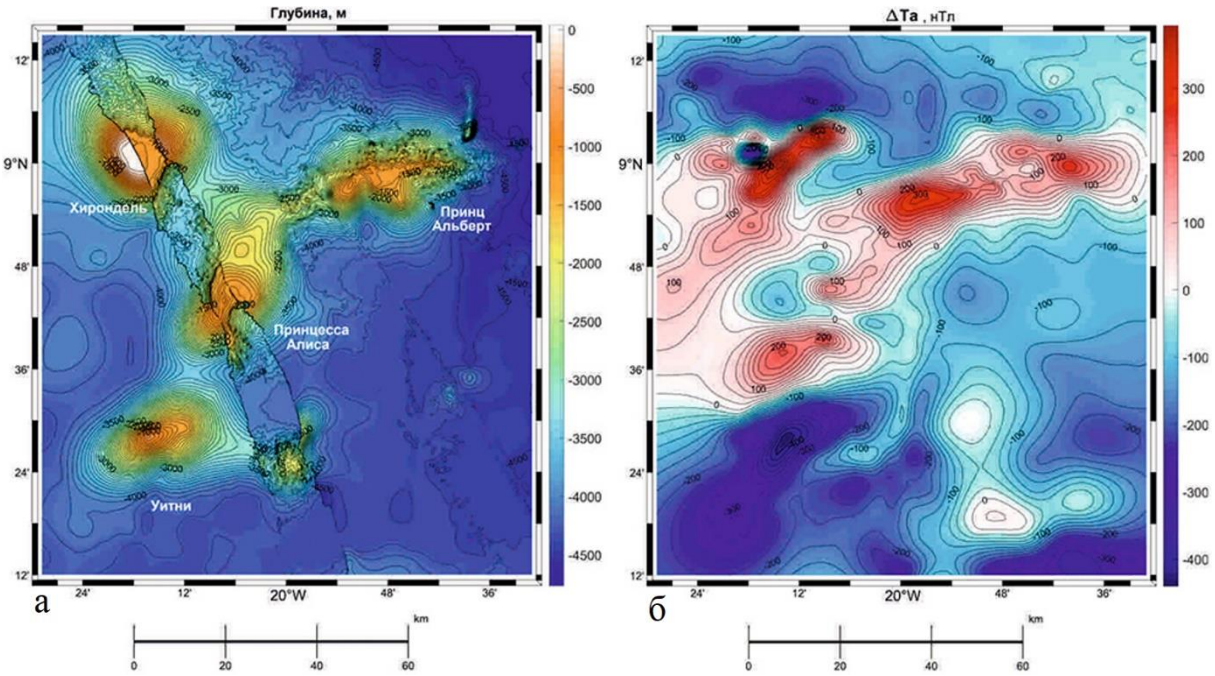


Рисунок 3. *а* – карта рельефа подводных гор; *б* – карта аномального магнитного поля

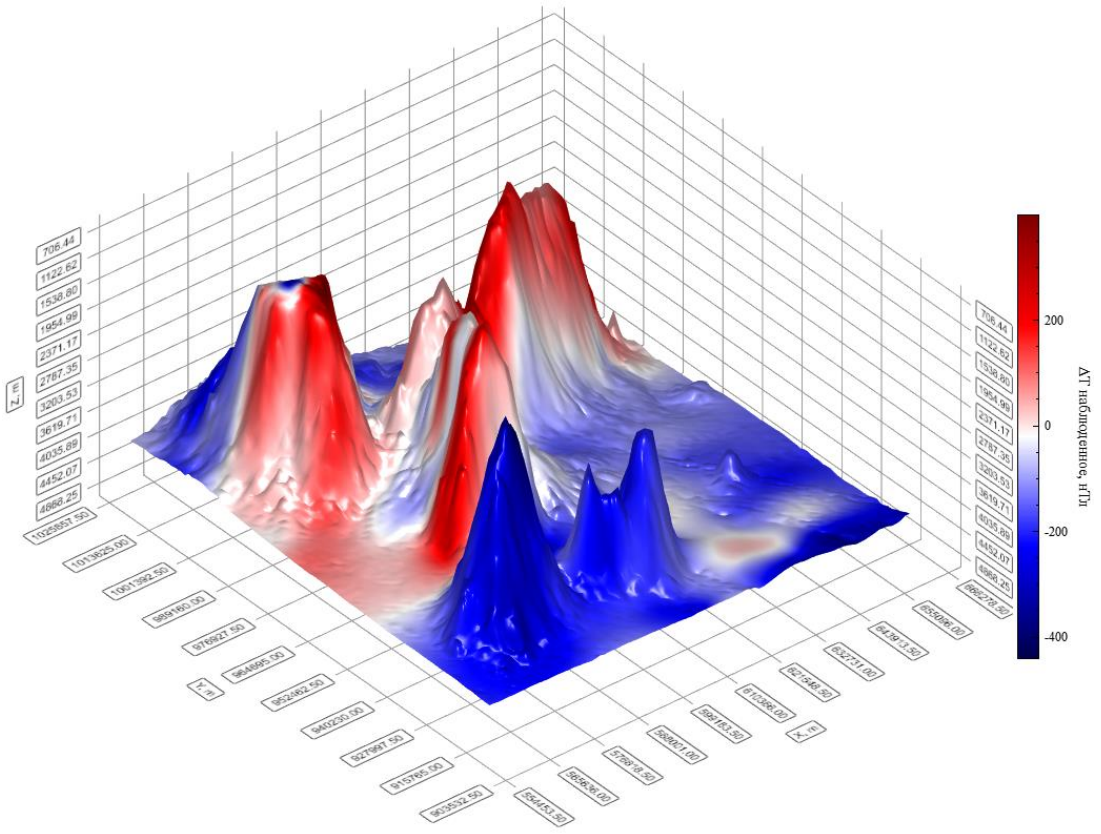


Рисунок 4. Трехмерная модель рельефа с наложенным АМП

Три горы: Принц Альберт, Принцесса Алиса и Уитни относятся к восточной цепи подводных гор. Простирание этой цепочки гор целиком укладывается в общее простирание восточной цепи. В магнитном поле эти постройки отмечаются положительными аномалиями интенсивностью 150-350 нТл.

Магнитное поле подводных гор Принц Альберт и Принцеса Алиса создают единую аномальную область, с простиранием от субширотного до юго-западного. Такая смена простирания аномалий может быть вызвана тектоническими нарушениями, сопровождавшими формирование всего массива подводных гор. В пределах этой аномальной области выделяется серия крупных локальных магнитных аномалии интенсивностью до 350 нТл. Положение этих аномалий отражает положение основных очагов магматизма. На периферии наблюдаемой аномальной области выделяются также локальные аномалии меньшей интенсивности, которые могут быть связаны с подводящими каналами и более мелкими очагами магматизма.

Подводная гора Уитни имеет элипсовидную форму и юго-западное простирание. Подводная гора Хирондель относится к северо-западной ветви цепи подводных гор Батиметристов. В магнитном поле подводная гора отражается узкой аномальной областью юго-западного простирания и по своей протяжённости значительно превосходит батиметрические границы подводной горы. Непосредственно сам массив отмечается линейно вытянутой магнитной аномалией юго-западного простирания и интенсивностью 400 нТл. Такая картина простирания аномальной области может быть вызвана тектоническим разломом юго-западного простирания, сопровождавшим формирование подводной горы и последующей тектонической раздробленностью массива, что отражается локальными аномалиями меньшей интенсивности.

Выводы

Полученные в 66 рейсе НИС «Академик Иоффе» новые данные, позволили авторам выполнить их интерпретацию и получить новые сведения о строении, процессах формирования и развития океанической коры и уточнить геохронологию в исследованных районах Атлантики.

Для северной оконечности цепи подводных гор Батиметристов была впервые синтезирована карта АМП и установлена приуроченность источников магнитных аномалий, к разломным зонам северо-восточного простирания.

Библиография

1. Пейве А.А. Подводные горы востока Южной Атлантики: происхождение и соотношение с мезозойско-кайнозойскими магматическими структурами. 2011 г. УДК 552.3(263)

2. Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Былинская М.Е., Головина Л.А. Новые данные о составе и возрасте пород гор Батиметристов (восточная окраина Приэкваториальной Атлантики)) // Докл. РАН. 2017. Т. 472. №2. С. 169-174.

3. Hübscher, Christian, et al. "Structural evolution and disintegration of oceanic intraplate volcanoes: The Bathymetrists Seamounts and its relation to Sierra Leona Rise (eastern equatorial Atlantic)-Cruise No. M152/2, 03.01.–12.02. 2019, Las Palmas (Spain)–Walvis Bay (Namibia), SEDIS." (2019).

4. Schilling J., Hanan B., McCulli B., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № B6. P. 12005-12028.

Особенности проведения геофизических исследований скважин на акватории Карского моря

Латышев К.А.*(МГРИ, kilat_2002@rambler.ru),
Посеренин А.И. (МГРИ, posereninai@mgri.ru)

Аннотация

Воспроизводство минерально-сырьевой базы, в частности восполнение стратегически важного углеводородного сырья, является важнейшей государственной задачей, от решения которой в значительной степени зависит развитие топливно-энергетического комплекса России.

Учитывая высокую степень разведанности и освоения месторождений углеводородного сырья на суше и высокие перспективы нефтегазоносности недр сопредельного континентального шельфа, очевидно, что последний рассматривается в качестве наиболее серьезного источника развития сырьевой базы газа и нефти.

Целью работы являлось рассмотрение особенностей проведения геофизических исследований скважин на акватории Карского моря и возможности дополнения основного комплекса ГИС исследованиями на кабеле микроимиджером FMI-HD для получения дополнительной геолого-геофизической информации.

Ключевые слова

Геофизические методы исследования скважин, нефть и газ, Карское море, Арктический шельф, микроимиджер

Теория

Арктический шельф России сегодня рассматривается как крупный регион, промышленное освоение которого позволит компенсировать падение добычи нефти и газа в старых нефтегазодобывающих центрах страны. Он обладает огромнейшим углеводородным потенциалом, способным обеспечить значительную часть энергетических потребностей страны и принести большой экономический эффект (Рисунок 1) [2].

Карское море — окраинное море Северного Ледовитого океана, между берегами Северной Евразии, островными архипелагами Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля [2].

Анализ геолого-геофизических материалов показал, что на шельфе Карского моря выделяются два самостоятельных осадочных бассейна, которые разделены Северо-Сибирским порогом — крупным эрозионно-тектоническим выступом архейско-протерозойского фундамента.

Южная часть Карского моря в тектоническом плане охватывает Южно-Карскую региональную депрессию, которая является северным окончанием Западно-Сибирской геосинеклизы. В нефтегазоносном отношении эта часть акватории выделена в составе Южно-Карской нефтегазоносной области, в пределах которой наибольший интерес в отношении газоносности представляет апт-альб-сеноманский комплекс пород, а в отношении жидких углеводородов — неокомские и юрские отложения [6].

Северная часть Карского моря представляет собой самостоятельную Северо-Карскую провинцию, на большей части которой перспективы нефтегазоносности связаны с палеозойскими осадочными комплексами. Перспективные на нефть и газ объекты этого бассейна могут быть связаны с антиклинальными, неструктурными ловушками и рифогеными постройками (Рисунок 2) [4,5]. Район изучен довольно слабо из-за его значительной ледовитости, которая в последние годы заметно уменьшилась, что позволило, наконец, провести сейсмические съемки методом отраженных волн (МОВ), а также сейсмоакустическое профилирование. До

проведения сейсмических работ знания о геологии севера Карского шельфа базировались исключительно на результатах интерпретации потенциальных полей [2].

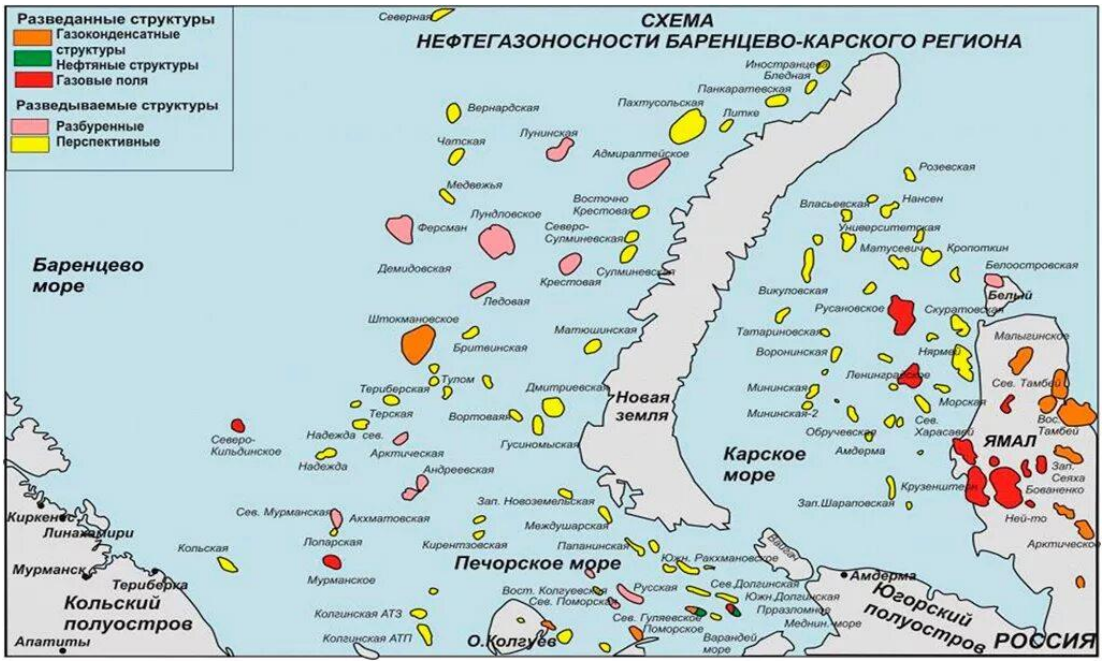


Рисунок 1. Схема нефтегазоносности Баренцево-Карского региона

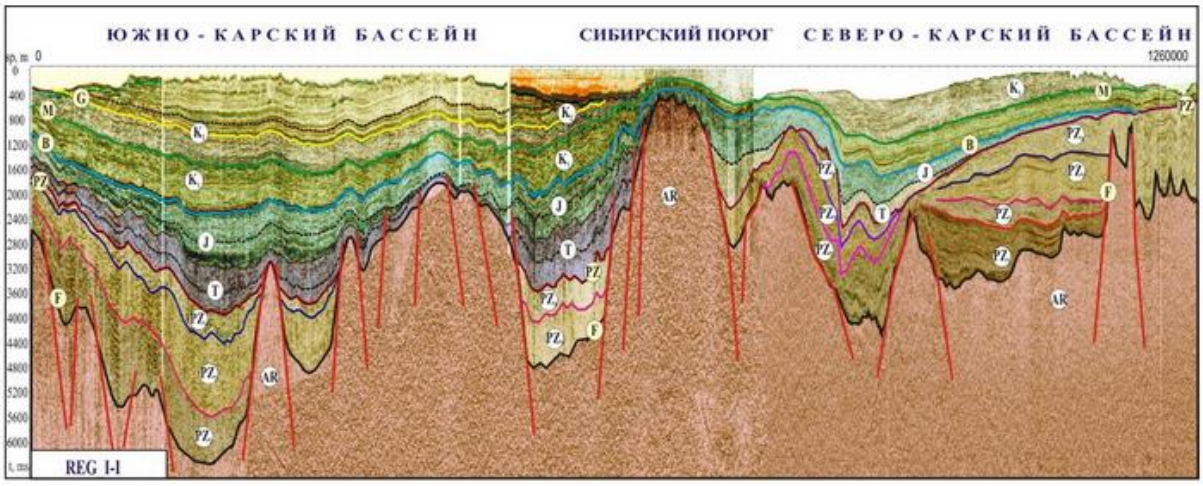


Рисунок 2. Сейсмогеологический разрез по профилю, проходящему по линии Южно-Карский бассейн - Сибирский порог - Северо-Карский бассейн

Проведение ГИС на акватории Карского моря представляет собой сложный и многоэтапный процесс, требующий особого подхода из-за специфических условий окружающей среды.

Особенности проведения исследований связаны со следующими ключевыми аспектами:

1. Ледовая обстановка.

Наличие льда может ограничивать доступ к участкам для бурения и проведения геофизических исследований скважин.

2. Температура и давление.

Низкие температуры воды и высокое давление на больших глубинах могут влиять на работу оборудования и характеристики исследуемых горных пород.

3. Тектонические особенности.

Регион подвержен действию различных тектонических процессов, в том числе поднятию и опусканию плит, что может приводить к образованию разломов и складок, создающих сложности в процессе выполнения каротажа.

Геофизические исследования скважин проводились с регистрацией методов: стандартного каротажа (ПС), радиоактивного каротажа (ГК, ГГК-П, ННК-Т). Комплекс детальных геофизических исследований включает: многозондовый боковой каротаж (БК); кавернометрию (ДС); резистивиметрию (РС); кросс-дипольный акустический каротаж (АК). Сводный планшет результатов обработки показан на рисунке 3.

Для получения информации о границах пластов, внутрипластовой слоистости, оценки трещиноватости, определения направлений горизонтальных напряжений предлагается провести геофизические исследования на кабеле микроимиджером FMI-HD [3] (Рисунок 3).

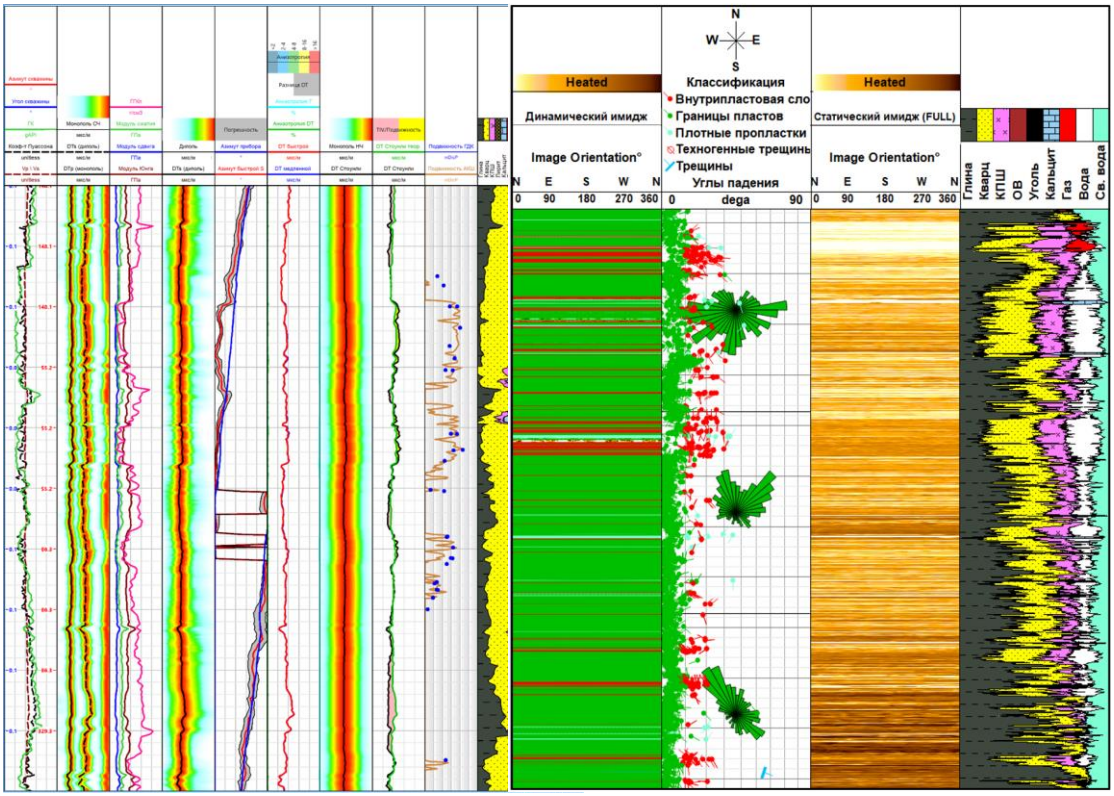


Рисунок 3. Сводный планшет результатов обработки данных ГИС (слева) и сводный планшет результатов интерпретации данных микроимиджера FMI-HD (справа)

Вектор максимального и минимального горизонтального стрессов определяется направлением техногенной трещиноватости или вывалов соответственно. Техногенные трещины образуются в направлении, параллельном к направлению максимального горизонтального напряжения, в то время как вывалы в перпендикулярном (Рисунок 4).

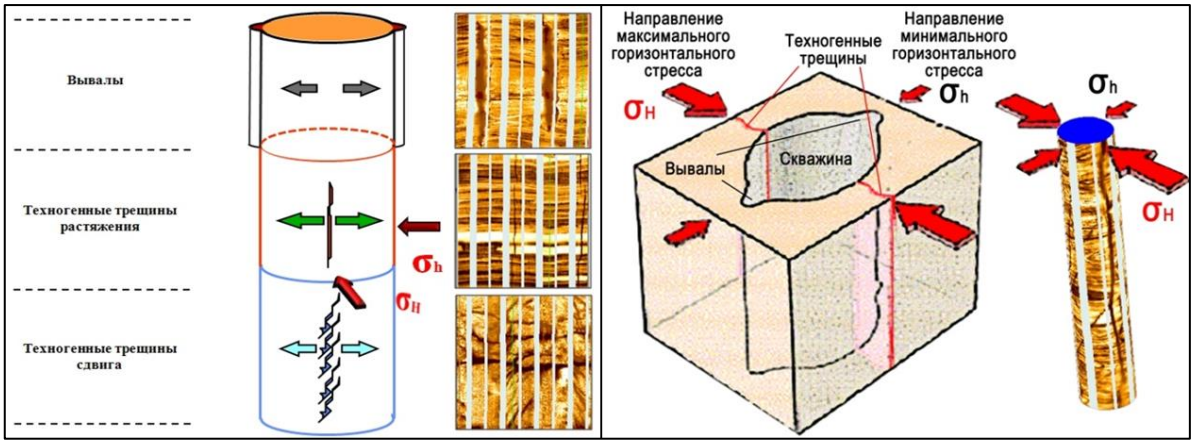


Рисунок 4. Образование техногенных трещин и вывалов стенок скважины под действием максимального горизонтального напряжения

Выводы

В работе рассмотрены особенности проведения геофизических исследований скважин на акватории Карского моря с учетом особенностей: ледовая обстановка, температура и давление, тектоническое строение региона. В дополнение к основному комплексу ГИС предложено провести геофизические исследования на кабеле микроимиджером FMI-HD с целью получения информации о границах пластов, внутрипластовой слоистости, оценки трещиноватости, определения направлений горизонтальных напряжений.

Библиография

1. Ананьев В. До арктического шельфа у России «руки не доходят» // Oil & Gas Journal. 2010. Май. С. 38.

2. Гусев Е.А., Крылов А.А., Урванцев Д.М., Горемыкин Ю.В., Криницкий П.И. Геологическое строение северной части Карского шельфа у архипелага Северная Земля по результатам последних исследований // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 505-512. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.1.

3. Документация Шлюмберже / FMI-HD – азимутальный электрический микроимиджер высокого разрешения [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.slb.ru/services/wireline/open_hole/imagers/fmi-hd/?ysclid=m7ofytttca20516698. (Дата обращения 28.02.2025г.)

4. Конторович В.А., Аюнова Д.В., Губин И.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Малышев Н.А., Скворцов М.Б., Соловьев М.В., Сурикова Е.С. История тектонического развития арктических территорий и акваторий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 3/4. С. 423–444.

5. Конторович В.А. Нефтегазоносность Карского моря // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 11. С. 34–43.

6. Супруненко О.И., Устрицкий В.И., Зуйков О.Н. Геолого-геофизическое районирование севера Баренцево-Карского шельфа по данным сейсморазведки // Геология нефти и газа. 2009. № 4. С. 17–25.

Применение комплекса ГИС-ГТИ ГЕО для оценки эффективности и оперативности управления буровыми работами

Мамедов Э.Н.* (МГРИ, emir.lareyn@bk.ru),
Белов А.П. (МГРИ, econg3@yandex.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются проблемы эффективности и безопасности буровых работ в нефтегазовой и горнодобывающей промышленности. Предлагается методология применения комплекса ГИС-ГТИ ГЕО, объединяющего геоинформационные и геотехнические системы для оптимизации процессов. Описаны преимущества интеграции данных, использования искусственного интеллекта и математических моделей для прогнозирования и снижения затрат. Результаты пилотного проекта показали снижение затрат на 15–20% и повышение безопасности за счет оперативного анализа и управления.

Ключевые слова

ГТИ, буровая оптимизация, информационные системы, цифровизация

Теория

Современная нефтегазовая и горнодобывающая промышленность сталкивается с рядом проблем, связанных с эффективностью и безопасностью процессов бурения. В условиях роста затрат на проведение буровых работ, изменения геологических условий и возрастающих требований к безопасности предприятия ищут новые способы оптимизации производственных процессов.

Настоящая работа посвящена разработке и обоснованию методологии применения комплекса ГИС-ГТИ ГЕО – интегрированного решения, объединяющего возможности геоинформационных систем (ГИС) и геотехнических информационных систем (ГТИ) для оценки эффективности и оперативности управления буровыми работами. В работе проведен анализ существующих методов контроля и управления процессами бурения, выявлены их основные недостатки, такие как фрагментарность поступающих данных, отсутствие единой системы и несвоевременность принятия управленческих решений. Предлагаемый комплекс ГИС-ГТИ ГЕО позволяет устранить пробелы в данных для учета разнородной информации, поступающей с датчиков оборудования, геологоразведочных исследований, а также данных о технологическом состоянии бурильных установок. Благодаря созданию единой информационной среды, возможности оперативного анализа, прогнозирования и принятия, корректирующих мер, что позволяет снизить экономические риски и снизить затраты. Методологическая основа исследования базируется на комплексном подходе, включающем теоретический анализ отечественного и зарубежного опыта применения информационных систем в бурении, системное моделирование процессов, экономическую оценку эффективности развития и практическую апробацию разработанного комплекса.

В работе на основных этапах необходимы данные: от сбора информации до возможности ее обработки в единой системе, которая позволяет формировать актуальную картину состояния буровых работ в режиме реального времени. Особое внимание уделяется разработке математических моделей, способам стимулирования изменения геологических и технических параметров, а также использованию методов искусственного интеллекта для прогнозирования отказов оборудования и оптимизации процессов планирования. Практическая апробация методологии проводилась по принципу одних объектов бурения, которые оценивают потенциал снижения операционных затрат и повышения производительности труда.

Результаты пилотного проекта, заключающиеся в том, что применение комплекса ГИС-ГТИ ГЕО может привести к снижению затрат на 15–20 % за счет текущего времени простоя оборудования, оперативного реагирования на изменение условий работы и оптимизации планирования технического обслуживания. Кроме того, интеграция данных обеспечивает повышение уровня безопасности, снижение вероятности аварийных ситуаций за счет ранних отклонений в работе оборудования и своевременную корректировку технологических процессов.

Особое значение исследования заключается в его междисциплинарном подходе, который выбирает методы анализа, исследования и практической апробации. Это не только повышает эффективность буровых работ, но и создает предпосылки для дальнейшей цифровизации процессов в нефтегазовой и горнодобывающей отрасли. Результаты работы могут быть использованы для разработки новых стандартов и рекомендаций по информационным системам в управлении промышленными объектами, а также формирования стратегии цифровой трансформации предприятий. Кроме того, исследование рассматривает перспективы дальнейшего развития комплекса ГИС-ГТИ ГЕО для учета модулей машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти направления открывают возможности для создания более адаптивных систем, позволяющих автоматически корректировать работу на основе анализа больших объемов данных, что в перспективе может значительно повысить качество управленческих решений. Учитывая динамику развития технологий, предлагаемая методология обладает потенциалом для масштабирования и адаптации под различные объекты бурения с учетом их специфики и условий эксплуатации.

Таким образом, работа по интеграции разнородных данных с помощью комплекса ГИС-ГТИ ГЕО является эффективным средством для оптимизации технологических процессов бурения, снижения эксплуатационных затрат и повышения уровня безопасности производства. Реализация разработанной методики обеспечивает переход от традиционных подходов к более современным, цифровизированным системам управления, что соответствует мировым тенденциям в развитии нефтегазовой и горнодобывающей отраслей. Практическая новизна работы проявляется в возможностях ее применения на различных этапах бурения, начиная от планирования и заканчивая эксплуатацией, что делает комплекс ГИС-ГТИ ГЕО перспективным решением для установления конкурентоспособности предприятий.

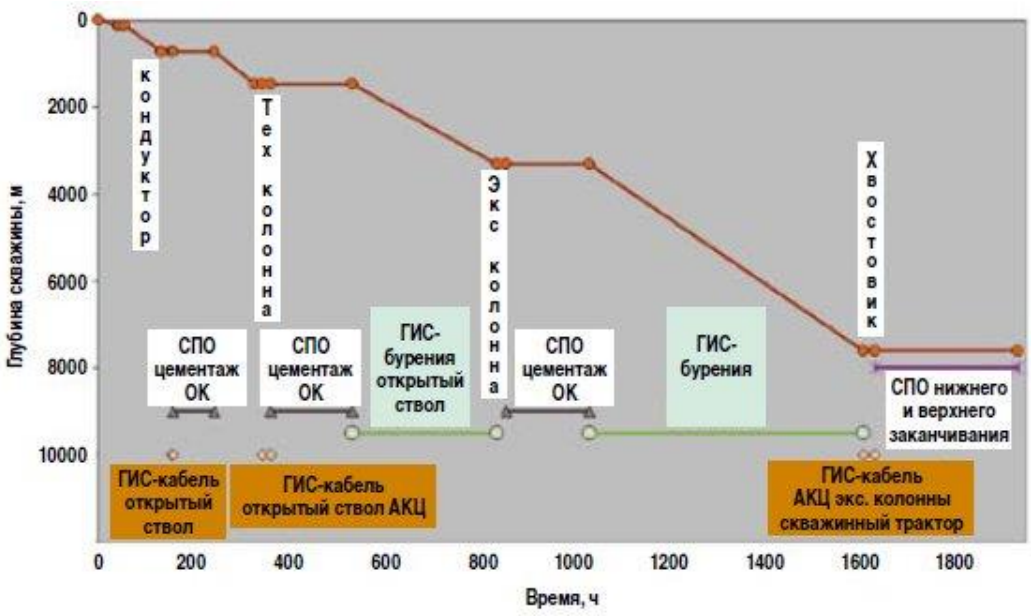


Рисунок 1. Стандартная схема проведения работ ГИС

Таким образом следует отметить, что предлагаемый подход не только оптимизирует процессы бурения, но и закладывает основы для проведения научных исследований в области цифровизации и автоматизации производственных процессов. Применение интегрированных информационных систем позволит создать более устойчивые и надежные технологии, что приведет к требованиям современного рынка, что, в свою очередь, обусловит положительное влияние на революционную науку в целом.

Библиография:

1. Интерпретация результатов ГТИ и оценка аномально высоких давлений. / Е.В. Тарасова - Тверь: ПолиПРЕСС , 2024 -296 с.

2. Инновационные подходы к снижению аварийности при бурении скважин / П. С. Иванов, Е. К. Лебедева // Техника и технология нефтегазового комплекса. - 2022. - № 1. - С. 34-48.

3. Современные технологии бурения нефтяных и газовых скважин / В. Н. Афанасьев, А. С. Кузнецов. - Москва: Нефтегазиздат, 2021. - 352 с.

4. Геолого-технологические исследования при бурении скважин: учебное пособие / А. М. Борисов, Е. П. Петров. - Санкт-Петербург: Невский диалект, 2020. - 288 с.

5. Правила геофизических исследований и работ в нефтяных и газовых скважинах | НАДЗОР-ИНФО: Сообщество экспертов России (nadzor-info.ru)

Проект геофизических работ с целью изучения оползневых процессов в Западном округе г. Москвы

Мефодьева А.В.* (МГРИ, iren.mn13@gmail.com),
Иванов А.А. (МГРИ, ivanovaa@mgri.ru)

Аннотация

Геофизические работы в Москве являются востребованными в связи с интенсивным развитием городской инфраструктуры, увеличением плотности застройки, а также необходимостью обеспечения безопасности объектов строительства. Геофизические исследования позволяют изучить особенности геологического строения территории, выявить потенциальные риски, связанные с карстовыми процессами, оползнями, наличием подземных полостей и техногенных образований. Особое внимание следует уделить проблеме распространения оползневых процессов, которые наблюдаются на склонах рек Москвы и Яузы, а также в других районах с нестабильными грунтами. Это особенно важно в условиях мегаполиса, где высокая антропогенная нагрузка может привести к деформациям грунтов и повреждению коммуникаций. Современные методы геофизики, обеспечивают высокую точность и оперативность исследований, что делает их значащими при проектировании и строительстве новых объектов, мониторинге состояния существующих сооружений. Проведение таких работ способствует снижению рисков, уменьшению затрат на строительство и повышению устойчивости городской инфраструктуры.

Ключевые слова

Оползень, берег реки, склон, инженерная геофизика, Москва

Теория

Оползень — это опасное природное явление, при котором происходит смещение масс горных пород, грунтов или искусственных насыпей вниз по склону под действием силы тяжести. Отложения оползней называют деляпсием [3]. Это явление может возникать как на естественных склонах (холмах, горах), так и на искусственных откосах (например, в карьерах или вдоль дорог). Оползни часто сопровождаются разрушениями инфраструктуры, угрожают жизни людей и наносят значительный экологический и экономический ущерб. Основными причинами их возникновения являются природные факторы, такие как эрозия, насыщение грунта водой, землетрясения, а также антропогенная деятельность, включая строительство и вырубку лесов.

Несмотря на то, что Москва находится в относительно равнинной местности, оползневые процессы здесь все же есть, особенно в районах, где есть склоны речных долин, оврагов или искусственных насыпей. Наиболее подвержены оползням территории, расположенные вдоль Москвы-реки и ее притоков, где грунты могут быть неустойчивыми из-за высокого уровня грунтовых вод или подмыва берегов. В последние годы участились случаи деформации склонов, связанные с активной застройкой и изменением климатического режима.

В ближайшие годы в Москве были зафиксированы несколько случаев оползневых процессов. К примеру, в 2020 году на юго-западе города, в районе Тропарево-Никулино, произошло смещение грунта на склоне, что потребовало срочных инженерных работ. Еще один случай был отмечен в 2021 году в районе Коломенского, где из-за подмыва берега Москвы-реки возник риск обрушения. Эти инциденты подчеркивают необходимость постоянного мониторинга и профилактики оползневых процессов в городских условиях.

Объектом работ является потенциальный оползневый склон, расположенный на территории города Москва (Рисунок 1). Изучаемая площадь располагается в пределах первой надпойменной террасы, а также на склоне реки Москвы, представленным деляпсием.



Рисунок 1. Снимок района работ со спутника

В геологическом строении территории глубиной до 55 метров присутствуют: четвертичные, дочетвертичные и каменноугольные отложения. Четвертичные отложения Москвы, формировавшиеся в последние 2,6 миллиона лет, представлены преимущественно ледниковыми, водно-ледниковыми, аллювиальными и озерно-болотными отложениями. Они включают моренные суглинки, пески, галечники, торфы и глины, которые образовались в результате деятельности нескольких оледенений (например, днепровского, московского, валдайского) и межледниковых эпох. В долинах рек, таких как Москва-река и Яуза, широко распространены аллювиальные отложения, представленные песками, гравием и суглинками. Эти отложения играют важную роль в инженерно-геологических условиях города, влияя на строительство и инфраструктуру. Для более точного уточнения физических свойств и геологического строения оползневого тела были проведены следующие виды геофизических работ.

Наиболее широко применяемым и простым методом для сбора и обработки сейсмических данных является метод преломленных волн (МПВ), используемый в модификации сейсмической томографии [1]. В рамках геофизических исследований объектом изучения выступает геологический разрез, а его основными параметрами являются скорости распространения продольных (P-волны) или поперечных (S-волны) сейсмических волн. В качестве проекций используются времена пробега этих волн от источника возбуждения до точек регистрации на приёмниках. Сейсмотомография обладает более высоким пространственным разрешение по сравнению с “классическим” методом преломленных волн и позволяет получить распределение скоростей во всем разрезе [2].

Метод МПВ позволяет определить скорость распространения сейсмических волн в грунтах, что даёт информацию об их упругих свойствах и плотности. Это важно для оценки несущей способности грунтов, выявления зон разуплотнения, трещиноватости и обводненности. К примеру, с помощью МПВ можно обнаружить инженерно-геологические процессы (склоновые и карстовые процессы), выделить кровлю и подошву слоев, линзы грунтов и другие неоднородности. Применение метода МПВ в инженерных изысканиях особенно актуально на начальных этапах проектирования, когда необходимо получить детальную информацию о геологическом строении верхней части разреза. Он отличается простотой исполнения, мобильностью и относительно низкой стоимостью, что делает его доступным для широкого

круга задач. Однако для более глубоких исследований или сложных геологических условий могут потребоваться дополнительные методы, такие как сейсморазведка ОГТ или электроразведка.

На рисунке 2 представлен сейсмотомографический разрез на продольных волнах по профилю длиной 72 м, который имеет двуслойное строение. Скорости продольных волн (*Vp*) находятся в диапазоне 180 − 350 м/с для первого слоя и 690 − 1840 м/с для второго слоя.

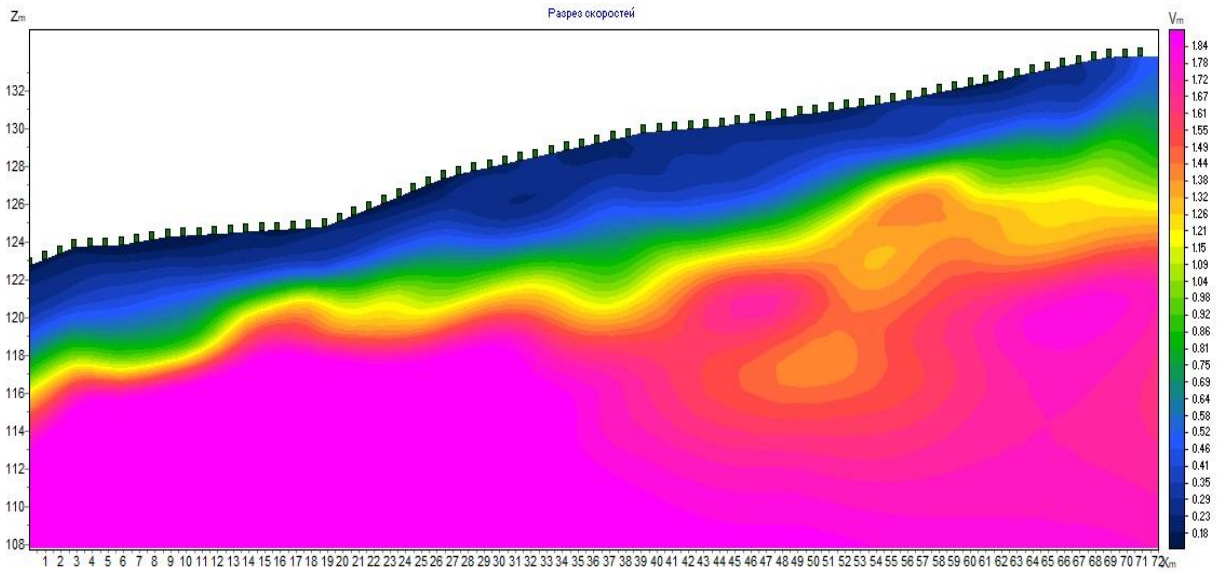


Рисунок 2. Результаты сейсмотомографии. Скоростной разрез продольных волн

Высокоскоростная толща, по геологическим данным, представлена юрскими отложениями (J_3). По юрским породам, которые представляют собой в основном глины происходит оползание вышележащих четвертичных пород.

Четвертичные отложения представляют собой техногенные грунты, аллювиальные отложения и деляпсий.

Техногенные грунты (tQ_{IV}) имеют повсеместное распространение, частично попадают на особо охраняемые природные территории, имеют антропогенные (хозяйственно-строительные) и естественно измененные и перемещенные грунты и представлены супесчано-суглинистыми грунтами. Общая мощность техногенных отложений достигает 4 метра.

Современные аллювиальные отложения (aQ_{IV}) распространены в пределах поймы реки Москвы и представлены в виде: суглинков мягкопластичной консистенции, с прослоями песка, песками с прослоями глины разной плотности. Мощность современных аллювиальных отложений достигает 15 метров.

Комплекс современных-верхнечетвертичных отложений «деляпсий» (отложения оползней) (dpQ_{III-IV}) распространен в пределах правого склона реки Москва и представляет собой оползневое тело, состоящее из перемещённых дочетвертичных отложений волжского и оксфордского ярусов верхней юры. Породы волжского яруса верхней юры ($dp\text{-}Q_{III-IV}(J_{3v})$): суглинки тяжёлые и глины, зеленовато-грязно-серые, с частыми тонкими прослоями песка, с включением обломков древней фауны. Породы оксфордского яруса верхней юры ($dp\text{-}Q_{III-IV}(J_{3ox}$): глины тяжёлые, чёрные, слюдистые, с включением обломков древней фауны, полутвёрдой консистенции. Мощность отложений оползней достигает 15 метров.

Верхнечетвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III}) распространены в пределах террасы реки Москвы и представлены: суглинками с прослоями песка, песками мелкими,

влажными и водонасыщенными, с прослоями глины, средней крупности. Мощность верхнечетвертичных аллювиальных отложений достигает 12 метров. Среднечетвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения днепровско-московского горизонта ($fQ_{II}d_м$) представлены: суглинками коричневыми, красно-коричневыми и серовато-коричневыми, с линзами и прослоями песка, местами с включениями дресвы и гравия, песками коричневыми, серовато-коричневыми средней крупности, неоднородными. Мощность флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложений составляет от 2 до 20 метров.

Выводы

Проведение геофизических исследований на оползневых объектах в Москве доказало свою высокую эффективность. Сейсмотомография обеспечивает точность и детализацию данных, что особенно важно для мониторинга склонов рек Москвы, где оползневая активность представляет значительную угрозу. Для своевременного предупреждения опасных ситуаций на оползневых участках необходимо наладить организацию сети мониторинга оползневого процесса и принятия мер по эффективной защите городских сооружений в оползневой зоне.

Библиография

1. Бурлуцкий, С. Б. Физико-геологические модели оползневых склонов по данным электро- и сейсмотомографии: специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых": диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Бурлуцкий Станислав Борисович, 2015. – 201 с. – EDN UELPEG.
2. Кулаков, И. Ю., Щелканова Н.А., Ступина Т.А. Количественная оценка пространственного разрешения в задачах сейсмотомографии. // Геофизические технологии. – 2020. – № 2. – С. 4-17. – DOI 10.18303/2619-1563-2020-2-4. – EDN NSVYDD.
3. Николаева, Г. В., Николаев П.А. О распространении современных оползневых отложений в районе Лужнецкой поймы р. Москвы / Г. В. Николаева, // ГеоРиск. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 32-45. – DOI 10.25296/1997-8669-2022-16-2-32-44. – EDN IFESCS.
4. Тихонов А.В. Научно-методические основы изучения глубоких оползней г. Москвы с применением высокоточных методов: автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. – М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2011. – 24 с.

Построение физико-геологической модели по результатам проведения комплекса геофизических методов с целью поисков золото-серебряного оруденения на участке Венера

Никонова Д.С. (МГРИ, nikonovads@inbox.ru),*
Новиков П.В. (МГРИ, novikovpv@mgri.ru)

Аннотация

В рамках проведения полевых работ на территории Чукотского автономного округа реализованы геофизические исследования, направленные на получение данных о содержании золото-серебряных оруденений на участке Венера. Выполнение электроразведочных работ методом электротомографии с измерением вызванной поляризации на участке позволяет построить разрезы кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости и подобрать комплекс геофизических методов для проведения дальнейших исследований на данной территории.

Ключевые слова

Электроразведочные работы, золото-серебряное месторождение, комплекс геофизических методов, физико-геологическая модель

Источники финансирования

За проведение геофизических работ отвечала компания ООО “Северо-Запад”.

Теория

Территория района работ расположена в Олойской складчатой зоне, являющейся частью Алазейско-Олойской эвгеосинклинальной системы. В строении Олойской зоны выделяются пять структурных ярусов, разделенных между собой угловыми и стратиграфическими несогласиями.

К первому структурному ярусу относятся палеозойские (девон-пермь) отложения (мощность 2000 м), выполняющие складчатое основание и выходящие на дневную поверхность в пределах Сиверского поднятия в юго-западной части территории.

Второй структурный ярус сложен верхнетриасовыми породами и отвечает геосинклинальному этапу развития складчатой зоны (мощность 1700-2000 м), участвует в строении Курьинской и Кричальской горст-антиклиналей.

Третий структурный ярус представлен вулканогенно-осадочными и вулканогенными породами верхней Юры (мощность – 2600 м). Он перекрывает породы второго яруса и выполняет наложенные впадины – Иннахскую, Тополево-Кричальскую, Карбасскую и Тантынскую.

Четвертый структурный ярус представлен вулканоструктурами оседания: Карбасской, Крестовской, Насончикской, Эльгечанской, Хетачанской, Вилкинской, Верхне-Яровой - слагают континентальные вулканиты мелового возраста (мощность – 1000 м).

Пятый структурный ярус представлен кайнозойскими рыхлыми образованиями, выполняющими посторогенную Нижне-Анюйскую впадину (макс. мощность – 200 м).

К позднеюрским субвулканическим образованиям отнесены дайки и субпластовые тела базальтов, долеритов, гранит-порфиров, дацитов, андезитов, липаритов.

Раннемеловые субвулканические образования представлены базальтами, долеритами, диабазами, диоритовыми порфиритами, кварцевыми диоритовыми порфиритам и андезито-дацитами, обычно локализуются в пределах полей развития нижнемеловых вулканитов или вблизи них.

Физические свойства горных пород представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства горных пород

№	Разности пород	σ, г/см³	æ,*10⁻⁵ ед СИ	ρ, Ом*м	η, %
1	Песчано-глинистые отложения	2.4	12.5	400	1.5
2	Туфы	1.7	300	1000	3.5
3	Базальты	2.9	260	10000	4.5
4	Вкрапленные руды	3.9	190	55	8

По представленной геологической информации построена петрофизическая модель месторождения (рисунок 1).

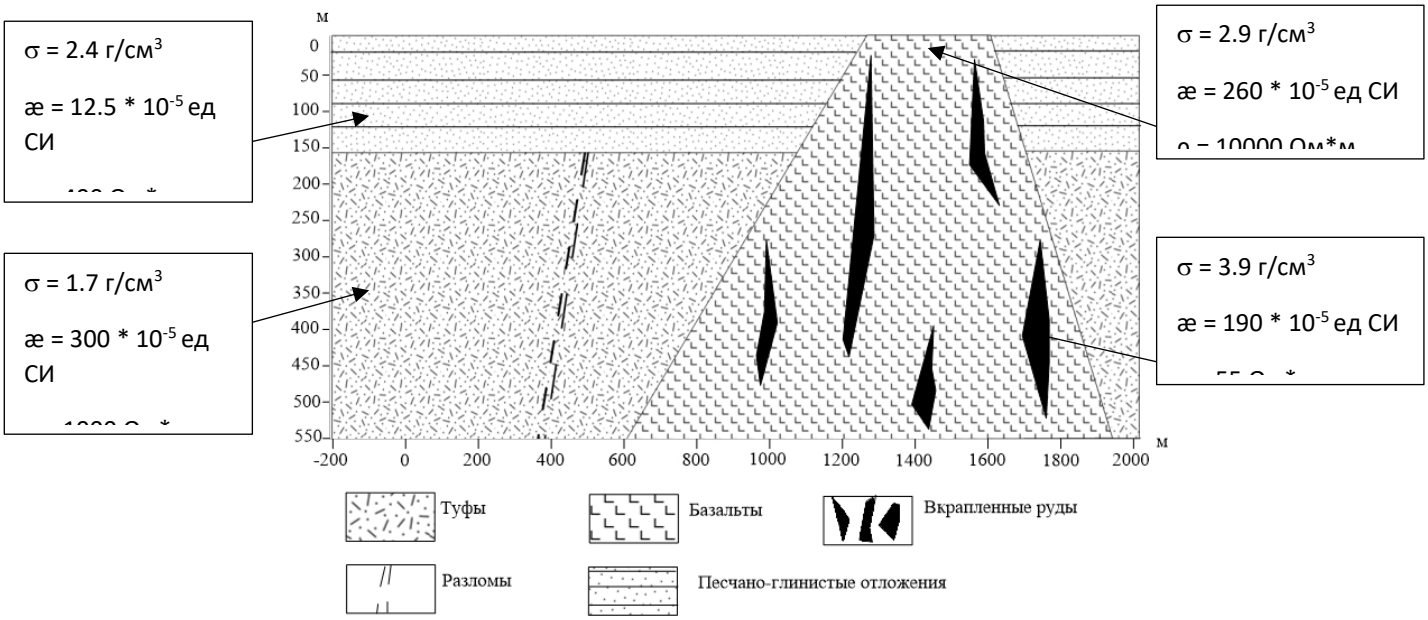


Рисунок 1. Петрофизическая модель месторождения

Электроразведочные работы на данной территории проводились методом электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП).

В качестве приемника использовался восьмиканальный измеритель для метода вызванной поляризации «ИМВП-8» (рисунок 2)



Рисунок 2. Измеритель «ИМВП-8»

По полученным данным были построены разрезы кажущегося сопротивления и поляризуемости (рисунок 3).

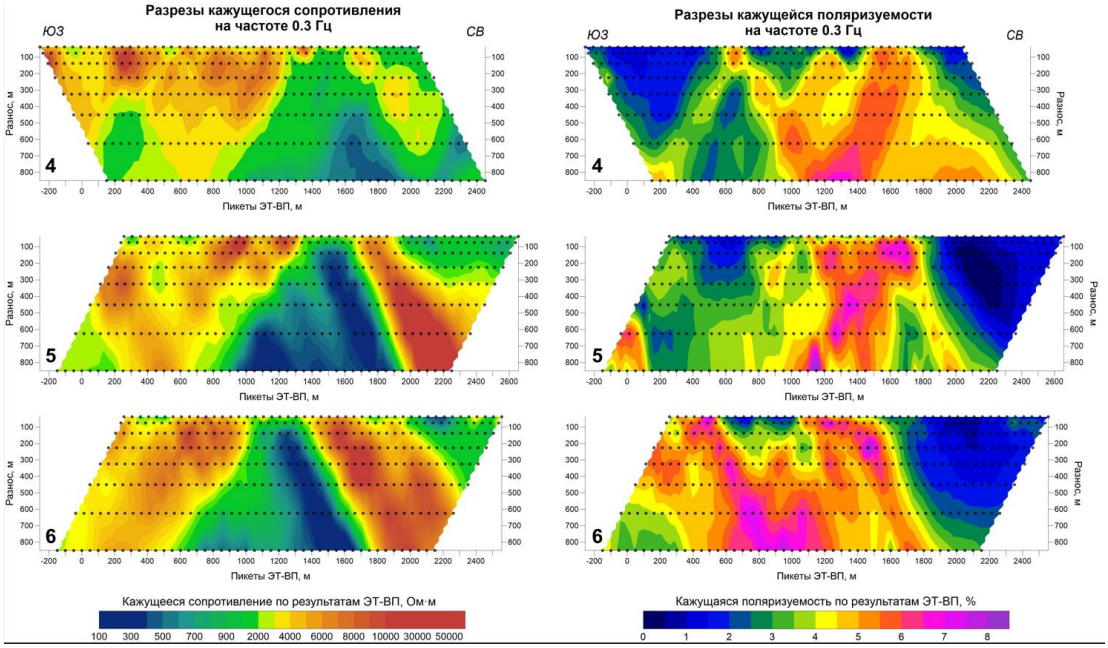


Рисунок 3. Разрезы кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости

По геологии и петрофизической модели построена ФГМ месторождения (рисунок 4).

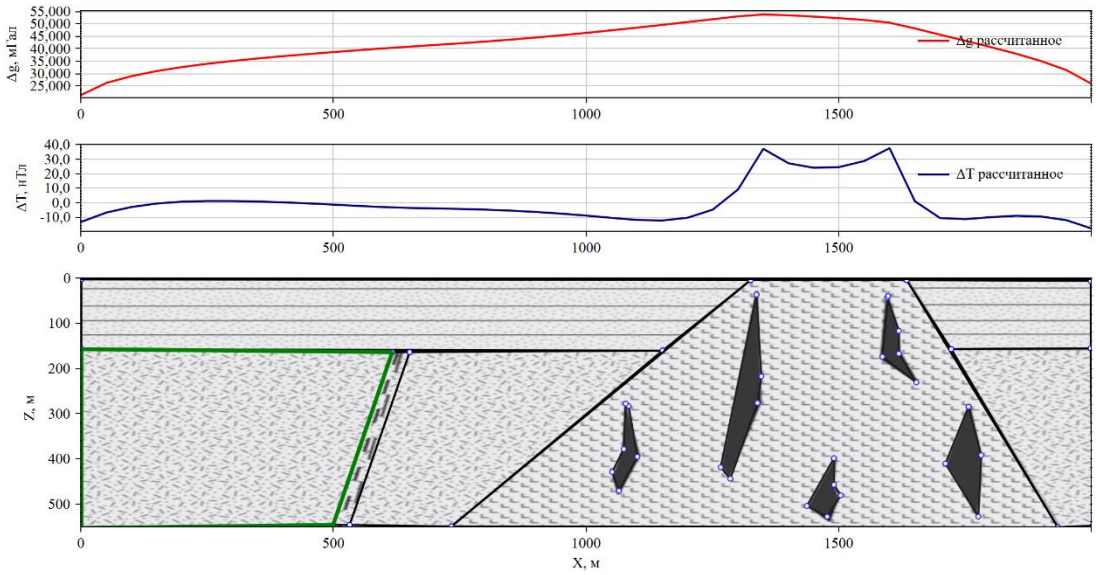


Рисунок 4. Физико-геологическая модель месторождения Венера

На физико-геологической модели хорошо выделяются повышенные значения гравитационного и магнитного поля над рудоносным объектом.

Выводы

Полученные в ходе работ данные позволили извлечь новые сведения о геологическом строении месторождения Венера.

В результате построения ФГМ видно, что для проведения поисков золото-серебряного месторождения на данной территории можно использовать комплекс геофизических методов, включающий в себя электроразведку, гравиразведку и магниторазведку.

Библиография

1. Доброхотова И.А., Новиков К.В. Электроразведка. Учебное пособие для студентов заочного обучения. - М.: РГГРУ, 2009.
2. Лобанов А.М. Гравиразведка. Краткий курс. / Учебное пособие для студентов геологических специальностей. - М.: 2017 г. - 78 с.
3. Морозов О.Л. Геологическое строение и тектоническая эволюция Центральной Чукотки – М.: ГЕОС, 2001. – 201 с.
4. Новиков К.В., Романов В.В. Выбор комплекса геофизических методов при поисках месторождений полезных ископаемых / Методическое руководство к курсовому проекту по разведочной геофизике – М.: 2015.

Физико-геологическая модель (ФГМ) участка археологических работ с остатками архитектурных сооружений 18 века в селе Кистыш Суздальского района

Петропавловский Д.А. (МГРИ, cool.denis59@yandex.ru),*
Новиков П.В. (МГРИ, novikovpv@mgri.ru)

Аннотация

Для обнаружения остатков архитектурных сооружений 18 века в селе Кистыш Суздальского района ранее применялся метод магниторазведки. Магниторазведка проводилась путём измерения модуля полного вектора индукции магнитного поля квантовыми магнитометрами. Вариации магнитного поля корректировались с помощью магнитовариационной станции. Разметка планшетов и привязка измерений проводились с использованием дифференциальной системы спутникового позиционирования. По результатам работ была построена физико-геологическая модель и разработан комплекс геофизических методов для дальнейших поисков в суздальском районе.

Ключевые слова

Археология, магниторазведка, электроразведка, гравиразведка, комплекс геофизических методов

Источники финансирования

Исследование выполнялось с использованием приборной базы Центра коллективного пользования при ИА РАН (г. Москва).

Теория

Район работ находится в северно-западной части Владимирского ополья. Покровные лёссовидные суглинки Владимирского ополья представляют собой пластообразную залежь выдержанной мощности (в среднем 3–5, в понижениях до 7 м), перекрывающую все формы рельефа По геологической классификации покровные суглинки выделяются как глинистые алевриты. Средний гранулометрический состав характеризуется содержанием физической глины в пределах 52-65%. Преобладающией фракцией является крупная пыль. Её содержание колеблется от 29 до 47%. Содержание илистых частиц изменяется в пределах от 26 до 34 %. Содержание песка крайне незначительно и составляет в среднем 2% [4].

В рельефе выражены признаки хозяйственной активности, в первую очередь – ямы диаметром несколько метров. Помимо, осложнённого рельефа, в результате съёмки выявилось большое количество аномалий от железосодержащих предметов (аномалии значительной, до 100 и более нТл, амплитуды с ярко выраженным отрицательным полюсом), что интерпретируется как следы хозяйственной активности.

В результате полевых работ архитектурных сооружений 18 века обнаружено не было, поэтому, было принято решение о создании ФГМ объекта поисков. На участке работ ожидалось найти кирпичный фундамент усадьбы размерами 10×10 метров. Размер стенок фундамента предполагается 0.48 м в ширину и 0.65 м в глубину.

В таблице 1 представлены петрофизические свойства горных пород, составляющих разрез [1-3, 5].

Таблица 2. Физические свойства горных пород

• **Разности пород**	• **æ,10^{-5} ед. СИ**	• **σ, г/см^3**	• **ρ, Ом*м**
• Кирпич	• 1500	• 1.8	• ≈10000

• Вмещающие породы (Суглинки)	• 20	• 1.5	• 100

По петрофизическим свойствам построена петрофизическая модель фундамента (Рисунок 1).

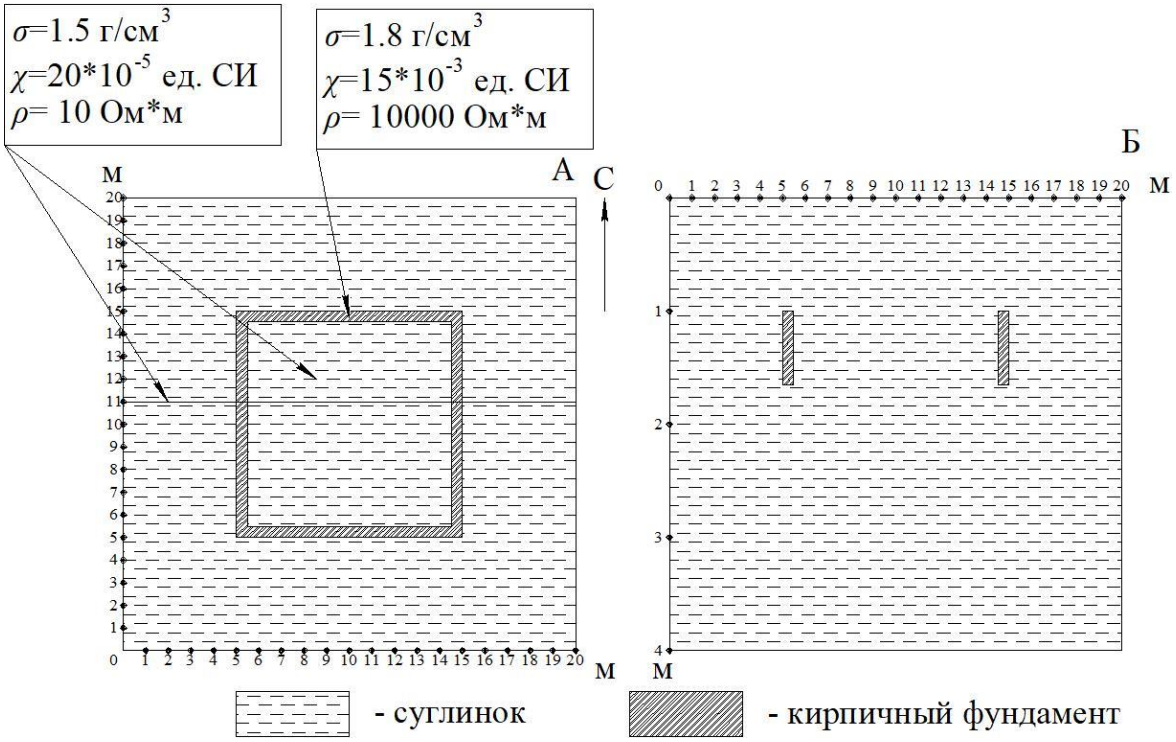


Рисунок 1. Петрофизическая модель фундамента
А – Горизонтальная проекция
Б – Разрез по профилю 11

Из петрофизических свойств горных пород выделяется резкая контрастность по плотности, магнитной восприимчивости и удельному электрическому сопротивлению.

По петрофизической модели была сформирована и построена физико-геологическая модель. За основу модели взяты разрезы по профилю 11, чтобы найти граничные условия обнаружения аномалий.

На рисунке 2 представлена ФГМ со смоделированными магнитным и гравитационным полем на профиле 11.

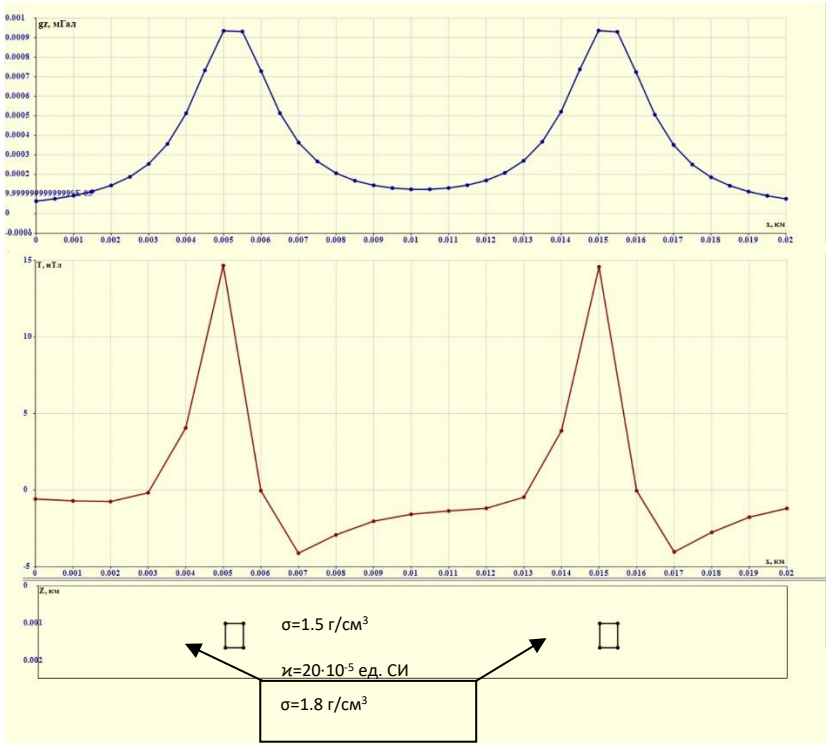


Рисунок 2. Физико-геологическая модель

На рисунке 3 представлен геоэлектрический разрез, построенный по результатам моделирования метода электротомографии.

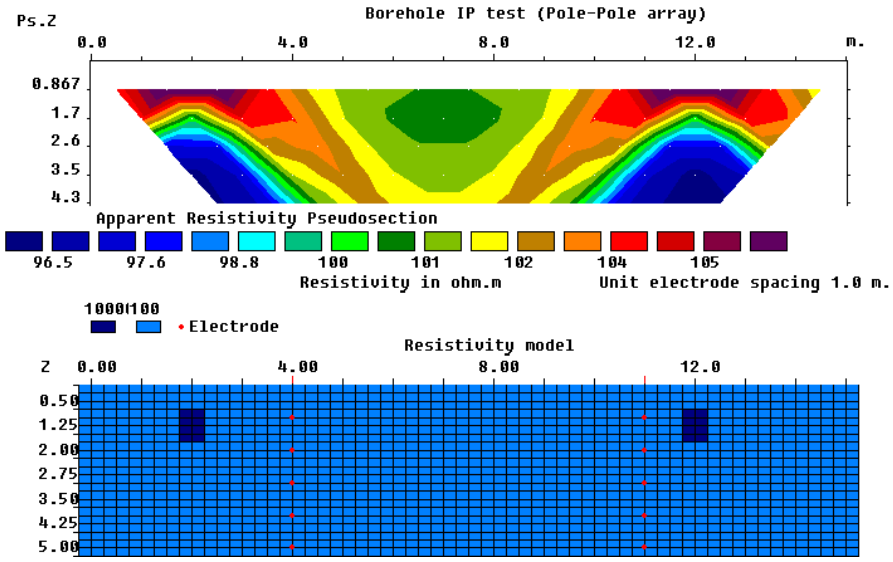


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез

В результате построения физико-геологической модели месторождения с применением гравиразведки и магниторазведки наблюдаются положительные аномалии гравитационного и магнитного поля над фундаментом усадьбы, но гравитационная аномалия слишком мала, чтобы обнаружить её в реальных условиях. На полученном геоэлектрическом разрезе мы видим уверенное выделение остатков фундамента методом электротомографии.

Выводы

Построенная физико-геологическая модель позволила исключить метод, который не подходит для данного вида работ. Комплекс геофизических методов, включающий магниторазведку и электротомографию подходит для поисков археологических объектов в данном районе работ. При дальнейших исследованиях будут проведены расчёты, позволяющие оценить диапазон параметров искомых объектов, которые можно обнаружить данными методами.

Библиография

1. Бессонова Е. А., Зверев С. А., Харченко Т. А., Саттарова В. В., Теличко А. С. Геомагнитные исследования средневековых печей для обжига строительной керамики // Мультидисциплинарные исследования в археологии. 2018. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geomagnitnye-issledovaniya-srednevekovyh-pechey-dlya-obzhiga-stroitelnoy-keramiki (дата обращения: 10.12.2024).
2. Иванов А.А., Новиков К.В., Новиков П.В. Электроразведка: учебное пособие - М.: МГРИ, 2019. - 80 с.
3. Лобанов А.М. Гравиразведка. Краткий курс. М. 2017. С 78.
4. Макеев А. О. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПАЛЕОПОЧВЫ ЛЁССОВЫХ ВОДОРАЗДЕЛОВ РУССКОЙ РАВНИНЫ. М.: Молнет, 2012. – 260 с.+цв. Вклейка 40 с.
5. Новиков К.В. Магниторазведка. Часть 1. / Учебное пособие для студентов геофизической специальности. - М., 2013 г.

Опыт применения электротомографии и дифференциальной магнитометрии на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая

Степанов С.В.* (МГРИ, stepanchuk.sidorov@mail.ru),
Гурьев В.А. (ФГБУ «ЦНИГРИ», gurevva@ya.ru),
Абрамов В.Ю. (МГРИ, geophy-rudn@mail.ru)

Аннотация

Несмотря на высокий уровень развития современных геофизических технологий в области аппаратуры и программного обеспечения на текущий момент поиск и разведка полиметаллических месторождений на территории Рудного Алтая существенно осложнены тем, что современные объекты исследования слабоконтрастны: из-за пострудных наложенных изменений петрофизические свойства искомого рудного объекта не имеют существенных отличий от вмещающих горных пород, а сам объект локализуется в областях тектонических контактов или развития геологических формаций с существенно разными петрофизическими свойствами, создающими высокоградиентные зоны изменения физических полей, диапазон которых превышает аномальный эффект от рудного объекта, также объект может быть перекрыт экранирующими формациями горных пород с весьма сложным распределением петрофизических характеристик [1, 2].

Летом 2024 года сотрудниками полевой геофизической партии №20 ФГБУ «ЦНИГРИ» на территории Ремовского рудного поля Золотушинского рудного района российской части Рудного Алтая [3] в рамках опытно-методических работ были проведены исследования методами электротомографии с многоэлектродной электроразведочной аппаратурой «Скала 64К15Е» [5, 7] и дифференциальной магнитометрии с регистрацией вертикального градиента магнитного поля с оверхаузеровским магнитометром-градиентометром MMPOS-2 [4] для подбора оптимального комплекса геофизических методов разведки при работе на слабоконтрастных (в геофизическом плане) объектах. Топогеодезическое обеспечение выполнялось при помощи ГНСС-приёмника Javad Triumph-1 [6].

Ключевые слова

Геофизика, электроразведка, электротомография, магниторазведка

Теория

Ремовское рудное поле (Рисунок 1, выделено голубым контуром) расположено в СЗ борту Золотушинской депрессии, осложняющей ЮЗ крыло крупной структуры I порядка – Алейское поднятие, которое приурочено к Рудно-Алтайскому тектоническому блоку Алтае-Саянской складчатой системы. Алейское поднятие протягивается с СЗ на ЮВ более чем на 200 км и осложнено серией более мелких складок. Золотушинская депрессия с размерами 70×40 км имеет изометрическую форму, вытянутую в СЗ направлении. Внутренняя структура депрессии – это сложное сочетание складчатых, разрывных и вулканотектонических элементов [3].

Ремовское рудное поле сложено вулканогенно-осадочными и вулканогенными горными породами кислого, среднего и основного составов. Преобладают продукты кислого вулканизма калиевого и калий-натриевого профиля. Широко развиты субвулканические тела риолитов, лавы, потоки риолитов. Пирокластические горные породы представлены туфами, туффитами, тефроидами, осадочные – известковистыми, кремнистыми алевролитами, алевропелитами, реже песчаниками и известняками [3].

К рудоносным формациям приурочены два стратиграфических рудоносных уровня полиметаллического оруденения – верхний (поздний живет-фран: базальт-риолитовая,

кремнисто-терригенная калиево-натриевая формация) и нижний (эмс-эйфель-ранней-живет: базальтсодержащая риолитовая известково-кремнисто-терригенная, калиевая формация) [3].

Рудные объекты, как правило, локализованы в стратифицированных отложениях девона. Оруденение сульфидное полиметаллическое: сплошное и вкрапленное, почти всегда согласно залегает с вмещающими горными породами. Основные рудные минералы: сфалерит, галенит, халькопирит, пирит, барит. Промышленные ценные элементы: Zn, Cu, Pb, Cd, Au, Ag и др. [3].

Дифференциальная магнитометрия с регистрацией вертикального градиента магнитного поля выполнялась в соответствии с «Инструкцией по магниторазведке» 1981 г. по одному из буровых профилей (Рисунки 1 и 2) с шагом 10 м.

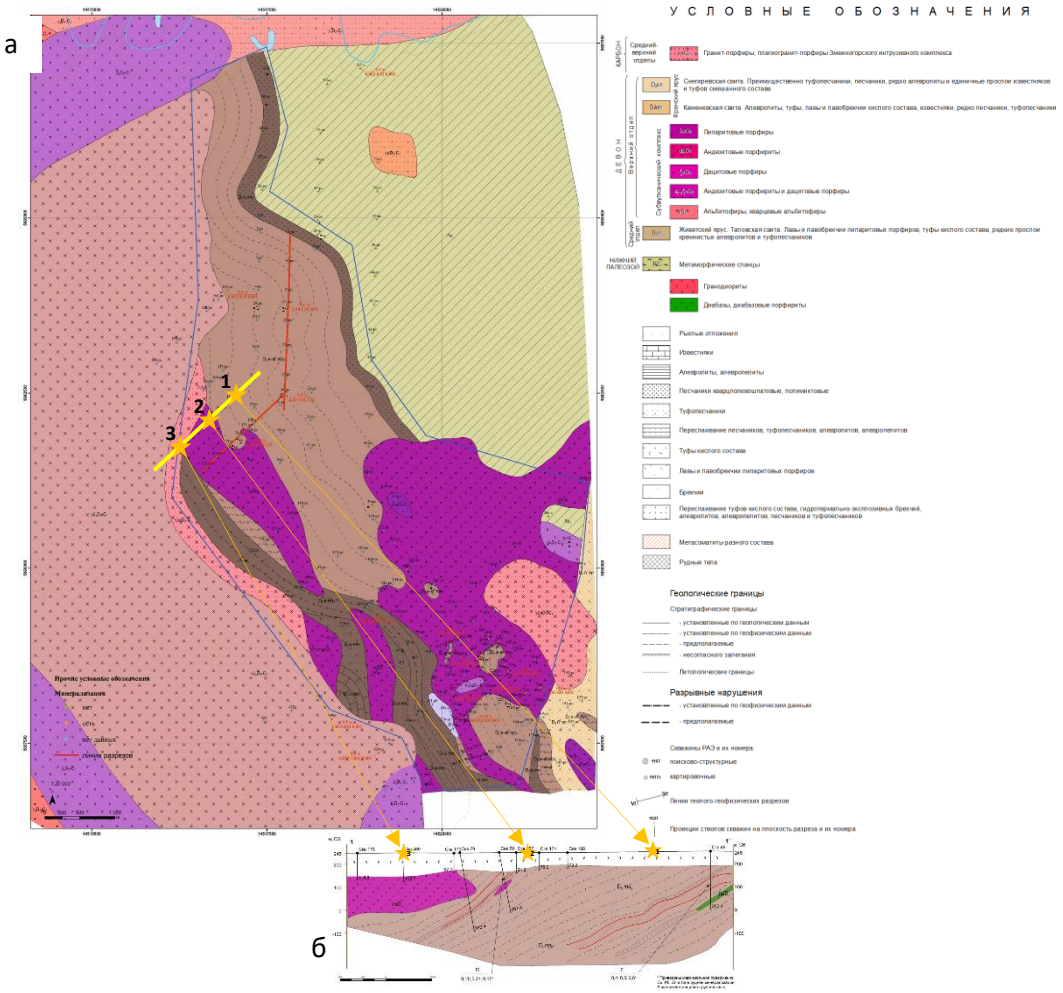


Рисунок 1. Расположение профиля (жёлтый) полевых геофизических опытно-методических работ на геологической карте (а) Ремовского рудного поля и геологический разрез по этому профилю (б). Центры расстановок электротомографии показаны оранжевым, зоны рудной минерализации на разрезе выделены красным



Рисунок 2. Процесс полевых геофизических работ методами:
а – дифференциальной магнитометрии при помощи градиентометра MMPOS-2
с высокоточным топогеодезическим обеспечением на базе ГНСС Javad Triumph-1,
б – электротомографии при помощи электроразведочной аппаратуры «Скала 64К15Е»

Электротомография на переменном электрическом токе с регистрацией процесса вызванной поляризации (ЭТ-ВП) выполнялась по тому же буровому профилю, что и дифференциальная магнитометрия (Рисунки 1 и 2). Было использовано два типа электроразведочных установок: Шлюмберже (Рисунок 3а) и осевая дипольная (Рисунок 3б). Для получения единого геоэлектрического разреза вдоль всего профиля была использована методика продолжающего профиля (Рисунок 3в).

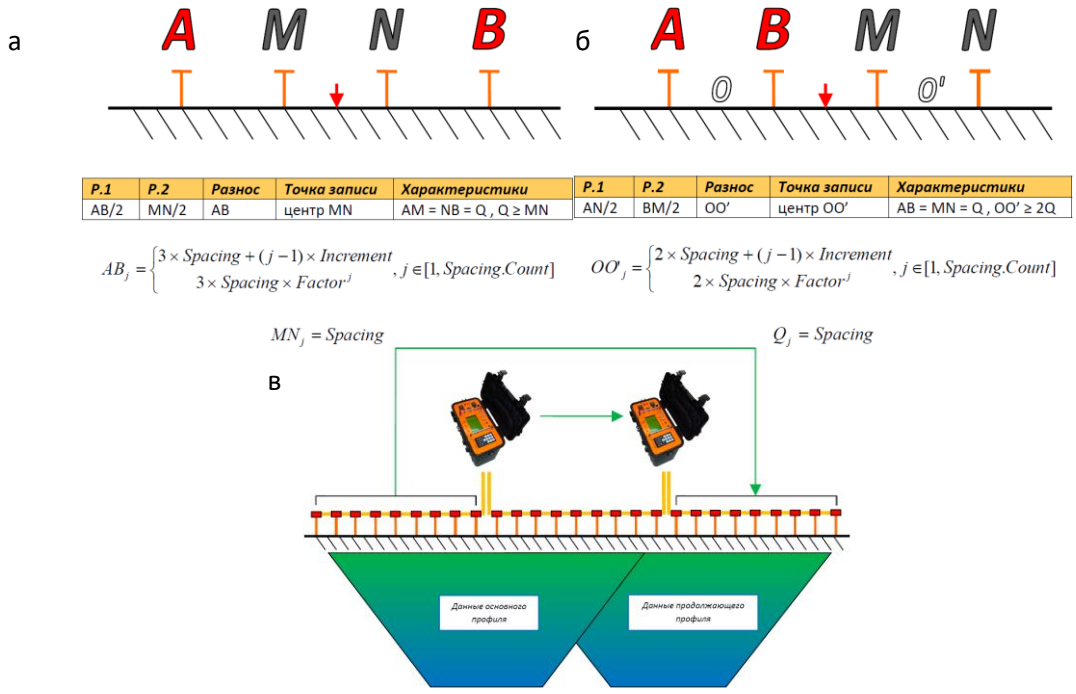


Рисунок 3. Методика полевых работ ЭТ-ВП: а – установка Шлюмберже,
б – осевая дипольная установка (отрезок OO’ соединяет центры питающего AB и измерительного MN диполей), в – схема продолжающего профиля с переносами первого кабеля предыдущей расстановки на место второго в следующей

Пример обработки результатов ЭТ-ВП, которая проводилась в разрабатываемом КБ «Электрометрии» программном обеспечении (ПО) Xeris [7], показан на рисунке 4.

а

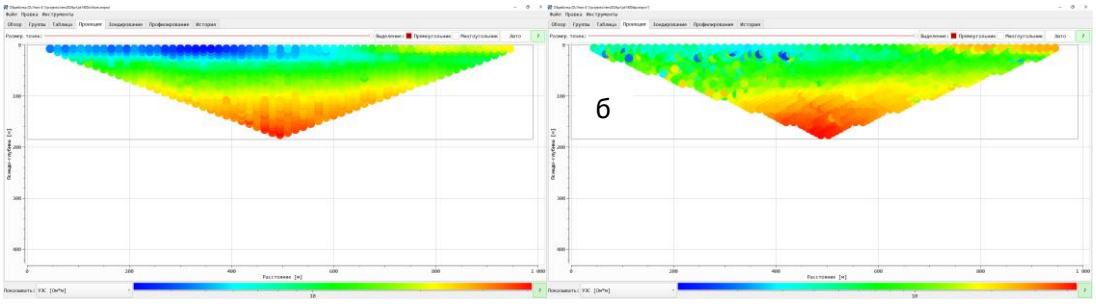


Рисунок 4. Геоэлектрический разрез ЭП-ВП с центром в т. 3 в ПО Xeris:
а – для установки Шлюмберже, б – для осевой дипольной установки

Выводы

Подбор оптимального комплекса геофизических методов разведки при решении современных задач поисковой геологии является наиболее актуальным в нынешнее время при работе на слабоконтрастных (в геофизическом плане) рудных объектах. Необходимо накопление большого количества результатов полевых геофизических работ с использованием разных методик исследования на разнообразных геологических объектах, а также обработка этих результатов в современном программном обеспечении с последующей итоговой комплексной интерпретацией. Результаты полевых опытно-методических работ 2024 года показали необходимость дальнейшего применения дифференциальной магнитометрии и ЭТ-ВП на рудных объектах.

Библиография

1. Гурьев В.А., Мишенин С.Г., Зюзин Ю.М., Утюпин Ю.В., Субботин П.А. Вертикальная магнитная градиентометрия на месторождениях полиметаллических руд. Материалы Всероссийского симпозиума «Магнитные измерения: новые разработки и их метрологическое обеспечение». СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2025.

2. Мишенин С.Г., Гурьев В.А., Зюзин Ю.М., Утюпин Ю.В., Редько А.Г. Развитие комплексов геофизических работ при изучении слабоконтрастных полиметаллических месторождений. Материалы II Научно-практической конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии». М.: ВИМС им. Н.М. Федоровского, 2024.

3. Кузнецов В.В., Кудрявцева Н.Г., Серавина Т.В. и др. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. М.: ЦНИГРИ, 2019. – 208 с.

4. НИЛ Квантовой магнитометрии. Физико-технологический институт. Уральский федеральный университет [Электронный ресурс]. URL: https://fizteh.urfu.ru/magnetometer/ (дата обращения: 29.04.2025).

5. Скала 64К15Е. Конструкторское Бюро Электрометрии [Электронный ресурс]. URL: https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/ (дата обращения: 29.04.2025).

6. Triumph-1M. Javad GNSS [Электронный ресурс]. URL: https://www.javad.com/ (дата обращения: 29.04.2025).

7. XERIS (Cross-Platform Electrical Resistivity Imaging Software) [Электронный ресурс]. URL: https://nemfis.ru/stuff/xeris/XerisRus.html (дата обращения: 29.04.2025).

Результаты электроразведочных работ для выделения песчано-гравийных отложений на участке Смоленской области

Такиев Т.А.* (МГРИ, t.timur271@gmail.com),
Абрамов В.Ю. (МГРИ, geophy-rudn@mail.ru)

Аннотация

Электромагнитные методы зондирования используются при глубинных и структурных исследованиях, поисках полезных ископаемых. Выполнение электроразведочных работ методом вертикального электрического зондирования в пределах участка позволяет выделить границы распространения и мощности песчано-гравийных отложений.

Ключевые слова

Вертикальное электрическое зондирование, вызванная поляризация, песчано-гравийные отложения

Теория

Электроразведка объединяет физические методы исследования геосфер Земли, поисков и разведки полезных ископаемых, основанные на изучении электрических и электромагнитных полей, существующих на Земле в силу естественных, космических, атмосферных, физико-химических процессов, либо созданных искусственно. Сущность электроразведки заключается в изучении зависимости электромагнитного поля, естественного или искусственного, от электрических (а иногда и магнитных) свойств среды, на которое поле воздействует [1].

Целью работ являлось определение границ распространения и мощности песчано-гравийных отложений (ПГО), для достижения поставленной задачи выбран метод вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП).

Зондирование – это изучение геоэлектрического разреза по вертикали, то есть на глубину. Метод, при котором проводятся многократные измерения с четырехэлектродной симметричной установкой при возрастающей расстоянии между питающими заземлениями и постоянном положении ее центра называется методом вертикального электрического зондирования [2].

При проведении измерений использовалась четырехэлектродная симметричная установка Шлюмберже AMNB. Разносы питающей линии AB/2: 1,5-100м, приемные линии – 1 и 10 м , что обеспечило заданную глубину изучению разреза.

Измерения напряжения проводилось на переменной токе, на частотах 0.6 и 4.88 ГЦ. Для определения вызванной поляризации использовалась методика фазово-частотных измерений.

Для создания тока в питающий линии использовался портативный генератор «АСТРА-100» производства ООО «Северо-Запад» (Рисунок 1 – *а*).

Электроразведочный генератор «АСТРА-100» используется для создания электромагнитного поля при проведении геофизических работ методами постоянного тока, вызванной поляризации, частотного зондирования и другими методами. В качестве внешнего источника питания используется аккумуляторная батарея с выходным напряжением 12 В.

Для измерения напряжения и фазового параметра ВП использовался электроразведочный измеритель «МЭРИ-Смарт» производства ООО «Северо-Запад» (Рисунок 1 – *б*).



а *б*

Рисунок 1. *а* - Портативный генератор «АСТРА-100»; *б* - электроразведочный измеритель «МЭРИ-Смарт»

Основная цель обработки данных ВЭЗ-ВП заключается в пересчете полученных значений разности потенциалов на приемной линии в кажущееся сопротивление ($\rho_к$) и в пересчете дифференциального фазового параметра в кажущуюся поляризуемость ($\eta_к$).

Для обработки, а также дальнейшей интерпретации данных ВЭЗ-ВП, использовалась программа IPI2WIN (автор - А.А. Бобачев, МГУ, Москва), в которой были построены кривые $\rho_к$ и кривые $\eta_к$ в зависимости от разноса.

Программа позволяет устранить «ворота» на кривых, появление которых связано с переходом с малой линии MN на большую. На данном объекте «ворота» на кривых кажущегося сопротивления устранялись путем приведения левого сегмента кривой (измерения на MN 1 м) к правому сегменту (измерения на MN 10 м). «Ворота» на кривых кажущейся поляризуемости устранялись путем присвоения обеим приемным линиям значений с большей линии MN (Рисунок 2). [3]

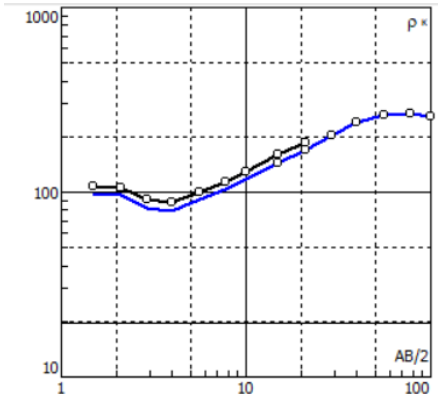


Рисунок 2. Пример устранения «ворот» на кривой кажущегося сопротивления

Общий объем измерений составил 90 ф.т.н. Среднее расстояние между точками наблюдений составило 150-200 м. Поисковые глубины 20-40 м. Учитывая, что шаг между точками ВЭЗ-ВП в несколько раз превышает глубинность зондирований, можно отнести данные работы к типу поисковых. Для проведения оценочных или разведочных работ необходимо сгустить шаг наблюдений до 10-20 м

Первый результат – карта кажущихся сопротивлений ($\rho_к$) на разносах 10 и 15м (Рисунок

3). Ценность этих карт состоит в том, что это первичный результат, в котором нет участия интерпретатора.

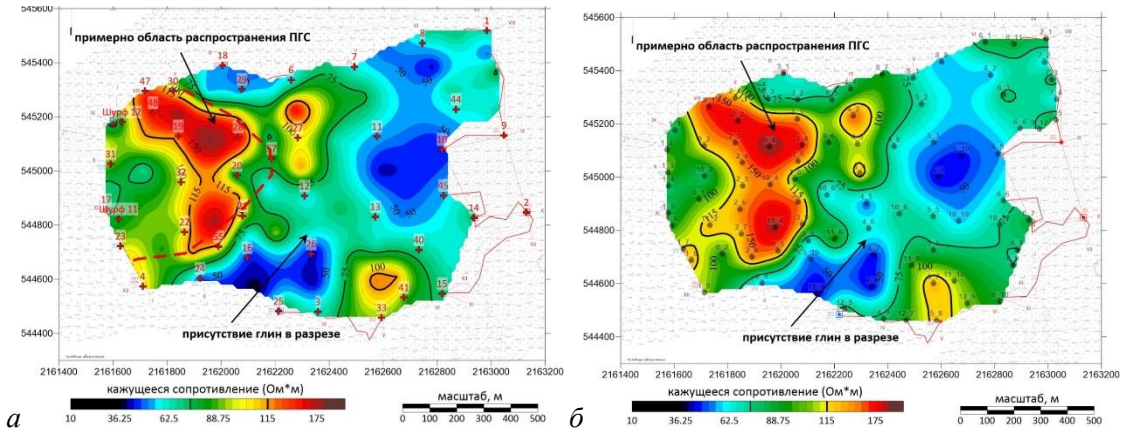


Рисунок 3. Карты кажущихся сопротивлений на разносах, *а* – 10м, *б* – 15м

Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП проводилась в ручном режиме в программе IPI2WIN (Рисунок 4). Результатом интерпретации является геоэлектрический разрез (Рисунок 5).

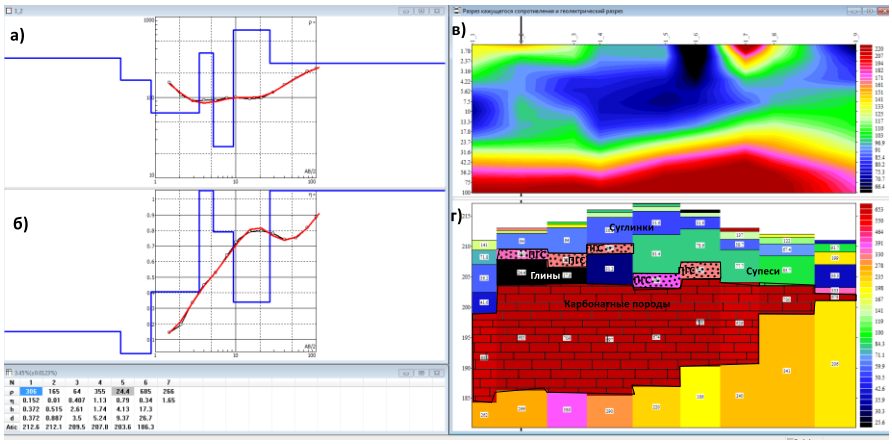


Рисунок 4. Результат интерпретации кривых ВЭЗ-ВП. Профиль № 1. а - подбор кривой кажущегося сопротивления; б - подбор кривой кажущейся поляризуемости; в - псевдоразрез кажущегося сопротивления; г - модель УЭС по профилю

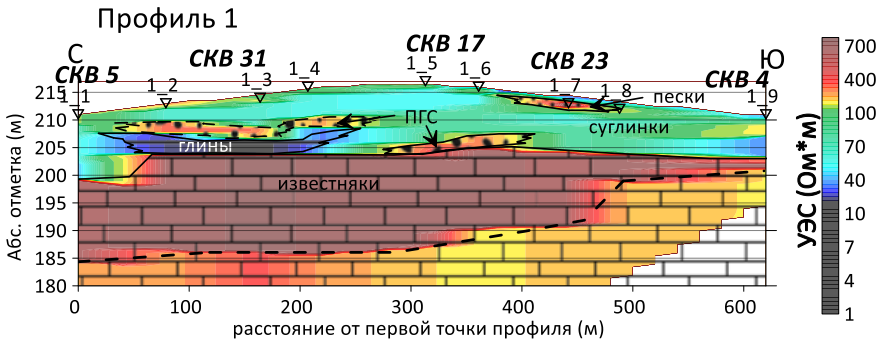


Рисунок 5. Результат интерпретации кривых ВЭЗ-ВП. Профиль № 1

В основании разреза повсеместно залегает высокоомные породы (темно-коричневый цвет на геолого-геофизических разрезах). Исходя из результатов бурения, мы предполагаем, что это горизонт плотных известняков. Удельное сопротивление карбонатных пород высокое. Однозначно определить УЭС пород, не выходящих на поверхность, мы не можем, но по результатам подбора оно составляет примерно 700 Ом·м. Это говорит о высокой плотности, низкой пористости известняков. В результате интерпретации была получена карта распределения мощности песчано-гравийных смесей (ПГС) (Рисунок 6).[4]

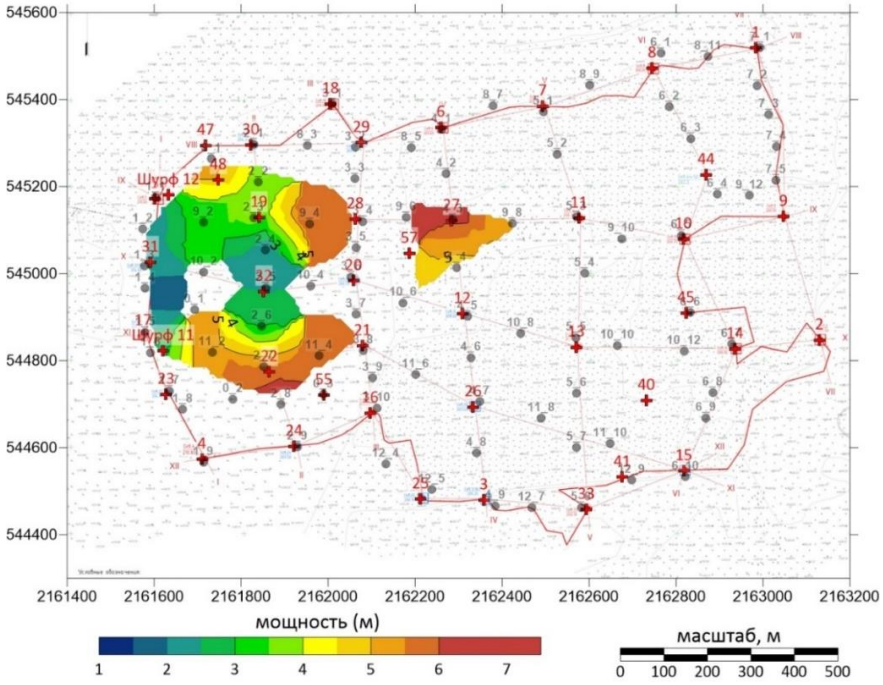


Рисунок 6. Мощность горизонта ПГС

Выводы

Полученные в ходе работ данные позволили выполнить интерпретацию и получить сведения о залегании ПГС на участке Смоленской области. На участке проведения работ песчано-валунно-гравийные отложения выявлены только в западной части площади работ. Вероятно, горизонт ПГС не сплошной, а представлен несколькими разделенными пластами. Мощность их изменяется от 1.5 до 6м. На западной границе, мощности ПГС минимальны, а максимальны на южной и западной частях залежи. На некоторых точках слой ПГС сливается с нижележащим горизонтом высокого сопротивления и оценки могут быть ошибочны.

Библиография

1. Геофизика: учебник, под ред. Хмелевского В.К., 4-е издание / В. А. Богословский, Ю. И. Горбачев, А. Д. Жигалин и др., КДУ Москва, – 2015. – С. 320.

2. Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка, Л.: Недра. – 1984. – С.352

3. Практикум по интерпретации ВЭЗ И.А. Доброхотова, К.В.Новиков М.: РГГРУ, 2009. – С.

4. Геофизика. учебник / В. И. Костицын, В. К. Хмелевской; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – 428 с.

Геофизические методы исследований скважин Дунаевского месторождения с целью выделения пластов-коллекторов и оценки их фильтрационно-емкостных свойств

Толстикова Е.С. (МГРИ, elena.tolstikova.02@mail.ru),*
Посеренин А.И. (МГРИ, posereninai@mgri.ru)

Аннотация

В настоящее время основным направлением развития экономики России является минерально-сырьевая база, которая в основном представлена углеводородным сырьем, таким как нефть, газ и конденсат. Экономика страны в большой степени зависит от объемов добычи, углеводородных ресурсов. На сегодняшний день при разработке месторождений широко разрабатываются трудноизвлекаемые и высокообводненные запасы нефти и газа.

Трудноизвлекаемое месторождение Дунаевское открыто в 1985 году. В промышленную эксплуатацию введено в 1987 году. До 1990 года разработка велась согласно технологической схеме, в которой предусматривалось выделение трех самостоятельных объектов – залежей нефти пластов АС $_{7-8}$, 1Б$_{10}$ и БС $_{18}$ [4].

Перспектива Дунаевского месторождения всегда была обозначена довольно четко. И внедрения новых методов, и применения современного оборудования, готовы продлить жизнь этой подземной кладовой еще на долгие годы жизни.

Ключевые слова

Дунаевское месторождение, геофизические исследования скважин, пласт-коллектор, фильтрационно-емкостные свойства

Теория

Дунаевское месторождение расположено в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа - Югры Тюменской области, в 35 км севернее г. Сургута (Рисунок 1).

Район работ представляет собой слабо пересеченную, сильно заболоченную, неравномерно залесенную равнину, приуроченную к широтному течению реки Обь. Район относится к слабонаселенным.

По начальным извлекаемым запасам месторождение относится к категории мелких, а по геологическому строению – к сложным.

В геологическом строении площади Дунаевского месторождения принимают участие отложения доюрского комплекса (палеозойский фундамент, промежуточные отложения пермо-триасового комплекса) и отложения мезозойско-кайнозойского осадочного чехла.

Основные задачи комплекса геофизических исследования – выделение коллекторов, оценка коллекторских свойств, определение характера их насыщения и подсчет запасов углеводородов.

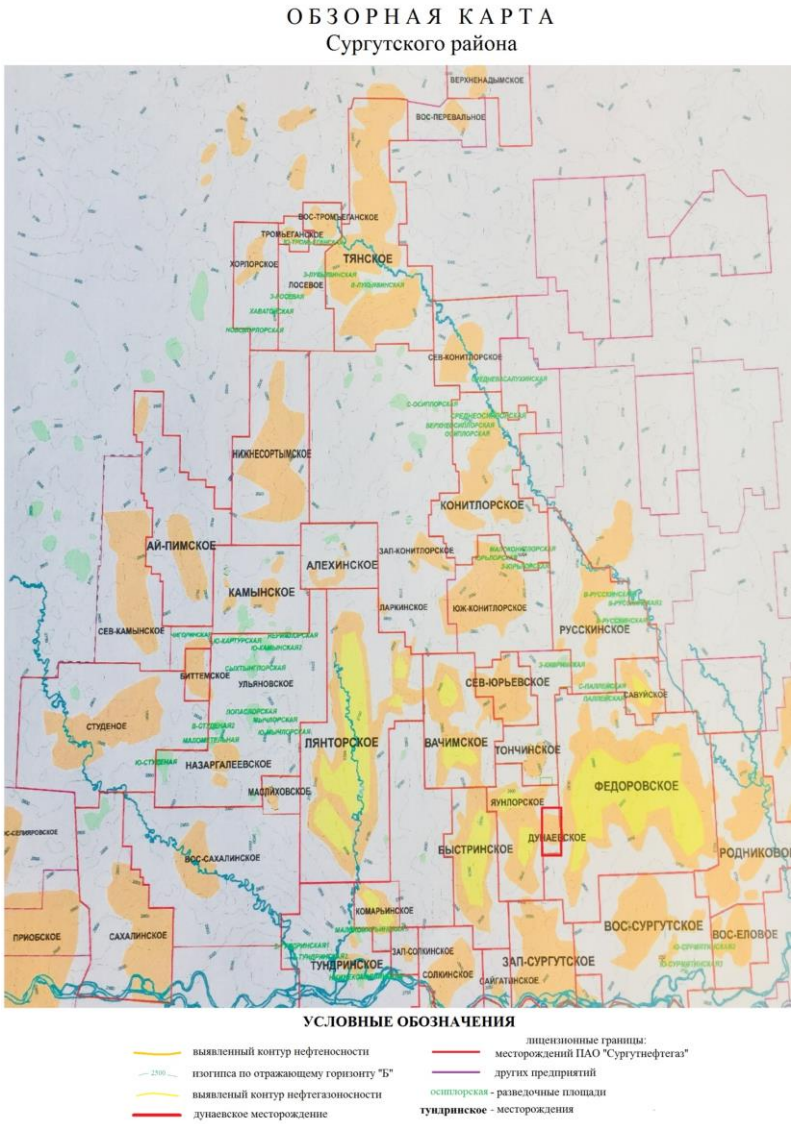


Рисунок 1. Обзорная карта Сургутского района

При литологическом расчленении разреза, построении литологической колонки используется комплекс геофизических исследований скважин, включающий следующие виды работ: БКЗ, ПС, ИК, БК, АК, ГК.

На этапе разведки и разработки на Дунаевском месторождении применялись следующие комплексы геофизических методов исследования скважин:

1) комплекс для поисковых, оценочных, разведочных и вертикальных эксплуатационных скважин;
2) комплекс для горизонтальных скважин;
3) комплекс для контроля за разработкой;
4) комплекс для наклонно-направленных скважин.

При бурении поисково-разведочных и эксплуатационных скважин на этапе доразведки и эксплуатации Дунаевского месторождения необходимо решать широкий спектр геологических, геофизических и промысловых задач. Для решения этих задач необходимо спроектировать комплекс ГИС, который позволил бы надежно определить геофизические параметры и свойства

продуктивных пластов, в полном объеме провести контроль разработки продуктивных пластов и устранить недостатки предыдущего комплекса.

В связи с поставленными задачами был предложен в разных масштабах комплекс геофизических исследований для открытого ствола разведочных и эксплуатационных скважин: ИК, ГК, НКТ, АК, ГГК-П, МБК, МКЗ, ИННК, кавернометрия, резистивиметрия.

При исследовании наклонно-направленных скважин из вышеупомянутого комплекса исключаются некоторые геофизические методы, проведение которых в данных типах скважин невозможно или проблематично, а именно МБК, МКЗ, ГГК-П, АК.

Классические методы каротажа затруднительны. Привлечение дополнительно новых методов ГИС – ЯМК и СГК позволит повысить точность определения геофизических параметров, уточнить петрофизические модели, увеличить надежность определения коллекторских свойств пород.

ЯМК – ядерно-магнитный каротаж, основанный на эффекте ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Ядерно-магнитный резонанс связан с физическим эффектом, заключающимся в реакции ядер на внешнее магнитное поле [3].

В пластах с углеводородами ЯМК показывает заниженные значения сопротивления по отношению к сопротивлению, определенному по ИК [2]. Это обстоятельство может быть использовано в качестве признака продуктивного пласта (Рисунок 2).

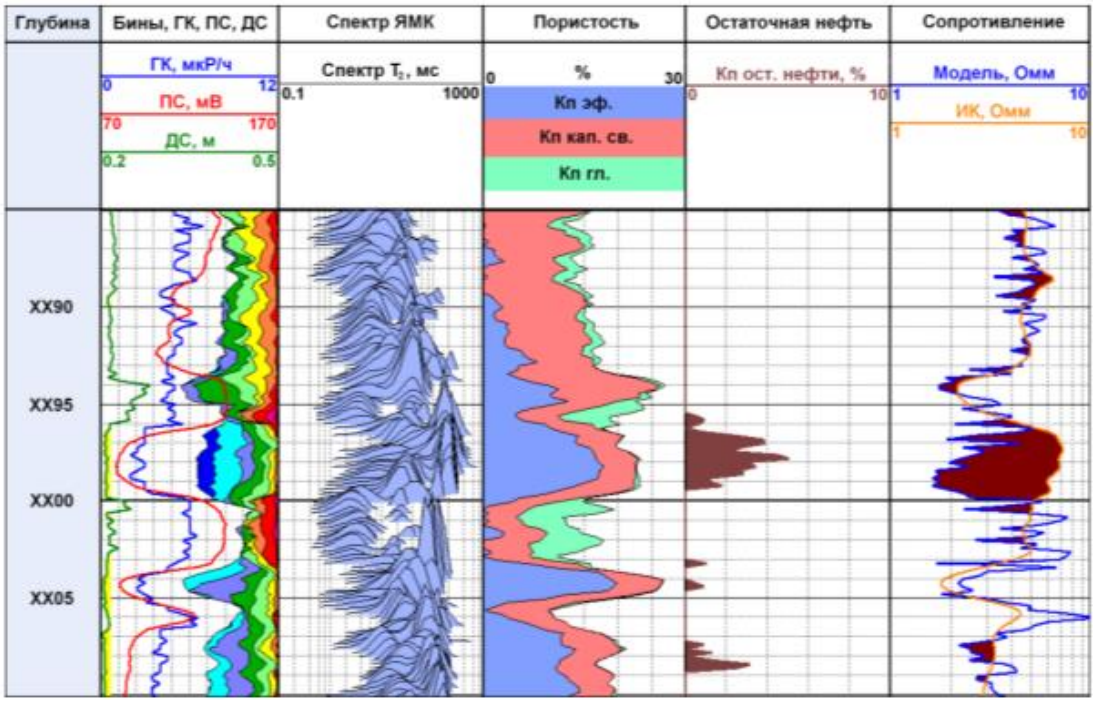


Рисунок 2. Пример выделения нефтенасыщенного пласта при расхождении результатов определения сопротивления по данным индукционного и ядерно-магнитного каротажей

СГК – спектрометрический гамма-каротаж, основанный на измерении спектрального состава естественного гамма-излучения горных пород с целью определения массовой концентрации в породах урана, тория и калия [1].

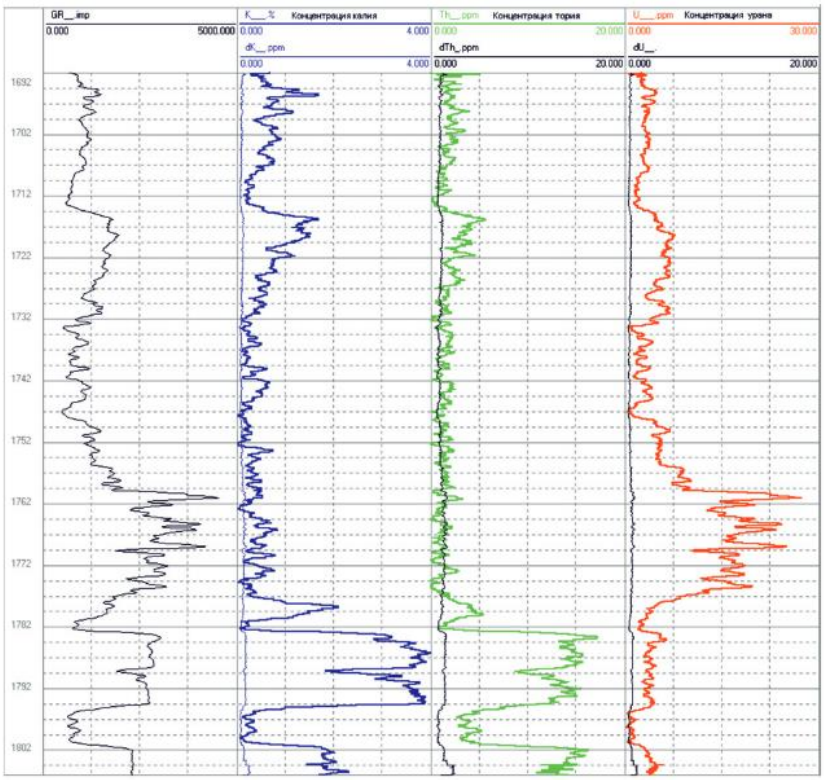


Рисунок 3. Результаты спектрометрического гамма каротажа

Выводы

В связи с необходимостью решения геолого-геофизических и промысловых задач на этапе доразведки и эксплуатации месторождения, спроектирован комплекс ГИС, позволяющий решить эти задачи и устранить недостатки предыдущего комплекса ГИС.

Для уточнения решения геологических задач перспективно внедрить в существующий комплекс ГИС методы ЯМК и СГК. Методы позволят с более высокой точностью оценить литологию, выделить коллекторы и определить коллекторские свойства.

Библиография

1. Гершанюк В.А., Губина А.И. Ядерная геофизика и геофизические методы исследования скважин: учебное пособие; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2021 г. – Ч.1. – 136 с.
2. Зеленов А.С. Технология обработки данных ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле: дис..канд. тех. наук: 25.00.10. – Тверь, 2016. – 117 с.
3. Мараев И.А. Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Учебное пособие. - М.; 2013. – 95 с.
4. Матвеев Н.Н. Выбор оптимальной системы разработки объекта ЮС1 Дунаевского месторождения с учетом геологического строения / Всероссийское образовательно-просветительское издание «Альманах педагога» 10.06.2019 г.

Опыт применения метода георадилокации для определения толщины насыпного слоя и выявления зон разуплотнения грунта в теле железнодорожной насыпи

Трюхан П.Е. (МГРИ, truhan137@gmail.com),*
Матюшенко А.А. (МГРИ, matiushenkoaa@mgri.ru)

Аннотация

Метод георадиолокации широко применяется в инженерной геофизике. В данной статье будет рассмотрено использование этого метода для определения толщины насыпного слоя и выявления зон разуплотнения грунта в теле железнодорожной насыпи на примере участка БАМ (Северобайкальск в 10-18 километрах в сторону села Магистральный). Для решения данной задачи была выбрана именно георадиолокационная сьёмка, потому что среди неразрушающих методов исследования она обеспечивает наибольшую разрешающую способность на небольших глубинах, имеет высокую скорость исследования, имеет хорошую помехозащищенность [1, 2].

Ключевые слова

Георадиолокационная съёмка, инженерная геофизика, железнодорожная насыпь, разуплотнение грунта

Теория

Метод георадиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ сред с разными электрическими свойствами – электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Такими границами раздела в средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами - уровень грунтовых вод, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и осадочными породами [5].

Целью работы являлось определение толщины насыпного слоя и выявление зон разуплотнения грунта в теле железнодорожной насыпи. Модель насыпи, представленная на рисунке 1, состоит из 3 слоёв.

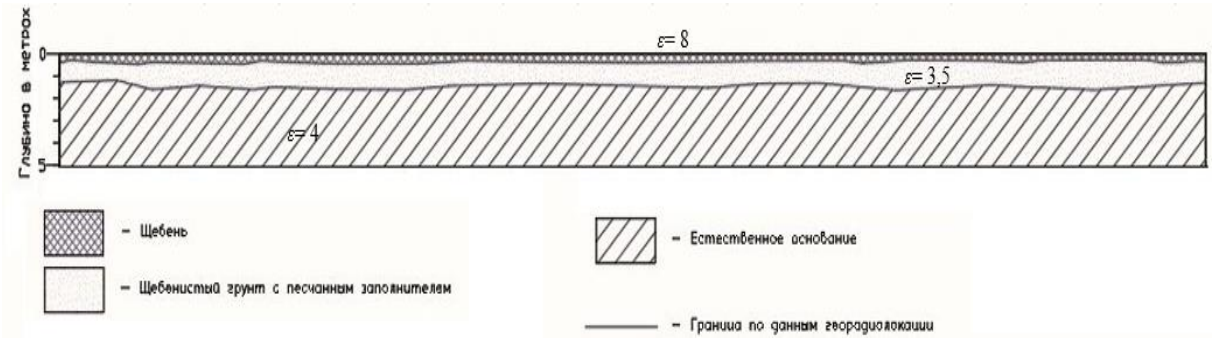


Рисунок 1. Модель железнодорожной насыпи

Первый слой представлен щебенистым грунтом с песчаным заполнителем, располагается на глубине 0,05 - 0,20 м. Отсыпка балластной призмы выполнена на всем участке георадиолокационного исследования, залегает горизонтально, без видимых искажений.

Второй слой представлен породами естественного основания, располагается на глубине 1,35 – 3,15 м.

Третий слой представлен естественными породами (основанием) и располагается на глубине 3,15 – 5 м.

Георадиолокационная съёмка на заданном участке проводилась по системе продольных профилей. Продольные профили располагались по кромке железнодорожной насыпи, по обеим сторонам от железнодорожных путей.

Ввиду участка работ исследования проходили в пешеходном режиме со скоростью перемещения прибора 3-5 км/ч. Измерения проводились георадаром ОКО-3 с одночастотным антенным блоком АБ-250 (Рисунок 2). Преимуществом данного георадара является способность за один проход обеспечить большую глубинность по каналу 250 МГц, а также получить данные для верхней части разреза, что сокращает время выполнения полевых работ.

Обработка георадиолокационных данных заключалась в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. В специализированных программах с помощью различных приёмов преобразования сигнала уровень шума и помех ослабляется или удаляется, а полезный сигнал увеличивается [4]. Пример радарограммы после этапа обработки представлен на рисунке 3. Обработка проводилась в специализированной программе компании производителе георадара и включала в себя такие процедуры как:

- установка «нуля» по сигналу прямого прохождения;
- задание параметров усиления;
- вычитание среднего;
- полосовая фильтрация.



Рисунок 2. Георадар ОКО-3 с антенным блоком АБ-250 Гц

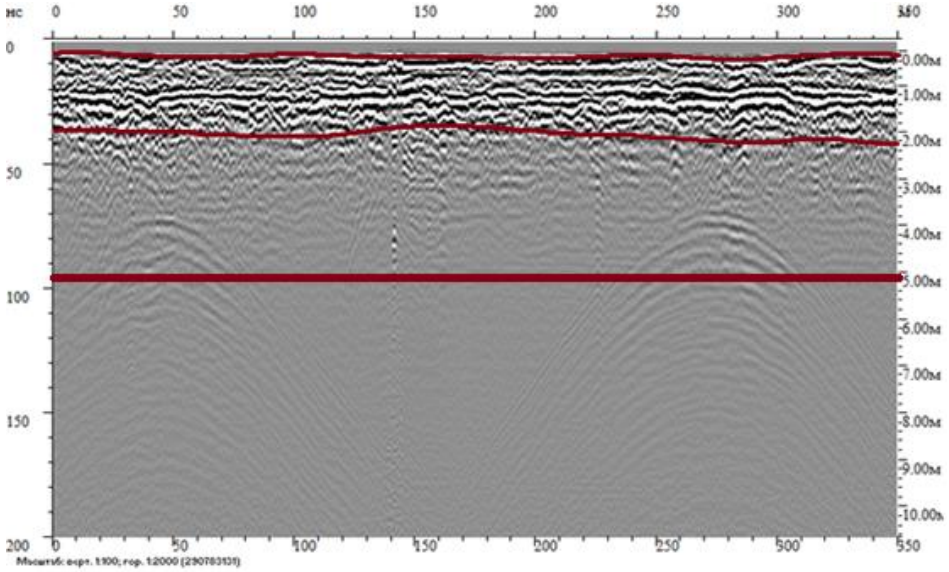


Рисунок 3. Радарограмма после первичной обработки

После этапа обработки на радарограмме хорошо выделяются слои насыпи, видны дифракционные гиперболы второго и третьего слоя.

Следующим этапом является интерпретация георадиолокационной съёмки. Она заключается в преобразовании исходных радарограмм в георадиолокационный разрез [3].

В результате были получены: глубинные разрезы по каждому профилю и рассчитаны толщины слоёв железнодорожной насыпи. На рисунке 4 представлен разрез по профилю с выделенными границами слоёв.

На разрезе видно, что глубина первого слоя выдержана по профилю и составляет 0,05-0,20 м. Мощность второго слоя в начале профиля значительно меньше и составляет 1,5 м, к центру уменьшается до 1,2-1,3 м, а в правой части профиля 1,35 м. Мощность третьего слоя составляет 5 метров.

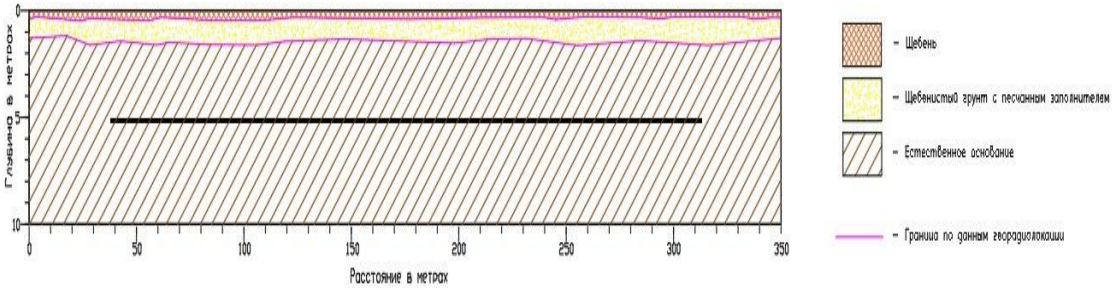


Рисунок 4. Глубинный разрез по второму профилю

Выводы

С помощью георадиолокации удалось выделить границы слоёв железнодорожной насыпи, выявить отсутствие зон разуплотнения в грунте. Для решения подобных задач в дальнейшем предлагается использовать комплекс методов, который включает георадиолокационную съёмку, методы электроразведки и сейсморазведки. Данный комплекс позволит детальнее изучить конструкцию железнодорожной насыпи.

Библиография

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

2. Владов М.Л., Старовойтов А.В., Калашников А.Ю. [2005]. Некоторые вопросы интерпретации георадиолокационных данных при изучении железнодорожных насыпей. Разведка и охрана недр. 2005. 2. 15-18.

3. Вознесенский А., Изюмов С. В., Дручинин С. В. Теория и методы георадиолокации. – Litres, 2017.

4. Калинин А.В, Владов М.Л., Старовойтов А.В., Шалаева Н.В. Высокоразрешающие волновые методы в современной геофизике. Разведка и охрана недр, 2002, № 1, с. 23-27.

5. Матюшенко А.А. Опыт применения метода георадиолакаций для определения конструкции дорожной насыпи. МГРИ, 2020. – 4 с.

Детализационные морские сейсморазведочные работы МОВ ОГТ 2D на Западном лицензионном участке (море Лаптевых) с целью утончения строения ранее выявленных перспективных объектов

Ушаков К.А.* (МГРИ, kostya.ushakov@gmail.com),
Романов В.В (МГРИ, romanovvv@mgri.ru)

Аннотация

Проведение полевых морских сейсморазведочных Работ МОГТ 2D буксируемыми в водном слое сейсмоприемниками в объеме 4300 пог. км (полная номинальная кратность), из них в пределах Западного лицензионного участка 3000 полнократных пог.км. (опционные работы), (основной объем Работ) и 600 полнократных пог.км (опциональные работы);

Выполнение набортной экспресс-обработки получаемых данных, результаты которой планируется использовать для дальнейшей обработки и геолого-геофизической интерпретации, с целью получения представительных геофизических данных для детализации строения и комплексного геологического изучения, ранее выявленных перспективных объектов в толще палеозой-мезозойских отложений и выявления новых объектов.

Ключевые слова

Методика, Сбор сейсмических данных на профиле

Теория

Учебный участок находится в северо-западной части моря Лаптевых в непосредственной близости с горным массивом Бырранга п-ова Таймыр (Рисунок.1.). В тектоническом отношении участок недр находится в пределах Восточно-Таймырской моноклинали, в зоне сочленения с Евразийским океаническим бассейном. Преобладающие глубины моря в Районе Работ 50-100 м, с резким увеличением глубины моря до 600 м в северно-восточной части участка. Глубина залегания кровли акустического фундамента до 12000 м. Целевые интервалы разреза находятся в интервале глубин 400-8000 м. Нефтегазоперспективные объекты приурочены к серии куполовидных и брахиантиклинальных складок, чаще к литологически и тектонически экранированным.



Рисунок 1. Обзорная схема района работ

Морские работы МОВ ОГТ 2D выполняются по фланговой системе наблюдений. Сейсмическое судно следует по предоставленной Заказчиком сети проектных профилей в пределах лицензионных участков (Рисунок 2).

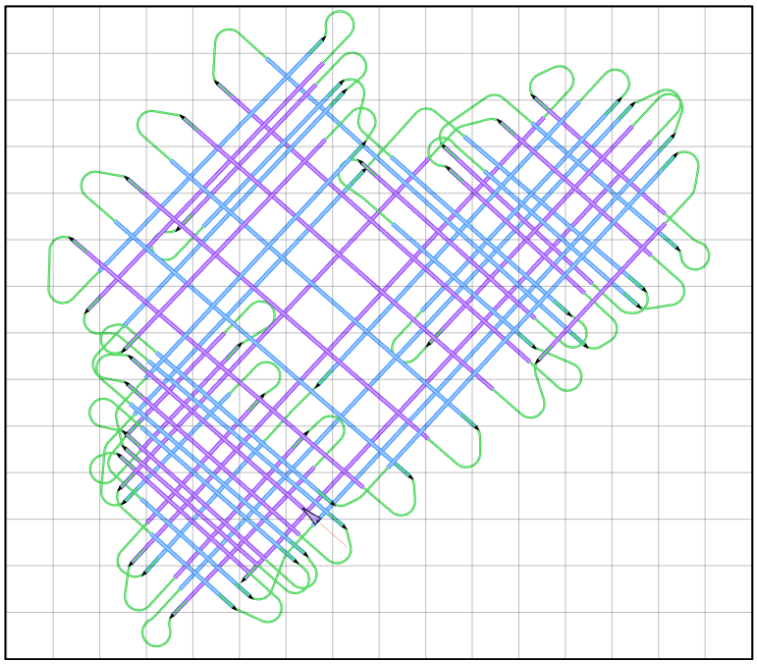


Рисунок 2. схема отработки профилей

При проведении сейсморазведочных работ первичный контроль качества регистрируемых данных осуществляться в реальном времени операторами сейсмостанции на программно-аппаратном комплексе Seal 428 с системой контроля качества в реальном времени: eSQC-PRO v.2.2/

Задача комплекса eSQC-PRO состоит в том, чтобы оперативно получать оценку качества регистрируемых данных, анализ уровня шумов и уровня полезного сигнала в реальном времени. Предусмотрено построение одноканального разреза в процессе регистрации на протяжении всего профиля, что позволяет оперативно определить пригодность регистрируемых данных (Рисунок 3).

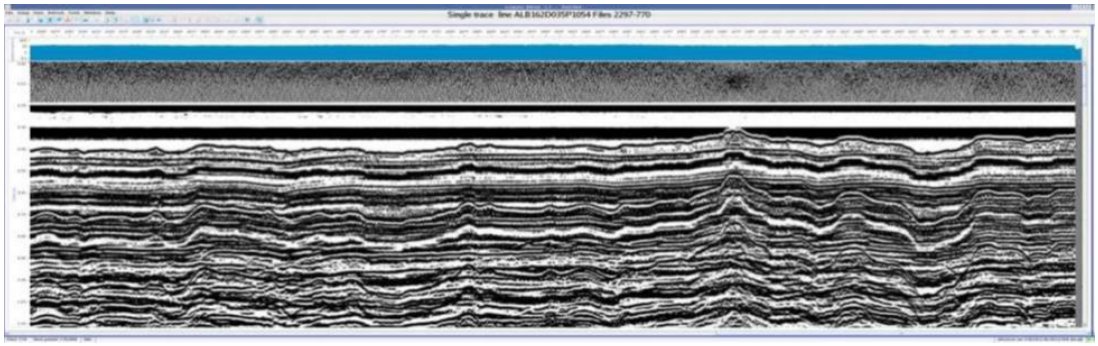


Рисунок 3. Пример фрагмента одноканального разреза

При необходимости предоставляться доступ ко всем видам оперативного контроля, вывод сейсмограмм, измерение уровня шумов, одноканальный разрез, карта амплитуд и т. д. (Рисунок 4).

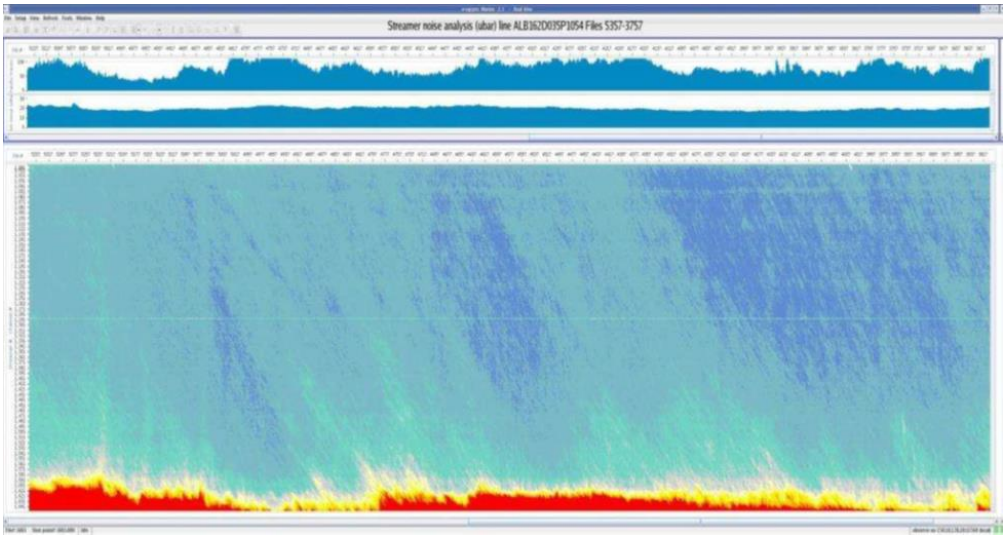


Рисунок 4. Система eSQC-PRO. Окно анализа уровня шума

В процессе работы на профиле контроллером пневмоисточников регистрируются любые ошибки и отклонения от спецификации.

Контроль осуществляется группой операторов круглосуточно. Позиционирование и контроль сейсмокосы по глубинам производится посредством программно-аппаратного комплекса Digicourse System 3 (Рисунок 5).

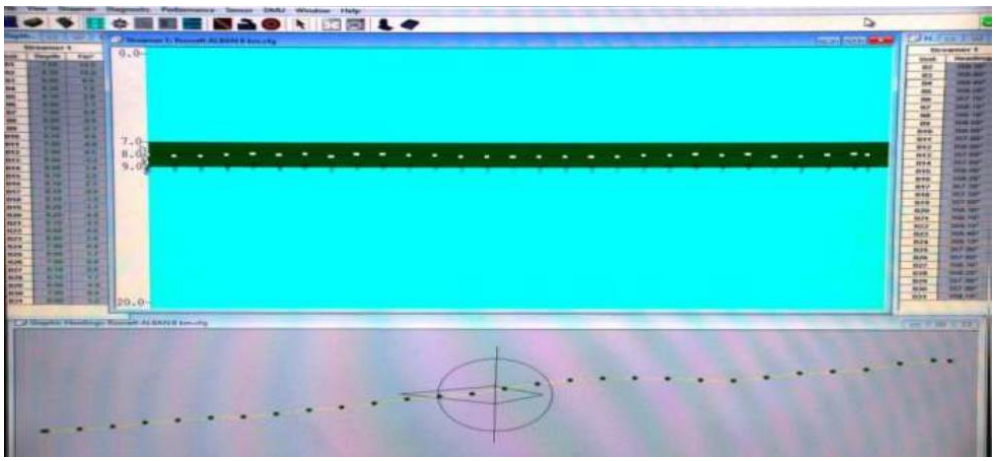


Рисунок 5. Монитор контроллера заглублений косы Digicourse System 3

Судно буксирует сейсмическую косу – кабель с расположенными в нем через равные расстояния датчиками давления. Глубина буксируемой сейсмокосы задается и контролируется стабилизаторами глубины, располагаемыми вдоль косы.

Возбуждение сейсмических колебаний производится пневматическими источниками, буксируемыми за кормой судна на заданной глубине, и контролируются датчиками глубины. Стрельба ведётся на точку ОГТ, для чего в навигационную систему вводится фиксированное

расстояние от референсной точки судна до предрасчётной ОГТ. За один проход судна отрабатывается один профиль ОГТ.

При выполнении работ на профилях вахтенный оператор сейсмического оборудования будет вести журнал профиля, в который будут заноситься все существенные события и характеристики условий производства работ, состояние и изменение погодных условий, шумов косы, перемещения проходящих судов, отклонения в работе любого из элементов сейсмического оборудования, изменения режимов работы оборудования (например, изменение глубины буксировки косы по согласованию с Представителем Заказчика) и т.п.

Выводы

Проведение детализационных морских сейсморазведочных работ МОВ ОГТ 2D на Западном лицензионном участке (море Лаптевых) подтвердило свою высокую эффективность для уточнения строения ранее выявленных перспективных объектов. Полученные данные позволили детализировать геологическую структуру участка, уточнить конфигурацию и глубину залегания потенциально нефтегазоносных горизонтов, а также выявить новые локальные объекты, представляющие интерес для дальнейшего изучения.

Библиография

1. Варламов А.С. Уравнивание гравиметрических наблюдений. – М.: Недра, 1980. 160 с.
2. Веселов К.Е., Сагитов М.У. Гравиметрическая разведка. М.: Недра, 1968, с. 418-420.
3. Инструкция по магниторазведке. Л.: Недра, 1981. 263 с.
4. Инструкция по морской гравиметрической съемке (ИГ-78). М. 1979.
5. Инструкция по гравиметрической разведке. М.: Недра, 1975. 88 с.
6. Пантелеев В.Л. Основы морской гравиметрии. М., Недра, 1983, с. 148-158.

Влияние изменения граф обработки материалов аэромагниторазведки и аэроэлектроразведки на цифровые результаты модели Ульбейской площади

Фенютин П.Ф.* (МГРИ, fenutinpytrr@gmail.com),
Новиков П.В. (МГРИ, novikovpv@mgri.ru)

Аннотация

Предусматривалось построение цифровых моделей геофизических полей, составление карт изолиний геофизических полей масштаба 1:200 000, полистно: аномального магнитного поля; локальной составляющей аномального магнитного поля; эффективных сопротивлений (проводимостей) не менее чем на 4-х рабочих частотах; формирование баз цифровых геофизических данных. Для этого проводилась пометодная обработка данных комплексной аэрогеофизической съемки.

Ключевые слова

Магнитное поле, сьемка, обработка, ДИП-А

Теория

В канал записи данных магнитометра были введены необходимые поправки и выполнены следующие преобразования:

• удаление единичных отскоков;

• поправка за вариации магнитного поля Земли;

• вычисление аномального магнитного поля (поправка за нормальное магнитное поле Земли);

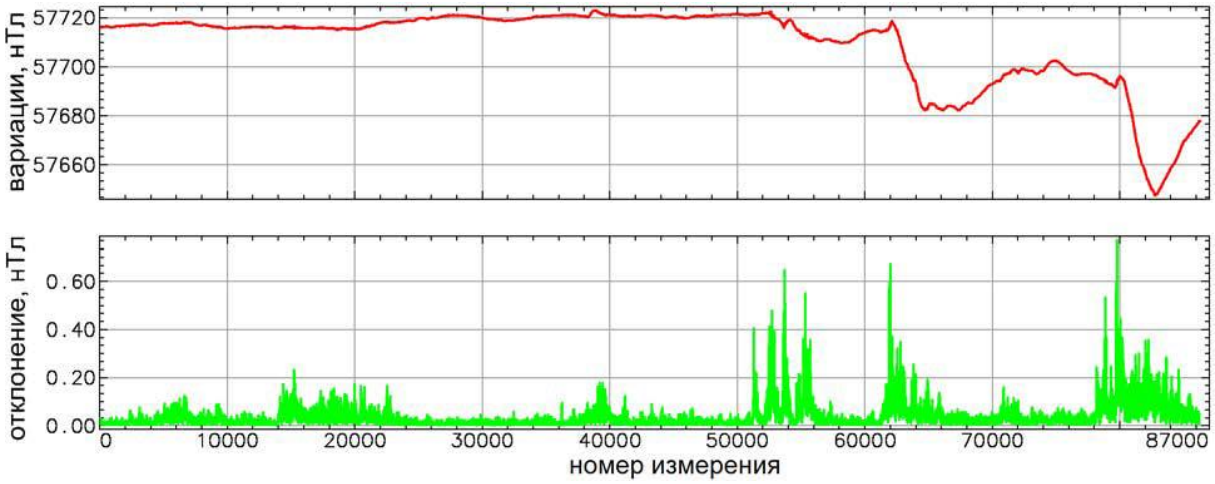
увязка маршрутов.

Выявление единичных отскоков в показаниях магнитометра осуществлялось на основе анализа графиков четвертых разностей магнитного поля по каждому маршруту.

Магнитные вариации контролировались перед вылетом и в процессе работ по отклонению от линейной хорды в течение 30 секунд (рис. 1). Поправка за вариации магнитного поля Земли содержится в стандартном графике обработки данных аэромагнитной съемки, реализованном в пакете программ Oasis montaj (GEOSOFT).

Поправка за нормальное магнитное поле Земли вычислялась на основе модели IGRF-2020 для даты 13.07.2020 года и вводилась в каждую точку наблюдений с учетом ее высоты над поверхностью эллипсоида, получаемой из навигационных данных. Тем самым обеспечивался учет нормального вертикального градиента магнитного поля.

Увязка магнитного поля выполнялась методом статистического уравнивания с трендом нулевого порядка. Остаточная невязка, или «профильность», (как правило, меньше точности съемки) уменьшалась с помощью процедуры «микроуравнивание» (microlevelling) программы Oasis montaj.



наблюденное магнитное поле
отклонение магнитного поля от линейной хорды в течение 30 сек

Рисунок 1. Вариации магнитного поля Земли 05.10.2020 г.

Обработка данных аэроэлектроразведки ДИП

Аппаратура ЕМ-4 является системой с изменяемой геометрией с разнесенными передатчиком и приемником. В таких системах при увеличении расстояния между передатчиком и приемником уменьшается амплитуда первичного поля в точке расположения приемника и тем самым увеличивается величина поля отклика по отношению к нему. Главный недостаток таких систем – существенно изменяющаяся нормальная составляющая поля при изменении положения приемника относительно передатчика. Другой недостаток – влияние наведенных в проводящих частях ЛА токов, измеренное поле которых также зависит от текущего относительного положения приемника.

Таким образом, измеренное в приемнике поле складывается из нормальной составляющей, описывающей поле источника, аномальной составляющей, описывающей поле отклика геологической среды и наведенной составляющей, обусловленной полем носителя.

Первичная обработка измеренных данных состоит, главным образом, из компенсации влияния вторичного поля, возникающего на борту ЛА-носителя. Для этого в современных модификациях системы ДИП-А применяется подход, в котором достаточно лишь контролировать сигналы дополнительных источников с нужной точностью. При этом сигналы дополнительных источников должны надежно разделяться с сигналами основного диполя в частотной области. Идея метода компенсации заключается в том, что если вектор реально возбуждаемого момента диполя может быть представлен в виде линейной комбинации векторов идеальных (расчетных) моментов, то и измеряемый приемником вектор поля может быть выражен такой же комбинацией. Поскольку расчетные диполи делаются существенно линейно независимыми, а наведенное ими в фюзеляже поле мало, измеренные векторы также останутся линейно независимыми. Данная модель фактически задается набором постоянных коэффициентов, которые можно определить в специальных калибровочных экспериментах. Калибровка выполняется на высоте, достаточной для того, чтобы пренебречь влиянием аномального поля на изменения. Высота калибровочного полета обычно составляет 500 - 700 м. Получаемые коэффициенты, по сути, описывают поле летательного аппарата как поле одного или нескольких точечных магнитных диполей и используются для исключения наведенного поля из измерений на рабочей высоте съемки.

Важный результат данного подхода к компенсации заключается в том, что первичное поле на каждой из частот в спектре сигнала возбуждения приводится к линейно поляризованному: направление вектора поля не меняется при изменении фазы детектирования. Более того, это направление одинаково для всех частот спектра первичного сигнала. Это позволяет выделить из измеренных сигналов действительную часть вектора поля $\mathbf{H}_{Re}$, которую также называют синфазной, т.е. изменяющейся синхронно с полем передатчика, и мнимую $\mathbf{H}_{Im}$, которую называют квадратурной компонентой.

Другой фактор, который сильно влияет на измерения аэроэлектроразведочной системы – непрерывные изменения геометрических параметров установки, поскольку передатчик и приемник системы связаны гибким тросом. Главная причина – существенная зависимость измеряемого приемными рамками первичного поля от взаимного расположения передатчик-приемник. Другая, не менее важная причина – очень сильная зависимость вторичного поля от расстояния до поверхности Земли, т. е. от высоты полета.

Для решения этой проблемы выполняется переход к эквивалентным измеренному сигналу параметрам среды. Наиболее очевидный параметр – кажущееся удельное электрическое сопротивление. Используется также кажущаяся электропроводность, которая является обратной величиной сопротивления.

Характер зависимости отклика от удельного электрического сопротивления показан на рисунке 2. Видно, что для однородного полупространства над высокоомными разрезами вплоть до десятков Омм синфазная составляющая отклика на частоте 130 Гц не отличима от нуля.

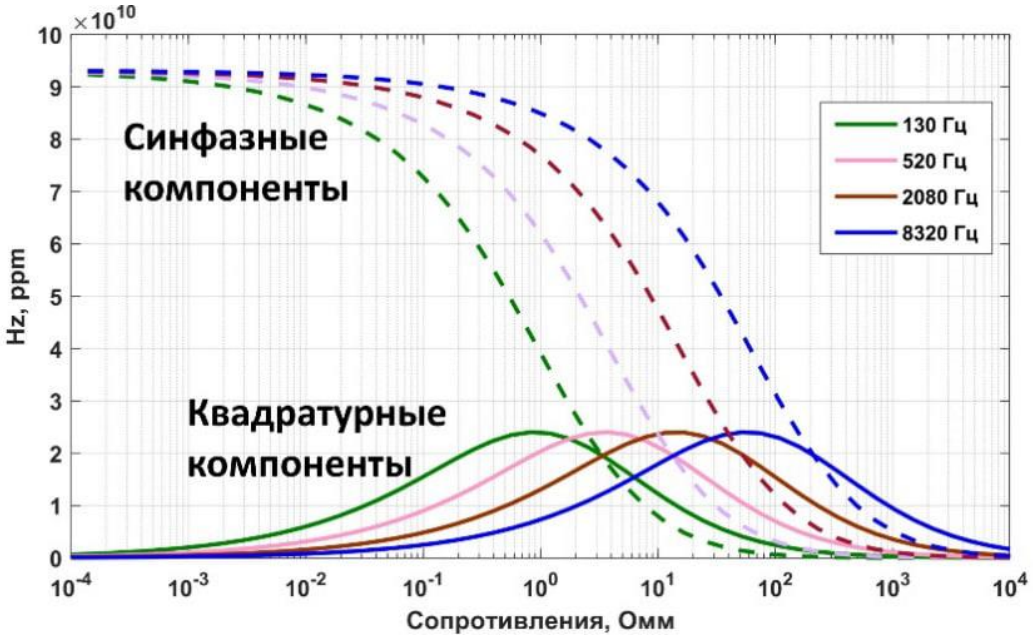


Рисунок 2. Синфазные и квадратурные компоненты отклика для модели однородного полупространства со средними параметрами геометрии

Специфика описанной процедуры компенсации заключается в том, что после ее применения в отсутствие отклика от Земли направление векторов поля на всех частотах совпадают. Если выполняется нормировка на амплитуду поля источника, то совпадают и их модули. Таким образом, расхождение между синфазными векторами на разных частотах может быть обусловлено только наличием вторичного поля.

Для работы с откликами в зоне низких удельных сопротивлений, там, где синфазным откликом на частоте 130 Гц уже нельзя пренебречь, можно использовать синфазную компоненту отклика на высокой частоте (8 кГц). Учитывая, что имеется достаточно точная информация о высоте источника поля и о координатах приемника как относительно источника, так и относительно поверхности земли, можно вычислить асимптотическое значение синфазного вектора отклика как поле отраженного диполя. Тогда, вычитая его из синфазного вектора, измеренного на частоте 8 кГц, можно получить достаточно хорошее приближение для вектора первичного поля.

Получение как квадратурной, так и синфазной компонент важно, поскольку в разной области удельных сопротивлений работают разные составляющие сигнала: на высоких сопротивлениях синфазная компонента отклика очень мала, работает только квадратурная компонента. При относительно низких сопротивлениях квадратурная компонента достигает максимума и практически не дает информации о разрезе, зато синфазная компонента работает эффективно. При еще более низких сопротивлениях квадратурная компонента вновь становится чувствительной к параметрам среды, но, в отличие от высокоомной ветви, убывает с ростом удельной электропроводности.

Таким образом, при измерении на каждой частоте синфазной (реальной) и квадратурной (мнимой) компонент отклика, который зависит от суммарной высоты передатчика и приемника и их горизонтального смещения, требуется определить удельное сопротивление эквивалентного однородного полупространства. Эта задача может быть решена с использованием двумерных палеток.

Выводы

По результатам обработки аэроэлектроразведочных данных с помощью алгоритма «Минимальная кривизна» были построены матрицы логарифмов аномального магнитного поля и эффективных сопротивлений с размером ячейки 100х100 м.

Библиография

1. Бабаянц П.С. Алгоритм решения прогнозно-поисковых задач в рамках вероятностно-статистического подхода для качественных признаков //Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1990. № 1.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист P-55 – Сусуман. Объяснительная записка (В.И. Шпикерман, И.В. Полуботко, ред. В.И. Шпикерман). – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 520 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист P-54 – Оймякон. Объяснительная записка (Г.Г. Казакова, А.Ф. Васькин; ред. А.П. Кропачев). – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 400 с.
4. Инструкция по магниторазведке, Л. «Недра», 1981.

Сравнительный анализ метода зонного кодирования с вейвлет-методами цифровой обработки сигналов

Яремченко Т.А.* (МГРИ, tarasyaremchenko@yandex.ru),
Штукин А.В. (МГРИ, avshtukin@gmail.com),
Матусов Р.А. (МГРИ, roman_981@mail.ru)

Аннотация

Рассматриваются методы цифровой обработки сигналов с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ), дискретных вейвлет-преобразований (ДВП) и дискретных мультипликативных преобразований (ДМП) для задач сжатия сигналов и изображений.

Разработаны программы в среде Matlab для сжатия сигналов с использованием ДПФ, ДМП (с тремя способами обработки порогового сигнала) и ДВП (на примере вейвлета Хаара). Проведены численные эксперименты для одномерных сигналов, а также для изображений. Результаты экспериментов показали, что выбор оптимального метода сжатия зависит от структуры сигнала. Для геофизических данных наилучшие результаты по среднеквадратическому отклонению были достигнуты с использованием ДВП, тогда как для сигналов, полученных с помощью обобщенной функции Римана, наиболее эффективным оказался один из методов ДМП. При обработке изображений ДВП продемонстрировал преимущество в точности восстановления (по критерию PSNR) в 1,5-2 раза по сравнению с методами зонного кодирования на основе ДМП и ДПФ. Результаты исследования подчеркивают важность выбора подходящего метода преобразования в зависимости от характера обрабатываемых данных, а также подтверждают эффективность вейвлет-преобразований для задач сжатия сигналов и изображений.

Ключевые слова

Сжатие сигналов, сжатие изображений, дискретные вейвлет-преобразования, дискретные мультипликативные преобразования

Теория

Применению быстрых алгоритмов для реализации дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и других дискретных преобразований в задачах цифровой обработки сигналов посвящены многочисленные статьи и монографии (например, [1] и [6]). Общая схема цифровой фильтрации сигналов с помощью ДПФ (обозначим его F) состоит в следующем. Сначала определяется спектр Y входного сигнала X, т.е. производится преобразование $Y=FX$. Затем с помощью диагональной матрицы D над спектром Y осуществляется необходимая фильтрация (сжатие, усиление или ослабление части спектральных составляющих и др.), после чего находится отфильтрованный сигнал $X=F^{-1}DY$ с использованием обратного преобразования F^{-1}.

В качестве альтернативы ДПФ в последние десятилетия широко применяются дискретные вейвлет-преобразования (ДВП) (например, [7] и [8]). Базисные функции, на которых основаны эти преобразования, называются вейвлетами (или всплесками). Преимущество вейвлет-преобразования по сравнению с ДПФ заключается в том, что оно обладает частотно-временной локализацией. Благодаря этому свойству значительная часть коэффициентов разложения сигнала по вейвлет-базису может быть отброшена, обеспечивая сжатие сигнала. В настоящее время вейвлет-преобразование широко используется в задачах цифровой обработки и кодирования одномерных сигналов (например, звуковые сигналы, сейсмические сигналы, сигналы ЭКГ и др.), а также в задачах обработки изображений (снимки со спутников, рентгеновские снимки, сжатие изображений, распознавании образов). В частности, в стандарте JPEG2000 используется вейвлет-преобразование для реализации сжатия и кодирования изображений.

В 80-е годы XX века одним из самых популярных в практике сжатия изображений и сигналов был алгоритм зонного кодирования, использующий различные дискретные ортогональные преобразования. Используемые три способа метода зонного кодирования основаны на свойствах ДПФ и дискретных мультипликативных преобразований (ДМП), доказанных в работах Ефимова А.В. [5] и Беспалова М.С. [2]. Сжатие информации методом зонного кодирования с помощью ДМП описано в книге Голубова Б.И., Ефимова А.В. и Скворцова В.А. [4], а также в книге Беспалова М.С. [2].

Разработаны программы в среде Matlab реализации сжатия сигнала с применением ДПФ, методом зонного кодирования с использованием ДМП (с тремя способами обработки порогового сигнала), а также реализован метод ДВП для случая Хаара. Проведены численные эксперименты описанными методами для одномерных сигналов: геофизические сигналы, сигналы, полученные с помощью обобщенной функции Римана с различными параметрами. Проведен сравнительный анализ результатов изложенных методов для обработки двумерных сигналов (сжатие стандартных тестовых изображений).

Ниже приведены результаты численных экспериментов с использованием разработанных программ для сжатия геофизического сигнала со степенью сжатия 90%, результаты работы представлены в таблице №1 и рисунках 1-4. Как видно по значениям среднеквадратического отклонения (СКО) для данного вида сигнала сжатие с использованием метода ДВП показывает лучший результат.

Таблица 1. Результаты СКО после сжатия геофизического сигнала на 90%

.

Метод сжатия	Среднеквадратическое отклонение
ДМП с обнулением 90% минимальных по модулю коэффициентов прямого преобразования	0,2141
ДМП с обнулением 90% последних коэффициентов прямого преобразования	0,2539
ДПФ с обнулением 90% центральных коэффициентов спектрального сигнала	0,2549
ДВП с обнулением 90% наименьших по модулю коэффициентов прямого преобразования	0,0218

На рисунках ниже представлены графики исходного (выделенный красным) и сжатого (выделенный синим) сигналов.

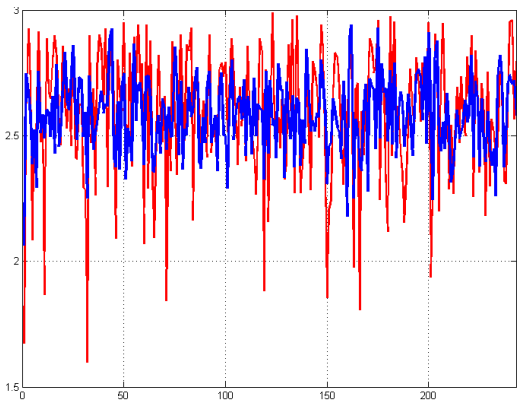


Рисунок 1. Исходный геофизический сигнал (красный) и сжатый на 90% сигнал (синий)

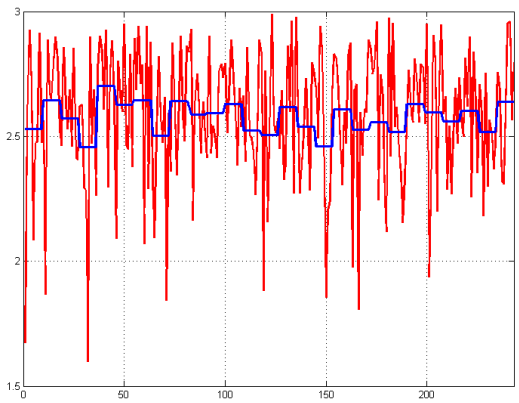


Рисунок 2. Исходный геофизический сигнал (красный) и сжатый на 90% сигнал (синий)

методом ДМП с обнулением 90% минимальных по модулю коэффициентов прямого преобразования

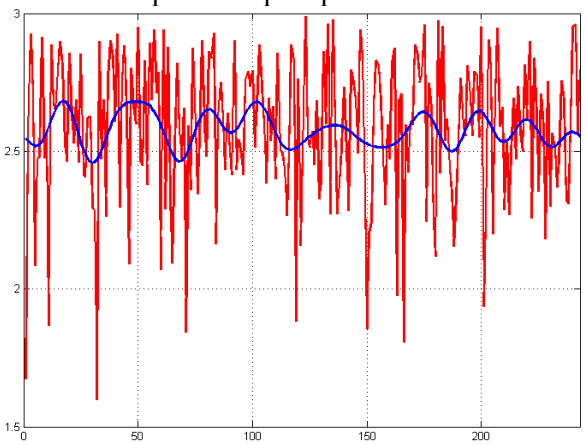


Рисунок 3. Исходный геофизический сигнал (красный) и сжатый на 90% сигнал (синий) методом ДПФ с обнулением 90% центральных коэффициентов спектрального сигнала

методом ДМП с обнулением 90% последних коэффициентов прямого преобразования

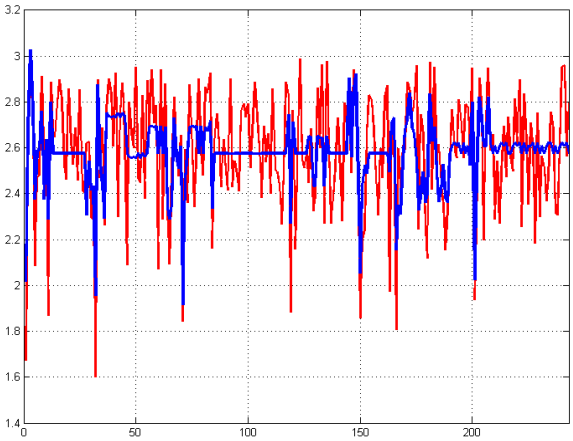


Рисунок 4. Исходный геофизический сигнал (красный) и сжатый на 90% сигнал (синий) методом ДПФ с обнулением 90% центральных коэффициентов спектрального сигнала

Ниже приведены результаты численных экспериментов с использованием разработанных программ для сжатия изображений со степенью сжатия 90% стандартных тестовых изображений, результаты работы представлены в таблице №2. Как видно по значениям PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое отношение сигнала к шуму) в таблице для всех изображений использование сжатия с использованием ДВП показывает преимущественный результат.

Таблица 2. Результаты PSNR после сжатия стандартных тестовых изображений на 90%

	ДМП с обнулением 90% минимальных по модулю коэффициентов прямого преобразования	ДМП с обнулением 90% последних коэффициентов прямого преобразования	ДПФ с обнулением 90% центральных коэффициентов спектрального сигнала	ДВП с обнулением 90% наименьших по модулю коэффициентов прямого преобразования
Lena.bmp	21,3651	19,8706	21,2863	35,7871
Winter.bmp	17,9421	16,9129	19,4792	33,1193
Rose.bmp	22,3339	20,6160	22,3114	35,0887
Bridge.bmp	21,0163	19,7480	22,1175	33,9939
Bird.bmp	27,8114	26,1138	26,5908	38,4073
Goldhill.bmp	24,1935	22,8801	23,4826	34,4866
Rentgen.bmp	26,4333	23,2320	26,4324	38,5638

Выводы

В результате исследования можно сделать вывод, что выбор оптимального метода для сжатия одномерного сигнала зависит от структуры этого сигнала. Было показано, что для рассмотренных геофизических сигналов значения среднеквадратического отклонения,

полученные методом ДВП ниже значений, полученных другими методами. Однако для сигнала, полученного с помощью обобщенной функцией Римана, оптимальным способом оказался один из способов метода ДМП. Было также отмечено, что в рамках проведенных экспериментов наименее эффективным методом оказался ДПФ. При сжатии исследуемых тестовых изображений было показано, что применение ДВП является оптимальным и имеет преимущество в точности в 1,5-2 раза по критерию PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое отношение сигнала к шуму), чем применение методов зонного кодирования с использованием ДМП и ДПФ.

Библиография

1. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом Вильямс, 2004.
2. Беспалов М.С. Сжатие информации с помощью дискретных мультипликативных преобразований Фурье. Сборник трудов МИЭТ. – М.: МИЭТ, 1992.
3. Булаев В.И., Мунасыпов Р.А. Сжатие геофизических данных с применением вейвлет-преобразования и нейронных сетей. – Уфа: УГАТУ, Вестник УГАТУ, Управление ВТ и И, Т. 11, № 1 (28), 2008. С. 200–207.
4. Голубов Б.И., Ефимов А.В., Скворцов В.А. Ряды и преобразования Уолша: Теория и применения. Изд. 2-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2008.
5. Ефимов А.В. Об аппроксимативных свойствах дискретных преобразований Фурье. Методы цифровой обработки информации: Сб. научный тр. МИЭТ. – М.: МИЭТ, 1980.
6. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая Обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2006.
7. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005.
8. Farkov Yu.A. On wavelets related to the Walsh series. Journal of Approximation Theory. Vol. 161, 2009.

Подсекция 1.2. Геоинформатика и цифровые технологии в недропользовании

Прогноз полезных ископаемых с применением нейросетевых технологий на примере полиметаллических объектов юго-восточного Забайкалья

Гришков Г.А.* (ИГЕМ РАН, gorgulini@yandex.ru),
Нафигин И.О. (ИГЕМ РАН,* nafigin@igem.ru*),
Устинов С.А. (ИГЕМ РАН,* stevesa@mail.ru*),
Минаев В.А. (ИГЕМ РАН, minaev2403@mail.ru)

Аннотация

Работа направлена на развитие подходов к применению нейросетевых технологий на разных стадиях геологоразведочных работ. В рамках работы проведен анализ различных нейронных сетей, вследствие чего выбрана архитектура AlexNet. Эта нейросеть прошла апробацию на различных территориях. Она позволяет проводить обучение на относительно малом количестве данных и обладает достаточной точностью для решения поставленных задач. Для проведения операций с выбранной нейронной сетью разработана методика, позволяющая на основе подготовленных геолого-пространственных признаков (критериев), косвенно или фактически контролирующих рудные объекты, проводить обучение нейросетевой модели с дальнейшим ее приложением к исследуемой территории. Данный подход позволяет провести анализ и получить экспертную оценку исследуемой области в виде пространственной прогнозно-поисковой модели, предсказывающей размещение наиболее перспективных для дальнейшего изучения участков. В представленной работе продемонстрирован пример использования разработанной методики для прогноза гидротермальных полиметаллических месторождений на территории Юго-Восточного Забайкалья.

Ключевые слова

Нейронные сети, прогнозно-поисковая модель, гидротермальные месторождения, юго-восточное Забайкалье, AlexNet

Источники финансирования

Работа проведена в рамках базовой темы государственного задания ИГЕМ РАН.

Теория

Актуальность и цель

В последние несколько лет наблюдается активное использование нейросетевых технологий для решения геологических задач. Это связано с развитием вычислительных методов, совершенствованием технических параметров персональных компьютеров и доступности нейронных сетей для широкого круга пользователей (Dramsch, 2020).

Список решаемых нейронными сетями задач постоянно увеличивается и в основном включает прогнозирование, принятие решений, распознавание образов, оптимизацию, а также анализ данных.

Представляемое исследование направлено на разработку подходов к применению нейронных сетей на разных стадиях геологоразведочных работ. Данное направление является актуальным в связи с существующей необходимостью в получении новых данных, с применением современных технологий, и выявлении закономерностей локализации месторождений, особенно стратегического минерального сырья, на фоне ускоренного развития экономического потенциала страны, в том числе в горнодобывающей промышленности, с учетом исчерпания легко отрабатываемых и вскрываемых ресурсов (Машковцев, Петров, 2023).

Основная цель данной работы – создание пространственных прогнозно-поисковых моделей полезных ископаемых (ПИ) с помощью нейронных сетей. Для её достижения проанализированы современные нейросетевые архитектуры и разработана методика, а также авторское программное обеспечение (ПО), позволяющие на основе пространственно визуализированных признаков (критериев) проводить обучение нейросетевой модели для решения прогнозных задач на обнаружение определенного геолого-промышленного (геолого-генетического) типа ПИ. Также продемонстрирован пример использования разработанной методики и ПО для прогноза гидротермальных полиметаллических месторождений на территории юго-восточного Забайкалья.

Выбор территории обоснован наличием известных многочисленных рудных объектов (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) и высокими перспективами на обнаружение новых гидротермальных месторождений (Петров и др., 2017).

Результаты

Нейронные сети представляют собой самообучающиеся модели, имитирующие деятельность человеческого мозга. В их основе лежит вероятностная модель, использующая регрессионный или классификационный подход для прогнозирования искомого результата (Гришков и др., 2021).

Для решения поставленной задачи использованы сверточные нейронные сети. Они хорошо себя зарекомендовали при решении задач, связанных с обработкой изображений (матриц). Как правило, данный тип нейронных сетей ориентирован на извлечение наборов уникальных признаков изображения или конкретного объекта. Это достигается за счет параллельной обработки изображения в различных слоях сети с помощью чередования слоев свертки (обработка изображения локальными операциями с помощью фильтров) и сжатия (сжатие изображения, с объединением значений фильтров), а также полносвязного слоя, формирующего итог из полученных значений (LeCun et al., 2015).

К настоящему времени разработано множество сверточных нейронных сетей для классификации изображений: AlexNet, ZFNet, GoogLeNet, VGG-16, ResNet, ResNeXt-10, PNASNet-5 и др. Для решения поставленных задач нами выбрана модель AlexNet, так как она хорошо зарекомендовала себя при прогнозе полезных ископаемых, анализе петрографических и геохимических данных (Li et al., 2020). Кроме того, она способна обучаться на относительно малом количестве данных, что позволяет в короткие сроки протестировать большое количество вариаций результатов работы нейронной сети.

В процессе создания прогнозно-поисковых моделей гидротермальных месторождений, в частности полиметаллических, выявлены, проанализированы и статистически обоснованы геолого-пространственные признаки (критерии), косвенно или фактически контролирующие рудные объекты на изучаемой территории.

При обучении нейронной сети использовано семь критериев, представляющих входные данные – условные уровни эрозионного среза, плотность линеаментов, разломная тектоника, литология, зоны контактов интрузивных тел, магнитные и гравиметрические данные. Пространственное распределение известных рудных объектов использовалось для обучения и валидации (заверки) результатов работы нейронной сети. Важно отметить, что обучающая и валидационная выборка объектов содержала два класса данных – положительные (сто процентная вероятность наличия рудного объекта в пределах территории) и отрицательные (установленная сто процентная вероятность отсутствия рудного объекта в пределах территории).

Перед началом обучения все подготовленные данные загружены в нейронную сеть в качестве входных данных, разбитых на двумерные массивы заданного размера в рамках операции свертки. В ходе анализа большого количества вариаций нейронной сети получен первый положительный результат, представленный в виде прогнозной схемы распределения гидротермальных месторождений полиметаллического типа (рис. 1а). Точность тестирования на

валидационных данных обученной нейронной сети в данном случае равнялась 30%, что привело к предсказанию не всех целевых областей. Это связано с избытком целевых объектов, а точнее низкокачественных примеров, которые привнесли значимое влияние шумовой компоненты в процесс обучения.

Обучение нейронной сети на более значимых целевых областях, а именно: рудопроявлениях и месторождениях, исключив пункты минерализации, а также рудные объекты с содержанием Ta или Th, привело к повышению точности тестирований на валидационных данных нейронной сети до 70%. В результате первичная прогнозно-поисковая схема приобрела иной вид (рис. 1б), предсказав большую часть искомых объектов. В работах, посвященных прогнозу на основе нейронных сетей, данный процент является достаточным, так как попытки его дальнейшего увеличения влияют только на качество выделения объектов, а не на их количество.

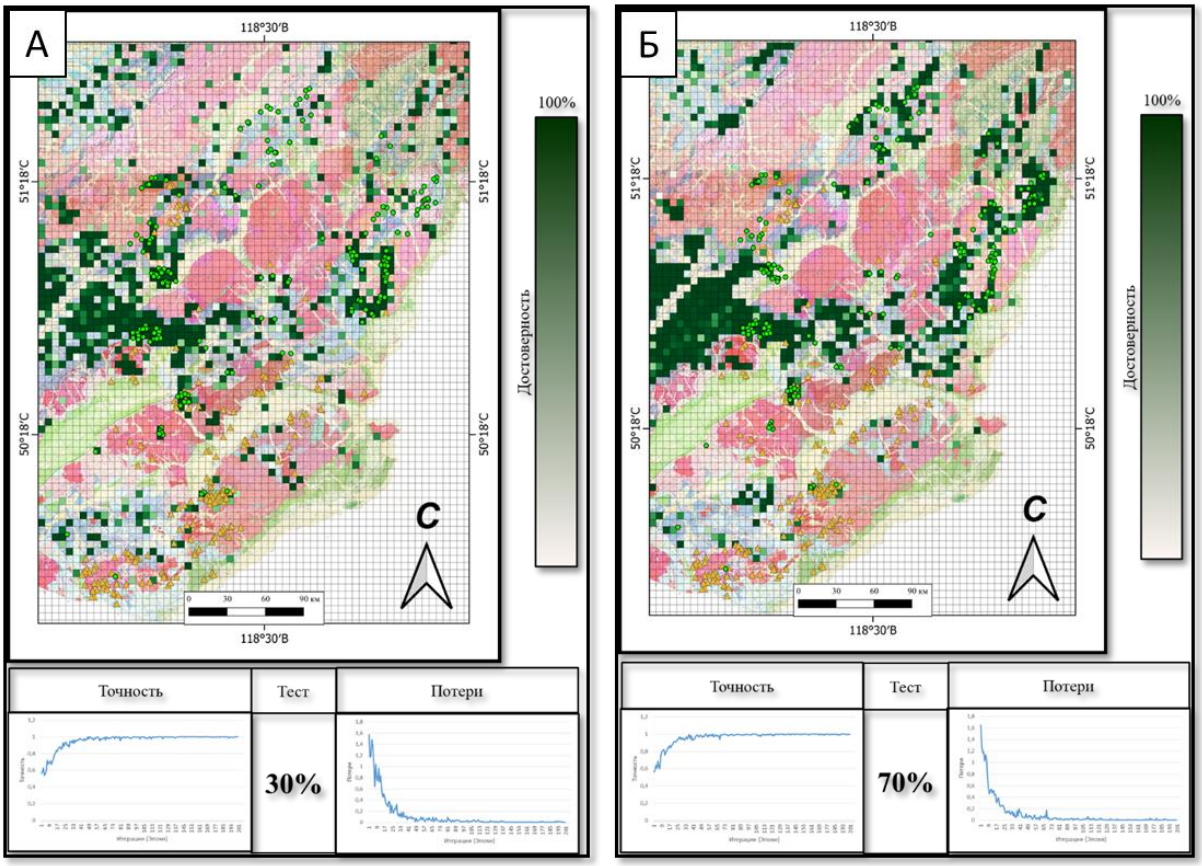


Рисунок 1. Результаты работы нейронных сетей: а) обученной на всех рудных объектах; б) обученной на месторождениях и рудопроявлениях без рудных объектов с содержанием Ta или Th. Треугольниками выделены рудные объекты Fl, Mn, Mo, Sn, Ta, Th, U, W; точками – с содержанием Zn или Pb

Выводы

Разработанный подход для создания пространственных прогнозно-поисковых моделей полезных ископаемых на основе сверточных нейронных сетей демонстрирует широкие возможности и является универсальным при решении многих геологических задач. Он может быть применен не только для прогноза полиметаллических, но и других типов полезных ископаемых. Кроме того, созданное ПО позволяет анализировать практически неограниченное

число критериев, которое может быть легко расширено за счет всех дополнительных данных (геохимия, геофизика, результаты воздушной съемки, результаты наземной съемки и др.), получаемых на всех стадиях геологоразведочных работ, что, наиболее вероятно, повысит точность прогноза искомого типа полезного ископаемого.

Библиография

1. Гришков Г.А., Устинов С.А., Нафигин И.О., Петров В.А. Нейронные сети и возможности их применения для анализа пространственных геологических данных // Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. Том. 4. Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле: инновационные технологии геологической разведки горного и нефтегазового дела, бурение скважин, математическое моделирование и разведочная геофизика. М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе. 2021. С. 33-36.

2. Машковцев Г.А., Петров В.А. Пути совершенствования научно-методических основ поисковых работ на твердые полезные ископаемые // Сб. докладов научно-практической конференции: Актуальные проблемы поисковой геологии. 22–24.11.2022. М.: ФГБУ «ВИМС». 2023. С. 195–208.

3. Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология рудных месторождений. 2017. Том 59. № 6. С. 445-469.

4. Dramsch J. 70 years of machine learning in geoscience in review // Advances in Geophysics. 2020. V. 61. P. 1–55

5. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. Deep learning // Nature. 2015. V. 521(7553). P. 436–444.

6. Li, S., Chen, J., Xiang, J. Applications of deep convolutional neural networks in prospecting prediction based on two-dimensional geological big data // Neural Comput & Applic. 2020. 32. P. 2037–2053.

Анализ временных вариаций гравитационного поля Земли: эксперименты и моделирование с использованием машинного обучения

Ерохин А.М.* (ООО «Петровайзер», erokhin_am@petroviser.ru),
Петров А.В. (МГРИ, petrovav@mgri.ru),
Белов А.П. (МГРИ, belovap@mgri.ru)

Аннотация

В работе проведено исследование временных вариаций гравитационного поля Земли, основанное на экспериментальных данных, полученных с помощью современных гравиметров: автоматизированных приборов CG 5 Autograv и CG 6 Autograv, а также модернизированного кварцевого гравиметра ГНУ КВ. Экспериментальная база, организованная на гравиметрическом пункте «Ледово», обеспечивает высокую стабильность измерений благодаря использованию изолированного бетонного постамента и синхронному сбору данных в трёхчасовых интервалах. Применение спектрального анализа совместно с алгоритмами машинного обучения, в том числе нейронными сетями с двумя скрытыми слоями, позволило разработать математические модели, способные учитывать нелинейность и квазипериодичность временных рядов. Результаты демонстрируют, что интеграция традиционных методов анализа с современными алгоритмами искусственного интеллекта значительно улучшает мониторинг и предсказание динамики гравитационного поля.

Ключевые слова

Гравитационное поле, гравиметрия, временные вариации, спектральный анализ, машинное обучение, нейронные сети, математическое моделирование

Теория

1. Введение

Мониторинг временных вариаций гравитационного поля Земли имеет большое значение для понимания динамики внутренних процессов планеты, оценки природных явлений и проведения геофизической разведки. Современные измерительные системы, основанные на высокоточном оборудовании, позволяют фиксировать малейшие изменения поля. Однако для анализа сложных временных рядов требуется использование методов, способных выявлять скрытые зависимости и адаптироваться к нелинейности процессов. В данном исследовании основное внимание уделено интеграции алгоритмов машинного обучения с традиционными методами спектрального анализа для построения математических моделей гравитационных вариаций.

2. Экспериментальная база и методика измерений

2.1 Гравиметрический пункт «Ледово»

Измерения проводились на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово», расположенном в лаборатории Института физики Земли. Постамент, выполненный в виде изолированного бетонного параллелепипеда, не соприкасается с полом, что позволяет минимизировать влияние вибраций на результаты измерений [1]. Синхронный сбор данных каждые три часа с одновременной регистрацией метеорологических параметров обеспечивает высокую точность приведения временных рядов к единой системе отсчёта.

2.2 Используемые приборы

1. В эксперименте использованы следующие приборы:

- CG-6 Autograv – современный автоматизированный гравиметр, демонстрирующий высокую точность измерений [1].

- CG-5 Autograv (модели 350 и 351) – приборы, зарекомендовавшие себя за счёт воспроизводимости результатов и стабильности показаний [1, 2, 4].
- Кварцевый гравиметр ГНУ-КВ – модернизированное устройство, оснащённое видеокамерой для цифровой регистрации показаний, что позволяет проводить детальный спектральный анализ [3, 5].

Размещение всех приборов на одном постаменте гарантирует идентичность влияния инерционных помех, что существенно упрощает последующую синхронизацию данных.

3. Обработка данных и спектральный анализ

2. Первичный анализ временных рядов выявил низкие коэффициенты корреляции между различными приборами, что связано с их конструктивными особенностями [2, 4]. При этом спектральный анализ, выполненный методом преобразования Фурье, показал высокую идентичность амплитудно-частотных характеристик между приборами, что свидетельствует о сопоставимой чувствительности устройств к вариациям гравитационного поля [3]. Такие результаты являются базисом для дальнейшего моделирования временных рядов с учётом нелинейных эффектов и случайных процессов.

4. Моделирование временных вариаций с использованием машинного обучения

4.1 Классические методы аппроксимации

3. В качестве базового подхода для аппроксимации временных рядов использовались полиномиальные модели. Модель третьего порядка продемонстрировала оптимальное соотношение точности и вычислительной сложности, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации ($R^2 \approx 0.88$).

4.2 Применение нейронных сетей

Для повышения точности предсказаний и более глубокого анализа временных рядов применены методы машинного обучения. Сравнение однослойной нейронной сети с более сложной архитектурой, включающей два скрытых слоя (рис. 1), показало, что последняя модель, обученная алгоритмом Levenberg-Marquardt, существенно снижает среднеквадратичную ошибку (MSE) и обеспечивает стабильное значение $R^2 = 0.88$ на тестовой выборке. Это демонстрирует, что современные алгоритмы искусственного интеллекта способны эффективно обрабатывать данные, характеризующие сложные нелинейные и квазипериодические процессы в гравитационном поле

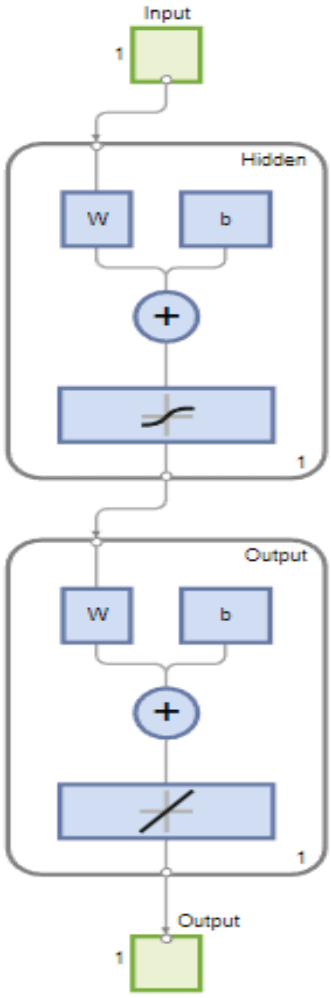


Рисунок 1. Общая схема структуры нейронной сети

4.3 Роль машинного обучения в обработке больших данных

Интеграция алгоритмов машинного обучения с традиционными методами анализа позволяет обрабатывать большие объёмы данных, выявлять скрытые закономерности и адаптировать модели в режиме реального времени. Такой междисциплинарный подход особенно актуален при учёте случайных «гостевых» факторов, которые затрудняют однозначное математическое описание временных вариаций гравитационного поля

5. Заключение и ключевые выводы

В результате проведённого исследования были получены следующие ключевые выводы:

1. Высокая корреляция в спектральной области между CG 6 и ГНУ КВ подтверждает их надёжность для регистрации гравитационных вариаций.
2. Временные вариации гравитационного поля имеют квазипериодический характер, но их однозначное математическое описание затруднено из-за влияния случайных процессов («гостевых» факторов).
3. Оптимальная модель должна комбинировать стационарные периодические компоненты и стохастические элементы.

Перспективы:

Для повышения точности моделей необходимы:

- Длительные наблюдения для выделения скрытых закономерностей.
- Разработка комплексных подходов, включающих машинное обучение и анализ больших данных.
- Учёт дополнительных геофизических факторов (сейсмичность, гидрологические изменения).

Исследование подчёркивает необходимость междисциплинарного подхода для решения задач в области гравиметрии

Библиография

1. Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Конешов В.Н. Особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 4. – С. 5–13.
2. Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка влияния сейсмических и метеорологических факторов на точность измерений относительным гравиметром // Физика Земли. 2013. – № 4. – С. 105–110.
3. Белов А.П., Лобанов А.М., Ерохин А.М. Опыт амплитудно-частотной оценки колебания грунтов в диапазоне 0,05—0,5 Гц с использованием чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. – № 65(2). – С. 67–73. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-67-73
4. Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка предельной точности гравиметра CG-5 Autograv // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. – С. 39–43.
5. Евдокимов Ю.К., Нигматуллин Р.Р., Денисов Е.С. Распределенные измерительные среды и системы. Фрактальная обработка сигналов // Фрактальная радиоэлектроника: в 2 томах / Гильмутдинов А.Х., Никитов С.А., Шахтурин Д.В., Ушаков П.А.; под редакцией доктора технических наук А.Х. Гильмутдинова – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2024. – 447 с.
6. Лобанов А.М., Белов А.П., Ерохин А.М., Венедиктов К.В. Алгоритм распознавания видеофайла для оцифровки колебаний аналогового индикатора на примере кварцевого гравиметра ГНУ-КВ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2024. – № 66(1). – С. 128–134. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-128-13

Современные технологии в оценке оползневой опасности правого склона дорожной выемки м-7 «волга» в правобережье реки Свияга республика Татарстан

Зиновьев Б.С.* (Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Институт Геологии и Нефтегазовых Технологий, bogdan.zinovev.2003@mail.ru),
Гараева А.Н. (Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Институт Геологии и Нефтегазовых Технологий)

Аннотация

Проведён анализ возможной оползневой опасности правого склона дорожной выемки М-7 «Волга» в правобережье реки Свияга, Республика Татарстан, с использованием современных технологий системы Google Earth Engine с Python API и продуктов GEO5. Использование современных технологий в строительстве автомагистралей может позволить найти оптимальные решения для снижения оползнеопасности сложных объектов. Эти технологии позволяют проводить мониторинг и анализ геологических условий, выявлять потенциальные угрозы и разрабатывать рекомендации по улучшению устойчивости склонов.

Ключевые слова

Оползень, дорожное полотно, оценка устойчивости склона, расчетная модель, М-7 «Волга»

Теория

Прогнозирование участков автодорожных выемок с учетом оползневой опасности является важной задачей в условиях природно-техногенной среды. Это связано с тем, что выемки, образованные в процессе прокладки дорог, могут значительно увеличить риск оползней, особенно в районах с неблагоприятными гидрогеологическими условиями. Расчет и прогнозирование оползнеопасных участков позволяют заранее выявлять риски и разрабатывать меры по их минимизации.

Целью данного исследования является оценка вероятности проявления оползневого процесса на участке автодорожной трассы М-7 «Волга» в правобережье реки Свияга.

В географическом отношении территория рассматриваемого участка дорожной выемки М-7 «Волга» расположена в Предволжье, ограничиваясь с севера и востока речной долиной р. Волга, на западе – руслом реки Свияга. Согласно геоморфологической схеме, район относится к Услонскому плато северо-восточной части Приволжской возвышенности. Территория плато представляет собой эрозионно-денудационную поверхность выравнивания, расчленённую речной и овражно-балочной сетью.

Согласно геологической карте Республики Татарстан, подготовленной ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского, в геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие отложения осадочного чехла девонской, каменноугольной, пермской, неогеновой и четвертичной систем.

Согласно схеме тектонического районирования РТ (Войтович Д.Е., 2001), рассматриваемая территория расположена на границе Токмовского свода и Казанско-Кировского прогиба, в пределах Казанской сейсмогенной зоны с максимальной магнитудой 5,5. Вблизи территории проходят Казанский региональный разлом, Алатырско-Казанско-Арский глубинный разлом. Согласно карте В (В – степень сейсмической опасности, равная 5%) СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81», рассматриваемая территория относится к зоне с интенсивностью землетрясений 5 баллов по шкале MSK-64.

Участок автодорожной трассы М-7 «Волга» в правобережье реки Свияга, представляет собой склон высотой порядка 39,36 метров, на котором выделяются террасы и полки шириной до 15 метров и длиной до 220 метров. Крутизна склона варьируется от 20 до 40 градусов. Склон дорожной выемки не озеленен и не покрыт защитным материалом (рис. 1).



Рисунок 1. Исследуемый оползневой участок вблизи трассы М7 «Волга»

На первом этапе моделирования было проведено исследование участка с использованием Google Earth Engine (GEE). Для более точного отображения углов наклона склонов и повышения разрешения изображений были применены данные с высоким пространственным разрешением. В GEE доступен Python API, который позволяет выполнять множество аналитических задач, в том числе расчет углов наклона для заданных полигонов (рис. 2).

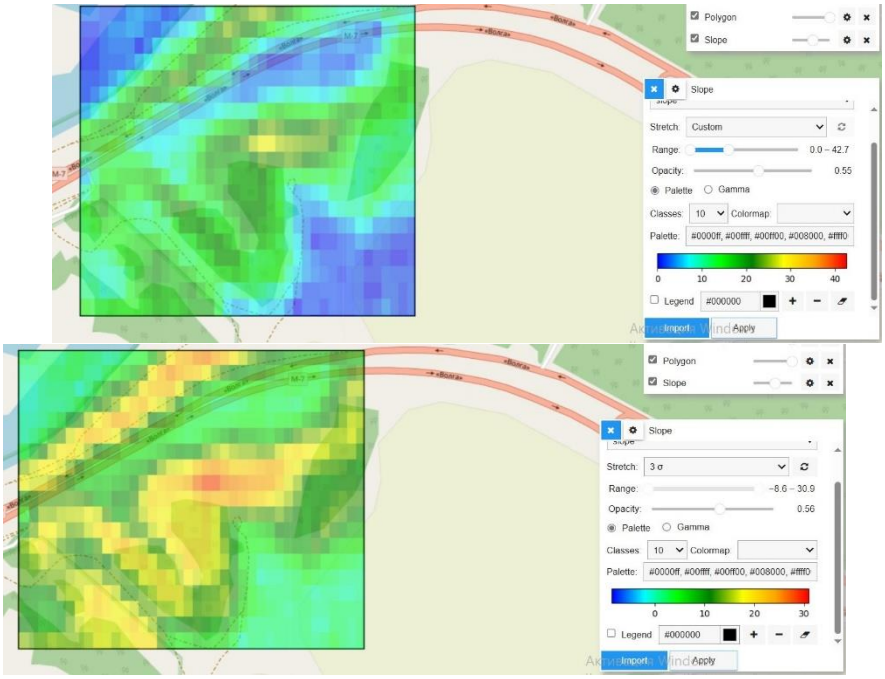


Рисунок 2. Исследование оползневого участка с использованием Google Earth Engine (GEE)

Вторым этапом стал расчет оползневой опасности в программном комплексе GEO5 (рис. 3). Расчёт устойчивости откоса выполняется с помощью модуля «Расчёт устойчивости откоса» по круглоцилиндрической и полигональной поверхности скольжения (с использованием оптимизации). Геологическое строение массива задавалось согласно собственным полевым и лабораторным данным и на основе геологических отчетов [5].

Вероятностный прогноз развития оползневых смещений для каждой полки и всего склона оценивался в зависимости от того, в какой диапазон попадает значение коэффициента устойчивости, рассчитанного по различным методам (Бишопа (Bishop simplified), Феллениуса – Петтерсона (Fellenius–Peterson), Спенсера (Spencer), Янбу (Janbu simplified) или Моргенштерна – Прайса (Morgenstern–Price)). Для расчёта устойчивости склона в соответствии с пунктом 4.9.60 СП 420.1325800.2018. искали участок который потенциально может стать причиной возникновения оползня.

Выводы

По результатам программного продукта Google Earth Engine (GEE) с использованием Python API, были выделены участки с потенциальной оползнеопасностью. Расчет оползневой опасности в программном комплексе GEO5. Подтвердил вероятность проявления оползневого процесса на участке участке автодорожной трассы М-7 «Волга» в правобережье реки Свияга.

Рекомендовано в ближайшее время обратить внимание на данный участок дороги и провести укрепление и облагораживание травянистой растительностью террасовых уступов, включающее отвод и локализацией временных водотоков, провести выполаживание склона под меньшую крутизну склона.

Библиография

1. Королёв А.Э., Пиржанова Е.С., Королёв Э.А. Сложные оползни в стенках дорожной выемки на одном их участков федеральной автомобильной трассы по территории Татарстана // Геологи XXI века: Материалы XXIV Всероссийской научной конференции

студентов, аспирантов и молодых специалистов (Саратов, 5 апреля 2024 г.). - Саратов: Издательство «Техно-Декор», 2024. С. 28-29. ISBN 978-5-907716-59-9.

2. Латыпов А.И., Жаркова Н.И., Нуриев И.С., Чернийчук Г.А. Моделирование развития оползневых процессов для прогноза оползневой опасности на территории горнолыжного комплекса "Казань" и г. Иннополис // Учёные записки Казанского университета, серия "Естественные науки", Т. 156, Книга 1, 2014, с. 148-162.

3. СП 11-105-97. «Инженерные изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов».

4. СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов» (с Изменениями №№ 1, 2).

5. Тихоненко Н.И. Отчет по геолого-гидрогеологической съемки масштаба 1:200000, 1967.

Особенности и перспективы развития системы управления и хранения геолого-геофизических данных в информационной среде сопровождения региональных работ на УВС

Корнеев А.А. (ФГБУ «ВНИГНИ», Korneev@vnigni.ru),*
Гогоненков Г.Н. (ФГБУ «ВНИГНИ», Gogonenkov@vnigni.ru),
Черемисина Е.Н. (ФГБУ «ВНИГНИ», E.cheremisina@geosys.ru),
Марков К.Н. (ФГБУ «ВНИГНИ», K.markov@vnigni.ru)

Аннотация

В настоящее время, с многократно возросшим объемом цифровых данных, особенно остро стоит вопрос об оценке, структурировании и хранении геолого-геофизической информации, поступающей в рамках реализации проектов ГРР - государственной программы по геологическому изучению недр.

В начале 2021 года ФГБУ «ВНИГНИ» создала и внедрила информационную среду сопровождения региональных геологоразведочных работ на поиски углеводородного сырья (ЛК ГРР), контролирующую порядок передачи и хранения геолого-геофизической информации в составе отчетов, приложений и других информационных материалов, поступающих в институт.

Ключевые слова

Информационная среда, хранение геолого-геофизической информации, проекты ГРР, система управления данными, ЛК ГРР

Теория

История создания информационной среды сопровождения региональных геологоразведочных работ

Начиная с начала 2020 года в момент старта сразу нескольких (около 20 проектов) проектов ГРР (ГРР – геологоразведочные работы – это комплекс работ, направленных на выявление месторождений полезных ископаемых и подготовку их к промышленному использованию) существенно возрос поток геолого-геофизической информации, поступающий в институт от подрядных организаций. Проблема передачи данных заключалась в том, что информация поступала в институт различными способами – от почтовых отправлений, курьерской доставки до загрузки материалов на FTP-сервер института. 6 апреля 2021 года распоряжением директора был введен новый порядок передачи геолого-геофизической информации в составе отчетов, приложений и других информационных материалов. С этого момента вся геолого-геофизическая информация стала поступать в институт посредством специализированной информационной среды сопровождения проектов – ЛК ГРР – через веб-интерфейс, реализованный на сайте института. Для авторизованных в системе пользователей была реализована возможность передавать информацию, с возможностью контроля со стороны ФГБУ «ВНИГНИ» сроков и комплексности материала, что было особенно важно при передаче данных по выполненным в отчетный период объемам работ.

Вторым вызовом системы была возможность реализации идеи упорядочить исходную первичную и интерпретированную информацию согласно требованию ТЗ, которое касалось формы представления полевой и интерпретированной информации для последующей сдачи этого массива в фонды. Задача была реализована через систему слотов, в которые помещалась структурированная информация, разбитая в соответствии с ТЗ по типам работ. В этот момент система из простого способа передачи информации, стала полноценной средой сопровождения геологоразведочных проектов [1] с системой упорядоченного хранения отчётной информации (Рис.1).

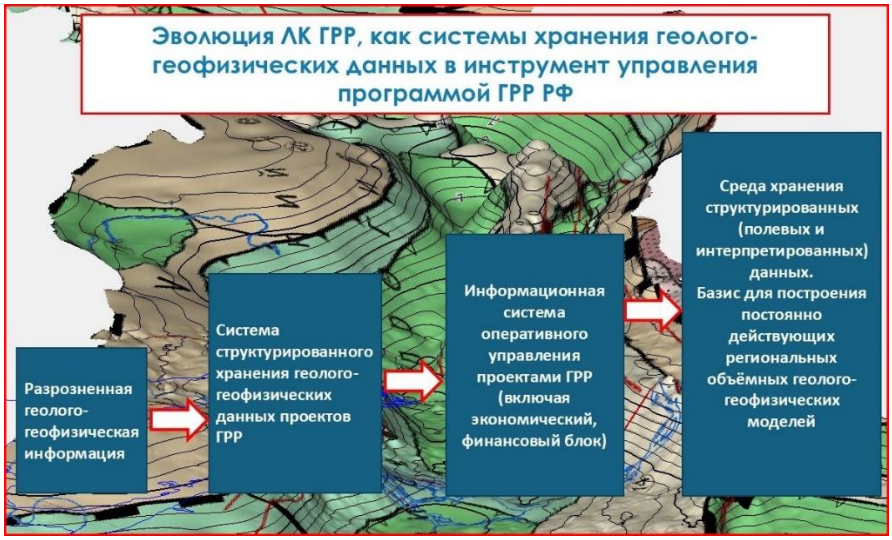


Рисунок 1. Эволюция системы хранения геолого-геофизических данных в среду информационного сопровождения геологоразведочных проектов

Эволюция системы – от передачи файлов до системы управления проектами

Фактически, начиная от системы обмена файлами по типу простейшего FTP-сервера в настоящий момент, система эволюционировала в информационную среду сопровождения [2], решающую две задачи управления потоками геолого-геофизическими данными:

- ✓ организованный способ передачи данных извне с возможностью контроля сроков поступления и комплектности материалов,
- ✓ структурированный массив (полевых и интерпретированных) отчетных материалов проектов ГРР с возможностью легкого доступа и долгосрочного хранение результатов.

Задачи, для которых создавалась система

1. Создать систему сопровождения региональных геологоразведочных работ в единой информационной среде с упорядоченным способом передачи геолого-геофизических данных

Чтобы исключить возможность потери (ошибок) и несоответствия, передаваемых документов данным, был выбран (в соответствии с официальным распоряжением) единственный способ передачи - передача посредством сайта института. Эта задача была реализована в первой версии системы ЛК ГРР и сразу же принесла пользу в лучшей организации работ.

2. Реализация оперативного доступа к файлам для экспертизы с использованием их классификации (двухмерный классификатор, карточка материала)

При загрузке материалов в систему ЛК ГРР, авторизированный пользователь может указать (кроме названия материала) два параметра: «вид данных» и «вид работ». Первый дает возможность определить вид передаваемых данных (полевые, интерпретированные, отчет), второй - вид работ: сейсморазведочные, электроразведочные, гравимагниторазведочные и т.д. Наличие этой вспомогательной информации существенно упростит поиск необходимых данных и ускорит работу.

3. Реализация контроля сроков и комплектности данных (механизм «заморозки» пакета данных при долговременном хранении)

В системе реализован контроль поступающих данных, мы видим какой пользователь, когда загрузил свой блок информации, в тот момент, когда пользователь нажимает кнопку «данные загружены в полном объеме» они фиксируются в системе, уходят на сервер хранения и догрузить или поменять файлы пакета становится невозможно.

4. Организация хранения промежуточной и итоговой отчетности всех участников проекта

Отдельным блоком реализована система хранения отчетной документации ОД, полностью соответствующая по форме и комплектности требованиям технического задания по полевой и интерпретированной информации, включая промежуточную и итоговую отчетность по проекту в целом.

5. Оперативный просмотр базовых и итоговых ГИС проектов

Для каждого проекта ГРР [3] непосредственно в системе реализована возможность оперативного просмотра загруженных картографических материалов в составе ГИС проекта

Выводы

Шаг в будущее. Расширение возможностей системы

Информационная среда сопровождения региональных работ на УВС относительно легко может быть трансформирована в полноценную систему управления проектами. Необходимо внедрить экономический блок с возможностью расчёта видов работ с расценками и таймингом. Уже в настоящий момент в системе реализованы блоки: загрузки данных авторизированного пользователя, информирования оповещение рабочей группы, модуль генерации заключения. На основе этих блоков можно создать блок электронной подготовки экспертных заключений и актов выполненных работ. Таким образом осуществить контроль видов работ подрядных организаций, реализовать электронное информирование, согласование и генерацию финансовых (отчетных) документов с целью упрощения документооборота при выполнении проектов ГРР.

Важной особенностью текущей версии системы является формирование базы данных геолого-геофизической информации, на основе которой с использованием любых специализированных систем можно рассматривать возможность создания постоянно действующих объемных региональных геолого-геофизических моделей [4].

Одним их главных достоинств таких моделей является возможность встраивания «на лету» новой информации в орбиту данных проекта, которая, поэтапно с включением каждого нового вида информации повышает точность решения задач и усиливает прогностический потенциал модели. Таким образом подтверждая тезис, больше данных - большая детальность и точность итоговой модели среды.

Перечисленные программные решения требуют интеллектуальных и финансовых вложений, но в достаточно в коротком времени реализации проекта ЛК ГРР мы получим инновационный проект, имеющий отличные возможности в решении важных в стратегическом плане задач регионального освоения недр территории РФ и её шельфа.

Уже сегодня система ЛК ГРР позволяет обеспечивать информационное сопровождение крупных региональных проектов ГРР, существенно экономит время и затраты специалистов как федеральных, так и компаний недропользователей.

Библиография

1. Системный анализ процесса физико-геологического моделирования на основе геоинформационных систем. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Геоинформатика. 2012. № 4. С. 1-7.

2. Проблемы комплексной интерпретации геофизических данных по региональным профилям и пути их решения. Липилин А.В., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геофизика. 2002. № 4. С. 3-6.

3. Актуальные результаты комплексных сейсморазведочных и аэрогравимагнитных работ в аспекте изучения тектоники и нефтегазоносности Рассохинского мегавала. Иванова С.Р., Корнеев А.А., Лошакова И.Ф., Каламкаров С.Л., Обухов А.Н. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2024. Т. 19. № 3.

4. Геолого-геофизическая модель центральной части Енисей-Хатангского регионального прогиба по результатам комплексной интерпретации современных сейсмических и гравимагнитных съёмок. Иванова С.Р., Обухов А.Н., Корнеев А.А., Каламкаров С.Л., Лошакова И.Ф., Соколова Т.Б. Жизнь Земли. 2024. Т. 46. № 3. С. 278-289.

Исследование влияния гиперпараметров и методов машинного обучения на результат классификации разливов нефти и мазута на пляжах

Никитин А.И.* (МГРИ, alexsey.niknik49@yandex.ru),
Петров Р.В. (МГРИ,* prezident012001@mail.ru*),
Морочко А.Ф. (МГРИ, morotchkoa@inbox.ru)

Аннотация

В работе предложен подход к автоматическому обнаружению нефтяных разливов на основе анализа спутниковых изображений с использованием методов машинного обучения. Исследованы алгоритмы классификации, включая метод логистической регрессии, случайный лес (Random Forest), Дерево решений (Decision Tree), KNeighbors, XGBoost, с акцентом на оптимизацию гиперпараметров. Анализ проведен на данных спутника Landsat, включающих мультиспектральные изображения прибрежных зон, подвергшихся загрязнению нефтью.

Ключевые слова

Машинное обучение, Гиперпараметры, Классификация, Спутниковые изображения, нефтяные разливы

Теория

Исследование направлено на классификацию участков океана по наличию нефтяных разливов. Датчик спутника Landsat предоставил изображения, разделенные на патчи 256×256 пикселей. Для каждого патча извлечены спектральные и текстурные признаки, включая нормализованный разностный водный индекс (NDWI) и индекс растительности (NDVI), которые ранее доказали свою эффективность в задачах мониторинга водных поверхностей [2].

Для того чтобы модели работали лучше, необходимо убрать лишние признаки, которые не важны для построения решения (Рисунок 1). Это позволит облегчить построение модели и ускорит все расчеты.

Перед обучением моделей был проведен анализ корреляции признаков, чтобы определить их информативность. Для оценки производительности моделей использовалась кросс-валидация (K-Fold = 5), что позволило снизить риск переобучения и повысить устойчивость моделей [3] (Рисунок 2).

Также в исследовании были использованы несколько методов для просчета, но, чтобы получить наилучший результат классификации необходимо подобрать гиперпараметры для каждого метода. Также был проведен анализ данных на аномалии и на пустые значения, и данные были нормализированы по шкале от 0 до 1, чтобы не было переобучения.

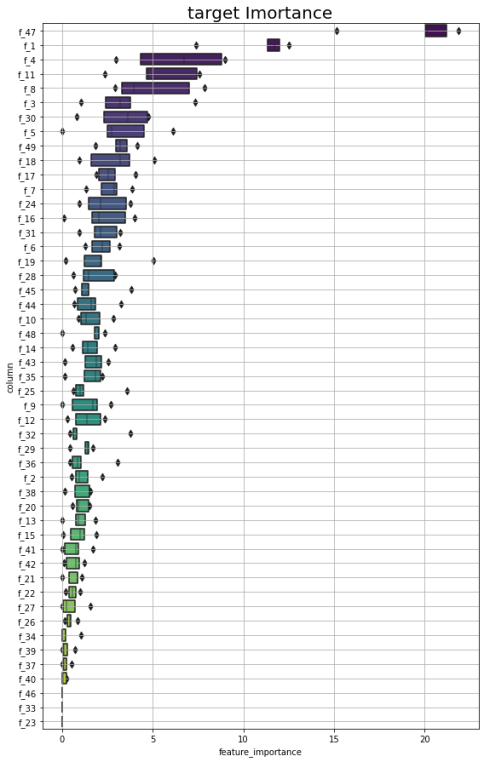


Рисунок 1. Важность признаков

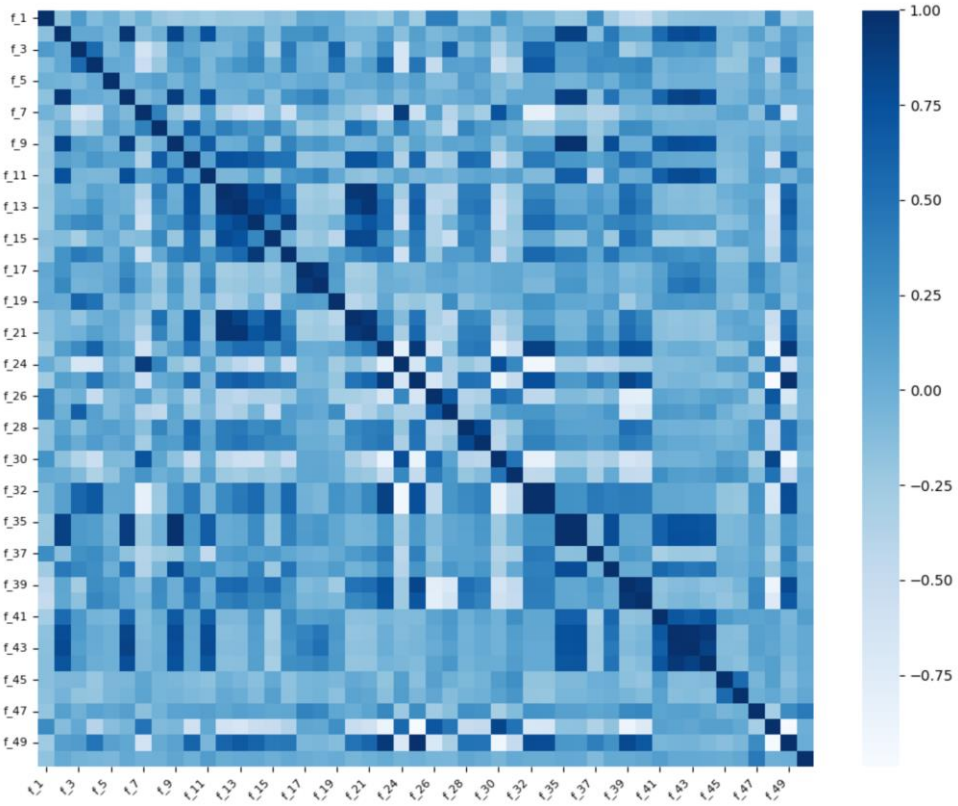


Рисунок 2. Матрица корреляции признаков

- Для классификации использованы пять моделей и их гиперпараметры, настроенные с помощью метода случайного поиска и кросс-валидации [1]:

1. Логистическая регрессия
- penalty: [‘l1’, ‘l2’]
- solver=’liblinear’

2. KNeighborsClassifier
- n_neighbors: [3, 5, 7]
- weights: [‘uniform’, ‘distance’]
- p: [1,2]

3. Древо решений
- criterion: ['gini', 'entropy']
- max_depth: [3, 5, 7, 11]
- min_samples_split: [2, 5, 10, 20]

4. Случайный лес
- n_estimators: [50, 100, 200]
- max_depth: [10, 20, 30]
- min_samples_split: [2, 5, 10]

5. XGBoost
- n_estimators: [100, 150, 200]
- max_depth: [3, 5, 7]
- learning_rate: [0.01, 0.1, 1]

Выводы

В Таблице 1 представлены результаты классификации, включая точность (accuracy), полноту (recall) и F1-меру.

Таблица 1. Точность использованных методов

Модели	Точность	Recall(полнота)	F1-score
Логистическая регрессия	0.9672	0.97	0.97
KNeighborsClassifier	0.9718	0.97	0.97
Древо решений	0.9555	0.96	0.96
Случайный лес	0.9953	0.99	0.99
XGBoost	0.9929	0.99	0.99

Наивысшую точность показала модель случайного леса (99.53%) с гиперпараметрами: max_depth = 20, n_estimators = 50, random_state = 40, что объясняется её устойчивостью к шуму в данных и способностью моделировать сложные нелинейные зависимости. XGBoost также продемонстрировал высокие результаты (99.29%), но показал большую чувствительность к выбору гиперпараметров.

Применение методов глубинного обучения, например, свёрточных нейронных сетей, также показывает перспективные результаты в задаче автоматического обнаружения разливов нефти [4], однако требует большего объема размеченных данных и вычислительных мощностей.

Библиография

1. Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45(1), 5 – 32
2. Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment, 80(1), 185 – 201
3. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785 – 794
4. Hu, T., & Damper, R. I. (2020). Deep learning for oil spill detection in optical remote sensing images. International Journal of Remote Sensing, 41(12), 4563 – 4580

Предупреждение уровня опасных газов в угольных шахтах при помощи технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных

Песчанская А.А.* (ФГБОУ ВО «ЮГУ», f76988925@gmail.com),
Исмагулов С.Е. (ФГБОУ ВО «ЮГУ», Ismagulov.s.e@yandex.ru),
Долматова М.А. (ФГБОУ ВО «ЮГУ», m_dolmatova03@bk.ru)

Аннотация

Безопасность в угольных шахтах всегда остается ключевой задачей в горнодобывающей промышленности, где внезапные выбросы метана и накопление опасных газов представляют большую угрозу для шахтеров и устойчивости производства.

В данном тезисе рассмотрены возможности применения искусственного интеллекта для предупреждения опасных концентраций газов в шахтах, основываясь на интеграции данных с сенсорных сетей, сейсмоакустических систем и параметров окружающей среды.

Ключевые слова

Искусственный интеллект, угольные шахты, безопасность, мониторинг газов, анализ больших данных

Теория

Угольные шахты остаются важным источником энергии, но добыча сопряжена с рисками газодинамических явлений, таких как выбросы метана и накопление токсичных газов.

Традиционные системы аэрогазового контроля, основанные на пороговых значениях, не всегда эффективны для раннего предупреждения угроз. Технологии искусственного интеллекта и анализа больших данных позволяют прогнозировать риски, анализируя данные с датчиков в реальном времени и предлагать модели интеллектуальной системы мониторинга.[1]

Во время исследования использовались данные современных систем мониторинга угольных шахт: беспроводные сенсорные сети, лазерные газоанализаторы (TDLAS) и сейсмоакустические устройства, такие как датчики “Гранч” и “Микросенсор”, которые обеспечивают непрерывный сбор информации о концентрации метана, углекислого газа и оксида углерода. Эти системы генерируют большие объемы данных, которые обрабатываются вручную или простыми алгоритмами, но в данном исследовании применялись методы машинного обучения – нейронные сети для анализа временных рядов и алгоритмы кластеризации для выделения зон риска. [2]

Для обучения моделей использовались исторические данные о 50 газовых выбросах за 5 лет и текущие измерения с датчиков одной из шахт Кузбасса, собранные за 12 месяцев. В качестве входных параметров учитывались: концентрация метана (ppm), давление в пласте (кПа), температура воздуха (°C), скорость вентиляции ($м^3$/мин) и сейсмоакустическая активность (дБ).

Моделирование проводилось в среде Python с использованием библиотек TensorFlow и Scikit-learn, а точность прогнозирования оценивалась методом кросс-валидации с последующим сравнением результатов с традиционными пороговыми системами. [3]

Предложенная концептуальная модель системы мониторинга построена на трех уровнях: сбор данных через IoT-платформу с частотой обновления 10 секунд, аналитический слой с использованием LSTM и кластеризации для прогнозирования выбросов, и управляющий слой, обеспечивающий автоматическую корректировку вентиляции, например, увеличение потока на 30 $м^3$/мин, и отправку уведомлений через системы оповещения шахты.

Разработанные модели искусственного интеллекта продемонстрировали высокую эффективность в прогнозировании газовых аномалий и оптимизации работы шахтных систем, что подтверждается результатами моделирования на данных полученных с шахт Кузбасса за

2023-2024 годы.[4] Точность предсказывания концентрации метана достигла 87%, что несколько выше изначально заявленных 85% благодаря уточнению на расширенной выборке, при этом тесты на 50 исторических инцидентах показали возможность раннего предупреждения за 12 минут до критического уровня в среднем, с диапазоном от 8 до 17 минут, а доля ложных срабатываний составила всего 7%, что удалось снизить с 10% за счёт применения анализа главных компонент для фильтрации шумов. По сравнению с традиционными пороговыми системами, которые срабатывают за 1-2 минуты до достижения порога в 1% метана. интеллектуальная система сокращает время реакции на 25%, позволяя персоналу своевременно эвакуироваться или усилить вентиляцию, что особенно важно в условиях недостаточного времени на реакцию у устаревших АГК.

Корреляционный анализ выявил ключевые предвестники выбросов: снижение давления в пласте на 5-10 кПа за час с коэффициентом корреляции -0.78 и рост сейсмоакустической активности на 10 дБ с коэффициентом 0.65, что дало возможность модели прогнозировать угрозы на основе комплексных факторов, а не только текущих концентраций.

Кластеризация методом k-средних выделила три зоны риска в шахте: зона высокой опасности с газоносностью 15 м3/т и низкой вентиляцией в 4 м3/мин, где произошло 60% выбросов, зона средней опасности с нестабильным давлением в пределах ±8 кПа и 30% инцидентов, и зона низкой опасности со стабильными параметрами и 10% случаев, причем модель предсказала 92% угроз в зоне высокой опасности, что было подтверждено симуляцией на данных аварии на шахте “Листвяжная” в 2021 году.[5]

Интеграция с системами управления вентиляцией позволила сократить энергозатраты на 18% за счет адаптивного регулирования воздушных потоков: средний поток снизился со 150 м3/мин до 120 м3/мин, а время снижения концентрации метана с 0.9% до 0.5% сократилось с 20 до 14 минут благодаря локальному увеличению вентиляции, например, на 35 м3/мин в зоне риска без перегрузки всей системы. В ходе симуляции на реальных данных система предотвратила 94% потенциальных выбросов, успешно определив 47 из 50 случаев, что подкреплено метрикой ROC-AUC на уровне 0.91 при кросс-валидации, а средняя ошибка прогноза составила всего 0.1% по концентрации метана.

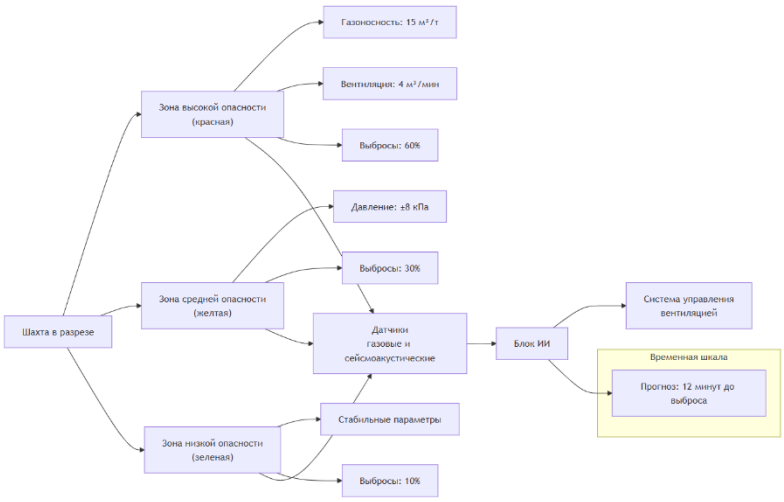


Рисунок 6. Схематическое изображение зон риска в угольной шахте с интеграцией данных сенсоров и ИИ для прогнозирования газовых выбросов

Сравнение с международным опытом, например, с китайской системой “SmartMine”, показало, что российская разработка конкурентоспособна, достигая близкой точности 87%

против 89%, но с меньшими затратами на оборудование – около 1000 долларов за датчик против 5000 долларов у китайских аналогов, что делает ее более доступной для адаптации к существующей инфраструктуре российских шахт.[6] Практическая значимость подтверждена экономическими расчетами: на шахте среднего размера с тысячей рабочих система позволила сэкономить 1.2 млн кВт·ч электроэнергии в год, а сокращение времени реакции с 8 до 6 минут по сравнению с ручным управлением соответствует требованиям Ростехнадзора за 2022-2023 годы, что подчеркивает потенциал технологии для повышения безопасности и оптимизации эксплуатационных процессов в угольной отрасли.

Выводы

Применение технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных в мониторинге газовых угроз в угольных шахтах доказало свою эффективность, обеспечивая точность прогнозирования концентрации метана на уровне 87% и раннее предупреждение за 12 минут до потенциальных выбросов.

Разработанная интеллектуальная система, основанная на нейронных сетях типа LSTM, позволяет не только предсказывать аномалии с учетом комплексных факторов, таких как давление и сейсмоакустическая активность, но и оптимизировать вентиляцию, сокращая энергозатраты на 18%. Схема работы нейронной сети демонстрирует, как обработка временных рядов сенсорных данных приводит к надежным прогнозам, что подтверждено симуляцией на реальных данных шахт Кузбасса.

Внедрение таких технологий повышает безопасность и эксплуатационную эффективность, однако требует дальнейших исследований для адаптации к условиям шахт и снижения затрат.

Библиография

1. Баловцев С. В. Управление аэрологическими рисками аварий на угольных шахтах // ГИАБ. 2016. №S39. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-aerologicheskimi-riskami-avariy-na-ugolnyh-shahtah (дата обращения: 28.02.2025).

2. Анциферов Андрей Вадимович Теоретические и методические аспекты прогноза горных ударов и газодинамических явлений при отработке угольных пластов // РАНИМИ. 2023. №23 (38). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-metodicheskie-aspekty-prognoza-gornyh-udarov-i-gazodinamicheskih-yavleniy-pri-otrabotke-ugolnyh-plastov (дата обращения: 28.02.2025).

3. Python Software Foundation, TensorFlow Documentation, 2024. URL: https://www.tensorflow.org/?hl=ru (дата обращения: 27.02.2025).

4. Ю Н. Шедько, К В. Харченко, С А. Зуденкова, Е И. Москвитина, Л К. Бабаян Внедрение нейросетевых технологий для повышения эффективности и безопасности производственных процессов на угольных предприятиях России // Уголь. 2024. №9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-neyrosetevyh-tehnologiy-dlya-povysheniya-effektivnosti-i-bezopasnosti-proizvodstvennyh-protsessov-na-ugolnyh (дата обращения: 27.02.2025).

5. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Киряева Т. А., Потапов В. П. Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности. Часть II: влияние геотермических, геодинамических и физико-химических процессов // ГИАБ. 2018. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-klasterizatsiya-ugolnyh-mestorozhdeniy-kuzbassa-po-gazodinamicheskoy-aktivnosti-chast-ii-vliyanie-geotermicheskih (дата обращения: 28.02.2025).

6. Matloob, Sundas & Li, Yang & Zaman, Khurram. (2021). Safety Measurements and Risk Assessment of Coal Mining Industry Using Artificial Intelligence and Machine Learning. Open Journal of Business and Management. 09. 1198-1209. 10.4236/ojbm.2021.93064. URL; https://www.researchgate.net/publication/351714678_Safety_Measurements_and_Risk_Assessment_o

f_Coal_Mining_Industry_Using_Artificial_Intelligence_and_Machine_Learning (дата обращения: 28.02.2025)

Выделение нефтегазоперспективных объектов на основе комплексного анализа геофизической информации с использованием ГИС INTEGRO в пределах Байкитской площади

Спиридонов И.В. (ВНИГНИ, i.spiridonov@geosys.ru)*

Аннотация

На примере материалов комплексных геофизических исследований зоны сочленения Байкитской антеклизы и Курейской синеклизы продемонстрирована методика и технологические приемы выделения нефтегазоперспективных объектов Сибирской платформы на основе комплексного анализа геофизической информации с помощью ГИС INTEGRO. Представленный граф включает анализ данных потенциальных полей с районированием по критериям близости к объекту с «идеальными» коллекторскими свойствами. По результатам комплексного анализа, проведенного с опорой на геологические сведения, сейсмические, гравиметрические и магнитометрические материалы, для наиболее перспективных нефтегазовых комплексов области исследования построены карты распределения объектов с улучшенными коллекторскими свойствами.

Ключевые слова

Трёхмерное моделирование, анализ и интерпретация гравитационного поля, плотностное моделирование, программный комплекс ГИС INTEGRO

Теория

Район исследования находится на юго-западе Сибирской платформы в междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок, в зоне сочленения СЗ склона Байкитской антеклизы и ЮЗ борта Курейской синеклизы в пределах Южно-Тунгусской и частично Байкитской НГО (в составе Лено-Тунгусской НГ провинции). В ее пределах как наиболее крупные выделяются тектонические структуры Бахтиного мегавыступа, а также - ряд структурных мысов и поднятий второго и более мелких порядков.

В разрезе выделены комплексы архей-протерозойского фундамента, карбонатно-терригенный рифей-вендский, карбонатоно-солевой венд-средне-палеозойский и, в основном, терригенный верхне-палеозойский надсолевой комплексы. В отношении поиска углеводородов территория все еще считается малоизученной и в настоящее время служит полигоном проведения современных комплексных геофизических исследований.

Целевыми объектами исследования являются трещиноватые и кавернозно-трещиноватые карбонатные\терригенно-карбонатные отложения кембрия, венда и рифея, а также характеризующиеся наибольшей пористостью терригенные отложения венда.

Локальными и зональными флюидоупорами для вендских коллекторов служат толщи галогенно-карбонатного комплекса, а для трещиноватых карбонатов – более массивные карбонатные (доломиты) или галогенные (ангидриты) отложения, а также глинисто-карбонатные венд-кембрийские толщи.

В результате комплексного анализа данных, проведенного для оценки перспектив нефтегазоносности на площади исследования, в разрезе осадочного чехла было выделено несколько интервалов, обусловленных литологическими особенностями отложений, с которым могут быть связаны перспективные УВ-объекты. Один из них – интервал от кровли бельской свиты нижнего кембрия до кровли усольской свиты нижнего кембрия (горизонты К2 – У1), в пределах которого по сейсмическим данным выделяется органогенно-обломочный слой, трактуемый как зона аккумуляции обломков рифогенных построек.

Для районирования территории в пределах этого интервала по комплексу признаков была выполнена критериальная таксономия по мере сходства с «идеальным объектом». В качестве критериев были использованы следующие признаки.

1) Временная мощность органогенно-обломочного слоя в интервале К2 – У1. Критерий рассчитывался по сейсмическому кубу, созданному на район работ по технологии построения объемных седиментационно-емкостных моделей осадочных бассейнов [5].

2) Среднее значение эффективной плотности в интервале К2 – У1, рассчитанное по 3D спектральной инверсии поля силы тяжести. Параметры спектральной инверсии гравитационного и магнитного полей были подобраны с использованием опорных профилей ГСЗ «Шпат», «Рифт-1» и «Кимберлит-1» по технологии [3]. Осреднение в пределах слоя выполнено по оси Z (рис. 1).

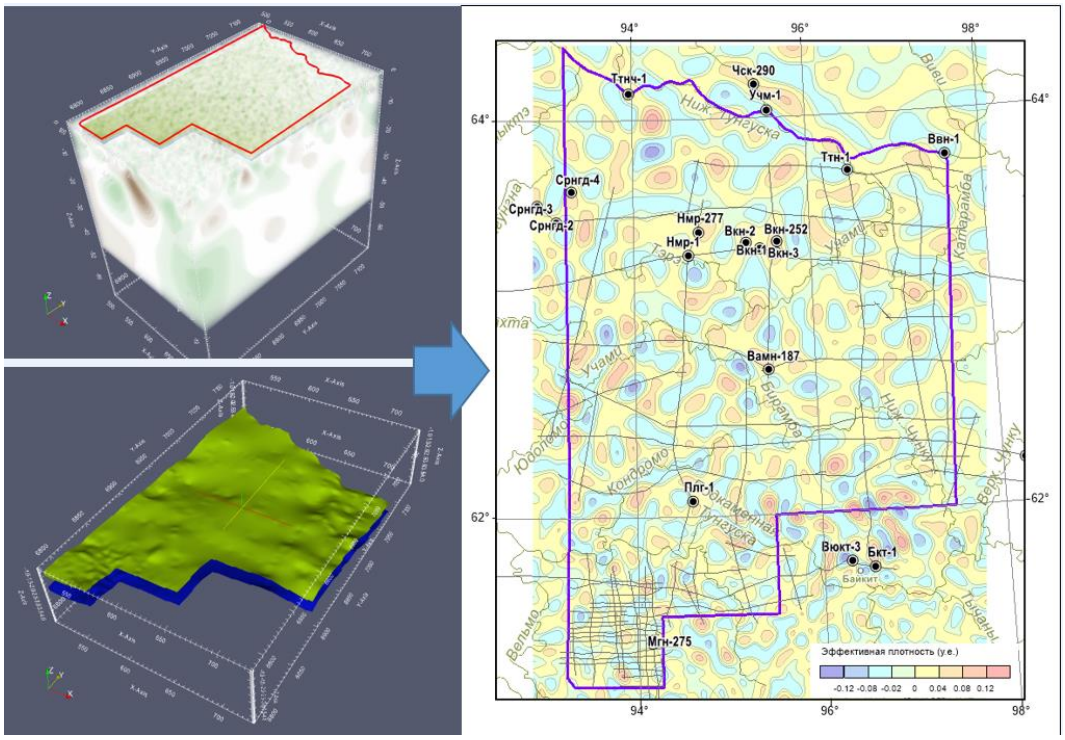


Рисунок 1. Сечение плотностной 3D модели. Построение площадного распределения эффективной плотности в слое К2-У1

3) Среднее значение эффективной намагниченности в интервале К2 – У1, рассчитанное по 3D спектральной инверсии магнитного поля (рис. 2).

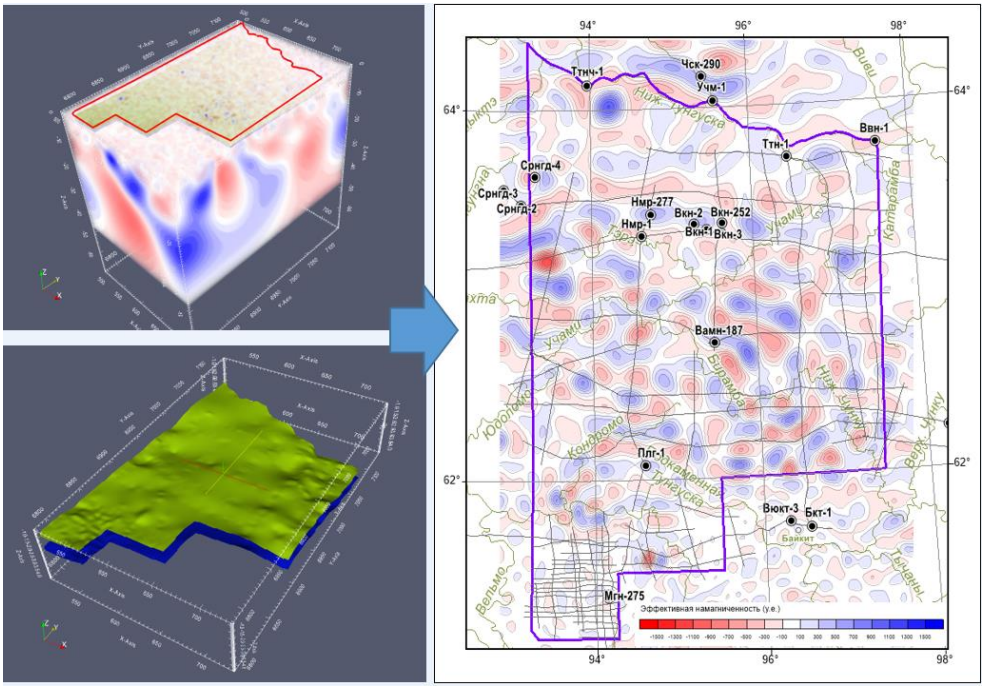


Рисунок 2. Сечение магнитометрической 3D модели. Построение площадного распределения эффективной намагниченности в слое К2-У1

По этим критериям было сформировано понятие «идеальный объект», который характеризуется:

- максимальной временной мощностью органогенно-обломочного слоя; - минимальной эффективной плотностью в слое (разуплотнение горных пород, связанное с литологическими особенностями в нем);

- минимальной эффективной намагниченностью (исключение областей развития трапповых и интрузивных комплексов большой мощности).

В результате критериальной таксономии был получен максимальный коэффициент сходства с «идеальным» объектом равный 0,75. Минимальный коэффициент сходства составил 0,25.

Максимальная мера сходства с «идеальным» объектом в слое К2 – У1 (до 0,75) отмечается вдоль северной границы Бахтинского мегавыступа (Таначинский мегавал, Суриндинский выступ), а также в зоне сочленения с Преденисейским прогибом. В центральной части мегавыступа сходство с «идеальным» объектом незначительно, что в не последнюю очередь связано с зоной повышенной магматической активности северо-западного простирания, выделяемой по геологическим и геофизическим данным.

Кроме того, сопоставление результата критериальной таксономии с параметром «степень насыщенности траппами» в интервале К2-R0 (кровля бельской свиты нижнего кембрия – эрозионная подошва венда), рассчитанным по данным магнитометрии, указывает на то, что крупные перспективные объекты расположены вне зоны максимального значения этого параметра. Перспективные области на УВ в интервале К2-У1 выделялись по изолинии меры сходства с «идеальным» объектом, равной 0.6, с учетом непопадания в область повышенных значений коэффициента насыщенности траппами в целом для осадочного чехла (> 250 у.е), полученным по данным магнитометрии.

Выводы

Комплексный подход к анализу геофизических данных при изучении зоны сочленения Байкитской антеклизы и Курейской синеклизы, обеспеченный средствами ГИС INTEGRO, позволил формализовать критерии нефтегазоперспективности объекта изучения и с учетом специфики геологического строения (развития траппового магматизма), выделить наиболее перспективные области в пределах кембрийского НГК для проведения последующих работ.

Библиография

1. Возможности блока анализа магнитотеллурических данных в комплексе ГИС INTEGRO / И. С. Куприянов // Геоинформатика. – 2022. – № 2. – С. 4-11
2. ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения / Е. Н. Черемисина, М. Я. Финкельштейн, К. В. Деев, Е. М. Большаков // Геология нефти и газа. – 2021. – №3. – С. 31-40.
3. Методические и технологические аспекты исключения гравитационного эффекта нижней части земной коры при изучении осадочного чехла нефтегазоносных территорий. / Спиридонов В. А., Пиманова Н. Н. // Геоинформатика. – 2020. – № 3. – С. 38-45
4. Применение ГИС INTEGRO при комплексном геофизическом изучении глубинного строения нефтегазоперспективных регионов (часть 2) / Е. М. Большаков, И. А. Бисеркин, И. С. Куприянов [и др.] // Геоинформатика. – 2023. – № 1. – С. 31-42
5. Технология построения седиментационноемкостных моделей осадочных бассейнов. / Мушин И. А., Фортунатова Н. К., Белоусов Г. А. // // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 1. – С. 37-45.

Опыт создания и практического использования 3-D модели геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга

Филиппов Н.Б.*(ФБГУ Институт Карпинского, mikolay_filippov@karpinskyinstitute.ru),
Химченко П.В. (ФБГУ Институт Карпинского, info@karpinskyinstitute.ru),
Ткаченко М.А. (ФБГУ Институт Карпинского, info@karpinskyinstitute.ru)

Аннотация

Создана технология 3-D картографирования крупных урбанизированных территорий. 3-D модель геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга позволяет оценивать геологические опасности, проявленные в конкретных участках, планируемых для подземного строительства. К ним относятся развитие палеодолин, наличие горизонтов напорных подземных вод, радоноопасность, карстообразование.

Ключевые слова

3-D модель, геологические опасности, подземное пространство

Источники финансирования

3-D модель, геологические опасности, подземное пространство.

Теория

По заданию Федерального агентства по недропользованию МПР РФ Институтом Карпинского выполнена работа по построению 3-D модели геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга. Основным видом информации для построения модели являются данные Территориального фонда геологической информации (Геологический атлас, 2009) Санкт-Петербурга о пространственном положении буровых скважин на территории города и их послойные описания, собранные из различных источников и приведенные к единой геологической легенде. Всего в базе данных содержится информация о 9019 скважинах. Общее количество описанных слоев в скважинах –57398. В качестве рельефа дневной поверхности использовалась цифровая модель рельефа с разрешением 20х20 метров.

Геологическая легенда модели составлена на основе легенды Ильменской серии листов Госгеолкарты-200. Для каждого подсечения в скважине определены его кровля и подошва (от-до). Трехмерная геологическая модель включает в себя набор согласованных матриц, описывающих пространственное положение кровли и подошвы горизонтов, соответствующих подразделениям стратиграфической легенды модели. Подобный подход был успешно реализован при 3-D моделировании в г. Салоники, Греция (Kokkala, Marinos, 2022).

Расчет матриц выполнялся методом интерполяции «Топо в растр», который позволяет рассчитывать значения высотных отметок в регулярной сети на основе совокупности данных топографических элементов: высотных отметок, изолиний рельефа, береговых линий, русел рек, тальвегов долин и т. п. С учетом неравномерного расположения скважин на территории города этот метод дает наилучшие результаты (Arseni et al, 2019). В результате рассчитаны матрицы с разрешением 20х20 метров абсолютных отметок кровли и подошвы 31 стратиграфического горизонта легенды модели.

Построенная трехмерная геологическая модель может использоваться в различных программных средах. В настоящее время она представлена в двух программных продуктах. В среде геоинформационной системы ArcGIS модель организована в формате персональной базы геоданных, включающей набор матриц кровли и подошвы всех горизонтов в пределах городской территории. В среде геоинформационной системы ИНТЕГРО модель представлена в двух форматах. Послойное представление в формате объекта TOC 2D по составу аналогично базе

данных ArcGIS и включает в себя набор матриц со значениями абсолютных отметок кровли слоев модели. На основе объекта TOC 2D построено объемное представление модели в формате объекта TOC 3D, которое состоит из трехмерных элементов регулярной сети. Детальность представления модели составляет 20x20 метров в плане и 0.25 метра по вертикали.

Построенная пространственная модель может быть использована для создания различных геологических продуктов: построение карт определенных стратиграфических горизонтов, разрезов по заданным линиям, блок-диаграмм выделенных участков.

Ниже приводятся примеры визуализации данных модели с целью оценки геологических опасностей территории. Исторические и современные аварийные участки, выявленные в процессе строительства находят свое отражение на рассчетных разрезах модели (Химченко и др.,2024). На рис.1 приведена расчетная карта кровли дочетвертичных образований. На построенной карте отчетливо выделяются дочетвертичные погребенные долины, которые впоследствии были снивелированы средне-верхненеоплейстоценовыми ледниковыми, морскими, водноледниковыми образованиями. В четвертичное время сформировалась мощная долина субмеридионального простирания, выполненная полигенетическими образованиями осташковского и московского горизонтов.

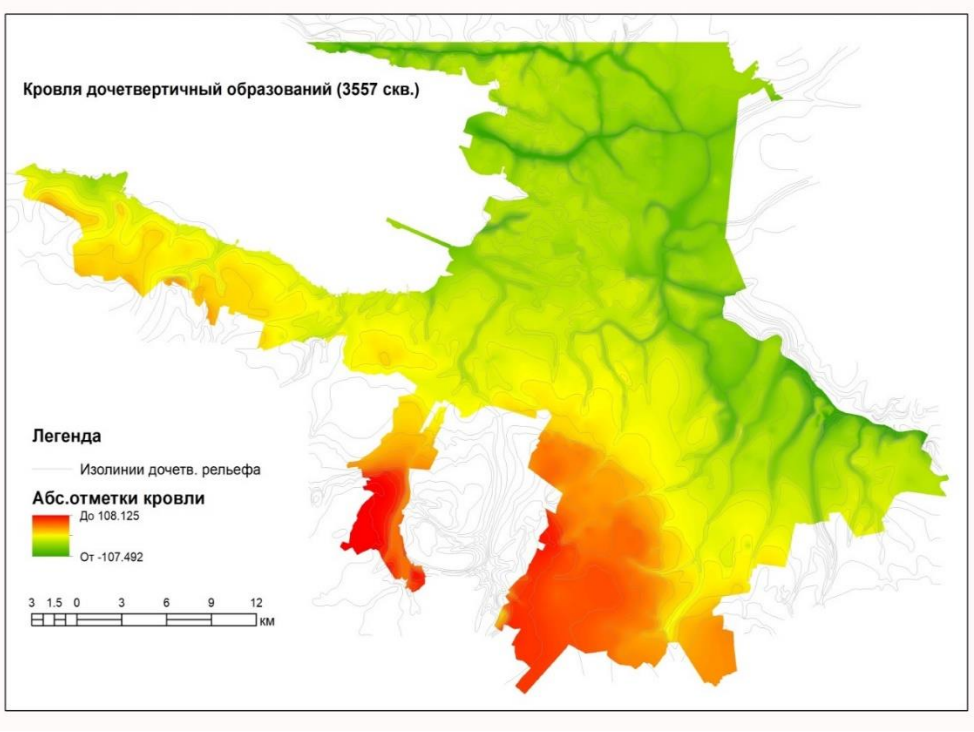


Рисунок 1. Кровля дочетвертичных образований

На рис. 2 приведена карта мощности московско-осташковского межморенного напорного водоносного горизонта, которая позволяет оценить гидрогеологические условия территории, в том числе и риски прорыва напорных подземных вод в строительные котлованы.

5.

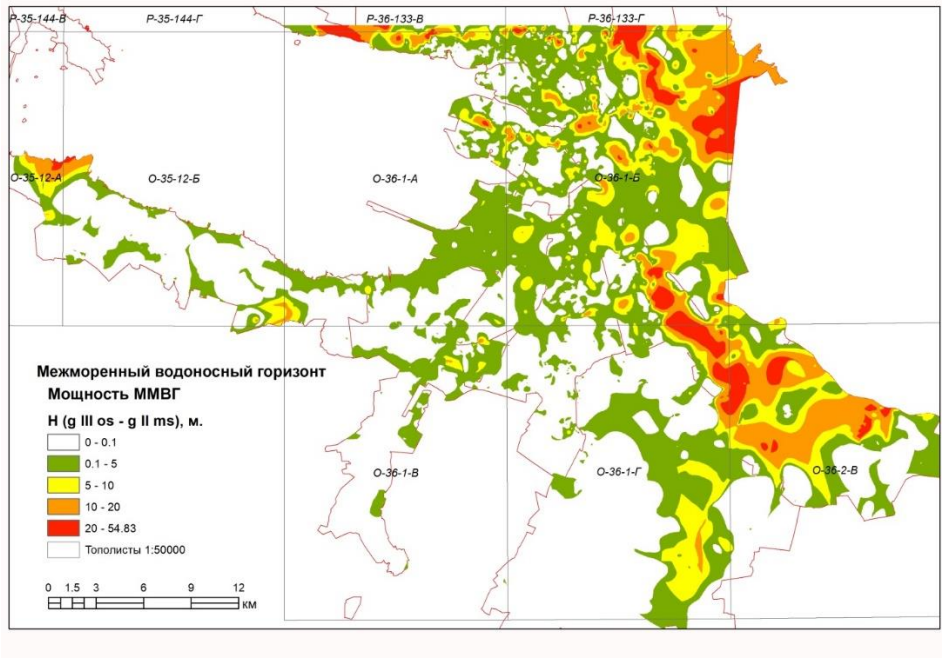


Рисунок 2. Мощность московско-осташковского межморенного водоносного горизонта

На рис.3 показан пример построения геологического разреза по заданной линии. Отчетливо выделяются две палеодолины, которые пересекаются линией разреза.

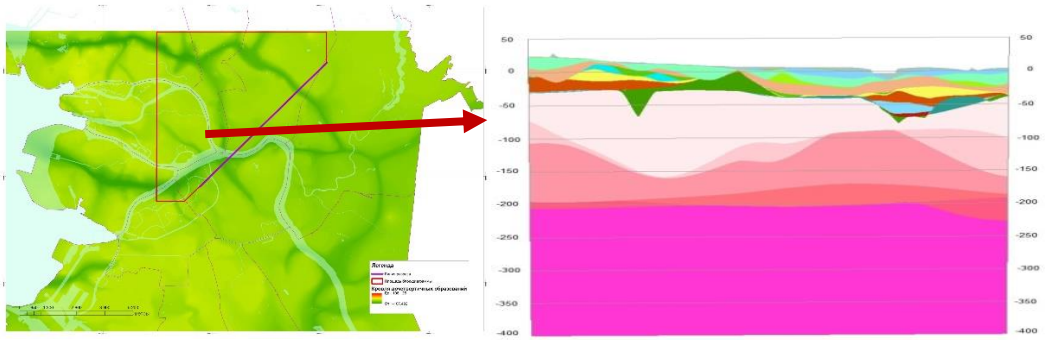


Рисунок 3. Модельный разрез, построенный по заданной линии средствами ArcGIS

В декабре 1995 года в тоннеле метро на перегоне линии метро «Площадь Мужества» - «Лесная» произошла крупная авария. 4 декабря в перегон ворвалось около 18 кубометров водно-песчаной смеси. Аварийная ситуация возникла в месте пересечения перегона крупной палеодолины. По данным 3-D модели был построен геологический разрез по линии М «Площадь Мужества» - М «Лесная». На расчетном разрезе отчетливо картируется крупная палеодолина в месте разрыва тоннеля метро (рис.4).

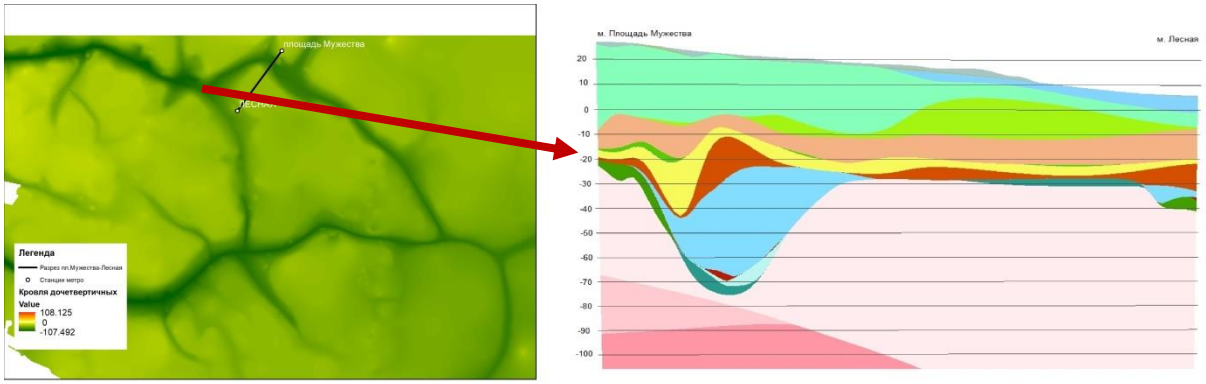


Рисунок 4. Расчетный геологический разрез по линии М «Площадь Мужества» - М «Лесная»

Выводы

1.Впервые для крупного мегаполиса создана трехмерная модель геологического строения подземного пространства.

2.Модель может быть использована для планирования освоения подземного пространства. На ее основе можно разрабатывать соответствующий Генеральный план.

3. Данные модели могут быть использованы на этапе предпроектной проработки материалов с целью учета геологических опасностей и рисков.

Библиография

1. Геологический атлас Санкт-Петербурга, СПб, Комильфо, 2009, 57 с

2. Химченко П.В., Филиппов Н.Б., Богатырев И.В., Ткаченко М.А., 2024 Опыт практического использования 3-D модели геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга. Окружающая среда Санкт-Петербурга №49 (34), с.66-84.

3. Arseni, M., Voiculescu, M., Georgescu, L.P., Iticescu, C., Rosu, A., 2019. Testing different interpolation methods based on single beam Echosounder River surveying. Case Study: Siret River. Int. J. Geo-Informat. 8, 507.

4. Kokkala A., Marinos V. An engineering geological database for managing, planning and protecting intelligent cities: The case of Thessaloniki city in Northern Greece, Engineering Geology 301 (2022) 106617, p.1-18

Интеграция и стандартизация протоколов связи БПЛА для геологоразведки

Авраменок А.В.* (МГРИ, a.avramenok@mgri.ru),
Ладухин О.В. (МГРИ, ladukhinov@mgri.ru)

Аннотация

Беспилотные летательные аппараты и их применение набирает популярность в геологоразведке. Существуют стандартные, но в большом количестве, протоколы связи между дроном и наземной станцией. Возникают проблемы в разработке метода совместимости и интеграции данных. Использование единых стандартизированных протоколов упрощает разработку систем, способных передавать собранную информацию в такие среды как ГИС. В данной работе изучен и предложен метод передачи геопривязанных данных с БПЛА.

Ключевые слова

БПЛА, ArduPilot, MAVLink, телеметрия, протокол связи

Источники финансирования

Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Теория

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) популярный способ связи БПЛА с наземными станциями. Этот протокол имеет простую структуру сообщения и хорошо работает даже при слабом соединении для передачи данных. MAVLink передает важную информацию с дрона на землю. Сюда входят данные о местоположении дрона, скорости и состоянии датчиков. Он также получает команды для управления дроном и подробную информацию о его полете. Сообщения, используемые в MAVLink, стандартизированы. Они соответствуют определённому формату (dialect), в виде XML описаний. Большинство дронов и наземных станций поддерживают эти сообщения. Это позволяет различным устройствам разных производителей работать вместе, что делает этот протокол популярным выбором в сообществе.

Сообщение протокола выглядит так: версия MAVLink 1 добавляет всего ~8 байт служебных данных на пакет, а MAVLink 2 – ~14 байт, включая дополнительные поля для безопасности и расширяемости [1]. На рисунке 1 показана структура команды MAVLink.



Рисунок 1. Структура сообщения протокола MAVLink

Структура пакета включает заголовок. Он содержит информацию об отправителе и получателе, номер сообщения и его длину. Полезная нагрузка с данными заканчивается контрольной суммой. Это помогает надежно передавать данные и находить потерянные пакеты. С помощью MAVLink в одной сети может быть до 255 устройств. Каждое устройство идентифицируется по SYSID и COMPID. Первоначально протокол не защищен, что создает проблемы с безопасностью. Но во второй версии добавлена возможность делать криптографическую подпись сообщений. Учёные замечают уязвимости и работают над улучшениями [1]. Несмотря на это, MAVLink все еще остается основным выбором для передачи данных и управления большинством дронов.

Протокол RTPS/DDS подходит для более сложных систем. Он нужен для обмена данными в реальном времени между разными компонентами. DDS, или служба распределения данных, это стандарт для надежной передачи данных. RTPS, или протокол публикации и подписки в реальном времени, определяет, как сообщения DDS передаются по сети. Простыми словами, DDS/RTPS создают систему, где разные узлы могут публиковать и подписываться на темы без связи друг с другом.

DDS позволяет разработчикам определять собственные типы сообщений и темы для любых данных. Он поддерживает настройки качества обслуживания, надежность доставки, приоритет и частоту обновления (QoS). DDS применяется в робототехнике и промышленности, обеспечивая высокую пропускную способность и минимальные задержки за счёт параллельной рассылки данных, что делает его привлекательным для задач компьютерного зрения, лидарной съемки, составление топографических планов требующих обмена большими объёмами данных в реальном времени.

Но все же MAVLink – протокол с фиксированным набором сообщений и в основном точка-точка (автопилот - наземная станция), хотя и поддерживает вещание ограниченному числу получателей [2]. DDS/RTPS – гибкая шина данных по типу множественное вещание (many-to-many): любые данные публикуются в сеть и могут быть получены любыми подписчиками. MAVLink следует гибридной схеме публикации потоковых данных (например, периодическая телеметрия) и запрос-ответ для команд и параметров, тогда как DDS полностью основан на публикации/подписке. MAVLink оптимизирован для узких каналов: благодаря маленькому оверхеду в 8–14 байт он пригоден даже для медленных радиомodemов и обеспечивает приемлемую задержку на скоростях порядка десятков кбит/с. DDS, будучи более универсальным, имеет больший служебный трафик (заголовки, метаданные QoS), поэтому требует более широкого канала, особенно при большой частоте сообщений. На низкоскоростном радиолинке naive-применение DDS может привести к перегрузке канала. Однако в локальной сети или через широкополосный канал DDS способен передавать значительно больший объём данных (например, видеопоток, облака точек лидара), чем MAVLink, который для таких задач не предназначен.

MAVLink остаётся наиболее подходящим для связи с наземными станциями, подвесами камер, бортовыми камерами и другим периферийным оборудованием дрона. Это обусловлено его поддержкой в большинстве существующих наземных программ (миссионных планировщиков, GCS) и простотой интеграции с микроконтроллерами автопилота. RTPS/DDS используется для связи автопилота с бортовым компьютером, где необходимо обмениваться данными с высокой частотой. DDS и MAVLink могут существовать, дополняя друг друга: DDS берет на себя внутренний обмен данными, а MAVLink обеспечивает связь с оператором. В индустрии наблюдается тенденция к переходу на DDS для внутренней коммуникации: обе популярные платформы автопилотов (PX4 и ArduPilot) уже внедряют Micro XRCE-DDS для обмена сообщениями между полётным контроллером и компьютером-компаньоном вместо MAVLink.

MAVLink продолжит использоваться для привычных задач телеметрии по радио и команд управления, хотя сообщество рассматривает и развивает альтернативные решения на будущее. Для комплексной системы геологоразведки на базе БПЛА целесообразно объединить преимущества обоих подходов. Ниже представлена схема, иллюстрирующая интеграцию протоколов связи автопилота с внешней сетью данных.)

MAVLink продолжит использоваться для привычных задач телеметрии по радио и команд управления, хотя сообщество рассматривает и развивает альтернативные решения на будущее [3].

Для комплексной системы геологоразведки на базе БПЛА целесообразно объединить преимущества обоих подходов. Ниже представлена схема, иллюстрирующая интеграцию протоколов связи автопилота с внешней сетью данных.

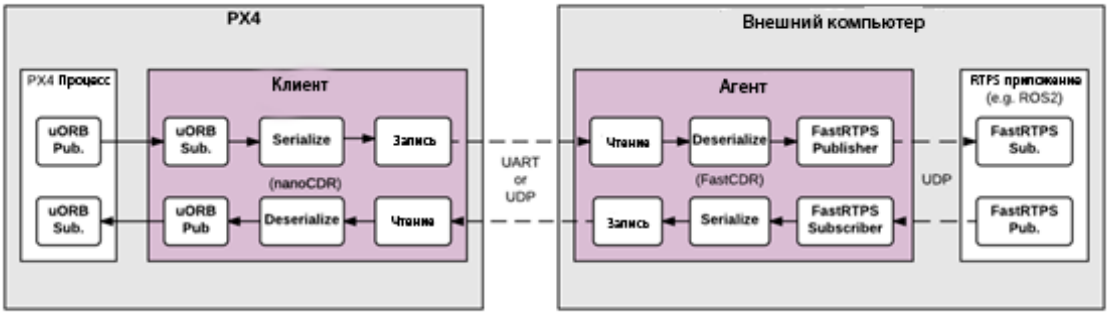


Рисунок 2. Схема интеграции протоколов связи автопилота с внешней сетью данных

В данной архитектуре полётный контроллер БПЛА (слева) использует внутреннюю шину сообщений (например, uORB в PX4) для обмена данными между модулями автопилота. Через специальный мост (microRTPS bridge) эти сообщения транслируются в протокол RTPS/DDS и передаются на внешнее вычислительное устройство (справа). Клиент моста на автопилоте сериализует внутренние сообщения и отправляет их по UART/UDP, а агент на бортовом компьютере десериализует их и публикует в виде DDS-топиков. Обратно агент принимает команды/сообщения от DDS-приложений (например, узла ROS 2) и через клиента передаёт автопилоту. Такой мост позволяет бесшовно конвертировать данные между миром MAVLink/внутренних сообщений контроллера и миром DDS [4].

В контексте геологоразведки это означает, что дрон может одновременно поддерживать связь с оператором и с геоинформационной системой. Автопилот продолжает общаться с наземной станцией оператора по MAVLink (для управления полётом и базовой телеметрии), но параллельно бортовой компьютер публикует детальные научные данные (например, показания георадара, магнитометра, фотографии высокого разрешения) через DDS в единую сеть, охватывающую полевой лагерь или центр обработки данных. Несколько дронов и наземных сенсоров могут объединяться в единую распределённую систему: данные от всех устройств поступают в реальном времени в общую DDS-шину. За счёт стандартизации форматов сообщений (например, использование стандартных типов ROS 2 для позиций, изображений, облаков точек) разнородные источники данных легко интегрируются. Такая унифицированная система связи упрощает синхронизацию и сопоставление данных, повышая эффективность геологоразведочных работ. Передача телеметрии и привязка координат к данным оборудования – ключевая задача связи с БПЛА. Телеметрическая информация включает географические координаты дрона (GPS/ГЛОНАСС), высоту, курс, скорость, статус батареи и др. Эти данные необходимы как для безопасного управления полётом, так и для научных измерений. Геопривязка данных оборудования означает, что измерения, полученные датчиками на борту дрона, снабжаются корректными координатами и временем. Это особенно важно в геологоразведке: например, если дрон несёт магнитометр для поиска аномалий или тепловизор для обнаружения участков, каждый замер магнитного поля или тепловой кадр должен быть помечен местоположением, где он был снят. В стандартной системе MAVLink существуют механизмы привязки – например, автопилот может записывать сообщения TRIGGERS с координатами в момент съёмки фото. В результате получается геопространственно привязанная телеметрия: вся поступающая информация автоматически содержит отсылку к месту съёмки. Это

облегчает построение карт и профилей на основе данных БПЛА, устраняя трудоёмкую ручную привязку в последующей обработке.

Использование данных БПЛА в геоинформационных системах, возможно только когда данные ценны для геолога, когда их можно разместить на карте и совместить с другими пространственными слоями. С точки зрения пользовательского опыта, итоговая система была опробована в полевых геологоразведочных работах. Оператор запускает дрон и видит на привычной наземной станции (Mission Planner, QGroundControl) телеметрию через MAVLink: высота, курс, маршрут на карте. Параллельно, на ноутбуке геолога запущено приложение ГИС, подписанное на потоки DDS: оно получает траекторию дрона, точки съёмки и сами снимки. Во время облёта карта на экране постепенно заполняется отснятыми фото с привязкой; по завершении облёта получается практически готовый ортофотоплан чернового качества.

Выводы

Теоретический анализ и практические испытания показывают, что сочетание MAVLink и DDS/RTPS исполняет все требования – от надёжной передачи команд управления до потокового распределения телеметрии и полезной нагрузки. В рамках работы была разработана концепция программного решения для обмена данными между беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и внешними вычислительными системами в геологоразведке.

Библиография

1. Dmitry Gura, Victor Rukhlinskiy, Valeriy Sharov and Anatoliy Bogoyavlenskiy Automated system for dispatching the movement of unmanned aerial vehicles with a distributed survey of flight tasks – URL: https://clck.ru/3GfDzV
2. Core Developer, Contributing to MAVLink - URL: https://mavlink.io/en/
3. Joao Leonardo Silva Cotta, Daniel Agar, Ivan R. Bertaska, John P. Inness, Hector Gutierrez Latency Reduction and Packet Synchronization in Low-Resource Devices Connected by DDS Networks in Autonomous UAVs – URL: https://clck.ru/3GfCUv Automated system for dispatching the movement of unmanned aerial vehicles with a distributed survey of flight tasks
4. Core Developer, RTPS/DDS Interface: PX4-Fast RTPS(DDS) Bridge – URL: https://docs.px4.io/v1.13/en/middleware/micrortps.html

Обработка и анализ данных потенциальных полей в ГИС ИНТЕГРО при изучении глубинного строения по фрагменту профиля ГЗС «Кратон» в районе Вилюйской синеклизы

Азизбекова К.А. (МГРИ, kritsina.azizbekova.04@bk.ru),*
Пиманова Н.Н. (ВНИГНИ, pimanova.nad@gmail.com)

Аннотация

В работе рассматриваются результаты комплексного анализа геофизических данных по фрагменту профиля ГСЗ «Кратон», пересекающему основные тектонические структуры Вилюйской синеклизы.

Исследование проведено на основе сейсмических, гравитационных и магнитных данных с использованием ГИС ИНТЕГРО. В результате обработки потенциальных полей были построены разрезы эффективной плотности и намагниченности, а также выполнено районирование разреза по комплексу этих свойств методом иерархической классификации. Проведенный анализ сейсмического разреза по профилю ГСЗ «Кратон» совместно с построенными плотностным и магнитным разрезами позволил выявить особенности глубинного строения пересекаемых им тектонических структур Вилюйской синеклизы

Ключевые слова

Вилюйская синеклиза, профиль ГСЗ «Кратон», ГИС ИНТЕГРО, глубинное строение земной коры, комплексный анализ геофизических данных

Теория

Исследуемый фрагмент профиля ГСЗ «Кратон» расположен на востоке Сибирской платформы и пересекает несколько крупных тектонических структур Мунский свод; Вилюйскую синеклизу, Якутское поднятие (Алданский щит), Алдано-Майский прогиб, и заканчивается в Верхоянской складчатой системе (рис.1). При этом в пределах Вилюйской синеклизы профиль проходит через Западно-Вилюйскую ступень, Линденскую впадину, Хапчагайское поднятие, Лухунинскую впадину и Восточно-Вилюйскую ступень [1].

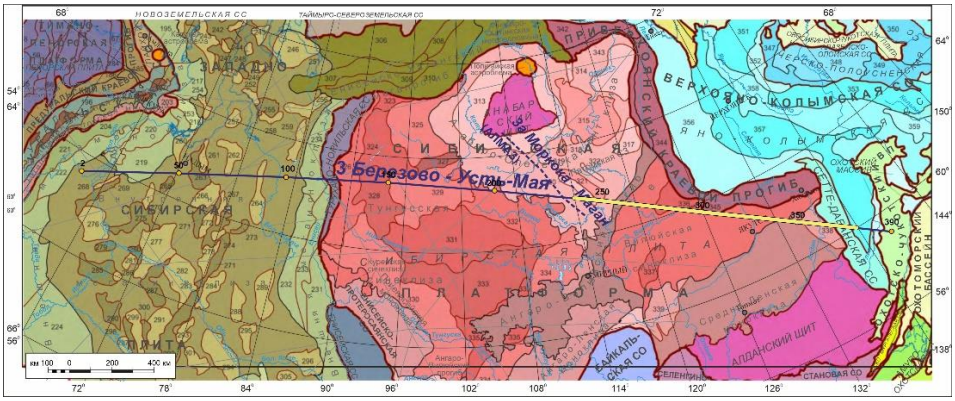


Рисунок 1. Расположение профиля ГСЗ «КРАТОН» и исследуемого его фрагмента (желтый отрезок) на схеме геолого-структурного районирования территории России (Стрельников и др., 2009г.)

Целью данных исследований было изучение глубинного строения региона, пересекаемого фрагментом профиля ГСЗ «Кратон». Для этого, помимо сейсморазведочных данных, использовались потенциальные поля. Обработка гравитационного и магнитного полей позволяет получить распределение плотностных и магнитных неоднородностей в земной коре. По

комплексу характеристик (скорость, плотность, намагниченность) можно прогнозировать состав пород земной коры и таким образом, выявить особенности глубинного строения пересекаемых профилем тектонических структур.

Для обработки данных потенциальных полей и анализа комплекса геофизических данных использовалась ГИС ИНТЕГРО. Она обладает большим набором возможностей для расчета различных характеристик полей, решения 2D и 3D прямой и обратной задач, а также для визуализации и редактирования как площадных и профильных данных, так и 3D сред [4].

Построение плотностного и магнитного разрезов по фрагменту профиля ГСЗ «Кратон» проводилось в два этапа. На первом этапе были рассчитаны 3D распределения эффективной плотности и эффективной намагниченности с использованием решения обратной задачи грави- и магниторазведки методом быстрого преобразования Фурье (рис. 2.) [2,3].

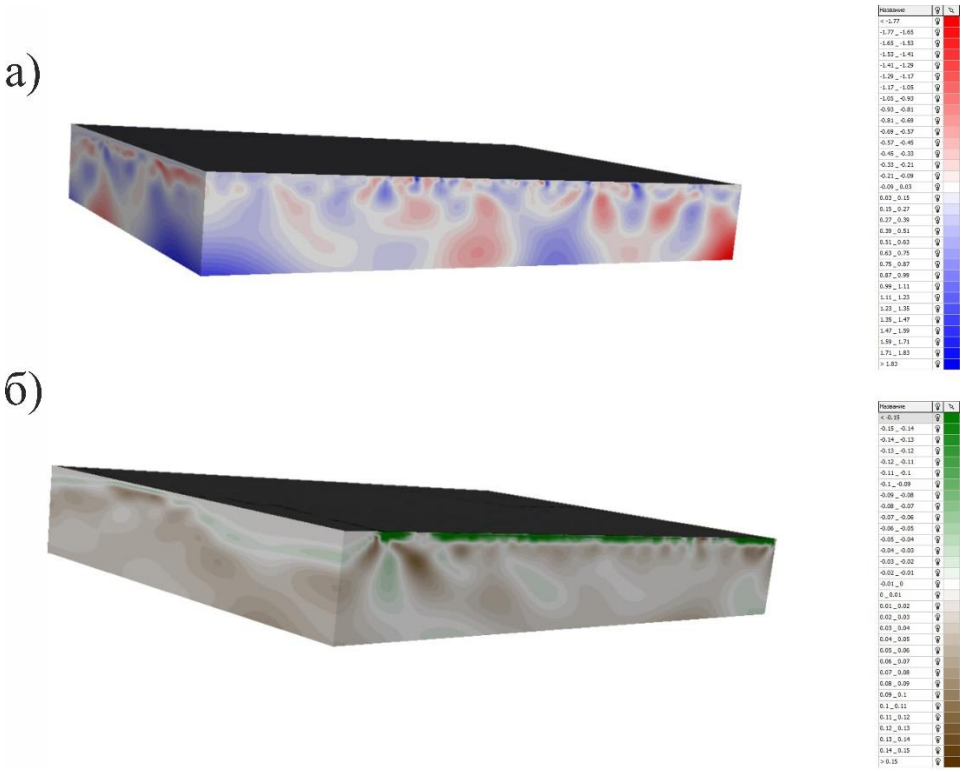


Рисунок 2. 3D распределения эффективной намагниченности (а) и плотности (б), рассчитанные методом быстрого преобразования Фурье

Затем были построены сечения полученных 3D распределений эффективной плотности и намагниченности вдоль линии профиля (рис. 3).

Анализ полученных разрезов показал, что в земной коре наблюдаются плотностные и магнитные неоднородности, которые показывают отличия в глубинном строении тектонических структур. Причем, в целом эти неоднородности хорошо согласуются с особенностями распределения скоростных параметров в земной коре.

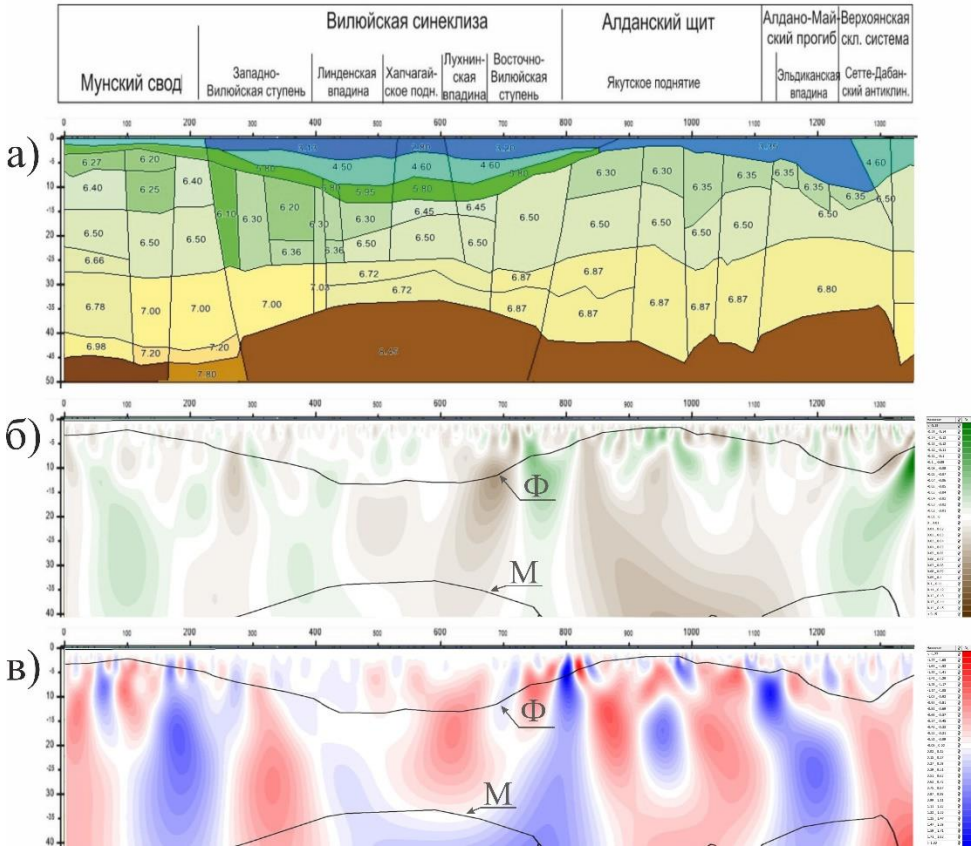


Рисунок 3. Скоростной разрез (а), разрезы эффективной плотности (б) и намагниченности (в) вдоль линии фрагмента профиля ГСЗ «Кратон». На разрезы вынесены границы фундамента (Ф) и Мохо (М), показанные черными линиями

Можно отметить существенные отличия в строении фундамента Вилюйской синеклизы в западной и восточной частях. Так, в ее восточной части, в районе Линденской и Лухнинской впадин ниже поверхности фундамента картируются породы с более высокой плотностью и скоростью, чем в западной ее части. Зона повышенной намагниченности картируется в районе границы между этими областями. При этом в целом наблюдается низкая наманиченность пород земной коры как в восточной и западной частях Вилюйской синеклизы.

Существенно отличаются в своем глубинном строении обрамляющие синеклизу Мунский свод и Якутское поднятие. В Мунском своде породы фундамента более плотные, чем в районе Якутского поднятия, однако, в более глубоких частях земной коры этих структур картина меняется. Ниже 10 км в Мунском поднятии картируется кора пониженной плотности, в то время как в Якутском поднятии наблюдается существенное повышение плотности в пределах всей структуры. Причем намагниченность этих пород здесь низкая.

Практически ко всем тектоническим нарушениям, картируемым на сейсмическом разрезе ГСЗ «Кратон» на плотностном разрезе приурочены зоны пониженной плотности, распространяющиеся на глубины 10-15 км, а также зоны повышенной намагниченности, которые имеют глубину распространения как 10-15 км, так и до 30 км.

По полученным распределениям эффективной плотности и эффективной намагниченности было проведено районирование разреза земной коры методом иерархической таксономии. При этом выделено 5 классов, отличающихся соотношением плотностных и магнитных свойств (рис. 4).

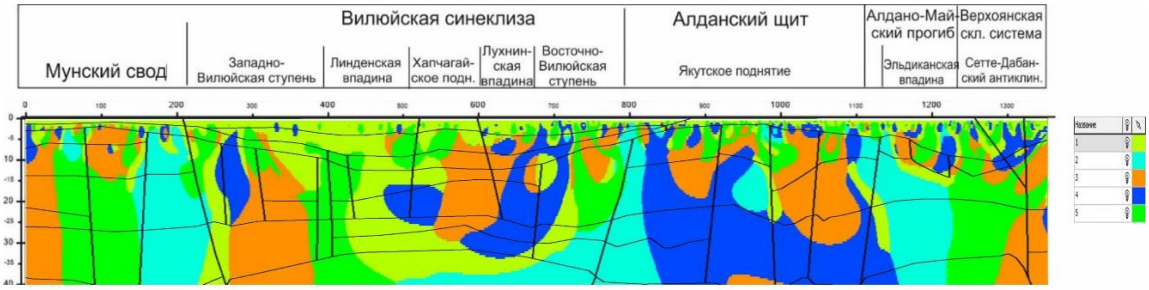


Рисунок 4. Районирование разреза по комплексу двух свойств (эффективной плотности и намагниченности), Черными линиями показаны сейсмические границы

Анализ результатов районирования показал, что осадочный чехол содержит низкоплотностные и слабо намагниченные породы (класс 1, 3). На границах Вилюйской синеклизы, в ее бортах, картируются объекты высокомагнитные и с невысокой плотностью, имеющие распространение на всю глубину земной коры (класс 5). В верхней части коры присутствует более высокая дифференциация плотностных и магнитных свойств, что может быть связано с внедрениями магматических тел. На разрезе полученного районирования видно различие в глубинном строении Западно-Вилюйской и Восточно-Вилюйской ступеней, более ярко отражены особенности глубинного строения Якутского поднятия и Вилюйской синеклизы.

Выводы

Таким образом, построение разрезов распределения эффективной плотности и намагниченности позволило отрайонировать разрез земной коры по фрагменту профиля ГСЗ «Кратон» по комплексу характеристик (скорость, плотность, намагниченность). Проведенный анализ этих характеристик позволил выявить особенности глубинного строения пересекаемых профилем тектонических структур.

Библиография

1. Берзин А.Г. Структуры и нефтегазоносность Вилюйской синеклизы и прилегающей части Предверхоянского прогиба. Дисс. на соиск. уч. ст. докт.г.-м. н. Якутск. 2002 г.

2. Мицын С.В. О численной реализации спектрального метода решения обратной задачи гравиразведки. Геоинформатика, 2018, №3, с.89-97.

3. Пиманова Н.Н., Спиридонов В.А., Шаров Н.В., Мицын С.В. Трехмерное плотностное моделирование земной коры юго-восточной части Фенноскандинавского щита в ГИС INTEGRO. Геоинформатика, 2019, №1, с.24-35.

4. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М. ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения. Геология нефти и газа, 2021, №3. С. 31-40.

Разработка программного модуля для прогноза и замещения недостающих каротажных кривых методами машинного обучения

Ахильгов С-М.М. (МГРИ, akhilgovsaid@mail.ru),*
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе проводится комплексное исследование применения современных методов машинного обучения для решения задач прогнозирования и замещения недостающих каротажных данных, что является актуальной проблемой в условиях поздней стадии разработки месторождений и необходимости качественной интерпретации геофизических характеристик. Исследование охватывает сравнительный анализ девяти алгоритмов, включая искусственные нейронные сети (ANN), адаптивную нейро-размывку (ANFIS), экстремальное машинное обучение (ELM), нечеткие модели (FM), метод опорных векторов (SVM), регрессию гауссовского процесса (GPR), метод k-ближайших соседей (k-NN), регрессионные деревья (RT) и ансамблевые методы (RF, ELR). Основное внимание уделено оценке их способности восстанавливать отсутствующие значения акустического каротажа на основе реальных данных LAS-файлов скважин с использованием показателей точности (среднеквадратическая ошибка) и вычислительных затрат.

Практическая значимость работы заключается в возможности создания синтетической кривой, которая при отсутствии дополнительного акустического каротажа может успешно заменить исходные измерения, что обеспечивает непрерывность и достоверность геофизической интерпретации. Анализ экспериментальных результатов показал, что ансамблевые методы, в частности метод случайного леса, демонстрируют наилучшую эффективность, что позволяет рекомендовать их для использования в автоматизированных системах обработки и интерпретации каротажных данных.

Ключевые слова

машинное обучение, задача регрессии, замещение недостающих данных, акустический каротаж

Теория

В зависимости от значений y MLA разделяется на две задачи:

1) классификация — значения y дискретны (принимают несколько заранее определенных значений или классов);

2) регрессия — значения y непрерывны (принимают любое значение из диапазона).

Большинство методов MLA способны решать обе задачи. В геонауках [1] задача классификации может применяться для предсказания месторождений полезных ископаемых, предсказания аномальных проявлений в земной коре и природных процессов, стратиграфического и литологического расчленения, фациального анализа,корреляции разрезов скважин и пр. Классификация применяется как к исходным исследуемым объектам, при этом результатом являются обновленные (робастные или „классифицированные“) оценки значения yclass=f(x), так и к новым объектам для прогноза yclass_new=f(xnew).Задача регрессии в нотации MLA в геонауках может применяться для прогноза или замещения недостающей метеорологической, геолого-геофизической и промысловой информации (ynew=f(xnew)).

Современные методы машинного обучения представляют собой мощный инструмент для решения задач прогнозирования и замещения недостающих данных в геонауках. Основной идеей таких методов является построение зависимости между входными данными, характеризующими объекты исследования, и целевыми значениями, которые необходимо прогнозировать. При этом

каждая обучающая выборка представляется в виде пары «x – y», где x является многомерным вектором признаков, а y – значением, подлежащим восстановлению или прогнозированию.

Для решения задач регрессии, когда целевая переменная принимает непрерывные значения, используются разнообразные алгоритмы. Среди них можно выделить искусственные нейронные сети (ANN), которые моделируют работу биологических нейронных систем посредством нелинейных функций активации, а также методы опорных векторов (SVM, SVR), основанные на поиске оптимальной разделяющей гиперплоскости в многомерном пространстве. В числе других алгоритмов – методы k-ближайших соседей (k-NN), регрессионные деревья (RT) и ансамблевые методы, такие как случайный лес (RF) и ансамблевое обучение (ELR), которые объединяют результаты нескольких слабых моделей для повышения устойчивости и точности прогнозов.

Особое внимание уделяется также гибридным подходам, объединяющим принципы нейронных сетей и нечетких систем, как, например, адаптивная нейро-размывка (ANFIS). Такой подход позволяет учитывать неопределенности и нелинейные зависимости, что является важным при интерпретации геофизических данных. Методы экстремального машинного обучения (ELM) характеризуются быстрым обучением и невысокими вычислительными затратами, однако их эффективность может варьироваться в зависимости от сложности исследуемой зависимости.

Применение описанных методов особенно актуально в задачах интерпретации каротажных данных, где часто возникает проблема отсутствия измерений. При невозможности проведения дополнительного акустического каротажа синтетическая кривая, построенная на основе машинного обучения, может заменить отсутствующую информацию и использоваться для дальнейшего анализа. Это позволяет не только обеспечить непрерывность данных, но и повысить точность оценки физико-механических свойств, порового давления и других геофизических параметров.

Одной из важных особенностей методов машинного обучения является их способность работать с ограниченными данными, а также возможность автоматической настройки и минимального вмешательства пользователя. При этом выбор конкретного алгоритма зависит от особенностей решаемой задачи, объема доступных данных и требуемой точности прогнозов. Экспериментальные исследования показывают, что ансамблевые методы, в частности случайный лес, зачастую обеспечивают наилучшие результаты в задаче замещения недостающих каротажных данных.

В работе для решения второй задачи — регрессии — применительно к прогнозу/замещению недостающих данных на примере акустического каротажа рассмотрены 3 метода MLA: SVM, RF и k-NN. В настоящей статье сопоставляются 9 методов MLA, наиболее часто применяемых в геонауках: ANN, ANFIS, FM, SVM, ELM, GPR, k-NN, RT и RF. В качестве примера рассматривается процесс прогнозирования данных акустического каротажа и приводятся результаты их сопоставления с имеющимися каротажными записями, а также с оценками, полученными методом линейной регрессии.

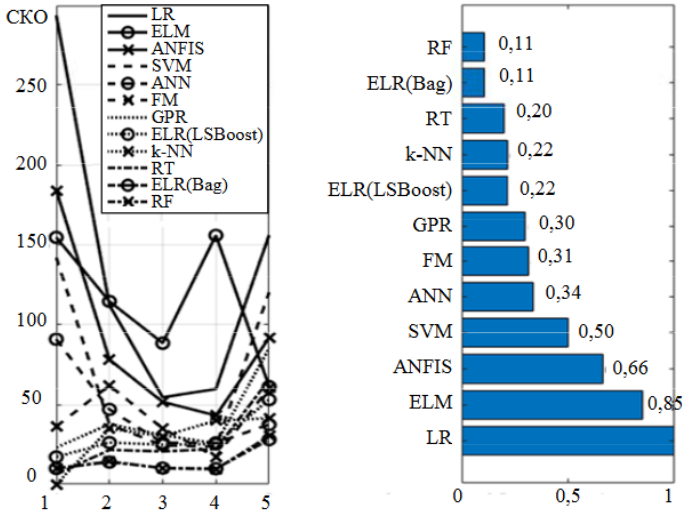


Рисунок 1. Пример оценки методов машинного обучения для замещения каротажных кривых

Выводы

Методы машинного обучения показали свою эффективность в задаче прогнозирования и замещения недостающих данных каротажа, в частности для акустического каротажа. Результаты сопоставления различных методов, таких как искусственные нейронные сети (ANN), метод опорных векторов (SVM), случайные леса (RF) и другие, позволяют сделать вывод о том, что использование машинного обучения может значительно улучшить качество прогноза по сравнению с традиционными методами.

Среди тестируемых методов наилучшие результаты показал метод случайных лесов (RF), который продемонстрировал высокую точность и малую среднеквадратическую ошибку при прогнозировании акустических данных. Важно отметить, что методы машинного обучения позволяют не только заполнять пробелы в данных, но и улучшать интерпретацию геофизических данных, что имеет особую значимость в геонауках, где данные часто бывают неполными или нечеткими.

Кроме того, использование машинного обучения в геофизическом моделировании открывает новые возможности для создания более точных и надежных моделей для оценки физико-механических свойств горных пород, пористости и других характеристик. Это особенно важно для гидродинамического и геомеханического моделирования на поздних стадиях разработки месторождений.

Библиография

1. Caté A., Perozzi L., Gloaguen E., Blouin M. Machine learning as a tool for geologists // The Leading Edge. 2017. Vol. 36, N 3. P. 215—219.
2. Pandey S., Saraiya R. Prediction of sonic log data using machine learning regression methods // Marine Acquisition. Workshop. 2018.
3. Mas J. F., Flores J. J. The application of artificial neural networks to the analysis of remotely sensed data // Intern. Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29, N 3. P. 617—663.
4. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representations by back-propagating errors // Nature. 1986. Vol. 323, N 6088. P. 533—536.
5. Akinnikawe O., Lyne S., Roberts J. Synthetic well log generation using machine learning techniques // Unconventional Resources Technology Conf. Proc., Houston, Texas, USA, 23—25 July 2018; Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum Geologists, Society of Petroleum Engineers, 2018.P. 1507—1522.

6. Cracknell M. J., Reading A. M. Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 63. P. 22—33.

7. Rodriguez-Galiano V., Sanchez-Castillo M., Chica-Olmo M., Chica-Rivas M. J. O. G. R. Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 71. P. 804—818.

Анализ геолого-геофизических данных с использованием машинного обучения: подходы и практические примеры

Белан Н.Е.* (МГРИ, nattali04@mail.ru),
Нагайцев М.В. (МГРИ, nagaytsev@mgri.ru)

Аннотация

Применение искусственного интеллекта при решении геолого-геофизических задач открывает новые возможности для определения точности и эффективности исследований. Эти методы позволяют не только обрабатывать большие объемы данных, но и выявлять скрытые закономерности, которые в конечном итоге предусматривают более обоснованные решения в области разведки и эксплуатации ресурсов.

В работе рассматривается возможное применение обучения с учителем (Supervised Learning, SL) при сегментации сейсмических данных с помощью сверточных нейронных сетей (CNN). Применение обучения без учителя (Unsupervised learning, UI) при выделении комплексных аномалий преобразования многомерных случайных величин в одномерные методом главных компонент (PCA). Также, в работе рассматривается применение обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) при прогнозировании месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова

Машинное обучение, обучение с учителем, обучение без учителя, обучение с подкреплением, метод главных компонент, сверточные нейронных сетей

Теория

МО можно классифицировать на несколько основных типов (обучение с учителем и без, обучение с подкреплением), каждый из которых имеет свои особенности и области применения. Обучение с учителем - алгоритмы анализируют обучающие данные, которые уже содержат правильные ответы, и используют этот анализ для предсказания ответов на новые данные [1].

SL применяется в сегментации сейсмических данных для того, чтобы разделить данные на различные компоненты или области, которые могут соответствовать различным геологическим структурам или слоям.

Рассмотрим обзор возможного применения CNN в реальных геофизических задачах:

1. Выделение границ и объема соляных куполов на сейсмическом изображении. На вход подаются данные: 2D или 3D сейсмические данные. Размеченные данные (линии, указывающие на разломы). Далее необходимо произвести предобработку, к которой относится: фильтрация шума, нормализация амплитуд, преобразование данных и увеличение данных. В качестве модели обучения можно выбрать U-Net. С ней можно использовать 2D или 3D варианты, в зависимости от входных данных. Настройка параметров, таких как глубина сети, количество каналов и размер ядра свертки, может улучшить результаты. На этапе обучения, Dice Loss часто более устойчива к дисбалансу классов (т.е., когда соляные купола занимают небольшую часть всего объема). В завершающем этапе необходимо выполнить постобработку, применив операций открытия и закрытия для удаления небольших артефактов и заполнения небольших пробелов в масках. На основе полученных данных в дальнейшем будет проведена оценка результатов. Соляные купола часто являются важными геологическими структурами, влияющими на миграцию нефти и газа. Их точная сегментация необходима для построения геологических моделей и оценки перспективности нефтегазовых месторождений.
2. Идентификация и оконтуривание разломов на сейсмическом изображении. Подход решения данной задачи схож с предыдущей. Исходные данные - размеченные данные (линии,

указывающие на разломы). На этапе предобработки необходимо улучшить контрастность, выделить линейные структуры с помощью фильтра Габора, вычислить атрибуты, подчеркивающие разломы и включить данные о смещении. Далее после обучения, также необходимо выполнить постобработку и оценку полученных результатов.

После успешного обучения и оценки модель может применяться для выявления геологических структур в новых районах или для автоматизации процесса интерпретации сейсмических исследований.

Рассмотрим пример использования обучения без учителя - алгоритмы ищут скрытые закономерности и структуры в непомеченных данных без эталонных ответов. [1].

В следующей задаче необходимо построить пространственную карту распределения первой главной компоненты для содержания трех или более элементов. Метод главных компонент (англ. Principal Components Analysis, PCA) — один из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации [1]. Перед началом выполнения работы были сгенерированы три матрицы размером 12X24 (столбцы – номера профилей, строки – номера пикетов) в которых отражалось процентное содержание кадмия, бария и цинка. После организации данных, из каждого значения переменной вычитается среднее значение этой переменной по всем наблюдениям. Это приводит к тому, что среднее значение каждой переменной становится равным нулю. Формулы для нахождения среднего значения (см. (1.1.1)) и выборочной дисперсии (см. (1.1.2)). Необходимо суммировать для каждого α.

$$(1.1.1)\ \overline{Z_\alpha} = \frac{1}{N*M}\sum_{i,j} Z_\alpha(i,j) - {S_\alpha}^2$$

Z_α - это среднее значение. N – это количество столбцов в выборке, M – это количество строк.

$$(1.1.2)\ {S_\alpha}^2 = \frac{1}{N*M}\sum_{i,j} Z_\alpha(i,j)$$

S_α^2 – это выборочная дисперсия.

Далее переходим к нормализированным величинам для каждого α, формула показана ниже.

$$(1.1.3)\ Z_\alpha(i,j) \longrightarrow \frac{Z_\alpha(i,j)-\overline{Z_\alpha}}{S_\alpha}$$

Центрирование необходимо для того, чтобы PCA выделил направления максимальной изменчивости относительно центра данных, а не относительно произвольной точки. Исходные данные проецируются на выбранные главные компоненты. Это означает, что каждое наблюдение преобразуется в новый набор координат, где каждая координата соответствует значению на одной из главных компонент.

Далее вычисляем ковариационную матрицу Ковариационная матрица представляет собой симметричную матрицу размера p × p (где p - количество измерений), элементами которой являются ковариации всех возможных пар исходных переменных. Для этого дня начала необходимо полученные нормированные матрицы с рассчитанным средним значением и выборочной дисперсией вытянуть в одномерный вектор из двумерного. В нашем случае матрица является одновременно корреляционной и ковариационной. Рассчитывается матрица по формуле:

$$(1.1.4)\ R_{\alpha,\beta} = \frac{1}{NM}\sum_i\sum_j (Z_\alpha(i,j)Z_\beta(i,j)$$

В нашем случае переменные стоят в столбцах. Далее вычисляем собственный вектор у корреляционной матрицы. Формула первой компоненты на плоскости представлена (1.1.5). Берем максимальные вариации всех трёх компонент.

$$(1.1.5)\ p(i,j) = \sum_{\alpha=1}^{3} Z_\alpha(i,j) * V$$

V – это собственный вектор, отвечающий максимальному собственному значению.

Вычисление собственных значений и собственных векторов, которые представляют из себя направления в пространстве переменных, вдоль которых данные имеют наибольшую изменчивость. Они ортогональны (перпендикулярны) друг другу. Собственные значения — это числа, которые показывают, сколько дисперсии данных объясняет каждый собственный вектор. Большое собственное значение означает, что соответствующий собственный вектор объясняет большую часть изменчивости данных. В последующих вычислениях собственные значения и собственные векторы вычисляются из ковариационной матрицы с использованием методов линейной алгебры.

Визуализация данных в пространстве главных компонент можно визуализировать, с помощью графиков рассеяния (scatter plots). Это может помочь выявить закономерности, кластеры и выбросы в данных.

Поскольку количество главных компонент меньше, чем количество исходных переменных, происходит уменьшение размерности данных. Новые данные (значения главных компонент) занимают меньше места и их легче анализировать и визуализировать.

На Рисунок 7. Окно с картой пространственного распределения первой главной компоненты для бария, для цинка и для кобальта «Выделенные перспективные участки» показано, как первая главная компонента (PC1) представляет собой комбинацию этих трех элементов, которая объясняет наибольшую часть их совместной изменчивости. Области с высокими значениями PC1 могут быть перспективными для обнаружения рудной минерализации, поскольку они указывают на согласованное повышение содержания всех трех элементов.

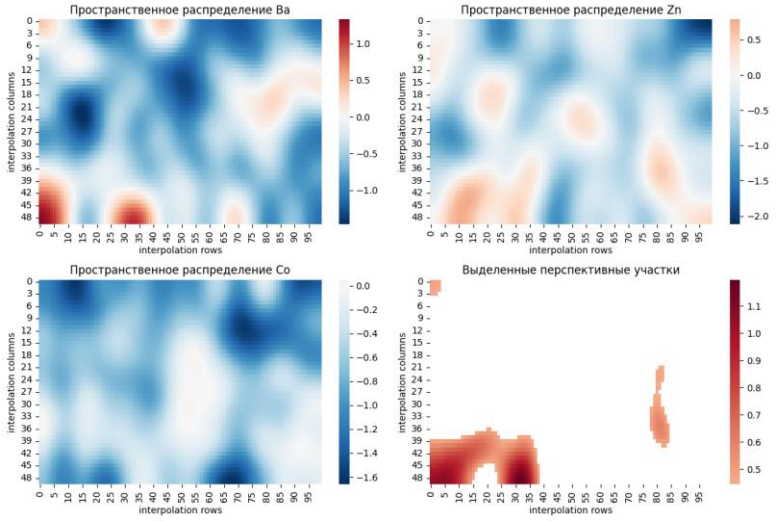


Рисунок 7. Окно с картой пространственного распределения первой главной компоненты для бария, для цинка и для кобальта

В третьей задаче рассматривается возможное применение RL в реальных геолого-геофизических задачах. Например, RL широко применим при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Метод позволяет создавать модели, которые могут самостоятельно

обучаться и адаптировать свои стратегии поиска на основе взаимодействия с геологической средой и получаемой обратной связи. [4] Агент, который использует RL, взаимодействует с "окружающей средой" — это геологическая область, в которой происходят исследования. Состояния среды могут включать данные о местоположении, геологических характеристиках, результатах прошлых исследований и других факторах. На основе этих данных агент принимает действия, например, выбирает точки для бурения или сейсмических исследований. После каждого действия агент получает награду или наказание в зависимости от результата (например, если месторождение найдено — положительная награда, если нет — отрицательная).

Основная цель RL — максимизация долгосрочной прибыли, что в контексте разведки полезных ископаемых означает оптимизацию поисковых усилий с минимальными затратами и рисками. Агент с помощью проб и ошибок находит наиболее эффективные способы выбора мест для бурения или сейсмических исследований, учитывая неопределенности и шум в данных, такие как отсутствие точных геологических карт или данные о возможных изменениях в структуре земли. Применение RL позволяет не только автоматизировать процесс принятия решений, но и адаптировать его к изменениям в геологической среде и экономических условиях, а также уменьшить человеческий фактор, улучшая точность и эффективность прогнозирования месторождений.

Выводы

Машинное обучение предоставляет мощные инструменты для решения разнообразных задач в области геологии и геофизики, улучшая качество анализа и интерпретации данных, а также повышая эффективность процессов разведки и добычи полезных ископаемых.

Библиография

1. Нагайцев М.В., Бондаренко Д.В., Рощина О.Е., Новикова С.А. Применение нейросетевых и прогностических моделей искусственного интеллекта при проведении геологоразведочных работ. Учебник. Понизовье: National Research, 2024. 7124с.
2. Метод главных компонент (PCA) https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Метод_главных_компонент_(PCA)
3. Семёнов Е.Д., Брагинский М.Я., Тараканов Д.В., Назарова И.Л. НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ. Научная статья. Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, №4. DOI: 10.35266/1999-7604-2023-4-6 https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevoe-prognozirovanie-vhodnyh-parametrov-pri-dobyche-nefti/viewer
4. Саттон, Р.С. Обучение с подкреплением / Р.С. Саттон. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. - 658 с
5. Рустамов А.Р., Пеньков Г.М., Петраков Д.Г., Рустамова М.А. Современные методы применения машинного обучения как инструмента прогнозирования добычи нефти. Научная статья. Недропользование. 2024. Т. 24, №1. С.44-50 DOI: 10.15593/2712-8008/2024.1.6 https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-primeneniya-mashinnogo-obucheniya-kak-instrumenta-prognozirovaniya-dobychi-nefti/viewer

ГИС ПАРК как инструмент решения современных геологических задач

Бойко М.С. (МГРИ, МФ ФГБУ «Институт Карпинского», m.boyko@mfkarpinsky.ru),
Белобородов М.А. (МФ ФГБУ «Институт Карпинского», m-beloborodov@yandex.ru)

Аннотация

ГИС ПАРК — это векторно-растровая система, объединяющая функции автоматизированных систем обработки данных (АСОД) и геоинформационных систем (ГИС) для решения геологических задач. Она поддерживает интеграцию картографической и описательной информации, обработку и анализ разнотипных данных, оформление карт и создание справочных систем. Основные функции включают создание баз данных, монтаж и интерпретацию геологических данных, составление карт геологического содержания и решение прогнозно-минерагенических задач. Технология основана на методах распознавания образов с обучением, что позволяет автоматически формировать модели прогнозируемых объектов и оценивать перспективные участки. ГИС ПАРК предназначена для упрощения и ускорения работ по изучению недр, а также для подготовки данных для представления в уполномоченные органы.

Ключевые слова

ГИС ПАРК, геоинформационная система, автоматизированные системы обработки данных, геоданные, прогнозно-минерагенические задачи, пространственный анализ, распознавание образов, машинное обучение

Теория

Идея, заложенная при создании ГИС ПАРК исходит из понимания того, что система, адекватная задачам геологии, должна объединять в одной программной среде функции обработки геоданных и функции геоинформационной системы. Поэтому ПАРК изначально создавался как синтез двух классов систем: автоматизированных систем обработки данных (АСОД) и геоинформационных систем (ГИС). АСОД дают методы и алгоритмы обработки, ГИС – возможность работы с геодезически привязанными данными, картографическое отображение и справочно-информационные функции. В результате создана векторно-растровая система, сочетающая функции картографической, информационно-справочной, аналитической и прогнозирующей систем и ориентированная на геологические задачи. На базе системы создана технология сопровождения геолого-съёмочных, картосоставительских и прогнозно-минерагенических работ от их планирования до итоговых карт и подготовки цифрового издания. Главное назначение системы: 1) фактографическая и аналитическая поддержка экспертных геологических решений; 2) упрощение и ускорение создания карт; 3) алгоритмическое решение геологических задач; 4) подготовка данных к представлению в НРС Роснедра и для цифрового издания.

Основные группы решаемых задач:

1. Создание баз данных геологической информации. Обеспечивается функциями импорта, геометрической коррекции, геодезической привязки, оцифровки; векторно-растровыми преобразованиями; средствами интерактивного и автоматического редактирования и оформления карт, а также организацией связей геолого-картографических объектов со справочной информацией. В представлении данных в ПАРК реализована концепция топологического комплексного векторного слоя, согласно которой:

а) каждая линия хранится в базе данных только один раз независимо от количества её ролей на карте. Любая линия или её сегмент в зависимости от ситуации рассматривается как линейный объект или как граница площадного объекта (например, линия может одновременно представлять разрывное нарушение и границу геологического тела). Такое представление

исключает дублирование данных, гарантирует непротиворечивость метрических характеристик объектов разных типов и исключает возможные ошибки при редактировании;

б) все объекты с одинаковым набором атрибутов независимо от их геометрического типа могут храниться в одном слое (например, линейные дайки и площадные геологические тела). Такая организация данных существенно упрощает редактирование и обработку карт.

2. Монтаж, обработка и интерпретация геологических, геофизических, геохимических и дистанционных данных. Для этого выполняются склейка и редактирование карт; оценка статистических параметров свойств объектов и территорий, сравнение выборок; обработка в скользящих окнах; расчет потенциальных функций; картографирование узлов линейных сетей; корреляционный и регрессионный анализ; фильтрация данных, анализ поверхностей; кластерный анализ; выделение и анализ линеаментов и кольцевых структур; комплексное районирование территорий и другие операции анализа данных.

3. Составление карт геологического содержания включает редактирование метрических, атрибутивных и текстовых данных; использование растровых и векторных подложек; оформление карт в соответствии с действующими стандартами путем автоматической расстановки условных знаков, индексов и надписей; компоновка и оформление макетов печати.

4. Решение прогнозно-минерагенических задач включает: построение карт потенциально прогностических признаков; выявление, оценку и картографирование поисковых признаков; формирование моделей прогнозируемых объектов; выделение, оценку и ранжирование перспективных участков; моделирование возможных стратегий поисковых работ.

Технология ПАРК рассчитана на прогнозирование объектов, которые контролируется геологическим строением территорий и прямо или косвенно отражены на геологических, геоморфологических, геофизических и других картах, аэро- и космических снимках и т.д. В основу комплексной интерпретации разнотипных данных положены идея и методы распознавания образов с обучением. Алгоритм реализованный средствами ПАРК, допускает 3 варианта постановки задач: 1) с использованием эталонных объектов для обучения и контроля; 2) с использованием экспертных оценок и контрольных объектов; 3) с использованием только экспертных оценок.

Прогноз выполняется путем вычисления и последующей интерпретации мер сходства точек территории с моделью прогнозируемого объекта. Модель формируется автоматически путем обучения системы на известных объектах или задается геолого-экспертом. Затем оцениваемая площадь сравнивается с моделью. В каждой точке вычисляется мера сходства с моделью. При этом вклад каждого признака в оценку сходства индивидуальный и определяется той информацией о прогнозируемых объектах, которая содержится в появлении его конкретного значения. Затем определяется минимальное сходство, достаточное для отнесения точки к прогнозируемому классу. Такое значение соответствует минимуму риска постановки поисков. Риск поисков функционально связан с риском пропуска объектов при излишнем сокращении площади поисков и с риском лишних затрат при вовлечении в поиски «пустых» площадей. При этом алгоритм поиска оптимального решения также представляет возможность учитывать соотношение цен искомого объекта и его поисков. На завершающем этапе выделенные участки ранжируются по индексу перспективности, учитывающем вероятность существования прогнозируемого объекта и его возможные ресурсы. Далее предоставляется возможность интерактивно управлять прогнозом. Варианты решения сразу отображаются на карте и получают оценки качества: локальность, надежность, риск.

5. Цифровое издание комплекта Госгеолкарты. Развитый инструментальный аппарат ГИС ПАРК позволяет осуществлять подготовку к изданию комплектов Госгеолкарты любой сложности, от листов подготовленных в середине 90-х с отсутствующей цифровой моделью, до современных карт. Механизмы автоматизированного контроля соответствия Единым требованиям и инструменты для работы с Эталонной базой знаков обеспечивают высокое

качество представляемых материалов и их соответствие действующим нормативным документам.

Цифровое издание включает: электронные версии карт комплекта; макеты печати; унифицированную цифровую модель комплекта в форматах, предусмотренных требованиями по представлению Госгеолкарт; объектно-привязанную справочную информацию и Объяснительную записку.

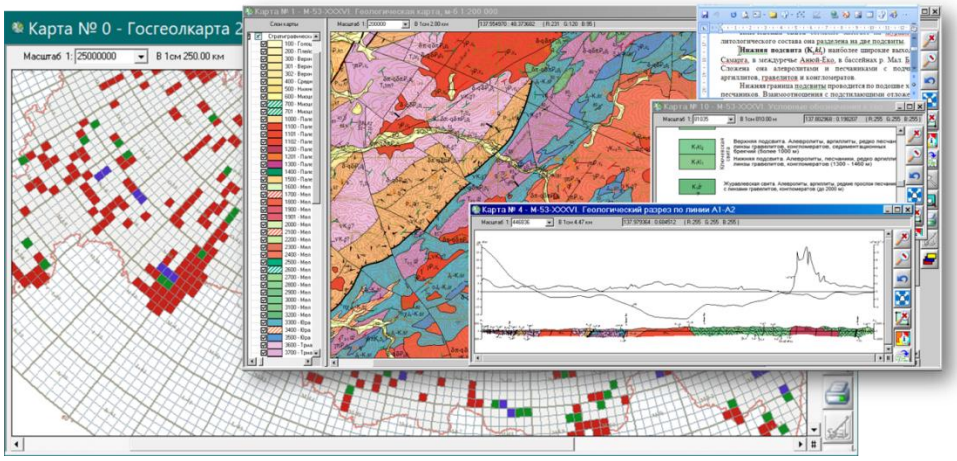


Рисунок 1. Фрагмент Электронного издания ГГК-200/2 подготовленный в ГИС ПАРК

Цифровое издание осуществляется в форме интерактивной картографической справочной системы. Для этого используется ГИС-вьюер, созданный на основе ПАРК, и имеющий средства навигации и поиска объектов, средства управления отображением карт и справочной информации. Кроме того, ПАРК обладает дополнительными модулями, обеспечивающими представление подготовленных карт в сети Интернет, включая интерактивную справочную систему, позволяющую получать информацию об объектах Госгеолкарты в режиме онлайн. К настоящему времени в рамках выполнения Госзадания подготовлено более 500 комплектов Госгеолкарты масштаба 1:200000, содержащих в общей сложности более 6000 тысяч различных карт геологического содержания.

6. Специалистами Московского филиала ФГБУ «Институт Карпинского» совместно с ИЦТН МГРИ на основе накопленного опыта применения на базе ГИС ПАРК разработана учебная программа, позволяющая студентам получить базовые знания в области ГИС, анализа пространственных данных, редактирования и создания электронных картографических материалов и применения этих знаний для решения прикладных задач.

Выводы

Система и технология ПАРК объединяют функции автоматизированных систем обработки данных (АСОД) и геоинформационных систем (ГИС) для решения геологических задач. Основное назначение ПАРК — поддержка экспертных решений, упрощение создания карт и алгоритмическое решение геологических задач.

Основные функции ПАРК включают создание баз данных, монтаж и обработку геологических данных, составление карт геологического содержания и решение прогнозно-минерагенических задач. Технология ПАРК использует методы распознавания образов с обучением для комплексной интерпретации разнотипных данных и прогнозирования объектов на основе геологического строения территорий. Обучение с использованием ПАРК позволяет

студентам эффективно осваивать современные методы анализа пространственных данных и их применение для решения прикладных задач.

Библиография

1. «МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО СОСТАВЛЕНИЮ И ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ ЛИСТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МАСШТАБА 1 : 200 000 (второго издания)» Версия 1.5. О. И. Бострикова, Н. И. Гусев, А. В. Довбня

2. «Методические рекомендации по составу и структуре сопровождающих и первичных баз данных ГК-200/2 и ГК-1000/3.» – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. М. А. Шишкин, Е. А. Лебедева, Г.И. Давидан

3. «ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ к составу, структуре и форматам представления в НРС Роснедра комплектов цифровых материалов листов Государственных геологических карт масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000» Версия 1.7 Редакция 2. М. А. Шишкин, Е. И. Ланг.

4. «ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ ГЕОЛОГО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ масштабов 1 : 500 000 и 1 : 200 000» М.–СПб., 2009. 44 с. МПР РФ, Роснедра, Федеральное агентство по недропользованию, ФГУП «ВСЕГЕИ»

Организация разработки системы интерполяции наборов 1D или 2D данных в куб данных

Бондарь А.Г.* (МГРИ, singal.bondar@gmail.com),
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается процесс создания и внедрения системы интерполяции, предназначенной для преобразования и представления данных, полученных в виде одномерных (1D) или двумерных (2D) наборов, в формат трёхмерного (3D) куба данных. Такая система особенно актуальна при работе с геофизическими данными, данными дистанционного зондирования и другими многомерными массивами, возникающими в различных областях науки и техники. Система позволит унифицировать данные разной размерности и обеспечить их корректное включение в объемные модели для дальнейшего анализа и визуализации.

Работа выполняется с использованием языка программирования Python и современных библиотек для обработки данных и научных вычислений.

Ключевые слова

Интерполяция данных, многомерные массивы, обработка данных, Python, численные методы

Теория

Современные методы сбора данных во многих научных областях, таких как геофизика, климатология, биомедицина, подразумевают использование данных, полученных в различных форматах — от точечных измерений (1D) до сложных двумерных полей (2D). Однако для комплексного моделирования процессов и явлений требуется представление этих данных в виде трёхмерных массивов (3D), где каждый элемент описывает свойства в определённой точке пространства.

Интерполяция как метод приведения данных к единому формату. Интерполяция — это математический метод, позволяющий по известным дискретным точкам восстановить значения в промежуточных точках. В контексте данной работы интерполяция используется для преобразования 1D и 2D данных в 3D кубы данных, что необходимо для комплексного анализа и моделирования.

Цель работы

1. Целью данной работы является создание программного модуля для интерполяции 1D и 2D данных в формат 3D куба данных. Модуль будет включать функции:
2. Автоматизированного сбора и загрузки данных различных форматов (таблицы, сетки, временные ряды).
3. Интерполяции данных с учетом пространственного положения и временной привязки.
4. Формирования единого 3D куба данных для дальнейшего анализа.
5. Визуализации многомерных данных для удобного восприятия.

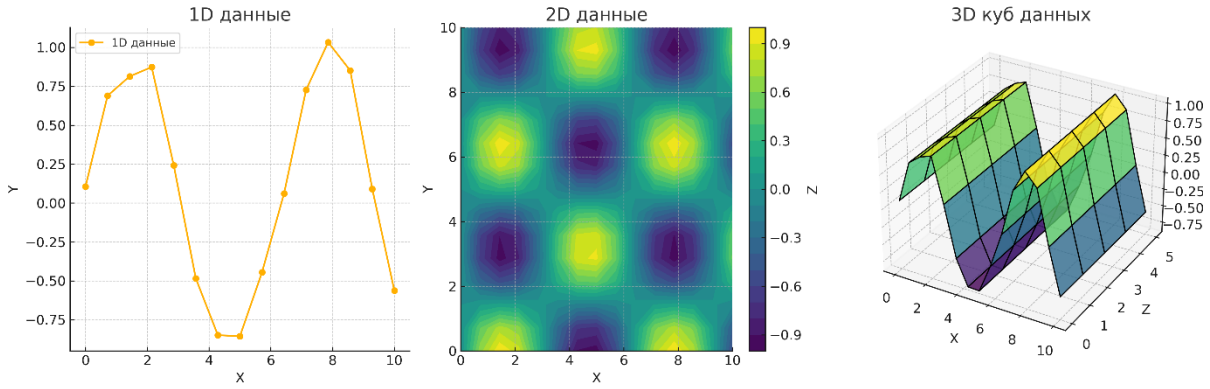


Рисунок 1. Пример представления данных в различных измерениях

На рисунке 1 изображен пример представления данных в различных измерениях. Используемые библиотеки:

1. Pandas — библиотека языка Python, обеспечивающая работу с табличными и временными данными. Основные структуры данных — DataFrame и Series — позволяют эффективно организовывать, фильтровать, обрабатывать и анализировать данные различной природы. В контексте данной работы Pandas используется для загрузки исходных наборов данных, их предобработки, а также для сохранения результатов интерполяции в удобных для последующего анализа форматах.
2. NumPy — одна из ключевых библиотек для работы с многомерными массивами и числовыми данными. NumPy предоставляет широкие возможности по выполнению векторных и матричных операций, линейной алгебры и численных методов. В процессе разработки системы интерполяции NumPy задействуется для создания пространственных сеток, выполнения численной интерполяции и представления данных в виде массивов.
3. Pathlib — встроенный модуль языка Python, предназначенный для работы с файловой системой. Он обеспечивает удобное манипулирование путями к файлам и директориям, что позволяет организовать гибкую систему хранения как исходных наборов данных, так и результатов расчетов, включая сохранение промежуточных этапов интерполяции.
4. HvPlot — библиотека визуализации, расширяющая функциональность Pandas и xarray, позволяя строить интерактивные графики непосредственно из структур данных. В рамках данной работы HvPlot может использоваться для наглядного представления как исходных 1D и 2D данных, так и построенных по ним объемных (3D) интерполированных моделей.
5. Matplotlib — классическая библиотека для построения статичных, анимационных и интерактивных графиков в Python. В ходе работы она используется для базовой визуализации: построения графиков одномерных временных рядов, двумерных карт, а также объемных (3D) представлений данных в виде поверхностей или контурных сечений.
6. SciPy — библиотека для выполнения научных вычислений, в том числе задач численной интерполяции. В контексте разработки системы SciPy предоставляет инструменты для выполнения одномерной (1D), двумерной (2D) и многомерной (ND) интерполяции, необходимых для построения объемных моделей данных на основе неполных или нерегулярных наборов.
7. Xarray — библиотека для работы с многомерными метками данных, которая идеально подходит для представления результатов интерполяции в виде структурированных многомерных массивов (data cubes). Xarray позволяет удобно обращаться к данным по

координатам и атрибутам, что существенно упрощает последующую обработку и анализ интерполированных наборов.

8. Plotly — современная библиотека для создания интерактивных визуализаций, которая может быть полезна для динамического анализа результатов интерполяции. С ее помощью можно строить 3D-поверхности, объемные срезы и анимации, иллюстрирующие процесс перехода от исходных данных к многомерному кубу.

Каждая из этих библиотек играет важную роль в процессе анализа данных и машинного обучения, позволяя эффективно обрабатывать данные, строить модели и визуализировать результаты.

Актуальность разработки:

Современные задачи анализа и обработки данных во многих областях науки и техники (геофизика, метеорология, биоинформатика, инженерное моделирование) требуют разработки гибких систем для интерполяции и представления разнородных данных в виде унифицированных многомерных моделей. При этом исходные данные часто представлены в виде отдельных одномерных или двумерных срезов, полученных в результате полевых измерений, дистанционного зондирования или численного моделирования. Создание программного инструмента, позволяющего автоматически выполнять интерполяцию таких наборов в согласованный трехмерный (или более сложный многомерный) куб данных, обладает высокой практической значимостью. Это позволяет не только унифицировать представление данных для последующего анализа, но и существенно упрощает их визуализацию, интеграцию с другими моделями и использование в системах принятия решений.

Выводы

В результате выполнения работы разработан концептуальный подход к созданию системы интерполяции данных, включающий:

- анализ исходных одномерных и двумерных наборов данных;
- выбор и адаптацию численных методов интерполяции для формирования многомерных (3D) кубов данных;
- создание программного модуля на языке Python с использованием современных библиотек для обработки, анализа и визуализации данных;
- тестирование разработанного решения на синтетических и реальных наборах данных.

Проведенные исследования подтвердили, что использование гибридных методов интерполяции, сочетающих регуляризацию, адаптацию к различным типам исходных данных и учет физических ограничений, позволяет повысить точность пространственного восстановления данных и обеспечить согласованность многомерных моделей.

Разработанный подход может быть адаптирован для решения широкого круга задач в различных предметных областях — от геофизических исследований до анализа биомедицинских данных и систем прогнозирования на основе многомерных временных рядов.

Библиография

1. Мещеряков, А. В., Кудряшов, В. А. (2020). Методы интерполяции и экстраполяции данных в научных вычислениях. М.: Наука.
2. Спиридонов, А. И., Иванова, М. Н. (2018). Математические методы обработки и интерполяции многомерных данных. Издательство МГУ.
3. Куц, В. А., Сафонов, И. И. (2019). Разработка алгоритмов интерполяции для анализа пространственных данных. Журнал "Информационные технологии", 12(3), 25-34.

4. Мазур, Л. Ю., Яковлева, И. А. (2017). Алгоритмы многомерной интерполяции в вычислительных системах. Вестник ВГУ, серия "Математика", 29(2), 15-22.

5. Розенблат, А. А., Грец, В. Г. (2021). Специализированные методы обработки данных с использованием интерполяции: от 1D до 3D. В сборнике: Современные подходы к анализу и интерпретации данных, 41-53.

6. Tautges, J., Lunt, R., & Reddy, S. (2016). A Survey of Interpolation Techniques for Multi-Dimensional Data. Journal of Computational Science, 18, 42-56.

Оценка золотоносности на основе расчета комплексного показателя рудоносности по геохимическим данным

Бычков В.В. *(МГРИ, vladislavbyhkov2003@mail.ru),
Фахрутдинов Ш.И. (МГРИ, fahrutdinovsi@mgri.ru)

Аннотация

В работе рассматривается задача оценки золотоносности на основе расчёта комплексного показателя рудоносности с использованием геохимических данных. Основное внимание уделяется разработке и обоснованию нового подхода, который позволяет интегрировать различные геохимические показатели для более точной оценки перспективности золотоносных участков.

Исследование направлено на выявление ключевых факторов, влияющих на содержание золота в горных породах, а также на разработку математических моделей, способствующих оптимизации процесса разведки месторождений. В ходе работы выполняется анализ элементов, сопутствующих золоту, проводится корреляция между геохимическими характеристиками проб и уровнем их рудоносности.

Разработанный подход может быть применён в практической геологии для повышения эффективности геологоразведочных работ, что, в свою очередь, способствует более рациональному использованию природных ресурсов. Учитывая растущий интерес к золотодобыче, результаты исследования могут быть полезны не только для научных целей, но и для практического применения в горнодобывающей отрасли, позволяя сократить затраты и снизить риск при выборе месторождений для разработки.

Ключевые слова

Оценка золотоносности, геохимические данные, рудоносность, комплексный показатель, геохимия золота, поиски месторождений золота, геохимические поиски, рудогенез

Теория

Объектом исследования являются геохимические данные (концентрации элементов) в пробках, отобранных на рудопроявлении/месторождении, перспективном на золото. В качестве объекта может выступать как уже разведанное месторождение с известными запасами золота, так и перспективная площадь, данные по которой ограничены. В работе планируется осуществить: сбор и подготовку данных, выбор элементов-индикаторов, построение комплексного показателя рудоносности (КПР), расчёт КПР, визуализацию и валидацию результатов, а также анализ чувствительности. Для реализации задачи планируется использовать следующие библиотеки и языки программирования: Python (библиотеки: pandas, NumPy, scikit-learn, SciPy, matplotlib и seaborn, geopandas); QGIS, SQL.

Процесс включает:
- Обоснованный выбор элементов-индикаторов;
- Корректная разработка формулы КПР;
- Валидация результатов;
- Тестирование методики на реальных данных.

Предложенный подход позволит определить более точную локализацию рудных тел, улучшит понимание генезиса рудных месторождений, повысит эффективность поисковых работ, улучшит оценку запасов и ресурсов, минимизирует экологические риски.

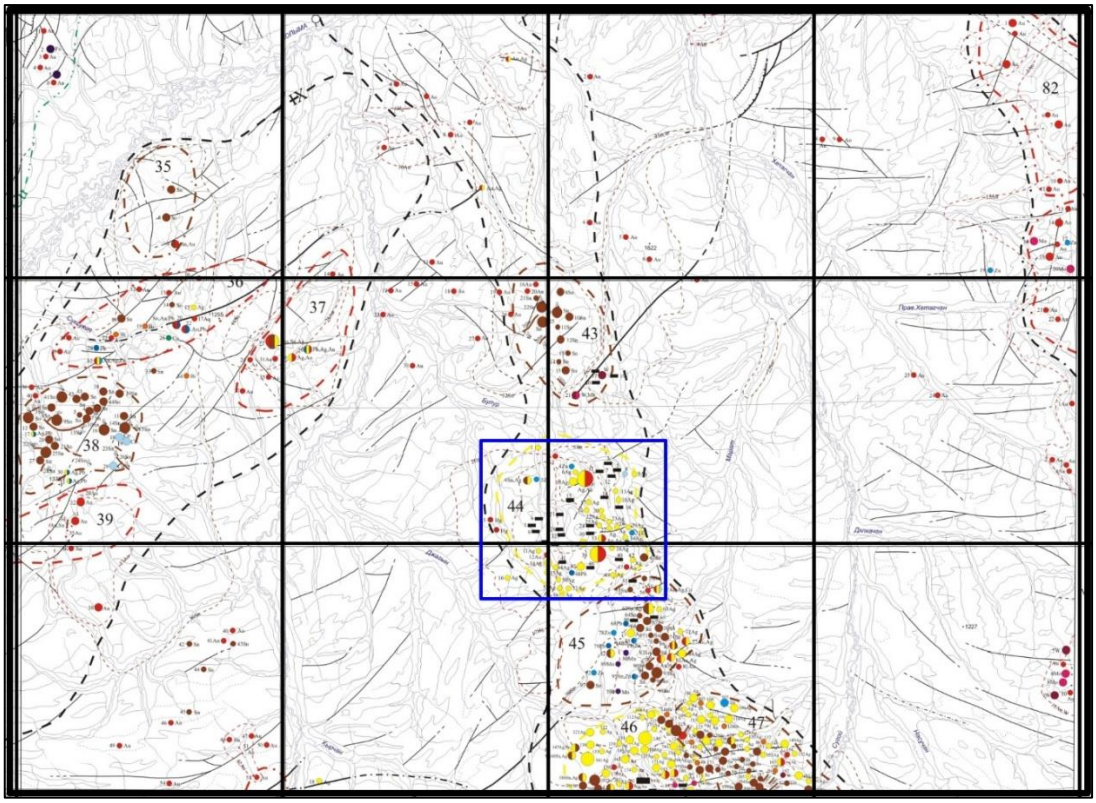


Рисунок 1. Карта рудоносности

Выводы

Расчёт комплексного показателя рудоносности (КПР) является эффективным методом оценки золотоносности территорий на основе геохимических данных. Правильный выбор элементов-индикаторов, адекватная нормировка данных и обоснованное определение весовых коэффициентов являются ключевыми факторами для получения достоверных результатов. Интеграция результатов расчёта КПР с геологическими, геофизическими и минералогическими данными позволяет повысить точность прогнозирования золоторудных месторождений. Методика расчёта КПР может быть адаптирована к различным геологическим условиям и типам золоторудных месторождений. Результаты оценки золотоносности на основе КПР должны рассматриваться как основа для дальнейших геологоразведочных работ, направленных на подтверждение и детализацию выявленных перспективных зон.

Библиография

1. Бобров В.А., Коваленко В.И. Геохимические методы оценки рудоносности массивов (на примере Восточного Забайкалья). Журнал: Геология и геофизика, 2018, том 59, № 5.

2. Михайлов Б.М., Смирнов А.Д. Количественная оценка рудоносности по геохимическим аномалиям. Журнал: Геохимия, 2016, том 54, № 3.

3. Рундквист Д.В., Ткачев А.В. Геохимические критерии рудоносности и их применение в прогнозных моделях. Журнал: Геология рудных месторождений, 2019, том 61, № 2.

4. Carranza E.J.M. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping. Journal: Journal of Geochemical Exploration, 2015, vol. 154.

Исторический анализ геолого-геофизических работ: от первых исследований до современных подходов машинного обучения при анализе данных геолого-геофизических измерений

Вандышева О.В.* (МГРИ, vov@mgri.ru),
Нагайцев М.В. (МГРИ, nagaytsev@mgri.ru)

Аннотация

В данной научно-исследовательской работе представляется исторический анализ геолого-геофизических работ, охватывающий широкий спектр исследовательских периодов — от первых опытов до современных методов, основанных на машинном обучении. Исследование начинается с анализа ранних работ в области геологии и геофизики, а также этапов развития методов исследования. Уделяется особое внимание вкладу выдающихся ученых, сыгравших ключевую роль в формировании и развитии этих научных направлений.

Актуальность работы связана с необходимостью адаптации традиционных методов анализа данных к современным технологическим вызовам. Традиционные методы эффективны, но не всегда позволяют выявить скрытые закономерности. Машинное обучение способно повысить точность и скорость обработки данных.

В дальнейшем рассматриваются традиционные методы анализа данных, включая как геологические, так и геофизические подходы. Также анализируется применение статистических методов, что способствует глубокому пониманию эволюции исследовательских подходов.

Основное внимание уделяется современным достижениям в области машинного обучения, которые значительно трансформировали способы обработки и интерпретации данных геолого-геофизических измерений. вкладу выдающихся ученых, которые оказали значительное влияние на формирование данной науки.

Заключительная часть исследования включает сравнительный анализ традиционных и современных методов, с целью выявления их преимуществ и недостатков, а также оценки эффективности внедрения технологий машинного обучения. Обсуждаются также актуальные тенденции в развитии анализа данных и их влияние на современную практику геолого-геофизических исследований. Работа направлена на содействие дальнейшему исследованию и улучшению методов анализа данных в данной области, что, в свою очередь, может привести к более глубокому пониманию геологических процессов и оптимизации методологии исследований.

Ключевые слова

Геолого-геофизические исследования, машинное обучение, искусственный интеллект, анализ данных, геологические риски, геоинформационные системы, сейсмический куб

Теория

Геолого-геофизические исследования прошли значительный путь развития, начиная от простых визуальных наблюдений и заканчивая современными методами анализа данных с использованием искусственного интеллекта (ИИ). Этот процесс трансформации привел к необходимости разработки более эффективных подходов для обработки объемных массивов информации, что особенно актуально в условиях увеличения сложностей современных геологических задач.

Исторический контекст

Истоки геолого-геофизических исследований восходят к XVIII–XIX векам, когда формировались основные принципы геологии. С начала XX века начинается использование инструментальных методов, таких как сейсмология и магнитная разведка, что заложило основы

для появления более сложных технологий. XXI век стал эпохой активного внедрения методов машинного обучения и анализа больших данных в геолого-геофизические исследования.

Современные подходы анализа данных:

1. Статистические методы:

- кластеризация и регрессионный анализ помогают выявлять геологические структуры и закономерности;
- метод Монте-Карло служит для оценки неопределенности и вариаций данных, что критично для интерпретации геологических и геофизических моделей.

2. Машинное обучение:

- сверточные нейронные сети (CNN) эффективно применяются для распознавания геологических структур в объемных сейсмических данных;
- градиентный бустинг используется для прогнозирования свойств горных пород на основе сейсмологических измерений;
- автокодировщики применяются для фильтрации шумов и повышения качества сейсмических данных.

Таблица 3. Сравнительный анализ методов по основным параметрам

Параметр	**Традиционные методы**	**Методы машинного обучения**
Точность	Средняя	Высокая
Скорость обработки	Низкая	Высокая
Требования к данным	Невысокие	Высокие
Гибкость применения	Ограниченная	Широкая
Автоматизация	Ограниченная	Полная

Сейсмическая разведка и применение машинного обучения

Сейсмический куб, представляющий собой объемное отображение сейсмических данных, позволяет детализировать геологическую модель недр. Однако традиционные методы интерпретации этих данных требуют значительных временных затрат и подвержены вмешательству субъективного опыта специалистов. Внедрение методов ИИ и машинного обучения значительно упростило и ускорило процесс анализа.

1. Традиционные методы интерпретации. Ранее интерпретация сейсмических данных осуществлялась вручную с использованием классификации волн по амплитуде, фазе и частоте. Эти методы существенно зависели от квалификации и опыта работающего специалиста, что зачастую приводило к ошибкам в интерпретации.
2. Преимущества машинного обучения. С внедрением методов машинного обучения автоматически осуществляется анализ объемных сейсмических данных. Например, обучение

моделей на основе известных образцов данных позволяет значительно ускорить процесс классификации горных пород (см. Рисунок 1).

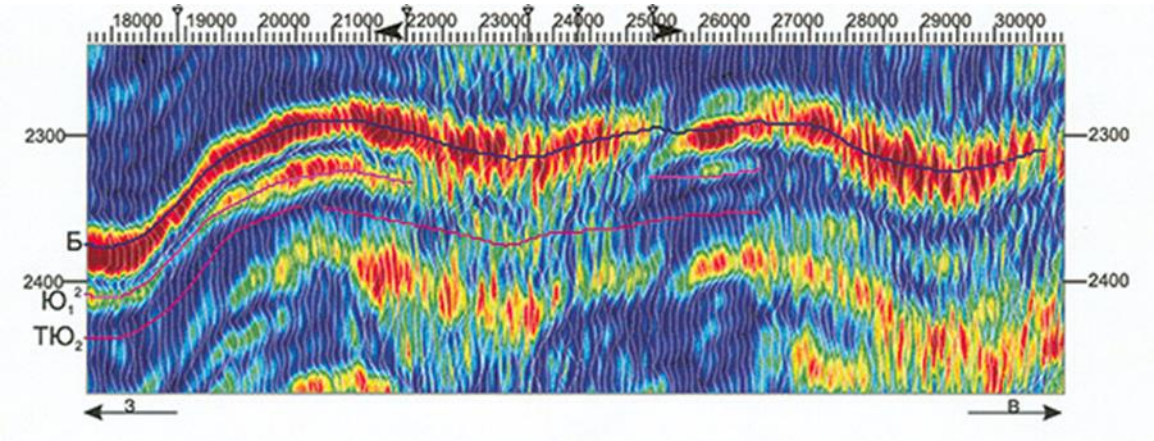


Рисунок 8. Пример визуализации классификации сейсмических данных

Современные методы, такие как автокодировщики и сверточные нейронные сети, становятся важным инструментом для уменьшения влияния шумов, что позволяет значительно повысить качество и точность сейсмических изображений (см. Рисунок 3). С помощью ИИ и машинного обучения также возможно объединение сейсмических кубов с геомеханическими моделями для прогнозирования поведения пластов при бурении, что в свою очередь снижает риски и повышает точность моделирования.

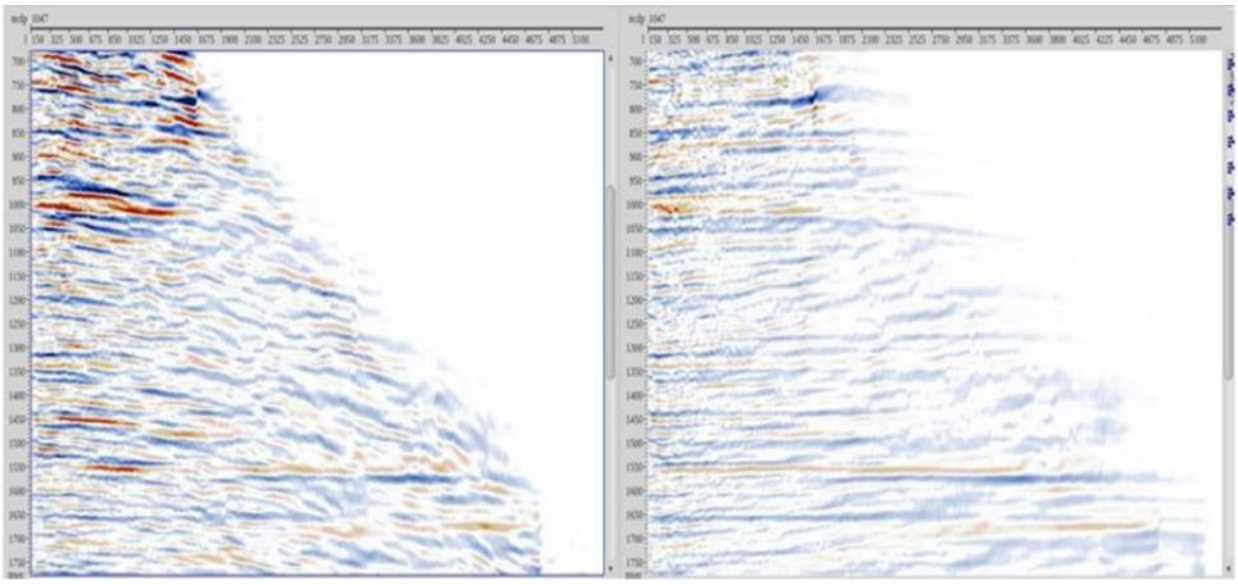


Рисунок 9. Исходные (А) и обработанные (Б) сейсмические данные до и после удаления шума

Выводы

Основные выводы научно-исследовательской работы:

1. Развитие методов анализа данных в геолого-геофизике прошло значительную эволюцию – от эмпирических наблюдений до автоматизированных алгоритмов машинного обучения.

2. Современные алгоритмы ИИ, включая нейронные сети и методы ансамблевого обучения, значительно повышают точность прогнозов.

3. Эффективность машинного обучения зависит от качества исходных данных, что требует тщательной предобработки.

4. Интеграция традиционных методов с современными технологиями открывает новые возможности для исследований.

5. Развитие машинного обучения требует подготовки специалистов с междисциплинарными знаниями.

Перспективы развития:

- Дальнейшая автоматизация интерпретации геофизических данных;
- Развитие самонастраивающихся алгоритмов машинного обучения;
- Интеграция методов машинного обучения с геоинформационными системами.

Современные технологии позволят глубже изучить процессы, происходящие в недрах Земли, и повысить эффективность разведки полезных ископаемых.

Библиография

1. Геологические методы исследований – URL: http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:0129259 (Дата обращения 18.02.2025).

2. Геофизические методы исследований: учебное пособие – URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geofizicheskie-metody-issledovaniy.pdf (Дата обращения 18.02.2025).

3. И.С. Шорохова, Н.В. Кисляк, О.С. Мариев. Статистические методы анализа. Екатеринбург: ИУу, 2015, - 300 стр.

4. Машинное обучение // Wikipedia – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_learning.

5. М.В. Нагайцев, Д.В. Бондаренко, О.Е. Рощина, С.А. Новикова. Применение нейросетевых и прогностических моделей искусственного интеллекта при проведении геологоразведочных работ. Москва: МГРИ, 2024, - 120 стр.

6. Е.В. Боровская, Н.А. Давыдова. Основы искусственного интеллекта. Москва: Лаборатория знаний, 2020, - 130 стр.

7. С.Н. Павлов. Системы искусственного интеллекта, Часть 1. Томск: ТУСУР, 2011, - 176 стр.

8. И.С. Шорохова, Н.В. Кисляк, О.С. Мариев. Статистические методы анализа. Екатеринбург: ИУу, 2015, - 300 стр.

Использование возможностей ГИС INTEGRO для комплексной визуализации и обработки геолого-геофизической информации в рамках подготовки студентов направления «Геоинформационные системы»

Деева М.В.* (МГРИ, deevamv@mgri.ru),
Толмачёва Е.Р. (ФГБУ ВНИГНИ, elena@geosys.ru)

Аннотация

Анализ геолого-геофизической информации в географических информационных системах (ГИС) представляет собой мощный инструмент для изучения и моделирования геологических процессов и структур. С помощью ГИС можно объединять и визуализировать различные типы данных, включая геологические карты, сейсмические исследования, данные о минералах и ресурсах, что позволяет более полно понять геологическую среду. Используя пространственные анализы и модели, геологи и геофизики могут выявлять закономерности, прогнозировать наличие полезных ископаемых, а также оценивать риски, связанные с природными катастрофами, такими как землетрясения и оползни. ГИС обеспечивают эффективные методы обработки и анализа больших объемов данных, что способствует принятию обоснованных решений в области георазведки и управления природными ресурсами.

Ключевые слова

ГИС, визуализация, анализ, разрезы, 3D-моделирование, скважины

Теория

Понимание необходимости комплексного анализа геолого-геофизических данных является ключевым аспектом подготовки студентов в области геологических и геофизических наук. В условиях современного мира, где ресурсы Земли становятся все более дефицитными, а потребности в их использовании — все более разнообразными, важно не просто изучать отдельные дисциплины, но и уметь интегрировать знания из различных областей для комплексного подхода к решению возникающих задач.

Наиболее существенным компонентом комплексного анализа является признание взаимосвязи между геологическими и геофизическими данными. Геологические данные, такие как литология, структура пород, наличие и характеристики полезных ископаемых, являются основой для формирования гипотез и научных выводов. В то же время, геофизические данные, полученные с помощью различных методов — от сейсмической разведки до магнитной и электрической съемки, — позволяют исследовать недра Земли с высокой точностью и идентифицировать структуры, которые могут быть недоступны для визуального осмотра или прямого бурения.

Современные технологии, такие как геоинформационные системы (ГИС), позволяют визуализировать данные и их взаимосвязи, что делает процесс анализа более доступным и наглядным. Многообразие специализированных географических информационных систем отражает широкий спектр задач и требований в различных областях. Существуют системы, ориентированные на обработку данных в геологии и геофизике, которые интегрируют информацию о месторождениях полезных ископаемых и результаты геофизических исследований. Каждая из этих специализированных систем предлагает уникальные инструменты и функционал, обеспечивая пользователям возможность более точно анализировать пространственные данные и принимать информированные решения, адаптированные к специфике их сферы деятельности.

Одной из таких систем является российская разработка ГИС INTEGRO, совмещающая в себе множество специализированных решений для задач геологии и геофизики. [4]

В качестве исходных данных для работы системы INTEGRO используются разнообразные источники информации, что позволяет аналитикам получать полное и актуальное представление о ресурсах и процессах, связанных с их управлением. Эти данные представлены в нескольких форматах и включают различные типы информации, как визуальной, так и количественной.

Картографические материалы, которые система обрабатывает, могут предоставляться как в виде растровых изображений, так и в формате векторной графики. Растровые данные представляют собой набор пикселей, образующих изображение, что делает их подходящими для детализированных визуализаций, таких как спутниковые снимки. Векторные данные, помимо геометрических форм, содержат информацию о координатах, что позволяет выполнять точные измерения и анализировать пространственные взаимосвязи.

Кроме того, система использует данные полевых изысканий, которые проходят обработку для получения более точной информации. Это может включать данные о потенциальных полях, информация по скважинам, включая данные об их характеристиках и местоположении, а также разрезы, которые могут быть представлены в формате растровых изображений или в формате SGY, что позволяет более эффективно анализировать геологические слои и структуры. Также могут быть задействованы данные в виде таблиц, что обеспечивает удобство для дальнейшей обработки и анализа.

Наконец, важным элементом в структуре исходных данных являются материалы дистанционного зондирования Земли. Эти данные собираются с помощью спутниковых или воздушных платформ и могут предоставлять ценную информацию о поверхности Земли, включая изменение растительности, геологические процессы и даже характеристики погоды. В совокупности, все эти данные позволяют INTEGRO создавать комплексные модели и проводить глубокий анализ, что, в свою очередь, способствует более эффективному управлению природными ресурсами. (Рисунок 1)

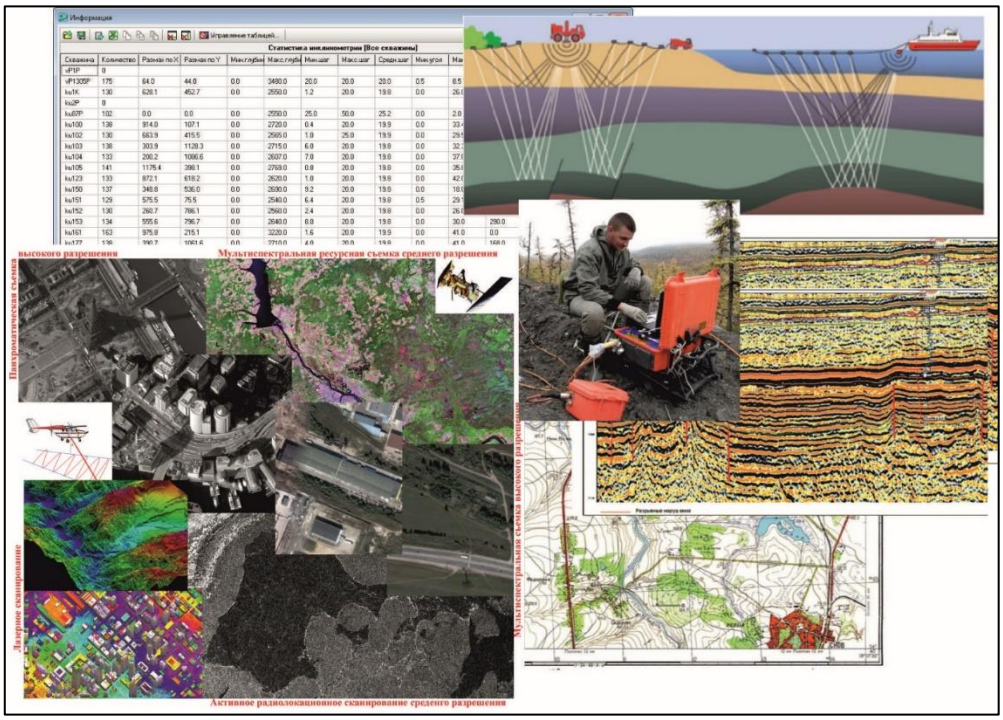


Рисунок 1. Источники данных для ГИС

Всё это множество разнородных данных загружается в ГИС с учётом координат и проекций, что позволяет в одном реальном координатном пространстве визуализировать и анализировать комплексно всё необходимые данные.

ГИС INTEGRO предоставляет все возможности для подготовки ГИС-проектов и картографической основы для выполнения работ по изучению недр.

Блок решения геофизических задач обеспечивает решения задач анализа и обработки двух и трехмерных массивов геофизической информации. [2]

INTEGRO позволяют интегрировать и визуализировать данные по результатам бурения и данные мониторинга, что способствует более глубокому анализу состояния и потенциальной продуктивности скважин. [1]

В ГИС реализована увязка сейсмогеологических разрезов и результатов геологической интерпретации по профилям. Также есть возможность автоматизированного построения геологических разрезов по заданному профилю или по сети профилей на основе цифровой модели рельефа, геологической карты, сведений по мощностям залегания пород. [3]

ГИС INTEGRO позволяет одновременно визуализировать картографические, профильные и скважинные данные с синхронизацией по X,Y,Z, осуществлять обработку и трехмерную визуализацию поверхностей, сечений и кубов данных в многооконном интерфейсе ГИС-проекта, что облегчает коммуникацию между различными специалистами, принимающими решения в области использования природных ресурсов. (Рисунок 2)

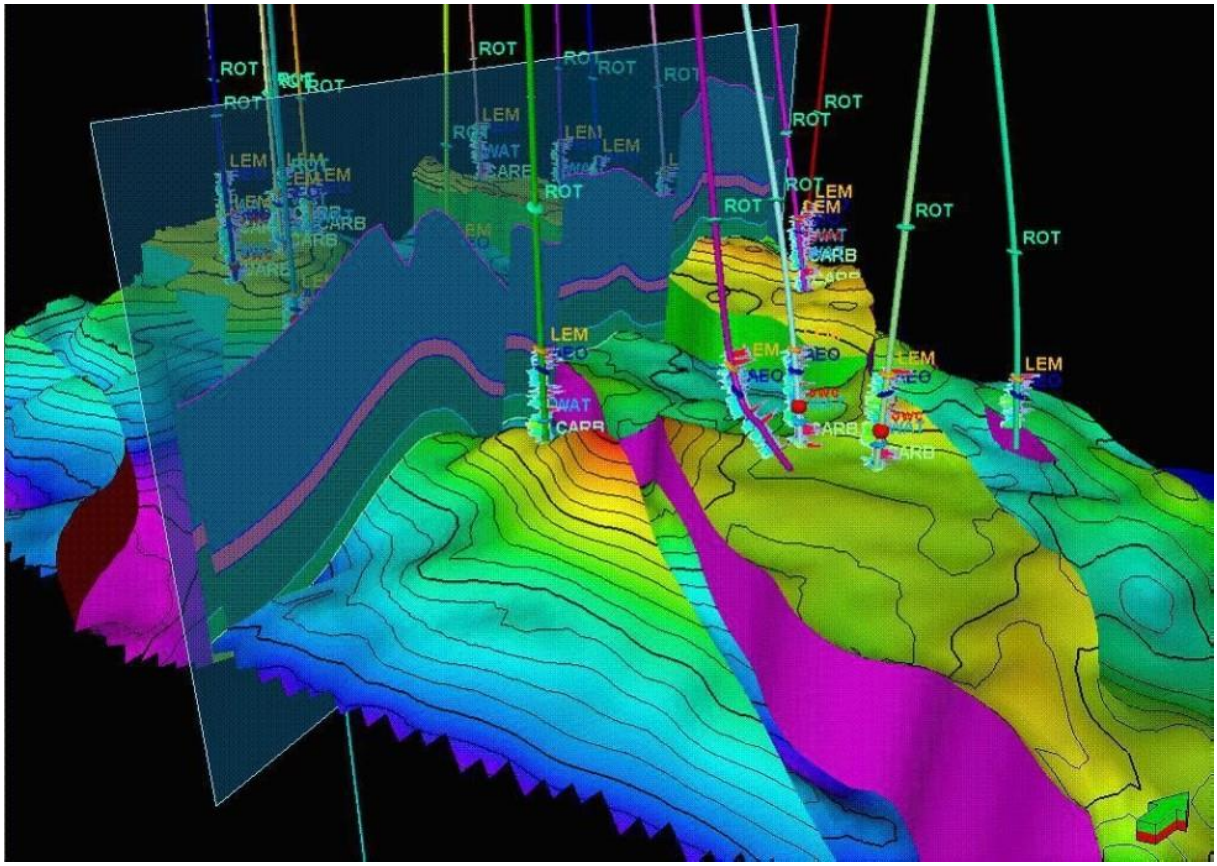


Рисунок 2. Комплексная визуализация разнородных геолого-геофизических данных

Выводы

Комплексный анализ геолого-геофизических данных является неотъемлемым аспектом формирования знаний и навыков студентов в данной области. Он позволяет не только углубить научные исследования, но и развивать критическое мышление, что способствует созданию более ответственного и устойчивого подхода к управлению природными ресурсами и охране окружающей среды. Подготовка специалистов, обладающих такими навыками и пониманием важности комплексного анализа, станет одним из ключевых факторов успеха в решении актуальных задач, стоящих перед обществом.

Библиография

1. Дровнинов Д. А. Визуализация скважинной информации в ГИС INTEGRO //Геоинформатика. – 2018. – №. 3. – С. 76-83.
2. Спиридонов В. А. ГИС ИНТЕГРО как инструмент 3D моделирования в науках о земле //Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2015. – С. 39-43.
3. Финкельштейн М. Я., Сабитов З. Проблемы трехмерного моделирования на основе геолого-геофизических данных в среде ГИС INTEGRO //Системный анализ в науке и образовании. – 2021. – №. 4. – С. 104–106-104–106.
4. Пиманова Н. Н., Бисеркин И. А., Деев К. В. ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ 3D СЕТОЧНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ В СРЕДЕ ГИС ИНТЕГРО //Геоинформатика. – 2013. – №. 4. – С. 45-48.

Современные цифровые методы оценки горизонтальной расчленённости рельефа

Зиновьева Д.В. (МГРИ, 9263220823@mail.ru),*
Бойко М.С. (Институт Карпинского, m.boyko@mfkarpinsky.ru),*
Котов И.А. (Институт Карпинского, i.kotov@mfkarpinsky.ru)

Аннотация

В статье представлен новый метод оценки горизонтальной расчленённости рельефа, основанный на анализе разнообразия базовых геоморфологических форм — геоморфонов. Метод подразумевает использование локальных троичных шаблонов для выделения геоморфонов на цифровых моделях рельефа (ЦМР).

В статье описаны преимущества этого метода по сравнению с классическими методиками оценки горизонтальной расчленённости, такими как оценка плотности речной сети. Также обсуждаются логические основы метода и его применение в различных областях, включая мониторинг госгеолкарты третьего поколения, оценку миграции загрязняющих веществ, геодинамических процессов и других.

Ключевые слова

Геоинформационные системы, горизонтальная расчленённость рельефа, классификация рельефа, локальные троичные шаблоны, геоморфоны, индекс Шеннона

Теория

В ходе выполнения работ в рамках мониторинга Госгеолкарты-1000 третьего поколения перед исполнителями встал ряд вопросов, связанных с автоматизацией классификации рельефа по классическим признакам на больших массивах данных. Как правило для классификации денудационных областей рельефа используется четыре основные характеристики: высота, крутизна склонов, вертикальная расчлененность рельефа и горизонтальная расчлененность рельефа. Большинство современных геоинформационных систем легко справляются с первыми тремя задачами при наличии подготовленной ЦМР, а наиболее сложной с точки зрения применения вычислительных технологий является оценки горизонтальной расчлененности рельефа.

В классическом понимании под горизонтальной расчлененностью рельефа подразумевается средняя величина расстояний между водораздельной поверхностью и тальвегами долин на территории. Автоматизация вычисления такого параметра задача достаточно сложная, ресурсоемкая и требует длительной подготовки исходных данных. При работе с современными ГИС для оценки горизонтальной расчлененности чаще всего используется вычисление плотности речной сети, исходя из соображения, что протяженность речной сети в заданной области прямо пропорциональна расстоянию меду соседними водотоками, а значит и их водоразделами.

Авторами предлагается новый подход, который подразумевает оценку разнообразия базовых геоморфологических форм (геоморфонов) на исследуемой площади. Так как ЦМР отличаются от изображений в градациях серого только более широким диапазоном значений, то к ним могут быть применены такие же методы, что уже многие десятилетия применяются в технологиях машинного зрения. Так одним из самых эффективных средств текстурного анализа являются локальные бинарные шаблоны (ЛБШ), представляющие собой двоичное описание восьмисвязной окрестности пикселя. Однако ЛБШ дают слишком упрощенное представление, недостаточное для анализа ЦМР. Переход к использованию локальных троичных шаблонов (ЛТШ), позволяет выделить необходимое для анализа ЦМР количество структурных элементов.

Именно на применении ЛТШ основан метод выделения геоморфонов, при котором для каждой ячейки ЦМР проводится расчет ЛТШ с учетом принципа прямой видимости, с последующим преобразованием полученного троичного числа в десятичную форму и записью значения в ячейку матричного слоя. Исходя из восьмисвязности описываемой окрестности ячейки возможно 3^8=6561 значение, что с учетом поворотов и отражений дает, в свою очередь, 498 уникальных шаблонов, названных геоморфонами. Дальнейшее сокращение количества путем статистического анализа распространения данных форм позволяет сократить это число до 30, а группировка в классы, соответствующие наиболее простым формам рельефа дает итоговое количество картируемых геоморфонов — 10, соответствующих элементарным формам: равнина, вершина, хребет, уступ, отрог, склон, депрессия, долина, подножье, ложбина (рисунок 1).

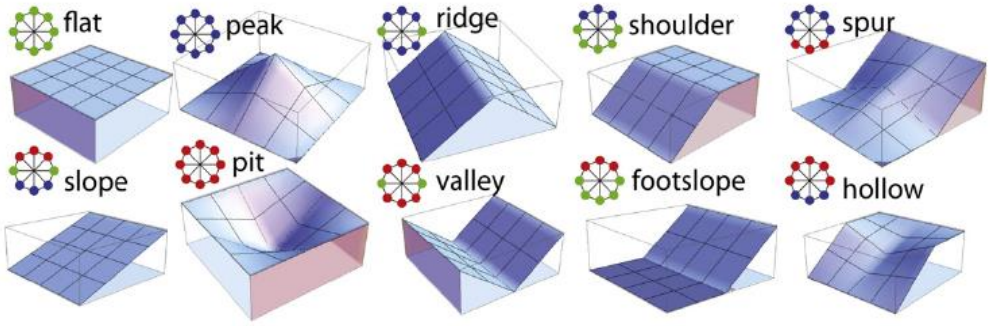


Рисунок 1. 3D-визуализация 10 элементарных форм (геоморфонов) и соответствующих им базовых ЛТШ

В настоящее время механизмы, позволяющие получить карту геоморфонов на исследуемую территорию реализованы в геоинформационных системах ArcGis Pro и GISGRASS. Обе реализации алгоритма мало отличаются друг от друга и для расчета требуют указания трех базовых параметров, влияющих на итоговое представление территории:

- расстояние поиска (SR)— задает размер области анализа вокруг целевой ячейки;
- расстояние пропуска — задает дистанцию на линии видимости с которой начинается анализ, установка параметра позволяет исключить малые формы рельефа;
- Пороговое значение угла плоской поверхности — устанавливает порог, ниже которого поверхность считается плоской.

Комбинация параметров зависит от желаемой детальности картирования, масштаба карты и разрешения исходной ЦМР.

В последнее десятилетие расчет и построение карты геоморфонов получают все более широкое распространение в различных областях, требующих анализа ЦМР, от почвоведения и анализа динамики экзогенных процессов, до изучения антропогенных ландшафтов и экологии, где служат как самостоятельным предметов анализа, так и компонентов более сложных расчетов. Мы предлагаем использовать данный метод для оценки горизонтальной расчлененности рельефа путем расчета меры разнообразия для геоморфонов на исследуемой территории. Для оценки разнообразия используется величина энтропии или индекс Шэннона, рассматриваемая как мера неопределённости состояния системы. Чем больше количество состояний, в которых может находиться система, тем больше значение неопределённости.

Для данной работы была выбрана ЦМР NASA SRTM GL. Сегодня в открытом доступе представлено достаточное количество и более точных моделей, но, чтобы сократить время расчетов и избежать дополнительной фильтрации, мы выбрали ЦМР с разрешение 90 метров. Исследуемый район: территория номенклатурного листа L-37-XXXV.

Карты геоморфонов были построены с использованием программного комплекса ArcGis Pro с различными наборами параметров, для подбора оптимального их сочетания (рисунок 2).

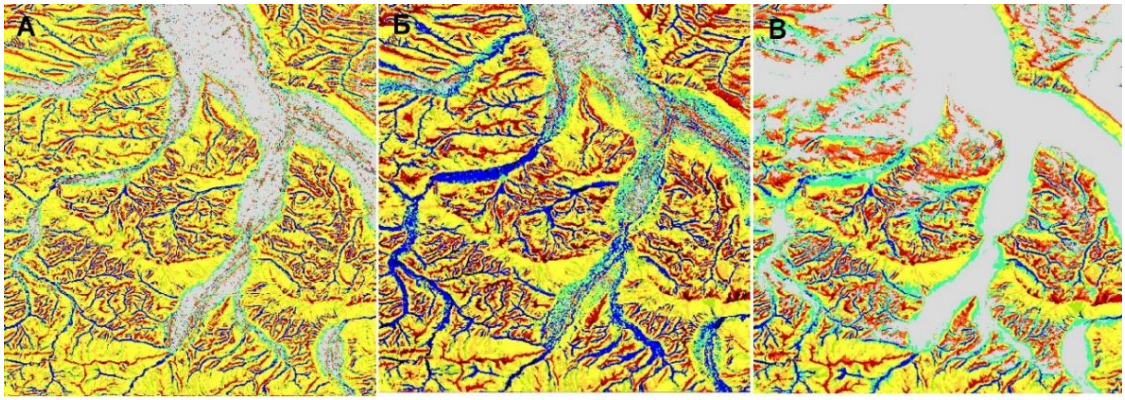


Рисунок 2. Фрагмент карты геоморфонов листа L-37-XXXV полученной с разными значениями параметра радиус поиска (SR) (А: SR=0.25км, Б: SR=0.5км, В: SR=1км)

Для целей обзорного картирования и классификации территории по горизонтальной расчлененности было выбрано максимальное значение SR=1 км, что позволило избежать влияния микроформ рельефа на результат, снизило «антропогенный шум», присутствующий на ЦМР и серьезно ускорило дальнейшие расчеты. Хотя, стоит отметить, что для более детальных исследований, при использовании ЦМР более высокого разрешения или даже при обработке результатов лидарной съемки рекомендуется использовать меньшие значения SR.

Расчеты коэффициента Шэнона производились в ГИС ПАРК. Полученный результат (Рисунок 3) в целом совпадает с оценкой горизонтальной расчлененности данной территории специалистами.

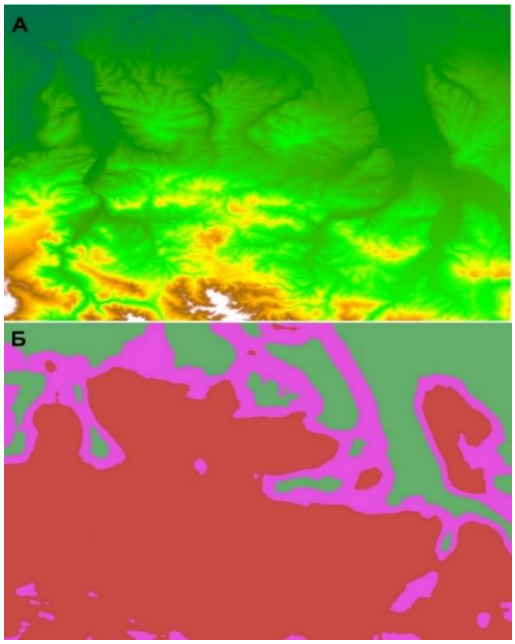


Рисунок 3. А: Исходная ЦМР территории листа L-37-XXXV, Б: результат классификации территории по разнообразию геоморфонов

Выводы

Применение методов анализа геоморфонов дает хороший результат при оценке горизонтальной расчлененности рельефа. Авторы так же хотели бы отметить, что использование данного метода не ограничивается только представленной, достаточно узкой, задачей, в рамках мониторинга Госгеолкарты-1000 третьего поколения построение и дальнейшая обработка карт геоморфонов использовались для выделения водоразделов, отрисовки специфических форм рельефа, таких как троговые долины и т.д.

Библиография

1. Позаченюк, Е. А., & Петлюкова, Е. А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа центрального предгорья главной гряды крымских гор для целей ландшафтного планирования. (Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И, Вернандского. География. Геология. Том 2(68). №2. 2016 г. С. 95-111).

2. Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. Geomorphology, 2013, 182, 147–156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005.

3. Jasiewicz, J., Netzel, P., & Stepinski, T. F. Landscape similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic unit. Geomorphology, 2014, 221, 104-112. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.011.

4. Józsa, E., & Kalmár, P. Assessing the applicability of EU-DEM dataset to landform classification using the geomorphons approach: the case study of the Eastern Mecsek Mountains region. Kartografické listy / Cartographic Letters, 2014, 22(2), 90–101.

Использование программных решений с открытым исходным кодом для оценки шумового загрязнения с учетом действующих нормативных документов

Иванникова В.О. (МГРИ, b3lka.vi@gmail.com),*
Бойко М.С. (МГРИ, m.boyko@mfkarpinsky.ru)

Аннотация

В статье дается сравнительная оценка возможности использования различных программных решений (включая с открытым исходным кодом) для расчета акустического воздействия на прилегающие территории. Расчеты велись на программных комплексах АРМ «Акустика» ООО "Технопроект", «Эколог-Шум» ООО «Фирмы «Интеграл» и модуля «Openoise» для QGIS (Open Source Software). Приведено сравнение результатов с инструментальными измерениями уровней шума.

Ключевые слова

Шум, расчет акустического воздействия, нормативные документы, транспортные потоки

Теория

Современные города всего мира, включая г. Москву, отличаются высоким уровнем шумового загрязнения. Транспортный шум — один из основных факторов, относящийся к нарушению окружающей среды и санитарно-эпидемиологического благосостояния населения.

На данный момент в проектных организациях используются расчетные комплексы, внесенные в Реестр российского программного обеспечения, такие как: АРМ «Акустика» ООО "ТЕХНОПРОЕКТ", «Эколог-шум» ООО «Фирма «Интеграл». Расчеты данных программ принимаются различными официальными органами, такими как Роспотребнадзор, ФАУ «Главгосэкспертиза» и пр. Для работы программ «Эколог-шум» и АРМ «Акустика» необходимо приобретение лицензионного ключа.

Одним из немногих бесплатных средств для расчета уровня шумового воздействия является модуль Openoise для QGIS. Данный программный продукт — это разработка специалистов Агентства по защите окружающей среды Пьемонта (ARPA Piemonte), использующая для расчетов шума от объектов транспортной инфраструктуры французский национальный стандарт NMPB и общеевропейскую методику CNOSSOS-EU.

Цель представленной работы — оценить возможность использования свободно распространяемого программного продукта Openoise для расчета шумового воздействия в условиях российской национальной нормативной базы.

Для визуализации расчетной части выбран участок о.п. Дмитровская - о.п. Тимирязевская на территории г. Москвы. Район проектирования находится в плотной городской застройке с различными источниками транспортного шума (МЦД-1, Дмитровское шоссе и пр.).

Для расчетов приняты следующие входные данные:

Таблица 1. Шумовые характеристики потока ж/д транспорта

Нумерация ж/д путей	L_{Aeq25}, дБА		$L_{i,Amax25}$, дБА	
	день	ночь	день	ночь
I главный путь	62,38	61,67	82,34	82,34
II главный путь	62,38	61,57	82,34	82,34

III главный путь	62,68	61,64	88,07	82,02
IV главный путь	64,36	63,46	87,91	84,69

Согласно п. 8.1 ГОСТ 33325-2015, расчетные точки были выбраны на расстоянии 2 м от фасада здания, обращенного в сторону оцениваемого участка железнодорожного пути, на высоте 1,5 м от поверхности земли на территории, непосредственно прилегающей к жилым домам и другим зданиям.

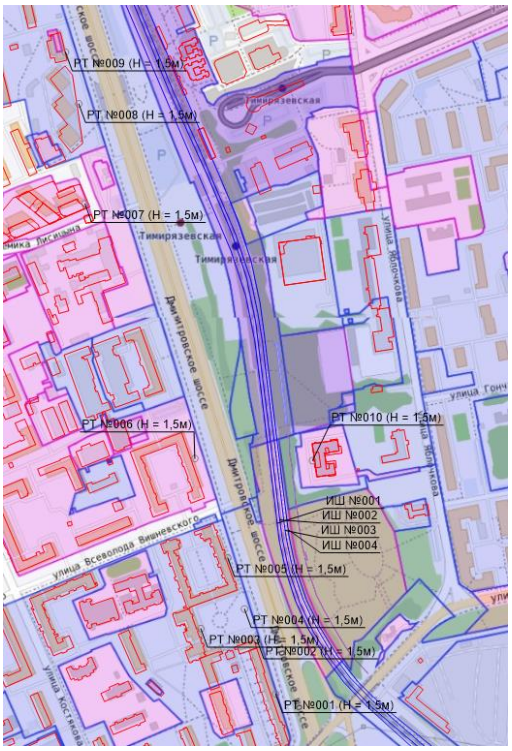


Рисунок 1. Ситуационная карта-схема с нанесенными РТ5-РТ7, РТ12-РТ17 и ближайшей жилой застройкой

Расчеты выполнены в ночной период суток, т.к. предельно допустимые уровни строже, чем в дневной период.

Для сравнения приняты расчеты в трех вышеуказанных программах и инструментальные замеры, проведенные в рамках «Инженерно-экологических изысканий» по объекту «Организация пригородно-городского пассажирского железнодорожного движения на участке Одинцово-Лобня (МЦД-1 «Одинцово-Лобня»)

Таблица 2. Сравнение результатов и инструментальных замеров

Расчетная точка		**La.экв**				**La.макс**			
N	**Название**	**АРМ**	**Эколог иум**	**Openois e**	**Замер ы**	**АРМ**	**Эколог иум**	**Openois e**	**Замеры**
001	Дмитровское шоссе, 1 к1	53,3	50.80	58.0	56,6	69,6	71.80	78.6	68,8
002	Дмитровский проезд, 4 к4	54,7	52.70	59.0		71,5	73.70	79.6	
003	Дмитровское шоссе, 3 к1	48,7	44.80	51.4		66,5	65.90	72.0	
004	Дмитровское шоссе, 3 к1	52,9	52.80	55.1		69,8	73.80	75.7	

	(площадка отдыха)								
005	Дмитровское шоссе, 5 к1	54,5	52.30	58.4		70,8	73.30	79.0	
006	Дмитровское шоссе, 7/2	53,2	49.20	56.3		68,2	70.30	76.9	
007	ЖК Дыхание митровское шоссе, 13	50,2	42.90	51.2		64,1	63.90	71.8	
008	ЖК Тимирязевский, митровское шоссе, 13а	52,5	47.70	54.1		67,4	68.80	74.7	
009	Дмитровское шоссе, 15 к1	53,1	49.00	55.1		68,4	70.00	75.7	
010	Улица Яблочкова, 3а ст1 (поликлиника)	57,2	56.10	60.4		74,8	77.00	81.0	

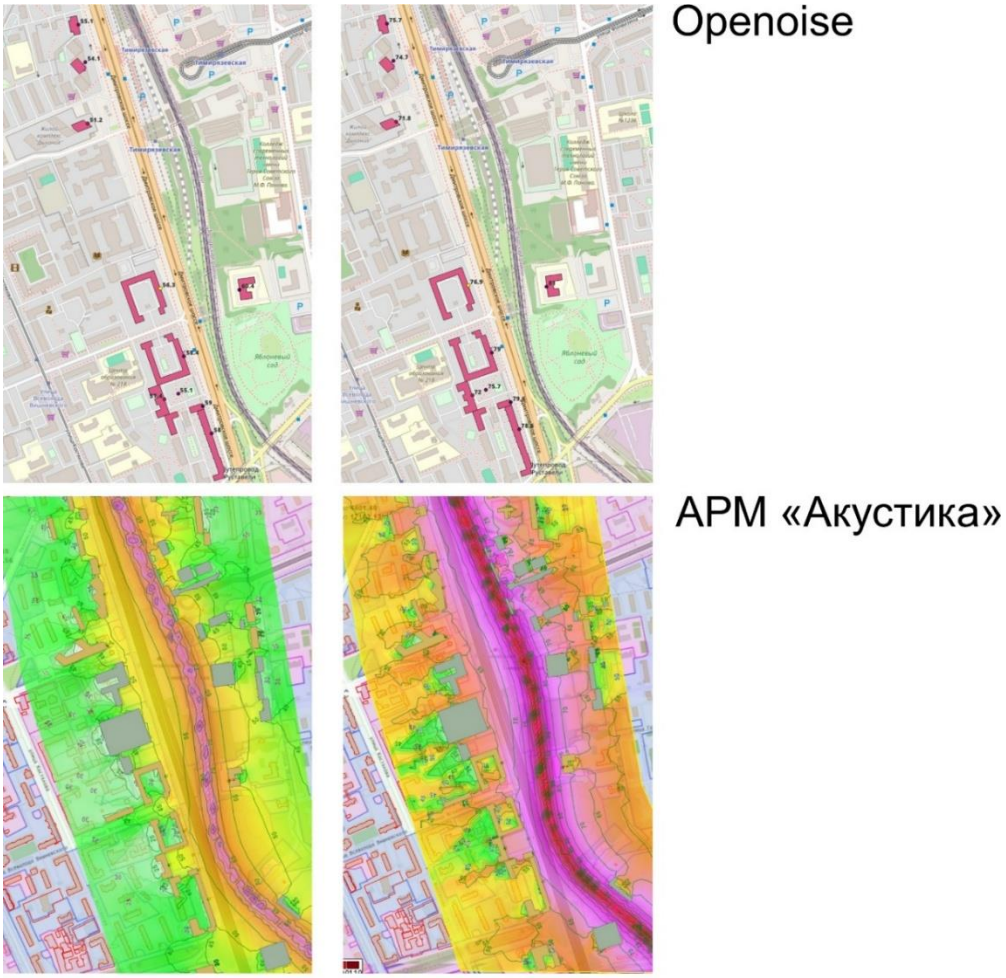


Рисунок 2. Инструментальные замеры, проведенные в рамках «Инженерно-экологических изысканий» по объекту «Организация пригородно-городского пассажирского железнодорожного движения на участке Одинцово-Лобня (МЦД-1 «Одинцово-Лобня»)

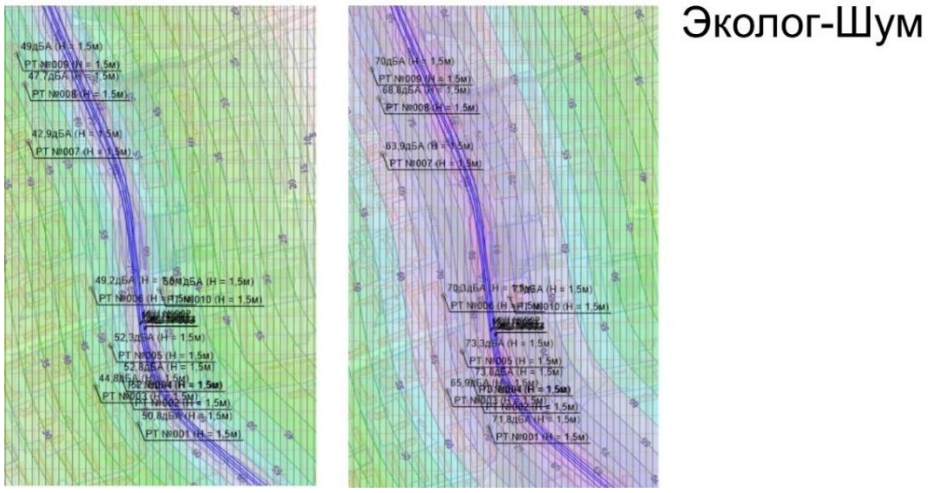


Рисунок 3. Графическое представление результатов расчета уровня шумового воздействия на прилегающую территорию жилой застройки (слева – эквивалентные уровни, справа – максимальные уровни)

Выводы

Анализ расчетов показал, что в существующем виде программное средство Openoise не может применяться даже для предварительной оценки шумового воздействия на территорию от линейных объектов инфраструктуры, что связано с существенными различиями нормативной базы ЕС и Российской Федерации. Но, учитывая доступность исходного кода модуля, возможна его доработка и приведение расчетной части в соответствии с российскими регулирующими документами.

Благодарности

Выражаю благодарность отделу проектирования безопасности и спецразделов ООО «Желдорпроект».

Библиография

1. Федеральный закон от 30.03.1999 г. №52-ФЗ «О санитарно- эпидемиологическом благополучии населения».
2. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»)
3. СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003»
4. ГОСТ 31295.2-2005 «Затухание звука при распространении на местности»
5. ГОСТ 33325-2015 «Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом»
6. ГОСТ 56234.3-2019 «Акустика. Программное обеспечение для расчетов уровней шума на местности»

Разработка программного комплекса для анализа сигналов геофизических приборов и модулей на стендах ручного управления

Иващенко Д.В.* (МГРИ, killstor@mail.ru),
Ладухин О.В. (МГРИ, 2012hanko@mail.ru)

Аннотация

В статье обосновывается необходимость упрощения тестирования модулей на стендах ручного управления, предлагается решение этой проблемы за счет создания универсального программного обеспечения с графическим интерфейсом, поддержкой сценариев и драйверами для работы с широким спектром PCI плат. Такой подход существенно упрощает процесс тестирования и снижает зависимость от узкоспециализированных навыков программирования.

Ключевые слова

Стенд ручного управления, программный комплекс, PCI платы, тестирование, графический интерфейс

Теория

Современные геологические и геофизические исследования требуют использование разных приборов и модулей[1, 2, 3], которые обеспечивают сбор, обработку и анализ различных данных. Однако тестирование таких устройств остается сложной задачей, требующей участия программистов, работающих с низкоуровневыми языками, такими как C. Эти специалисты разрабатывают тесты для управления и обработки сигналов через PCI платы стендов (0), а также занимаются отладкой в реальном времени. Такой подход имеет свои недостатки: необходимость глубоких знаний оборудования и программирования, а также низкая скорость адаптации к новым устройствам.

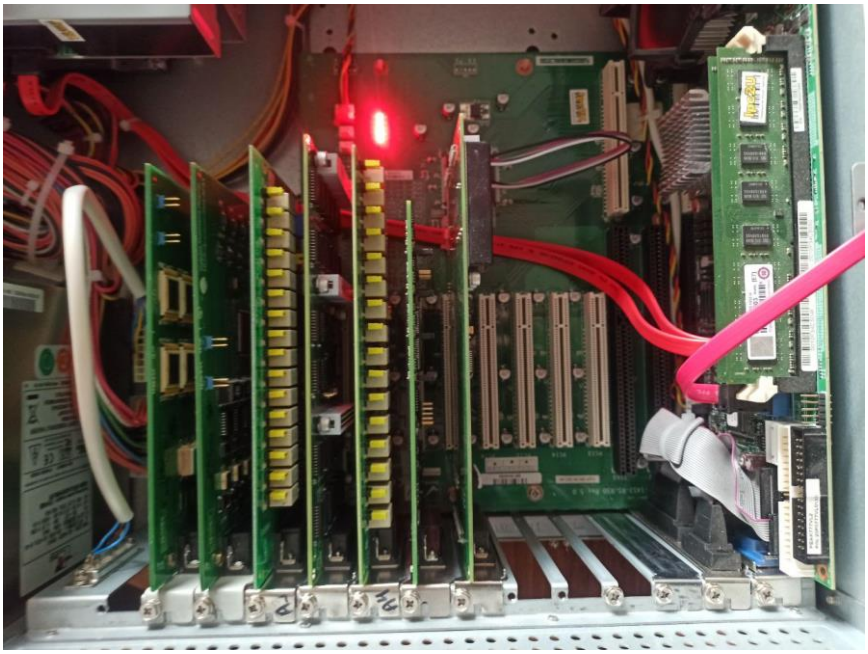


Рисунок 1. Стенд ручного управления

Предлагаемое решение заключается в разработке универсального программного комплекса для стендов ручного управления, который включает в себя графический интерфейс, поддержку сценариев и драйверы для работы с широким спектром PCI плат. Этот комплекс позволяет значительно упростить процесс тестирования и снизить зависимость от узкоспециализированных навыков программирования.

Основные компоненты разработанного комплекса (0) включают: драйвер для каждой PCI платы, сервер и клиент. Драйвер предоставляет серверу интерфейс для взаимодействия с регистрами платы, обеспечивая возможность чтения данных с входных каналов и записи значений, введённых пользователем, в выходные каналы. Сервер управляет взаимодействием с драйверами, принимая сообщения от клиента, выполняя поступающие команды и передавая ответные сообщения клиенту, а также перенаправляя все данные, полученные с платы. Клиент визуализирует полученную информацию в графическом интерфейсе (0) предоставляя пользователю возможность просматривать разнообразные данные о плате, такие как VID, DID, Index, Bus, Dev, Fun, SSDID, SSVID [4], а также видеть значения, поступающие с входных каналов, изменять значения выходных каналов и задавать маску для выходных каналов.

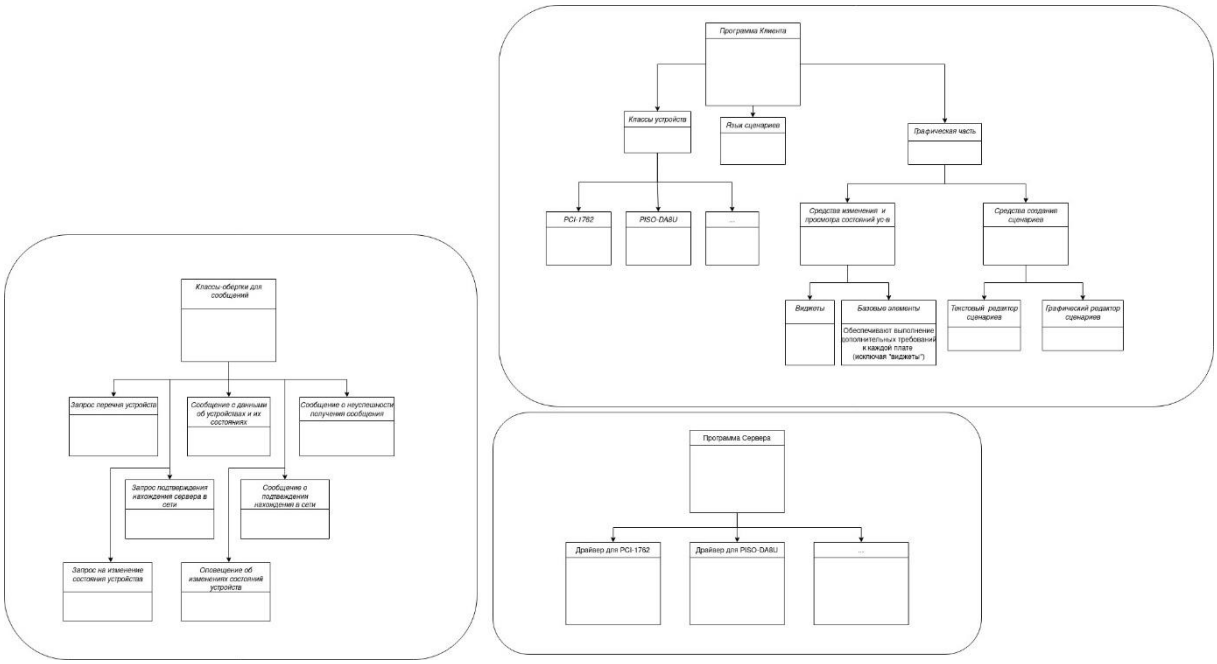


Рисунок 2. Блок схема программного комплекса и его основных составляющих

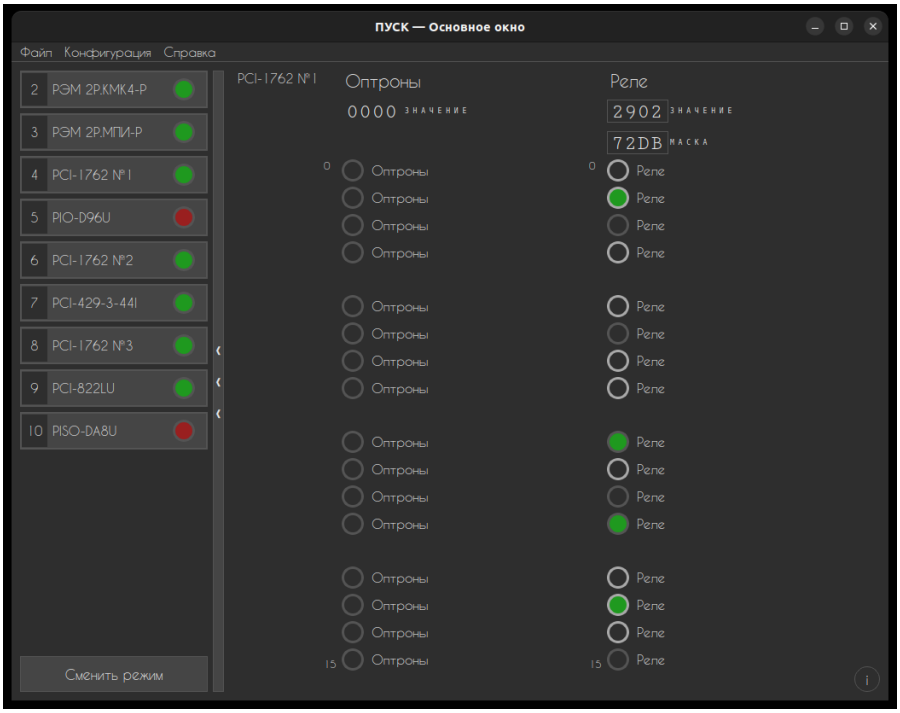


Рисунок 3. Информация о входных и выходных каналах платы PCI-1762

Также в программном комплексе создан режим «Виджеты» (0), позволяющий вывести нужную информацию определённых плат, благодаря которой можно настраивать рабочую область. Поддерживаются методы добавления, удаления, закрепления и перемещения виджетов. Возможно выделение одного или нескольких виджетов с помощью зажатой клавиши CTRL, а также выделение виджетов по области.

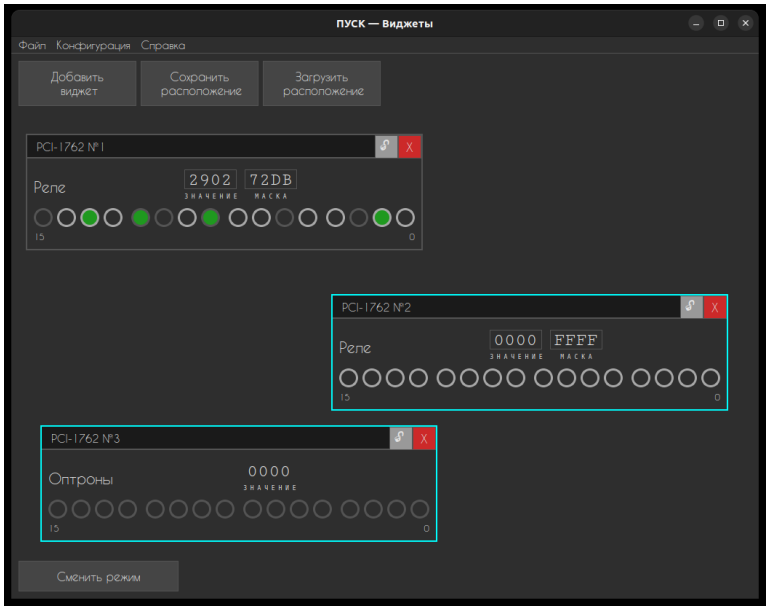


Рисунок 4. Режим «Виджеты»

Выводы

Разработанный комплекс программ ручного управления стендами значительно упрощает процесс тестирования и мониторинга приборов и модулей, используемых в геологии и геофизике. Он позволяет автоматизировать многие рутинные задачи, уменьшить количество ошибок и ускорить процесс тестирования. Внедрение данного комплекса программ позволит снизить порог входа в тестирование модулей, а также освобождает специалистов, позволяя им сосредоточиться на более важных задачах.

Библиография

1. Автоматизированная система для предупреждения пересечений стволов скважин / В. В. Костин, Б. А. Овезов, А. М. Машкова, Н. В. Соловьев // Молодые - Наукам о Земле : Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах, Москва, 31 марта – 01 2022 года / Редколлегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. Том 4. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2022. – С. 231-234. – EDN JHINTT.
2. Молчанов А. А., Абрамов Г. С., Сараев А. А. Телеизмерительные системы с электромагнитным каналом связи для проводки и геофизических исследований наклонно-направленных и горизонтальных скважин Западной Сибири (опыт применения и перспективы). НТВ АИС «Каротажник», №59,1999.—С.85-91.
3. Решетников П.М. Применение модулей геофизических исследований скважин и методика обработки данных в процессе бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин с использованием забойных телеметрических систем // Квалификационная работа. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2005. - 17 с.
4. Martin Mares, Grant Grundler “How To Write Linux PCI Drivers”, 2006, 13 p.

Разработка программного обеспечения решения прямой и обратной задач электроразведки на постоянном токе в 3D

Игнатьев Д.А.* (МГРИ, ignatiev.dmitry2015@yandex.ru),
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, akhmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

Электроразведка на постоянном токе является одним из ключевых методов геофизических исследований, используемых для изучения структуры земной коры, поиска полезных ископаемых, инженерно-геологических изысканий и экологического мониторинга. Решение прямых и обратных задач в 3D позволяет учитывать сложные геологические структуры, что повышает точность интерпретации данных. Существующие коммерческие программные продукты часто являются дорогостоящими и закрытыми, что ограничивает их доступность и гибкость. Разработка открытого и адаптируемого программного обеспечения (ПО) является актуальной задачей.

Ключевые слова

Прямая задача электроразведки на постоянном токе, обратная задача электроразведки на постоянном токе, SimPEG, программные реализации, Res3D/Res2D, COMSOL Multiphysics, BERT, открытый код, гибкость, Python, NumPy, SciPy, Matplotlib, визуализация данных, Qt, кроссплатформенность, графический интерфейс, виджеты, OpenGL, 3D-графика

Теория

Прямая задача заключается в расчете распределения электрического потенциала и токов в трехмерной среде. Для этого необходимо учитывать такие параметры, как структура геологической среды, удельное электрическое сопротивление каждой области, расположение и сила токовых электродов, а также граничные условия модели. Решение прямой задачи обычно выполняется численными методами, такими как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) или метод граничных элементов (МГЭ). Эти методы позволяют получить распределение потенциала и токов, которые затем можно сравнить с реальными измерениями, что делает их незаменимыми для моделирования сложных геологических структур.

Обратная задача, в свою очередь, направлена на определение электрических свойств и структуры геологической среды на основе измеренных данных, таких как значения потенциалов или сопротивлений. Эта задача начинается с начального предположения о распределении удельных сопротивлений и включает итерационный процесс подбора параметров модели. Для решения обратной задачи используются различные методы, включая линеаризованные подходы, итерационные методы (например, метод Ньютона или метод Гаусса-Ньютона), а также методы регуляризации, которые помогают стабилизировать решение. Кроме того, в сложных случаях могут применяться статистические методы, такие как метод Монте-Карло или Байесовский подход. Однако решение обратной задачи часто является неоднозначным из-за ограниченности данных и сложности геологической среды, что требует тщательного подхода к выбору методов и инструментов.

Для решения задач электроразведки на постоянном токе в 3D существует множество программных реализаций, как коммерческих, так и открытых. Среди коммерческих программ выделяются Res3D/Res2D, которые используют метод конечных разностей для решения прямой задачи и метод Гаусса-Ньютона для обратной. Эти программы обладают удобным интерфейсом и высокой скоростью вычислений, что делает их популярными среди профессионалов. Однако их основной недостаток — это закрытый код и высокая стоимость, что может быть ограничением

для некоторых пользователей. Другой известный коммерческий продукт — COMSOL Multiphysics, который применяет метод конечных элементов для решения прямых задач. COMSOL отличается универсальностью и поддержкой сложных геометрий, но также требует лицензии, что делает его дорогостоящим решением.

Среди открытых программ стоит отметить SimPEG, который использует как метод конечных элементов, так и метод конечных разностей для решения прямой задачи, а также метод Гаусса-Ньютона для обратной. Основные преимущества SimPEG — это открытый код и гибкость, которые позволяют адаптировать программу под конкретные задачи. Однако для работы с ним необходимы навыки программирования, что может быть вызовом для новичков. Еще одна открытая программа — BERT, которая применяет метод граничных элементов для прямой задачи и метод Тихоновской регуляризации для обратной. BERT демонстрирует высокую точность в задачах с гладкими границами, но его применение ограничено в случаях неоднородных сред.

Для решения прямых задач в 3D наиболее эффективными являются методы конечных элементов и конечных разностей, так как они обеспечивают баланс между точностью и вычислительной сложностью. В случае обратных задач предпочтение отдается итерационным методам, таким как метод Гаусса-Ньютона, которые в сочетании с регуляризацией обеспечивают устойчивость решения. Открытые программы, такие как SimPEG и BERT, предоставляют гибкие инструменты для исследований, но требуют от пользователя навыков программирования. В то же время разработка специализированного программного обеспечения позволяет учитывать специфику конкретных задач, однако это требует значительных временных и вычислительных ресурсов. Таким образом, выбор инструмента зависит от задач, доступных ресурсов и уровня подготовки пользователя.

SimPEG (Simulation and Parameter Estimation in Geophysics) — это открытая библиотека на Python, разработанная для моделирования и решения прямых и обратных задач в геофизике. Она предоставляет гибкие инструменты для работы с различными геофизическими методами, включая электроразведку на постоянном токе, магниторазведку и электромагнитные методы. Благодаря своей открытости, модульности и интеграции с современными вычислительными библиотеками, такими как NumPy, SciPy и Matplotlib, SimPEG активно используется в научных исследованиях и образовательных целях. Основные возможности SimPEG включают решение прямых задач, таких как моделирование распределения электрического потенциала в трехмерной среде. Для этого библиотека поддерживает различные численные методы, включая метод конечных элементов и метод конечных разностей, а также работу с различными типами сеток — как структурированными, так и неструктурированными. Это позволяет учитывать сложные геологические структуры и обеспечивает высокую точность расчетов.

Кроме того, SimPEG предоставляет инструменты для решения обратных задач, таких как восстановление распределения удельного сопротивления по измеренным данным. Для этого используются методы оптимизации, например, метод Гаусса-Ньютона, а также регуляризация, которая обеспечивает устойчивость решения и предотвращает переобучение модели. Одной из ключевых особенностей SimPEG является ее гибкость и расширяемость. Пользователи могут создавать собственные модели и алгоритмы, адаптируя библиотеку под конкретные задачи. SimPEG также легко интегрируется с другими библиотеками Python, что делает его удобным инструментом для комплексного анализа данных. Для визуализации результатов библиотека поддерживает построение 2D и 3D графиков, что позволяет наглядно анализировать данные и модели.

Преимущества SimPEG делают его мощным инструментом для исследователей. Во-первых, это открытый код, который позволяет модифицировать и адаптировать библиотеку под конкретные задачи. Во-вторых, SimPEG поддерживает различные численные методы и типы сеток, что обеспечивает гибкость в решении задач. В-третьих, благодаря интеграции с Python,

библиотека легко сочетается с другими инструментами для научных вычислений. Наконец, активное сообщество пользователей и разработчиков обеспечивает регулярные обновления и поддержку, что делает SimPEG надежным выбором для геофизических исследований.

Qt — это еще один мощный инструмент, который может быть использован для создания пользовательских интерфейсов в приложениях для электроразведки. Это кроссплатформенный фреймворк для разработки графических пользовательских интерфейсов (GUI) и приложений, созданный компанией Trolltech (ныне принадлежит The Qt Company). Он широко используется для создания настольных, мобильных и встраиваемых приложений, а также поддерживает различные языки программирования, включая C++, Python (через PyQt или PySide), JavaScript и Rust. Qt предоставляет разработчикам мощные инструменты для создания интуитивно понятных, производительных и современных приложений. Благодаря своей универсальности, Qt используется в таких известных продуктах, как Autodesk Maya, Adobe Photoshop Elements, KDE (рабочая среда для Linux) и многих других.

Одной из ключевых особенностей Qt является его кроссплатформенность. Фреймворк поддерживает основные операционные системы, включая Windows, macOS, Linux, Android, iOS и встраиваемые системы. Это позволяет разработчикам писать код один раз и запускать его на разных платформах без значительных изменений. Кроме того, Qt отличается модульностью: он состоит из множества модулей, которые можно подключать по мере необходимости. Например, QtCore предоставляет базовые функции, такие как работа с файлами, потоками и таймерами, QtWidgets содержит компоненты для создания графических интерфейсов (кнопки, окна, меню), а QtQuick предлагает современный декларативный подход к созданию интерфейсов через QML.

Гибкость Qt позволяет использовать как традиционный подход к созданию интерфейсов через виджеты, так и современные методы, такие как QML и QtQuick. Это делает фреймворк подходящим для разработки как простых, так и сложных приложений. Qt также поддерживает интеграцию с различными языками программирования: хотя основной язык — C++, разработчики могут использовать Python (через PyQt или PySide), JavaScript (через QML) и другие языки. Кроме того, Qt предоставляет возможности для работы с OpenGL и 3D-графикой, что позволяет создавать приложения с использованием современных графических технологий.

Qt работает на основе механизма сигналов и слотов (signals and slots), который является ключевым для обработки событий и взаимодействия между компонентами приложения. Этот механизм заменяет традиционные callback-функции, делая код более читаемым и безопасным. Сигнал — это событие, которое генерируется объектом (например, нажатие кнопки), а слот — это функция, которая вызывается в ответ на сигнал. Например, при нажатии кнопки можно вызвать функцию, которая изменит текст на экране.

Основные элементы интерфейса в Qt называются виджетами. Это базовые компоненты, такие как кнопки, текстовые поля и окна, которые используются для создания пользовательских интерфейсов. Qt также предоставляет мощные инструменты для работы с данными через модель-представление (Model-View), такие как QTableView, QListView и QTreeView. Эти компоненты позволяют отображать и редактировать данные в таблицах, списках и древовидных структурах.

Для работы с графикой и анимацией Qt предлагает такие инструменты, как QPainter для 2D-графики, OpenGL для 3D-графики и QtQuick для создания современных анимированных интерфейсов. Кроме того, Qt поддерживает мультимедиа через модуль QtMultimedia, который позволяет работать с аудио, видео и камерами. Для международной поддержки Qt предоставляет инструмент Qt Linguist, который помогает локализовать приложения на разные языки.

Благодаря своей обширной документации и активному сообществу разработчиков, Qt остается одним из самых популярных фреймворков для создания графических интерфейсов. Его кроссплатформенность, гибкость и поддержка современных технологий делают его отличным выбором для разработки как настольных, так и мобильных приложений. В сочетании с такими инструментами, как SimPEG, Qt может стать мощным решением для создания

специализированных приложений в области электроразведки и других геофизических исследований.

Выводы

Разработка программного обеспечения для решения прямых и обратных задач электроразведки на постоянном токе в 3D является важным направлением в геофизических исследованиях. Современные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР), позволяют эффективно решать прямые задачи, учитывая сложные геологические структуры. Для обратных задач предпочтение отдается итерационным методам, таким как метод Гаусса-Ньютона, в сочетании с регуляризацией, что обеспечивает устойчивость и точность решения.

Существующие коммерческие программные продукты, такие как Res3D/Res2D и COMSOL Multiphysics, обладают высокой производительностью и удобным интерфейсом, но их закрытый код и высокая стоимость ограничивают доступность для широкого круга пользователей. В то же время открытые решения, такие как SimPEG и BERT, предоставляют гибкость и возможность адаптации под конкретные задачи, хотя и требуют от пользователя навыков программирования.

SimPEG, как открытая библиотека на Python, демонстрирует значительный потенциал для научных исследований и образовательных целей благодаря своей модульности, интеграции с современными вычислительными библиотеками и поддержке различных численных методов. Qt, в свою очередь, предлагает мощные инструменты для создания кроссплатформенных графических интерфейсов, что делает его идеальным выбором для разработки специализированных приложений в области электроразведки.

Таким образом, сочетание открытых библиотек, таких как SimPEG, с современными фреймворками для создания интерфейсов, такими как Qt, позволяет разрабатывать гибкие, адаптируемые и доступные программные решения для геофизических исследований. Это открывает новые возможности для повышения точности и эффективности интерпретации данных, а также для расширения доступности современных методов электроразведки для широкого круга пользователей.

Библиография

1. Документация библиотеки SimPEG – URL: https://docs.simpeg.xyz/v0.23.0/content/tutorials/05-dcr/index.html
2. Документация библиотеки Qt – URL: https://doc.qt.io/
3. Geosci.xyz: образовательный ресурс по геофизике, раздел Geophysical Surveys – URL: https://em.geosci.xyz/content/geophysical_surveys/index.html

Разработка модуля биржевой аналитики в области недропользования

Итунин Д.В.* (МГРИ, den.itunin@mail.ru),
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается процесс разработки модуля биржевой аналитики, направленного на анализ и прогнозирование цен на акции в области недропользования, а также на оптимизацию торговых стратегий. Модуль будет включать функции для сбора данных о ценах акций, их обработку, анализ и визуализацию.

Работа выполняется при помощи машинного обучения на языке Python и различных сопутствующих ему библиотек.

Ключевые слова

Машинное обучение, аналитика данных, акции

Теория

Торговля акциями на бирже — процесс перехода прав собственности на акции и другие ценные бумаги на организованных торговых площадках (биржах). Первичное размещение эмиссии акций позволяет получить средства для деятельности предприятия. Вторичный оборот лишь изменяет собственников акций, но не приносит прямого дохода предприятию. Однако биржевая котировка акций позволяет определить истинную цену предприятия.

Большую популярность в последнее время получил способ торговли акциями на бирже через Интернет, так называемый интернет-трейдинг. В этом случае процедура покупки и продажи акций сильно упрощается. Требуется определенное программное обеспечение, обычно предоставляемое брокером или непосредственно биржей.

С переходом на электронные носители не только увеличилась скорость. Начали активно развиваться методы внутридневной торговли, появились механические торговые системы, ориентированные на краткосрочные торговые операции, которые могут проводиться в автоматическом режиме в огромных количествах с высокой частотой.

Целью данной работы является создание модуля биржевой аналитики, направленного на анализ и прогнозирование цен на акции в области недропользования, а также на оптимизацию торговых стратегий. Планируемый результат должен выполнять следующие задачи:

1. Сбор данных: Модуль осуществляет сбор данных для получения актуальных данных о ценах акций, объемах торгов и других рыночных показателях.
2. Обработка данных: Полученные данные будут форматироваться, до удобного для использования вида.
3. Анализ и прогнозирование: Применение методов машинного обучения и статистического анализа для прогнозирования цен акций и выявления торговых сигналов.
4. Визуализация данных: Полученные результаты анализа визуализируются в виде графиков или таблиц. Это позволит пользователям легко интерпретировать данные и принимать обоснованные решения.
5. Тестирование и оптимизация: Проведение тестирования разработанного модуля на исторических данных для оценки его эффективности и надежности. Оптимизация алгоритмов на основе полученных результатов.

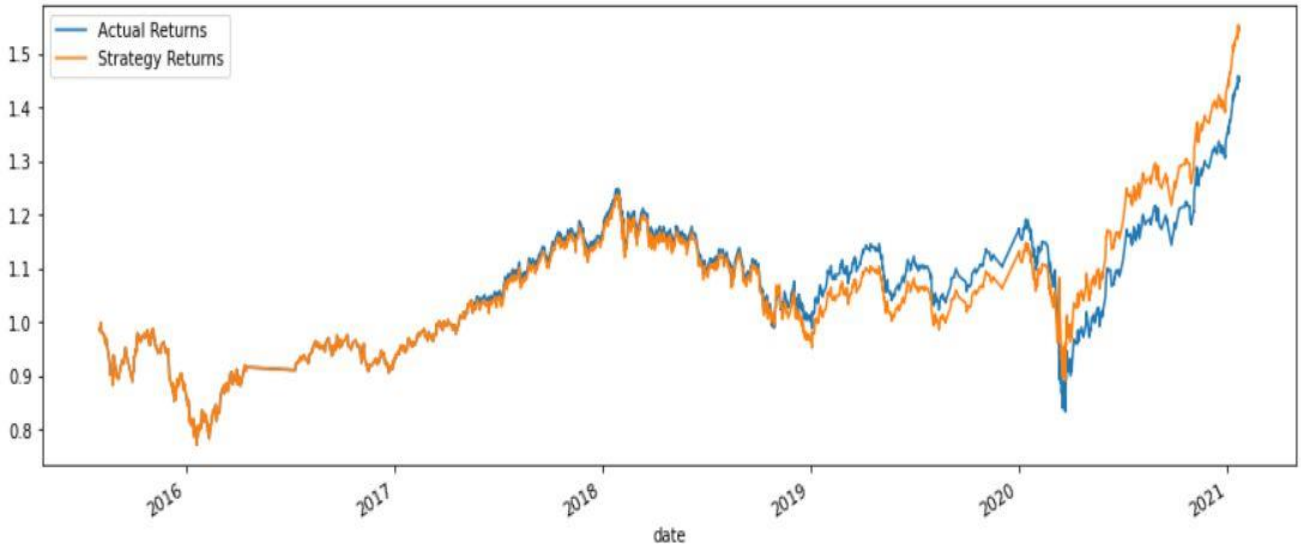


Рисунок 1. Пример графической визуализации результатов анализа

На рисунке 1 изображен пример отображения результатов анализа данных через графики это наглядный и часто применяемый в аналитике экономики способ представления данных. Оранжевый график отображает спрогнозированный результат, а синий реальный.

Используемые библиотеки:

- Pandas — это библиотека для работы с данными в Python. Она предоставляет структуры данных (например, DataFrame и Series), которые позволяют легко манипулировать и анализировать данные. Обычно используется для чтения, обработки и анализа табличных данных.
- NumPy — это библиотека для работы с многомерными массивами и матрицами, а также для выполнения математических операций над ними. Она часто используется вместе с Pandas для выполнения числовых расчетов и обработки данных.
- Pathlib — это модуль для работы с файловыми системами. Он позволяет удобно управлять путями к файлам и директориям. Path предоставляет методы для создания, чтения и изменения файловой системы в платформонезависимом формате.
- HvPlot — это библиотека для визуализации данных, которая позволяет создавать интерактивные графики на основе данных в DataFrame. hvplot.pandas добавляет методы визуализации к объектам Pandas, позволяя легко строить графики с использованием синтаксиса Pandas.
- Matplotlib — это библиотека для создания статических, анимационных и интерактивных визуализаций в Python. pyplot — это модуль внутри Matplotlib, который предоставляет функции для создания графиков, диаграмм и других визуальных представлений данных.
- Scikit-learn (sklearn) — это библиотека для машинного обучения в Python. svm (Support Vector Machine) — это один из алгоритмов машинного обучения, который используется для классификации и регрессии.
- StandardScaler — это класс из Scikit-learn, который используется для стандартизации признаков путем удаления среднего значения и масштабирования к единичной дисперсии. Это особенно полезно при работе с алгоритмами машинного обучения, которые чувствительны к масштабированию данных.

- DateOffset — это класс из модуля pandas.tseries.offsets, который позволяет выполнять операции с временными метками, такие как добавление или вычитание временных интервалов (например, дней, месяцев). Это полезно при работе с временными рядами.
- classification_report — это функция из Scikit-learn, которая генерирует отчет о качестве классификации модели.

Каждая из этих библиотек играет важную роль в процессе анализа данных и машинного обучения, позволяя эффективно обрабатывать данные, строить модели и визуализировать результаты.

Актуальность разработки: В условиях быстрого изменения финансовых рынков и увеличения объемов данных необходимость в эффективных инструментах для анализа биржевых котировок становится особенно важной. Разработка модулей биржевой аналитики отвечает современным требованиям трейдеров и инвесторов, работающих при помощи технического анализа предоставляя им возможность принимать обоснованные решения на основе анализа данных.

Выводы

В ходе этой работы была рассмотрена возможность и эффективность машинного обучения в области биржевой аналитики. Стоит учитывать, что это лишь один из способов торговли, применяемый главном образе в техническом анализе, однако существуют и другие подходы к этому вопросу.

Также был расписан способ создания модуля для биржевой аналитики на языке ЗPython и сопутствующих ему библиотеках.

Внедрение современных методов анализа данных. открывает новые возможности для прогнозирования цен акций и выявления торговых сигналов. Это повышает вероятность успешных торговых операций и уменьшает риск

Библиография

1. Nassif, A. B., Alshahrani, M. (2021). A comparative study of machine learning models for stock price prediction.
2. I.Goodfellow, Y.Bengio, A.Courville. Deep Learning. MIT Press, 2016.
3. C.C.Aggarwal. Neural Networks and Deep Learning. A Textbook. Springer International Publishing AG, 2018.
4. Bianchini S., Lissoni F., Pezzoni M., Zirulia L. (2016) The economics of research, consulting, and teaching quality: Theory and evidence from a technical university.
5. Kline S.J., Rosenberg N. (1986) Overview of innovation. In: The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth.
6. Lee S., Jung H. S. Machine Learning Techniques Applied to Geoscience Information System and Remote Sensing. – MDPI. ISBN 978-3-03921-215-6. (2019).

Формирование требований к ГИС с учетом специфики нагрузочного тестирования

Казаков Л.А.* (МГРИ, leokazakoff@yandex.ru),
Ладухин О.В. (МГРИ,* 2012hanko@mail.ru*)

Аннотация

В статье обосновывается перспективность формирования требований к ГИС с учетом специфики нагрузочного тестирования. В частности, рассматривается эффективность применения цифровых технологий для повышения конкурентоспособности предприятия и зависимость его успешности от реализации новых идей по автоматизации в процессе тестирования.

Данная область деятельности направлена на создание современных подходов к автоматизации нагрузочного тестирования с использованием цифровых технологий и призвана решить проблему временных затрат, количества рутинной работы и количества ресурсов для выполнения многократных процессов. В связи с этим актуальность рассматриваемой проблемы несомненна.

Ключевые слова

Нагрузочное тестирование, ГИС, автоматизация

Теория

В настоящее время одной из важнейших проблем геоинформационных систем (ГИС) являются сбои в работе, которые нарушают стабильность обработки пространственных данных.

Функционирование программного обеспечения ГИС должно быть рассчитано на продолжительные нагрузки, особенно при работе с большими массивами геоданных, такими как картографическая информация, слои аналитики или данные датчиков. Сбои и отказы в таких системах способны привести не только к потере пользовательского доверия и финансовым убыткам, но и к критическим ошибкам в принятии решений, основанных на геопространственном анализе.

Тестирование производительности ГИС играет ключевую роль: оно позволяет оценить, насколько стабильно система обрабатывает запросы, визуализирует данные и интегрируется с внешними сервисами при высоких нагрузках. Особое внимание уделяется скорости обработки пространственных запросов, точности геокодирования и устойчивости к пиковым сценариям, например, в условиях чрезвычайных ситуаций или массового использования картографических сервисов.

Оценка на соответствие производительности продукта требованиям, сформулированным в техническом задании, проводится с помощью нагрузочного тестирования. Нагрузочное тестирование – тип тестирования, который представляет собой определение времени отклика системы на запросы различных типов с целью удостовериться, что система работает в соответствии с требованиями при нормальной пользовательской нагрузке программно-технической системы в ответ на внешний запрос, а также позволяет оценить поведение системы при возрастающей нагрузке [2]. Цель нагрузочного тестирования заключается в определении максимальной нагрузки, при которой система может функционировать. Прецеденты и действующие лица для нагрузочного тестирования представлены на 0.

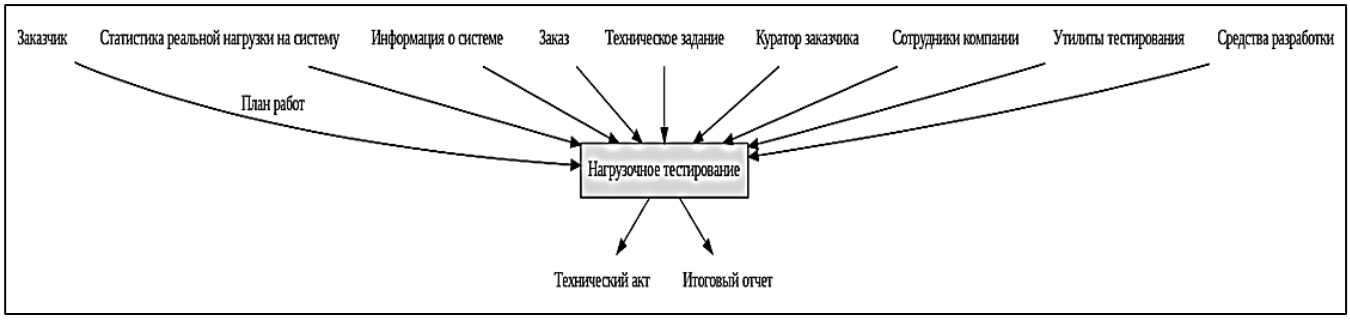


Рисунок 1. - Контекстная диаграмма «Нагрузочное тестирование»

Нагрузка может включать количество пользователей и число операций на сервере.

Производительность геоинформационной системы зависит от следующих факторов [2]:

- скорости работы программного обеспечения;
- производительности аппаратного обеспечения;
- скорости сети.

В ходе тестирования выполняются операции, позволяющие точнее оценить производительность и выявить уязвимости системы [2]:

- замер времени выполнения операций при различных уровнях нагрузки;
- определение числа пользователей, одновременно работающих с приложением;
- выявление пределов допустимой производительности при росте нагрузки.

После анализа недостатков существующей организации бизнес- и информационных процессов принято решение о внедрении системы, которая приведет к ускорению процесса проведения нагрузочного тестирования, что ускорит получение требуемых заказчиком результатов, уменьшит затраты времени и упростит работу инженерам-тестировщикам, значительно сократит количество ошибок.

Для этого предлагается автоматизировать данные процессы (0):

- создание сценария НТ;
- рестарт сервисов и проверки;
- очистка дискового пространства;
- получение графиков для построения дальнейшего отчета;
- генерация таблиц для построения дальнейшего отчета;

Преимущества автоматизации процесса проведения нагрузочного тестирования:

- получение результатов тестирования в наиболее короткие сроки;
- возможность проведения НТ не только инженером-тестировщиком. но и другими специалистами (с подготовленной для них инструкцией);
- сокращение числа ошибок.

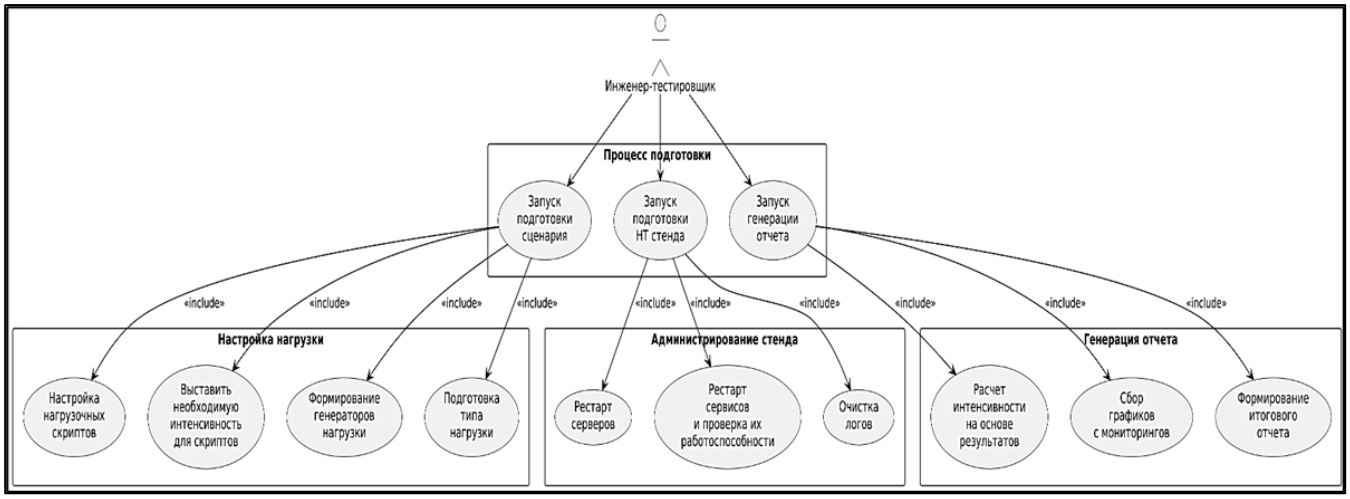


Рисунок 2. - Диаграмма UseCase «Подготовка сценария»

В ходе выполнения поставленных задач было использовано следующее ПО:

- Jmeter - программное обеспечение с открытым исходным кодом, Java-приложение, предназначенное для нагрузочного тестирования функционального поведения и измерения производительности [4].
- GitLab - веб-приложение и систему управления репозиториями программного кода для распределенной системы контроля версий Git [1].
- Allure - популярный инструмент с открытым исходным кодом для визуализации результатов тестирования [3].

Данное решение позволит автоматизировать выполнение Windows-пакетов и Linux-запросов, позволяя очищать диск тестового стенда, перезапускать приложения и эмуляторы перед тестами. Оно ускорит создание нагрузочных сценариев в JMeter, настройку интенсивности скриптов и построение отчетов в Allure, значительно повышая скорость НТ. Несомненно, что потребуются дополнительные вложения в оборудование и обучение сотрудников.

Выводы

Работа над рассматриваемой темой призвана решать такие проблемы как: сокращение сроков, объема рутинных задач и задействованных ресурсов для повторяющихся процессов.

Представленные методы и соответствующие инструменты позволяют проверить такие нефункциональные требования, как производительность и работоспособность геоинформационной системы при различных нагрузках и создаваемых условиях. Нагрузочное тестирование позволяет не только следить за работой системы, но и помогает давать рекомендации по оптимизации работы системы, а также способствует выявлению и устранению большого набора потенциальных угроз, которые информационная система может начать испытывать на стадии эксплуатации.

В процессе работы созданы предпосылки для более глубокого исследования по автоматизации процесса проведения нагрузочного тестирования в ГИС.

Библиография

1. Роман Андреев GitLab для начинающих: зачем он нужен в мире, где есть GitHub [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.hexlet.io/blog/posts/gitlab-dlya-nachinayuschih (дата обращения: 23.02.2025).

2. Туровец Николай Олегович, Алефиренко Виктор Михайлович Методы тестирования интегрированных информационных систем // Science Time. 2022. №3 (99) [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-testirovaniya-integrirovannyh-informatsionnyh-sistem (дата обращения: 23.02.2025).

3. Dmitry Baev, Mikhail Lankin Allure Report Hands-on Guide [Электронный ресурс]. – URL: https://qameta.io/blog/allure-report-hands-on/ (дата обращения: 23.02.2025).

4. Ekrem Kurt JMeter — Performance and Load Testing: Beginner's Guide | Part I [Электронный ресурс]. – URL: https://jmeter.apache.org/ (дата обращения: 23.02.2025).

Разработка методов автоматизированной генерации и визуализации штрихового отображения рельефа с использованием открытых ГИС технологий

Карапетян Л.М.* (МГРИ, lusinekarapetyan000406@mail.ru),
Бойко М.С. (МГРИ, m.boyko@mfkarpinsky.ru)

Аннотация

В статье рассматривается проблема упрощения визуализации пространственных данных в ранних версиях геоинформационных систем (ГИС). Автор предлагает решение этой проблемы с помощью новейших версий ГИС, включая систему с открытым исходным кодом QGIS. Особое внимание уделяется методу штрихового оформления рельефа, который позволяет точнее представить крутизну и экспозицию склонов. Описывается упрощённая схема автоматической генерации штрихового представления рельефа с использованием генератора геометрий QGIS.

Ключевые слова

Геоинформационные технологии, ГИС, картография, визуализация, рельеф, QGIS, цифровые модели рельефа (ЦМР), штриховое оформление, автоматизация, обработка изображений

Теория

Стремительное развитие геоинформационных технологий в конце XX – начале XXI века подарило специалистам большое количество различных методов, средств и инструментов по обработке пространственных данных. К сожалению, в ранних версиях ГИС разработчики фокусировались на реализации именно средств пространственного анализа и обработки геоданных, уделяя недостаточно внимания средствам их визуализации. Это привело к тому, что одновременно с постоянным усложнением и структур пространственных баз данных, произошла некоторая деградация их визуализации, вызванная недостаточностью изобразительных средств ГИС, в последствии зафиксированная в различных нормативных документах. В качестве примера можно рассмотреть условных знак роговиков на Госгеолкарте-200. Подобное упрощение достаточно часто приводит к потере части смысловой нагрузки условного знака чем снижает информационную точность карты, в пример приведенном примере условного знака роговиков градиентное увеличение размера точек указывало на нарастание процесса при приближении к источнику.

В картах специального назначения, таких как Госгеолкарта, составление которых нормировано большим количеством требований подобные изменения не слишком заметны, в связи с «инертностью» нормативной базы, однако в картографических материалах общего или презентационного назначения было утрачено достаточно большое количество изобразительных техник, использование которых зачастую способно повысить информационную насыщенность карты без существенного увеличения загруженности.

Один из таких приемов – штриховое отображение рельефа. Этот способ представления, прекрасно передающий морфологию рельефа, появился еще в XVII веке, а позднее в XVII-XIX вв. получил широкое распространение на военных картах, для которых точное представление о крутизне и экспозиции склонов важнее определения абсолютных и относительных высот. Позднее, в первой половине XX века, метод был усовершенствован в работах Эдуарда Имгофа и Н.Н. Лосякова, которые использовали сочетание штрихового отображения с боковым освещением рельефа. Из-за сложности автоматизации процесса штрихового оформления, отсутствия доступных моделей рельефа и, самое главное, недостаточности инструментария ГИС данная техника последние десятилетия использовалась только в художественно-оформленных картах, для подготовки которых допустимо использование большого количества ручного труда.

В новейших версиях ГИС, включая систему с открытым исходным кодом QGIS, разработчики наконец-то обратили внимание на недостаточность инструментария художественного оформления карт и представления пространственной информации и у картографов, работающих в этих системах, появилась возможность автоматизировать многие технические приемы, ранее доступные только при рукописном оформлении карт, в том числе штриховое оформление карт.

Предлагаемый метод позволяет средствами исключительно QGIS, без использования других программных комплексов для обработки изображения, получить законченную и оформленную карту мелкого либо среднего масштаба с использованием штрихового оформления рельефа. Исходными данными для работы является цифровая модель рельефа (ЦМР) района г. Пятигорск (рис.1), находящаяся в открытом доступе в каталоге https://opentopography.org/. ЦМР Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global является наиболее «чистой», т.е. лишенной шумов из находящихся в открытом доступе, что позволяет снизить трудозатраты на подготовку данных к оформлению карты.

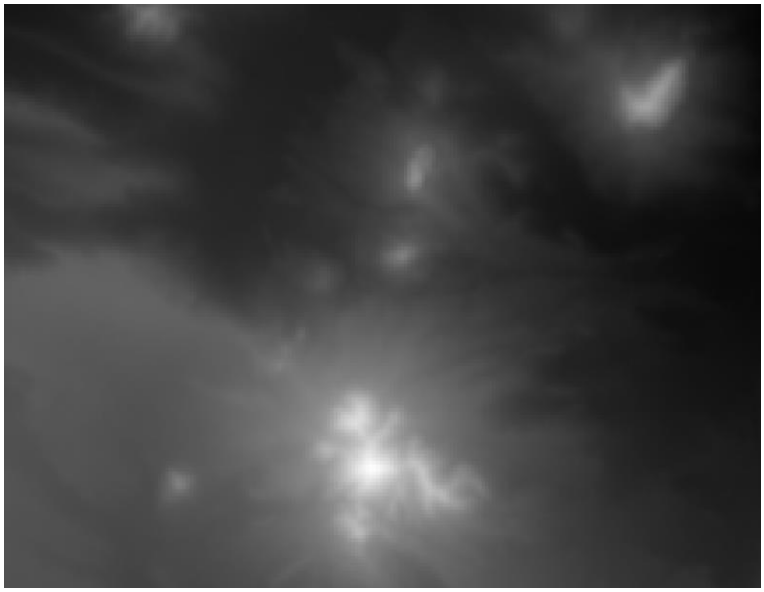


Рисунок 1. Фрагмент ЦМР SRTM GL3 Global 90m окрестностей г. Пятигорск

Параметрами, определяющими толщину, размер и положение отдельных штрихов являются уклон и экспозиция склона, которые могут быть определены путем построения соответствующих производных карт на основе ЦМР штатными средствами QGIS. Так же на основе данных ЦМР используя только штатные инструменты QGIS был получен слой отметок высот, атрибутивная таблица которого содержит данные об экспозиции и уклоне склона в данных точках. Основной же инструмент, позволяющий использовать QGIS для решения поставленной задачи – Генератор геометрий (geometry generator), позволяющий создавать визуальное представление объекта, не совпадающее с исходным ни по типу, ни по местоположению, ни по размерам, с использованием либо языка выражений (expressions) QGIS либо языка Python.

Предлагаемая упрощенная схема автоматической генерации штрихового представления рельефа с использование генератора геометрий QGIS выглядит так:

1. Создание линейных штрихов для каждой отметки высоты.

На данном этапе генерируются линейные объекты на основе имеющихся точечных, с учетом уклона и экспозиции.

Выражение имеет вид:

make_line($geometry, project($geometry, “StrokeM” + “StrokeD”*“Slope” / 90, radians((“angle” - 90)))), где

Slope – значение наклона склона;

Angle – азимут отрезка горизонтали соединяющего данную точку со следующей по порядку;

StrokeM – минимальная длина штриха;

StrokeD – удлинение штриха, т.о. максимальная длина штриха равна “StrokeM” + “StrokeD”.

Параметры Slope и Angle получены из данных ЦМР и берутся из атрибутивной таблицы слоя отметок высот, параметры StrokeM и StrokeD выбираются исходя из масштаба карты и желаемого «сечения» штриховых уровней.

2. Создание «реалистичного» штриха с помощью инструмента interpolated lines редактора стилей QGIS, с подбором параметров инструмента в соответствии с масштабом карты.

3. Тонировка штрихов в зависимости от направления экспозиции склона выражение для инструмента interpolated lines редактора стилей QGISбудет иметь вид:

1 - abs("Aspect" - 180) / 180, где

Aspect это значение экспозиции склона, полученное из данных ЦМР.

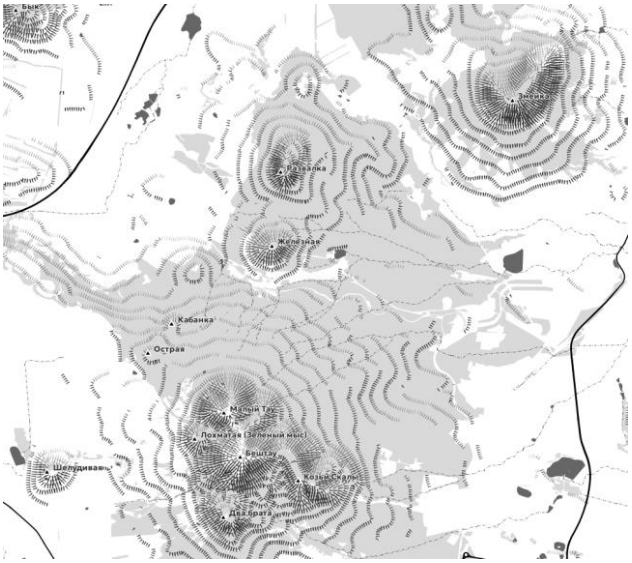


Рисунок 2. Фрагмент карты окрестностей г. Пятигорск с использованием штрихового оформления рельефа

Выводы

Современные ГИС обладают широким спектром возможностей для высокохудожественного оформления карт без использования ручного труда или дополнительного ПО. Эти инструменты и средства позволяют уже сейчас полностью автоматизировать использование различных техник представления пространственных данных и создания условных обозначений ранее недоступные из-за технических сложностей, что, в свою очередь, повысит читаемость и информативность карт различного назначения.

Библиография

1. Лосяков Н. Н. Точность изображения скалистого рельефа на топографических картах. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1973.

2. Самсонов Т. Е. Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. - LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, 2011.

3. Imhof E. Cartographic Relief Presentation. English-language edition. ESRI Press, USA, Redlands, California, 2007.

4. LeonowiczA., Jenny B. Generating Hypsometric Layers from GTOPO30 for Small-Scale Mapping. Mountain Mapping and Visualisation: Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop, 2008.

5. Zentai L. The Transformation of Relief Representation on Topographic Maps in Hungary: From Hachures to Contour Lines. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00087041.2018.1433475#abstract

Сравнительный анализ традиционных и современных методов машинно-обучения в обработке геолого-геофизической информации

Колесова А.П.* (МГРИ, kap_72@list.ru),
Нагайцев М.В. (МГРИ, nagaytsev@mgri.ru)

Аннотация

Научно-исследовательская работа посвящена исследованию методов обработки геолого-геофизической информации с использованием традиционных и современных подходов, включая технологии машинного обучения.

В условиях быстрого развития вычислительных технологий и необходимости повышения точности и эффективности анализа геолого-геофизических данных, выбор оптимальных методов обработки становится особенно актуальным [1].

Работа охватывает как классические методы, применяемые в геолого-геофизических исследованиях, так и новейшие достижения в области искусственного интеллекта, такие как нейронные сети, метод наименьших квадратов и случайный лес. В исследовании рассматриваются преимущества и ограничения различных подходов, проводятся экспериментальные исследования и сравнительный анализ их эффективности.

Ключевые слова

Геолого-геофизическая информация, метод наименьших квадратов (англ. ordinary least squares OLS), случайный лес (англ. Random Forest RF), метрика среднеквадратичной ошибки (англ. mean squared error MSE), машинное обучение

Теория

В настоящем исследовании рассматриваются синтетические геофизические данные, смоделированные для изучения зависимости проницаемости породы от набора определенных параметров, которые включены в набор данных: плотность, пористость, скорость звука и целевая переменная — проницаемость, которые формируют основу для построения регрессионных моделей [2,3]. Проницаемость синтетически генерируется как линейная комбинация указанных параметров с добавлением нормального шума:

Permeability = 50 * Density + 100 * Porosity + 200 * Velocity + ϵ), где ($\epsilon \sim N(0, 5)$)

Созданные данные затем помещаются в структуру данных DataFrame, где признаки (X) составляют столбцы «Density», «Porosity» и «Velocity», а целевая переменная (y) — столбец «Permeability». Это позволяет разделить данные на независимые переменные, которые будут использоваться для предсказания, и зависимую переменную, которая представляет собой результат моделируемого процесса.

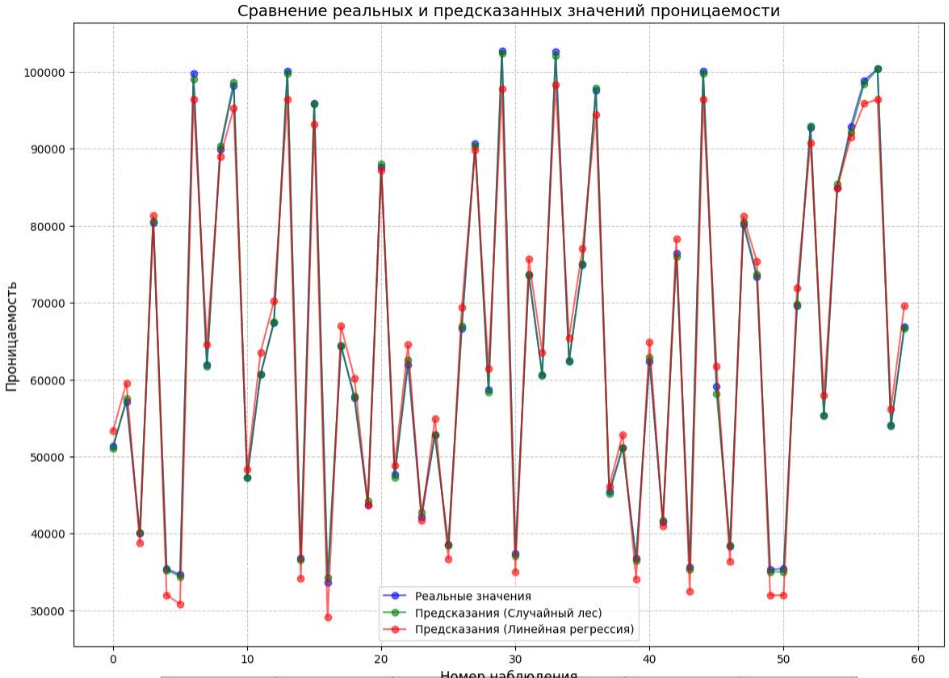
После генерации данных, производится разделение их на обучающую и тестовую выборки. Используется функция «train_test_split» из библиотеки «sklearn.model_selection», которая случайным образом делит все данные на две части: 70% — для обучения модели (обучающая выборка), 30% — для тестирования (тестовая выборка). Это деление важно для того, чтобы проверить способность модели обобщать информацию на новых, ранее не виденных данных. Обучающая выборка используется для построения модели и ее обучения, тогда как тестовая выборка необходима для оценки точности работы модели на данных, которые она не видела во время обучения.

В процессе работы с данными выполняется их стандартизация с помощью «StandardScaler», чтобы привести все признаки к одинаковому масштабу. Это особенно важно для алгоритмов, которые чувствительны к масштабированию, таких как линейная регрессия. Однако для деревьев решений, например, стандартизация может быть не так критична. Несмотря

на это, стандартизация позволяет улучшить результаты, если данные содержат признаки с разными диапазонами значений.

Модели, которые используются для анализа данных, включают случайный лес [4] и метод наименьших квадратов. С помощью этих моделей исследуется зависимость проницаемости от геофизических параметров. Random Forest представляет собой ансамбль деревьев решений, которые делают предсказания путем агрегации результатов каждого дерева. Модель OLS же основывается на предположении линейной зависимости между признаками и целевой переменной.

Оценка качества моделей проводится с использованием нескольких статистических метрик: среднеквадратичной ошибки (MSE), корня среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Эти метрики вычисляются на тестовой выборке и представлены в таблице под графиком (см. Рисунок 10). MSE и RMSE измеряют абсолютное отклонение предсказанных значений от фактических, R^2 отражает долю объясненной дисперсии, а MAPE предоставляет относительную оценку ошибки в процентах.



Название модели	MSE	RMSE	R²	MAPE (%)	Время выполнения (с)
Случайный лес	129134.3487	359.3527	0.9997	0.4972	0.1477
Линейная регрессия	6662299.6109	2581.1431	0.9866	4.067	0.001

Рисунок 10 Сравнение реальных и предсказанных значений проницаемости

Случайный лес значительно превосходит линейную регрессию благодаря своей способности моделировать сложные нелинейные зависимости, присутствующие в данных. Эти результаты обусловлены специально сгенерированной природой данных, где нелинейные функции доминируют. Линейная регрессия, несмотря на высокое значение R^2 (0.9866), не может конкурировать с гибкостью случайного леса в таких условиях, что приводит к её заметно худшим показателям по MSE, RMSE и MAPE.

Ниже представлена сравнительная таблица, которая выделяет ключевые различия между этими двумя методами, что поможет более глубоко понять их преимущества и ограничения при решении задачи предсказания проницаемости на основе геофизических параметров.

Таблица 4. Сравнительный анализ методов обработки геолого-геофизической информации

Характеристика	**Random Forest (Случайный лес)**	**OLS (Метод наименьших квадратов)**
Тип модели	Ансамблевая модель на основе деревьев решений	Линейная регрессионная модель
Алгоритм	Использует множество деревьев решений для предсказания с агрегацией результатов	Строит линейную зависимость, минимизируя сумму квадратов отклонений от реальных значений
Обработка нелинейных зависимостей	Хорошо справляется с нелинейными зависимостями	Предполагает линейную зависимость
Чувствительность к выбросам	Устойчив к выбросам, поскольку использует случайные подмножества данных	Чувствителен к выбросам, так как минимизация квадратов отклонений усиливает их влияние
Масштабирование данных	Не требует предварительного масштабирования данных	Требует масштабирования данных (например, с использованием StandardScaler)
Время обучения	Требует больше времени на обучение из-за многократных деревьев	Быстро обучается, так как строит одну линейную модель
Точность	Может давать более точные результаты при сложных данных и нелинейных зависимостях	Может показывать меньшую точность при нелинейных зависимостях
Интерпретируемость	Менее интерпретируем, так как представляет собой ансамбль деревьев решений	Легко интерпретируем, так как предоставляет линейную зависимость между признаками и целевой переменной
Риск переобучения	Меньший риск переобучения, так как используется ансамбль моделей	Более подвержен переобучению, особенно при большом числе признаков или небольшом количестве данных

Выводы

В данном конкретном случае преимущество случайного леса как метода машинного обучения очевидно и обусловлено его способностью эффективно моделировать сложные нелинейные зависимости в данных. Линейная регрессия, несмотря на высокую объясняющую способность, не смогла конкурировать с гибкостью случайного леса из-за своей ограниченной функциональной формы. Полученные результаты подчёркивают важность выбора метода в зависимости от природы данных и целей исследования. В задачах, подобных данной, где

требуется высокая точность предсказаний при наличии нелинейных закономерностей, методы машинного обучения, такие как случайный лес, являются предпочтительными. Однако в других контекстах, где приоритет отдаётся простоте или интерпретируемости, линейная регрессия может оставаться целесообразным выбором. Таким образом, настоящее исследование не только подтвердило эффективность случайного леса в заданных условиях, но и продемонстрировало значимость адаптации методологии к специфике данных.

Библиография

1. Нагайцев М.В., Бондаренко Д.В., Рощина О.Е., Новикова С.А. Применение нейросетевых и прогностических моделей искусственного интеллекта при проведении геологоразведочных работ. Учебник. Понизовье: National Research, 2024. 7124 с.

2. Сахнюк В.И., Новиков .В., Шарифуллин А.М., Белохин В.., Антонов А.П., Карпушин М.Ю., Большакова М.А., Афонин .А., ауткин .., услова А.А. (2022). Применение методов машинного обучения в обработке данных геофизических исследований скважин отложений викуловской свиты. Георесурсы, 24(2), с. 230–238. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.21.

3. Машинное обучение и искусственный интеллект в геологии, DOI: https://zolotodb.ru/article/12356.

4. Carranza, Emmanuel John M.; Laborte, Alice G. (2016). Data-Driven Predictive Modeling of Mineral Prospectivity Using Random Forests: A Case Study in Catanduanes Island (Philippines). Natural Resources Research, 25(1), 35–50.

Анализ осложнений, возникших при бурении скважин вблизи Чернояровской-1 скважины

Курочкин Н.Д.* (МГРИ, nikitkaa201@mail.ru),
Деева М.В. (ВНИГНИ, deevamv@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе проведен анализ осложнений, возникших при бурении трех скважин, расположенных вблизи Чернояровской-1 скважины. Основная цель исследования – выявить возможную корреляцию между строением, литологией и осложнениями этих скважин для дальнейшего прогнозирования потенциальных проблем при бурении Чернояровской-1 скважины.

Исследование включает в себя анализ и структурирование имеющихся данных по скважинам для удобства дальнейшей работы. Проведен статистический анализ для выявления закономерностей между характеристиками скважин. Результаты работы могут быть использованы для разработки рекомендаций по снижению рисков при бурении Чернояровской-1 скважины, расположенной вблизи исследуемых скважин, или при бурении новых скважин в данном районе.

Ключевые слова

Бурение скважин, осложнения, анализ рисков, литология, статистический анализ, корреляция

Теория

Осложнения при бурении скважин – это непредвиденные трудности или проблемы, возникающие в процессе бурения, которые могут затруднить или остановить выполнение работ, увеличить затраты, снизить безопасность или негативно повлиять на окружающую среду. Эти осложнения могут быть вызваны различными геологическими, техническими или операционными факторами.

Актуальность темы анализа осложнений для дальнейшего прогнозирования проблем, которые могут возникнуть при бурении скважин в исследуемом районе, обоснована рядом причин.

Среди главных причин актуальности темы исследования можно выделить снижение рисков и затрат, поскольку бурение скважин – это довольно дорогостоящий процесс и возникновение любых осложнений, а в особенности тех, которые не ожидались, может привести к значительным финансовым и временным потерям, поскольку при возникновении любого осложнения, необходимо незамедлительно приступать к его устранению, что может затормозить процесс бурения скважины.

Также к причинам актуальности темы анализа возникновения осложнений при бурении можно отнести оптимизацию технологий бурения и повышение эффективности планирования работ. Оптимизация технологии бурения подразумевает под собой понимание осложнений, которые могут возникнуть во время работы, и предварительную подготовку к их устранению, что значительно ускоряет процесс бурения скважин. Повышение эффективности планирования работ подразумевает под собой знание о возможных осложнениях и позволяет более точно планировать бурение новых скважин, что включает в себя выбор оптимальных мест для бурения, определение необходимого оборудования и разработку планов действий на случай возникновения проблем.

Немаловажным является повышение безопасности работников и эффективное управление ресурсами. Под повышением безопасности подразумевается то, что осложнения при бурении могут представлять угрозу для работников и окружающей среды, а прогнозирование и

предотвращение таких осложнений способствует повышению уровня безопасности на месторождениях. Эффективное управление ресурсами, такими как время, материалы и человеческие ресурсы, является критически важным для успешного выполнения проектов по бурению, а прогнозирование осложнений помогает в оптимальном распределении этих ресурсов.

В процессе бурения скважины в неустойчивых горных породах возможно интенсивное кавернообразование, осыпи, обвалы и т. д. В ряде случаев дальнейшее углубление ствола скважины становится невозможным без предварительного крепления ее стенок [1]. Поглощение буровых растворов – тяжелое осложнение процесса строительства скважины, приводящее к значительным затратам времени и материальных ресурсов [2]. Уход бурового раствора в продуктивных пластах происходит под давлением. Давление пласта в новых поисковых скважинах происходит часто из-за превышения гидростатического давления [4]. И это только два самых распространенных примера осложнений, которые могут возникнуть при бурении, поэтому одной из главных задач современных специалистов является готовность к их оперативному устранению.

К наиболее опасным авариям при бурении относятся газо-, нефте- и водопроявления или LWC (англ. loss of well control). Газонефтеводопроявление – это аварийные события при бурении и эксплуатации скважин, которые проявляются в виде самопроизвольных выделений из скважины газа, нефти, воды или их смеси, способных переходить в открытое фонтанирование при нарушении барьеров безопасности [3].

В ходе исследования рассмотрены данные о трех скважинах, расположенных вблизи Чернояровской-1 скважины (0). Анализировались параметры строения, литологические характеристики и осложнения, возникшие при бурении. Для выявления корреляции между данными скважин использовался метод статистического анализа.

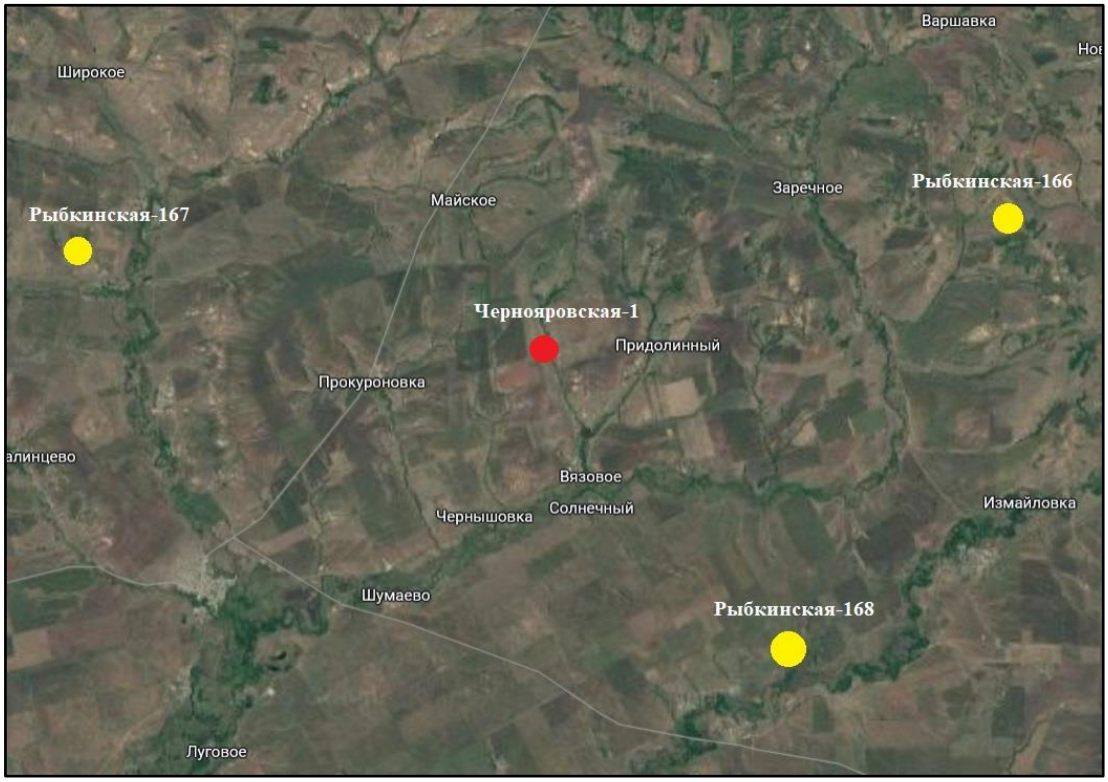


Рисунок 1. Расположение скважин вблизи Чернояровской-1

Данные для анализа были предоставлены ВНИГНИ. Они представлены в виде планшетов с литологией и стратиграфией на нефтеносный горизонт. Для удобства эти данные были структурированы для дальнейшей работы.

Данные об осложнениях и мероприятиях по их устранению по пробуренным скважинам были представлены в виде таблицы в документации. Ниже представлена часть документации, в которой описаны аварии и осложнения на анализируемых скважинах, а также мероприятия по их устранению (0).

Аварии и осложнения на анализируемых скважинах и мероприятия по устранению осложнений

По каждой скважине из отчетов по проделанной работе была взята информация по произошедшим осложнениям. Подробное описание представлено в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Аварии и осложнения по пробуренным скважинам

№ скважины	Интервал по вертикали/Стратиграфия, м.	Осложнения/Аварии	Мероприятие по устранению	Результат
166	2580	Ликвидация прихвата	-	Ликвидировано.
	2997	Поглощение	Закачка ВУС 20 м^3	Ликвидировано.
	3993	Поглощение 10 м^3/ч	Закачка ВУС 20 м^3	Ликвидировано.
167	3935-3939	поглощение 3,5м^3/ч при проработке	Закачка ВУС в объёме 20м^3	Ликвидировано.
	3950-3174	Затяжки при подъеме (подъем с выкручиванием)	Проработка, утяжеление раствора, прокачка ингибирующих пачек	Ликвидировано.
	4047	поглощение при промывке - 20м^3,интенсивность-20м^3/ч	Закачка ВУС, техотстой	Ликвидировано.
168	1175	Поглощение 8-9 м^3/ч	Техотстой, закачка ВУС 25 м^3	Ликвидировано.
	1606	Поглощение	Закачка ВУС 30 м^3	Ликвидировано
	2930-3934	Полное поглощение без выхода циркуляции	Прокачка ВУС, установка мостов	Ликвидировано
	4065	Поглощение 1-6 м^3	Установка ВУС	Ликвидировано

Рисунок 2. Аварии и осложнения на анализируемых скважинах и мероприятия по их устранению

Для анализа данных использовался статистический метод корреляционного анализа. Это позволило выявить зависимости между различными характеристиками скважин. В частности, исследовался вопрос о том, как строение и литология скважин влияют на возникновение осложнений при бурении.

Корреляционный анализ данных скважин проводится для выявления и измерения степени взаимосвязи между различными характеристиками скважин. В контексте бурения и геологических исследований этот метод позволяет понять, как определенные параметры влияют друг на друга, что особенно важно для прогнозирования потенциальных осложнений и разработки стратегий их предотвращения.

Корреляционный анализ производится в несколько этапов, к основным из которых относятся: сбор данных для анализа, подготовка этих данных, выбор метода анализа (в зависимости от представленных данных), проведение анализа, интерпретация результатов, разработка рекомендаций. После проведения корреляционного анализа, могут быть достигнуты такие цели, как: выявление зависимостей, прогнозирование осложнений, оптимизация процесса бурения и поддержка принятия решений.

Одним из ключевых преимуществ корреляционного анализа является его способность выявлять скрытые зависимости между различными параметрами, что позволяет более точно прогнозировать потенциальные проблемы и разрабатывать стратегии их предотвращения. Этот метод позволяет не только определить наличие связи между переменными, но и оценить её силу и направление, что особенно полезно для принятия обоснованных решений.

Кроме того, корреляционный анализ удобен в применении благодаря своей относительной простоте и доступности инструментов для его проведения. Он не требует сложных вычислительных ресурсов и может быть выполнен с использованием стандартных статистических программ, что делает его доступным для широкого круга специалистов. Удобство корреляционного анализа также заключается в его универсальности: он применим к

различным типам данных и может быть интегрирован в более сложные модели для улучшения их точности и надежности.

Выводы

Проведенные исследования показали наличие корреляции между строением, литологией и осложнениями скважин, расположенных вблизи Чернояровской-1 скважины. Можно сделать предположение, что это связано с тем, что исследуемые скважины находятся на небольшом расстоянии друг от друга и расположены примерно в одной области со схожими условиями строения земной коры.

Результаты данного исследования позволяют прогнозировать возможные осложнения при бурении новых скважин в данном районе и разрабатывать рекомендации по снижению рисков. Полученная информация будет использована в работе по оценке и анализу рисков, которые могут возникнуть при бурении Чернояровской-1 скважины.

Благодаря проделанной работе можно будет составить прогноз осложнений, которые могут повлиять на проект по подготовке к бурению Чернояровской-1 скважины.

Благодарности

Выражаю благодарность старшему преподавателю кафедры информационных систем и технологий Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе, Деевой Марии Владимировне.

Библиография

1. Минеев А. В., Милосердов Е. Е., Мамышев А. С. “Аварии и осложнения при бурении нефтяных и газовых скважин”. «Наука и современность», 2013г. 5с.
2. Деряев А. Р. “Рекомендации по предупреждению осложнений и аварий при бурении наклонно-направленных скважин”. «Символ науки», 2022г. 4с.
3. Дмитревский А. Н., Еремин Н. А., Черников А. Д., Зинатуллина Л. И. “Использование методов искусственного интеллекта для предотвращения осложнений при строительстве скважин“. «Известия Тульского государственного университета. Науки о земле», 2021г. 14с.
4. Мирсаатова Ш. Х., Архипов А. А. Эшмуродов О. Р. “Предупреждение геологических осложнений по уходу буровых растворов в пласт при бурении скважин”. «Экономика и социум», 2024г. 6с.

Оценка учета влияния магнитного склонения и наклонения при районировании на основе технологий грави- и магниторазведочных данных

Лякишев М.К. (МГРИ, lyakishevmikhail@yandex.ru),*
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

В работе представлен подход к районированию геологических структур на основе данных грави- и магниторазведки с использованием методов машинного обучения и геоинформационных систем. Применяются алгоритмы кластеризации K-means и K-medoids для классификации без учителя, реализованные через библиотеку scikit-learn. Для решения прямой и обратной задачи магниторазведки используется библиотека SimPEG с распараллеливанием вычислений, а результаты визуализируются в ГИС QGIS с помощью разработанного плагина на Python. Подход повышает точность интерпретации геофизических данных и автоматизирует процесс зонирования.

Ключевые слова

Решение прямой и обратной задачи магниторазведки, библиотека SimPEG, K-means, K-medoids, scikit-learn, ГИС QGIS

Теория

Районирование — это процесс разделения территории на однородные области (зоны) на основе определённых признаков или параметров, таких как геологические, геофизические или геохимические характеристики. Этот метод широко применяется в геологии и геофизике для выделения участков с различными типами пород, структурными особенностями или аномалиями, что помогает изучать строение земной коры и выявлять перспективные зоны для исследований или добычи полезных ископаемых.

Гравиразведка — это геофизический метод исследования, который основан на измерении изменений гравитационного поля Земли, вызванных различиями в плотности горных пород. Метод используется для изучения строения земной коры, выявления геологических структур (например, разломов или складок) и поиска залежей полезных ископаемых, таких как нефть, газ или рудные тела.

Магниторазведка — это геофизический метод, изучающий магнитное поле Земли для обнаружения магнитных аномалий, связанных с геологическими объектами. Эти аномалии возникают из-за различий в магнитных свойствах пород и могут указывать на наличие рудных месторождений, тектонических структур или других особенностей. Метод применяется в геологоразведке и исследованиях строения земной коры.

Машинное обучение — это раздел информатики, который занимается разработкой алгоритмов и методов, позволяющих компьютерам автоматически анализировать данные, выявлять закономерности и строить модели для предсказаний или принятия решений без явного программирования. В геофизике машинное обучение используется для обработки больших объёмов данных, классификации геологических объектов и автоматизации интерпретации.

Кластеризация — это метод машинного обучения, который группирует данные в кластеры (группы) на основе их схожести или близости по заданным признакам. В геологии и геофизике кластеризация применяется для выделения зон с однородными геофизическими параметрами, что полезно при районировании территории и поиске скрытых закономерностей в данных.

Геоинформационные системы (ГИС) — это компьютерные системы, предназначенные для сбора, хранения, анализа и визуализации пространственных данных. В геофизике ГИС используются для создания карт, анализа геологических и геофизических данных, а также

интеграции информации из различных источников для поддержки принятия решений в геологоразведке и управлении природными ресурсами.

Теория

В данном исследовании рассматривается автоматизация районирования геологических структур по данным грави- и магниторазведки с применением современных методов анализа данных и ГИС-технологий.

1. Районирование по результатам грави- и магниторазведки

1.1. Задача классификации без учителя

Классификация без учителя используется для выявления скрытых закономерностей в геофизических данных без предварительной разметки, что особенно полезно при анализе сложных геологических структур.

1.2. Методы кластеризации в задаче классификации

Применяются алгоритмы кластеризации K-means и K-medoids, позволяющие группировать данные по схожим характеристикам. Оптимальное число кластеров определяется с использованием критериев, таких как метод силуэта или локтя.

1.3. Библиотека scikit-learn

Реализация методов кластеризации осуществляется с помощью библиотеки scikit-learn на языке Python, предоставляющей удобные инструменты для обработки данных и анализа результатов.

2. Методы решения прямой и обратной задачи магниторазведки

2.1. Библиотека SimPEG

Для моделирования и инверсии геофизических данных используется библиотека SimPEG, специально разработанная для задач магнито- и гравиразведки.

2.1.1. Подготовка данных

Перед расчетами данные подвергаются предварительной обработке: удаление шума, нормализация и приведение к единой сетке для повышения качества моделирования.

2.1.2. Распараллеливание расчетов с помощью библиотеки pymatsolver

Для ускорения вычислений применяется библиотека pymatsolver, которая оптимизирует решение систем линейных уравнений путем распараллеливания на многоядерных процессорах.

3. Вывод результатов решения обратной и прямой задачи

3.1. Вывод результатов решения обратной задачи в виде файлов VTK и NRRD

Результаты инверсии сохраняются в форматах VTK для визуализации в ParaView и NRRD для анализа в 3D Slicer, что обеспечивает детальное изучение трехмерных геофизических моделей.

3.2. Вывод результатов решения прямой задачи в виде растрового файла ГИС (GeoTIFF)

Результаты прямого моделирования экспортируются в формат GeoTIFF, совместимый с ГИС-системами, что упрощает дальнейшую обработку и интерпретацию.

4. ГИС QGIS

4.1. Чтение растровых файлов

Растровые файлы GeoTIFF загружаются в QGIS для пространственного анализа и отображения геофизических параметров.

4.2. Создание растровых слоев

На основе данных формируются растровые слои, визуализирующие результаты районирования и кластеризации.

4.3. Разработка плагина QGIS на языке Python для районирования

Создан плагин на Python, который автоматизирует процесс зонирования по результатам кластеризации, интегрируя данные из SimPEG и scikit-learn в QGIS.

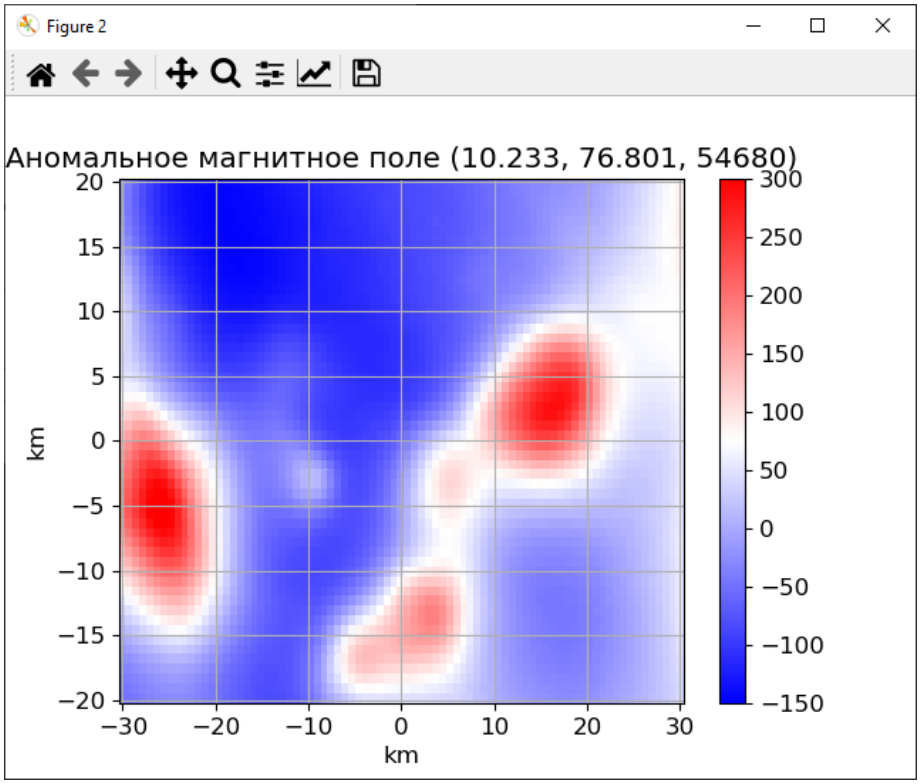


Рисунок 1. Аномальное магнитное поле в городе Парабель. Томская область

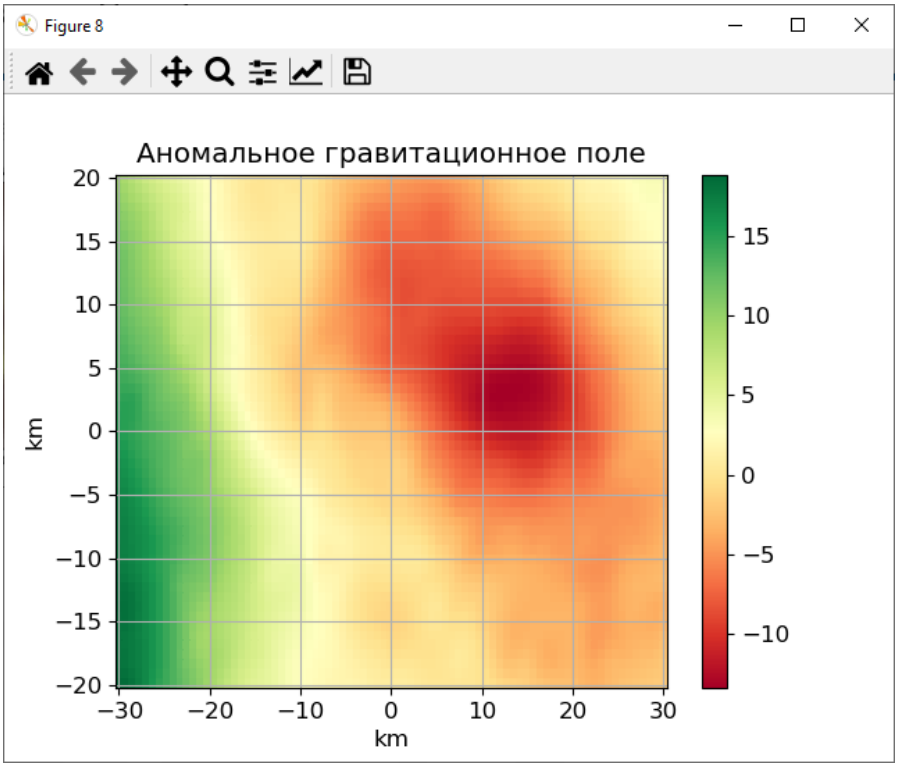


Рисунок 2. Аномальное гравитационное поле в городе Парабель. Томская область

Выводы

Разработанный подход объединяет методы машинного обучения и ГИС для эффективного районирования по данным грави- и магниторазведки. Использование библиотек SimPEG, scikit-learn и плагина для QGIS позволяет автоматизировать процесс анализа, повышая его точность и доступность для геологов.

Библиография

1. Лоури У., Фихтнер А. Основы геофизики. — 3-е издание. — Cambridge University Press, 2020.
2. Карранза Э. Дж. М. Геокомпьютация целей минерального поиска. — Elsevier, 2016.
3. Ли Ю., Олденбург Д. У. Машинное обучение для инверсии геофизических данных // Геофизика. — 2019. — Т. 84, № 3. — С. R1–R12.
4. Бонэм-Картер Г. Ф., Агтерберг Ф. П. Интеграция ГИС и геофизических данных для поиска полезных ископаемых // Журнал прикладной геофизики. — 2015. — Т. 112. — С. 1–12.

Прикладное применение горно-геологических информационных систем при обработке данных опробования геологоразведочных работ

Стадник Д.А. (МГРИ, stadnikda@mgri.ru),
Кирков А.Е. (МГРИ, kirkovae@mgri.ru),
Нагайцев Н.А.* (МГРИ, nikitanag111@gmail.com),
Гаврилов Р.И. (МГРИ, supermouse27228@gmail.com)

Аннотация

Цель исследования: рассмотреть методические основы автоматизированной обработки геологоразведочной информации и исследовать ее ключевую роль в проектировании и планировании деятельности горнодобывающих предприятий.

В данной статье представлены основные принципы, технологии и процессы, лежащие в основе обработки данных опробования геологоразведочных работ в горно-геологических информационных системах, дано общее представление о том, как эти методы повышают точность, эффективность и масштабируемость оценки запасов на примере моделирования месторождения-прототипа «Темир».

Ключевые слова

Горно-геологические информационные системы, обработка геологоразведочной информации, инновационные технологии, горное дело, цифровизация горного производства

Теория

Автоматизированная обработка геологоразведочных данных невозможна без использования специализированного программного обеспечения – горно-геологических информационных систем (ГГИС). Современные ГГИС позволяют не только обрабатывать большие объемы данных, но и строить точные цифровые модели месторождений, выполнять сложные расчеты и визуализировать результаты.

ГГИС активно используются на всех этапах проектирования и эксплуатации горных предприятий. Например, на этапе геологоразведки программы позволяют быстро обрабатывать данные бурения и строить предварительные модели месторождений, на этапе проектирования горных работ программное обеспечение используется для расчета запасов и оптимизации процессов добычи, на этапе эксплуатации месторождения программы помогают отслеживать изменения в запасах и корректировать планы добычи.

Практика

Рассмотрим основные этапы автоматизированной обработки и представления геологоразведочной информации в ГГИС на примере месторождения железистых кварцитов.

Согласно предоставленным авторам исходным данным, месторождение-прототип железистых кварцитов «Темир» расположено в западной части России. Оно приурочено к району Курской магнитной аномалии (КМА). Данное месторождение является важным источником железорудного сырья для металлургической промышленности России.

Рудовмещающими породами являются метаморфические образования курской серии нижнего протерозоя, представленные гнейсами, сланцами и амфиболитами. Железистые кварциты залегают в ядре синклинальной складки, имеющей субмеридиональное простирание с крутопадающими крыльями. Главными рудными минералами являются магнетит и гематит, второстепенными - мартит и железистые силикаты.

Исходя из данных опробования, для лучшего визуального анализа геологической информации авторами была построена гистограмма распределения полезного компонента $Fe_{магн}$,

необходимая для моделирования рудного тела. На рис.1 представлен в разрезе общий вид скважин с метками по опробованию после импорта геологической базы данных в ГГИС «ГЕОМИКС», на рис.2 - гистограмма распределения полезного компонента $Fe_{магн}$.

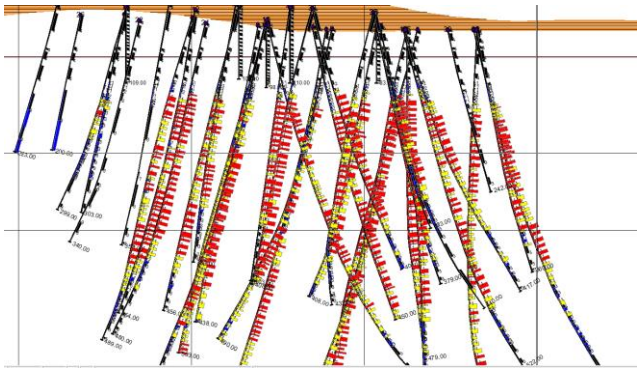


Рисунок 1. Общий вид скважин с метками по опробованию в разрезе

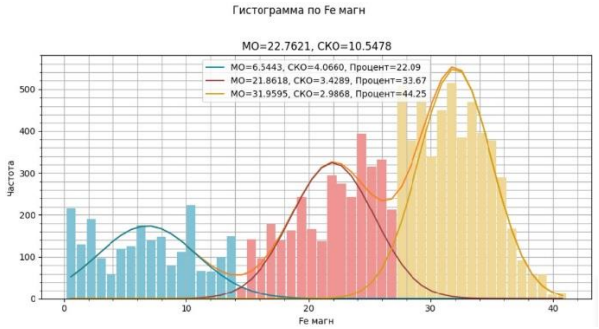
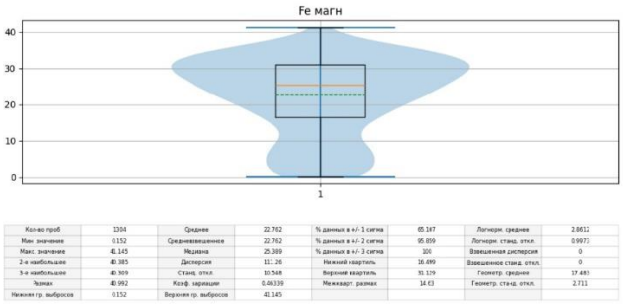


Рисунок 2. Гистограмма распределения полезного компонента $Fe_{магн}$

Из гистограммы отчетливо видно многомодальное распределение с явным выделением трех компонентов, каждый из которых имеет примерно нормальное (гауссовское) распределение.

Для подтверждения анализа геологоразведочной информации был построен график «Ящик с усами», представленный на рис. 3, который подтверждает существование трех групп в анализируемых данных, так как диапазоны значений хорошо разделяются и соответствуют пикам на гистограмме.



Кол-во проб	1304	Среднее	22.762	% данных в +/- 1 сигма	65.147	Логнорм. среднее	2.8611
Мин. значение	0.152	Средневзвешенное	22.762	% данных в +/- 2 сигма	95.859	Логнорм. станд. откл.	0.9971
Макс. значение	41.145	Медиана	25.389	% данных в +/- 3 сигма	100	Взвешенная дисперсия	0
2-е наибольшее	40.385	Дисперсия	111.26	Нижний квартиль	16.499	Взвешенное станд. откл.	0
3-е наибольшее	40.309	Станд. откл.	10.548	Верхний квартиль	31.179	Геометр. среднее	17.481
Размах	40.992	Коэф. вариации	0.46339	Межквартр. размах	14.63	Геометр. станд. откл.	2.711
Нижняя гр. выбросов	0.152	Верхняя гр. выбросов	41.145				

Рисунок 3. График «Ящик с усами» и таблица статистических характеристик

На рис.4 представлена корреляция между содержанием $Fe_{магн}$ и $Fe_{общ}$ Вычисленный коэффициент Пирсона равен 0.5675, уравнение линии тренда представлено в виде

y=25.33+0.3554·x. Значение коэффициента Пирсона (0.57) указывает на умеренную положительную корреляцию между $Fe_{магн}$ и $Fe_{общ}$, а положительный наклон линии тренда свидетельствует, что с увеличением содержания $Fe_{магн}$ возрастает общее содержание железа.

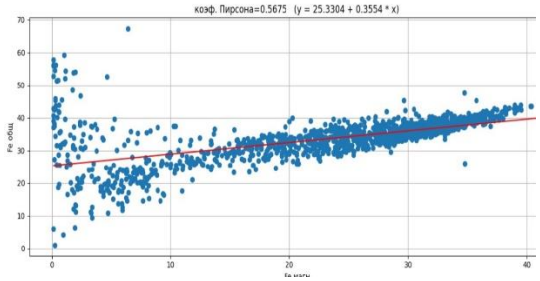


Рисунок 4. График зависимости $Fe_{магн}$ и $Fe_{общ}$

На рис.5 представлен график нормального распределения $Fe_{магн}$. График показывает нормальное распределение для содержания $Fe_{магн}$ с МО = 23.52 и СКО = 10.27. Распределение $Fe_{магн}$ в пробах не подчиняется строгому нормальному закону, что является типичным для природных данных. Полимодальность подтверждает выделение трех групп.

На рис.6 представлен график квантилей. Кумулятивная гистограмма демонстрирует накопленную частоту содержания $Fe_{магн}$. Переходы между группами руд отображены изменением наклона кривой.

Кумулятивная гистограмма подтверждает деление на три группы, так как изменения наклона кривой соответствуют переходам между группами руд.

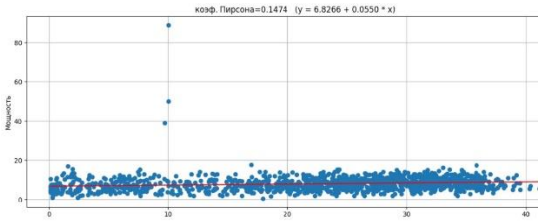


Рисунок 5. График нормального распределения $Fe_{магн}$

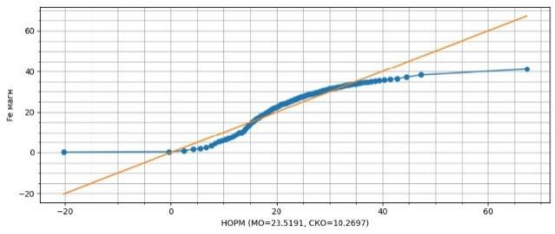


Рисунок 6. График квантилей

Выводы

Поскольку спрос на полезные ископаемые продолжает расти, а экологические нормы становятся все более жесткими, внедрение ГГИС будет иметь решающее значение для поддержания конкурентоспособности и обеспечения ответственного управления ресурсами. Однако реализация этого потенциала требует постоянных инвестиций в технологии, обучение персонала и инфраструктуру, а также приверженности решению этических и экологических

проблем. Будущее горнодобывающей промышленности заключается в плавной интеграции автоматизации, роботизации с интеллектуальными системами управления и устойчивыми практиками, что позволяет создать отрасль, которая будет не только экономически жизнеспособной, но и экологически и социально ответственной.

Благодарности

Авторы выражают благодарность компании ГЕОМИКС за предоставленные в цифровой форме исходные данные по месторождению-прототипу «Темир» для обеспечения возможности проведения исследования.

Библиография

1. Стадник, Д.А., Стадник Н.М., Григорян К.Л., Кожиев З.В. Актуализация технологических показателей технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых с помощью компьютерных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 5–1. – С. 170–184. DOI: 10.25018/0236_1493_ 2023_51_0_170.
2. Стадник Н.М. Основные методические принципы формирования интегрированной геоинформационной базы прогнозирования и оценки запасов угольных месторождений // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Горная промышленность». – 2016. – № 3(127). – С. 73–76.
3. Голик, В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Стадник Д.А. Резерв повышения эффективности разработки маломощных рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – № 9. – Т. 331. – С. 63–69. DOI 10.18799/24131830/2020/9/2805.
4. Клюев Р. В., Мартюшев Н. В., Кукарцев В. В., Кукарцев В. А., Бригида В. С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.
5. Захаров В. Н., Каплунов Д. Р., Клебанов Д. А., Радченко Д. Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами // Горный журнал. — 2022. — № 12. — С. 55—61. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.10.
6. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности. Горная промышленность. 2022;(3):89–92. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-89-92

Ключевые моменты методики преподавания современных ГГИС (на примере ПО ГГИС Micromine)

Скруйбите Р.А. (МГРИ-МГРИ, forrasa@yandex.ru)*

Аннотация

Компьютерное моделирование месторождений и геостатистические методы подсчета запасов полезных ископаемых, которые обеспечивают современные горно-геологические информационные системы (ГГИС), являются привычными инструментами в работе предприятий горнорудного сектора во всем мире.

В 2015 году Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) были разработаны и утверждены Министерством природных ресурсов и экологии РФ рекомендации по подсчету запасов с использованием блочного моделирования, что несло в себе адаптацию геостатистических методик к отечественным реалиям, как методическим, так и нормативно-правовым [4].

До 2015 года ГГИС и компьютерные методы подсчета запасов в России применялись в основном на рудниках и в горнорудном производстве. С появлением данного документа у ГКЗ появилась возможность принимать на экспертизу отчеты с технико-экономическим обоснованием кондиций и подсчетом запасов выполненными с помощью блочного моделирования. Таким образом, возникла необходимость в большем количестве специалистов в данной области.

Буквально 5-10 лет назад знания по подсчету запасов с использованием ГГИС были труднодоступны, иностранная литература по данной тематике на русский язык не переводилась, одно из исключений - книга Джеки Кумбс, которая стала настольной книгой специалистов в данной области [3]. Ю.Е. Капутин был одним из немногих российских авторов, кто в своих книгах открывал завесу геостатистического подсчета на примере ПО Datamine [1]. Все необходимые знания можно было получить только на специальных курсах от разработчиков ПО, разделявшихся на начальный и продвинутый уровни и проводившихся один-два раза в год для ограниченного числа пользователей.

В последние годы подобные знания становятся более открытыми и доступными. Так, компании, производящие ГГИС разрабатывают свои мануалы, которые находятся в открытом доступе и включают в себя полный курс обучения программному продукту. На цифровых площадках появилось много обучающих видео.

Основными программными продуктами для оценки ресурсов являются Datamine (Великобритания), Surpac (Geovia) (Франция), Micromine (Австралия). Из российских разработок – MineFrame, Digimine, ГЕОМИКС и др.

В настоящее время обучение ГГИС включено в учебную программу университетов в рамках различных дисциплин. Ниже описывается авторская методика преподавания возможностей современных ГГИС на примере ПО Micromine.

Ключевые слова

Геология, геоинформатика, Micromine, подсчет запасов, методика обучения, геостатистика, блочное моделирование

Теория

Возможны различные варианты вариантов преподавания современных ГГИС:

1. По стандарту обучения с разделением на начальный уровень и продвинутый согласно подробным мануалам по применению различных ГГИС. Такая методика хороша либо для долгого процесса обучения, когда достигается наиболее качественное понимание не только

самого программного продукта, но и методики подсчета запасов, либо, если курс недолгий, для получения подробных знаний начального уровня (до геостатистики), что также дает студентам понимание об основах ГГИС и позволит впоследствии совершенствовать имеющиеся знания в процессе получения опыта на производстве.

2. Авторская методика, без разделения на начальный и продвинутый уровни. Такой курс может быть рассчитан на короткий срок обучения (ориентировочно семестр) Согласно данной методике студенты получают возможность в рамках одного семестра получить как теоретические, так и практические знания по всем этапам, начиная от создания базы данных, заканчивая конечной стадией – подсчетом запасов, когда в процессе обучения предоставляется так называемая «выжимка» из всех процессов работы, производится обучение ключевым операциям от начала и до конца, которые сформируют так называемый каркас знаний и понимания сути блочного моделирования и оценки ресурсов в любом ПО.

Авторская методика успешно апробирована на нескольких группах. Для обучения используется ПО Micromine. Последние версии программы практические не имеют багов, софт русифицирован, интуитивно-понятный интерфейс и качественные подробные мануалы делают ПО Micromine практически идеальной ГГИС не только для оценки запасов на производстве, но и для процесса обучения.

Курс начинается с изучения интерфейса программного продукта. Проводится краткий обзор по возможностям программы. Помимо этого, студентам даются необходимые знания по стадийности геологоразведочных работ для понимания на каких этапах работ и для каких целей может применяться ПО.

Важно отметить, что в процессе обучении ГГИС рассматриваются не как самостоятельный математический инструмент, а в качестве вспомогательного инструмента для решения задач горнорудного производства именно с точки зрения геологии, когда геология первична, а математика, статистика - вторичны.

Приводятся реальные примеры месторождений, задачи и процессы связываются с другими дисциплинами. Так, при моделировании месторождений в ГГИС необходимо учитывать множество факторов, начиная от генезиса и формирования рудопроявлений и месторождений, методики поисков и разведки с учетом геологических, инженерно-геологических, гидрогеологических, горнотехнических, технологических и экономических условий и заканчивая добычей и сопоставлением данных разведки и эксплуатации в процессе отработки месторождения.

Кроме того, производится ознакомление студентов с процессами и нормативно-методическими документами, которые регламентируют процедуру подсчета и утверждения запасов в Российской федерации (ГКЗ) и за рубежом (на примере кодекса JORC) и описываются фундаментальные различия между методиками подсчета.

В процессе обучения на теоретическом занятии описывается методика для каждого этапа, даются подробные пояснения какие данные необходимы и как их получают на практике. На лабораторном занятии студенты сами под руководством преподавателя поочередно выполняют этапы в ГГИС.

План обучения состоит из следующих этапов:

1. Создание базы данных скважин и горных выработок. При создании базы данных поясняется, что такое устья скважин (борозды), инклинометрия, опробование, для чего нужны и как получают эти параметры, без которых невозможно создать корректную базу данных. Описываются методика создания первичной документации в процессе буровых работ (паспортов скважин, журналов опробования), методика и необходимость проведения инклинометрии, рассматриваются способы опробования, виды аналитических работ, по результатам которых определяются содержания полезных компонентов по каждой пробе и пр.

2. Статистический анализ данных опробования. В процессе статистических исследований производится объяснение по каждому показателю (максимальная и минимальная величины, среднее содержание, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации, медиана, Оценка Сишеля, степень свободы и пр.) и какие предварительные выводы о месторождении (рудопроявлении) мы можем сделать из этих данных. Строятся гистограммы, графики накопленной частоты, графики вероятности.

3. Создание кондиционных интервалов. При создании кондиционных интервалов оконтуривание может производиться по российской методике и по зарубежной. Студенты создают рудные интервалы по методике ГКЗ и по методике JORC и сравнивают между собой полученные данные.

4. Каркасное моделирование. При каркасном моделировании объясняется последовательность создания каркасов, их проверка и возможности исправления ошибок построения. Как правило, для обучения дается один блок либо небольшой объем данных, чтобы оконтуривание и создание каркасных моделей не занимало много времени, но был понятен принцип построения.

5. Статистический анализ данных опробования в пределах каркасов рудных тел позволяет получить характеристики аналогичные указанным в п. 2 в том массиве данных, с которым мы будем работать.

6. Ограничение выдающихся («ураганных») содержаний. Производится объяснение, откуда они берутся и как их наличие может повлиять на оценку запасов. Кратко описываются методики ограничения: Когана, Каллистова, персентиль-функция и др.

7. Создание композитных интервалов равной длины. Данная процедура применяется для приведения композитов к одной длине для корректной интерполяции содержаний полезного компонента в блочную модель.

8. Геостатистический анализ. Производится построение вариограмм, определяется направлений минимальной изменчивости оруденения для построения поискового эллипсоида, который используется для последующей интерполяции.

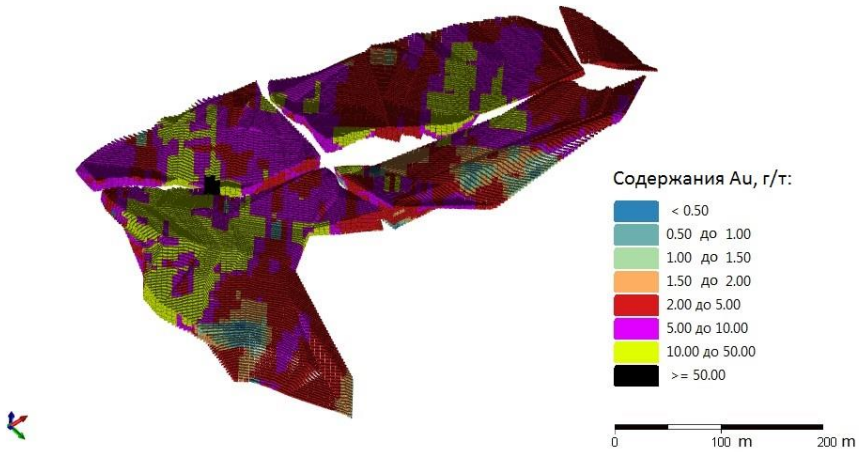


Рисунок 1. Пример блочной модели месторождения после интерполяции содержаний

9. Блочное моделирование. Студенты учатся строить пустые блочные модели в пределах каркасов рудных тел, определять экстенты блочной модели, величину блока и параметры субблокировки.

10. Интерполяция содержаний в блочную модель (рис. 1). Рассматриваются методы интерполяции, такие как метод обратных расстояний, кригинг, полииндикаторный кригинг. Различия методов интерполяции для подсчета запасов по методике ГКЗ и по методике JORC.
11. Проверка блочной модели. Рассматриваются основные способы проверки блочной модели: визуальная, график квантилей, Swath Plot и др.
12. Отчет по запасам. Создание отчета по блочной модели дает цифры запасов руды, запасы и содержания полезных компонентов в заданном объеме данных и является окончанием работ.

Выводы

Описаны ключевые моменты преподавания современных ГГИС и последовательность обучения. Подобная методика позволяет студентам за ограниченное количество времени не только от начала и до конца провести процесс подсчета запасов, но и в рамках дисциплины получить новые знания либо закрепить предыдущие (в зависимости от специальности обучаемых студентов) по остальными геологическим дисциплинам.

Библиография

1. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 424 с.
2. Капутин Ю. Е. Повышение эффективности управления минеральными ресурсами горной компании (геологические аспекты). СПб.: Недра, 2013. 246 с.
3. Коган И. Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. М.: Недра, 1974. 304 с.
4. Кумбс Д. Искусство и наука оценки запасов. пер. с англ. Перт, 2010. 231 с.
5. Рекомендации к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическому обоснованию кондиций и подсчету запасов твердых полезных ископаемых с использованием блочного моделирования на месторождениях различного морфологического типа. М.: ГКЗ МПР РФ, 2015. 86 с.
6. Сборник международных горных кодексов. Перевод IMC Montan. М.: Горная книга, 2017. 260 с.
7. Скруйбите Р.А., Акифьева А.Д., Гиль В.А. Опыт государственной экспертизы подсчета запасов твердых полезных ископаемых и ТЭО кондиций, выполненных с использованием геостатистических методов // Разведка и охрана недр. 2016. №8. С. 56-58.
8. Скруйбите Р.А., Фахрутдинов Ш.И. Геологическая основа поиска анизотропных направлений при геостатистическом моделировании на примере рудного тела Верхнее Многовершинного золоторудного месторождения // Геология и разведка. 2022 №5. С. 73-85.
9. Abzalov M. Applied Mining Geology. Springer, 2016. 447 p.
10. Rossi M., Deutsch C. Mineral Resource Estimation. Springer, 2014. 346 p.

Мультимодальные нейросетевые системы для автоматического обнаружения и описания объектов недропользования на данных дистанционного зондирования

Ненашев Д.А.* (МГРИ, ddanilazamotov@gmail.com),
Нагайцев М.В. (МГРИ, nagaytsev@mgri.ru)

Аннотация

Автоматизация анализа спутниковых снимков открывает новые возможности для геологоразведки и мониторинга недропользования. В данном докладе рассматривается подход на основе современных методов машинного обучения и глубокого обучения для классификации спутниковых изображений и автоматической генерации их описаний (Image-to-Text). Предлагается конвейер, в котором сверточные нейронные сети (CNN) используются для распознавания объектов, связанных с добычей полезных ископаемых (например, карьеры, отвалы, хвостохранилища), а механизмы внимания и рекуррентные сети – для формирования текстового описания сцены. В теоретической части описаны традиционные методы обработки спутниковых данных и современные алгоритмы (CNN, трансформеры) для классификации и image captioning (автоматическая генерация описаний изображений) [1]. В экспериментах продемонстрировано, что глубокие нейросети способны точно идентифицировать признаки добычи (достигается точность порядка 95%) и генерировать осмысленные описания изображений. Полученные результаты показывают эффективность предлагаемого подхода для задач недропользования – от поиска месторождений до мониторинга состояния горных работ – и могут способствовать более оперативному и объективному принятию решений в геологоразведке.

Ключевые слова

Дистанционное зондирование; глубокое обучение; классификация изображений; описание изображений; недропользование

Теория

Классификация спутниковых снимков. Было принято решение заменить традиционные методы (спектральные индексы, визуальный анализ) на глубокое обучение, поскольку они показывали недостаточную точность для нужд недропользования.

Применение **Vision Transformer (ViT)** в классификации спутниковых снимков позволило достичь точности **до 97%**, превосходя **CNN** на **2–3%** [2]. Эффективными оказались гибридные модели, такие как **Swin Transformer**, совмещающие локальную обработку CNN с глобальным вниманием трансформеров. **Механизм внимания** позволяет учитывать пространственные зависимости в изображении и выделять ключевые области, что улучшает интерпретацию модели и повышает точность обнаружения объектов недропользования. Это критически важно для мониторинга месторождений и геологоразведки.

Сверточные нейросети (CNN) в анализе спутниковых снимков. CNN автоматически выделяют информативные признаки на разных масштабах, что делает их эффективными для распознавания объектов недропользования (карьеры, отвалы, разрезы). Современные архитектуры **VGG, ResNet, EfficientNet** успешно применяются для классификации пород, ландшафтов и мест добычи полезных ископаемых.

Генерация описаний спутниковых снимков (Image-to-Text). Автоматическое описание изображений сочетает компьютерное зрение и обработку естественного языка. Современные **кодировщик-декодировщик** модели используют **CNN** для выделения визуальных признаков и **LSTM** для генерации текста. **Механизм внимания** помогает фокусироваться на ключевых областях изображения, повышая качество описаний. Исследования развивают многоуровневые

схемы внимания, учитывающие как связь "слово – область", так и семантические взаимосвязи в тексте.

Экспериментальные результаты

Для оценки эффективности модели проведены эксперименты на данных **Sentinel-2**, содержащих размеченные регионы с карьерами, шахтами и контрольными областями. В качестве базовой архитектуры использована **ResNet50**, дообученной на наших данных [2]. Для сравнения тестировался **SVM** на ручных признаках (спектральные индексы, текстурные характеристики), однако CNN показала значительно более высокую точность – **~95%** на тестовой выборке.

Анализ точности показал **быструю сходимость**: уже к **5-й эпохе** точность **>90%**, а к **20-й** стабилизировалась на **97–98%** (обучение) и **~95%** (валидация). **Матрица ошибок** подтверждает **~97%** верных определений объектов добычи при минимальном количестве ложных срабатываний. Дополнительно протестирована **автоматическая локализация** объектов недропользования на крупных территориях [3].

Модель анализировала сцены, разбитые на тайлы, выявляя признаки добычи. Результаты классификации наносились на карту для последующей проверки, что позволяет эффективно анализировать большие площади (Рис 1.).



Рисунок 1. Пример обнаружения объектов добычи на спутниковом снимке: желтыми маркерами показаны центры областей, где модель выявила характерные признаки карьеров или хвостохранилищ [4]

Алгоритм дополнительно формирует **текстовые метки** (например, **"lowImpact"**) для предварительной оценки экологического воздействия каждого обнаруженного объекта. Он успешно определяет **карьеры, отвалы, хвостохранилища** и другие элементы горнопромышленной инфраструктуры. Группировка меток вблизи одного месторождения указывает на **крупные разработки**, охватывающие несколько соседних тайлов, что помогает оценивать масштабы добычи и степень вмешательства в окружающую среду.

Во второй части экспериментов тестировалась **генерация текстовых описаний** спутниковых снимков. Архитектура модели включает **ResNet-152** для выделения визуальных признаков и **двунаправленный LSTM** с **механизмом мягкого внимания** для поэтапного формирования текста. Модель корректно идентифицирует объекты и генерирует осмысленные описания, например: *«на изображении виден красный самолет на аэродроме»*. Анализ внимания показал, что модель фокусируется на ключевых областях сцены при выборе каждого слова, что

улучшает интерпретацию результатов. На рис. 2 показана визуализация работы механизма внимания для каждого слова при генерации данного описания.

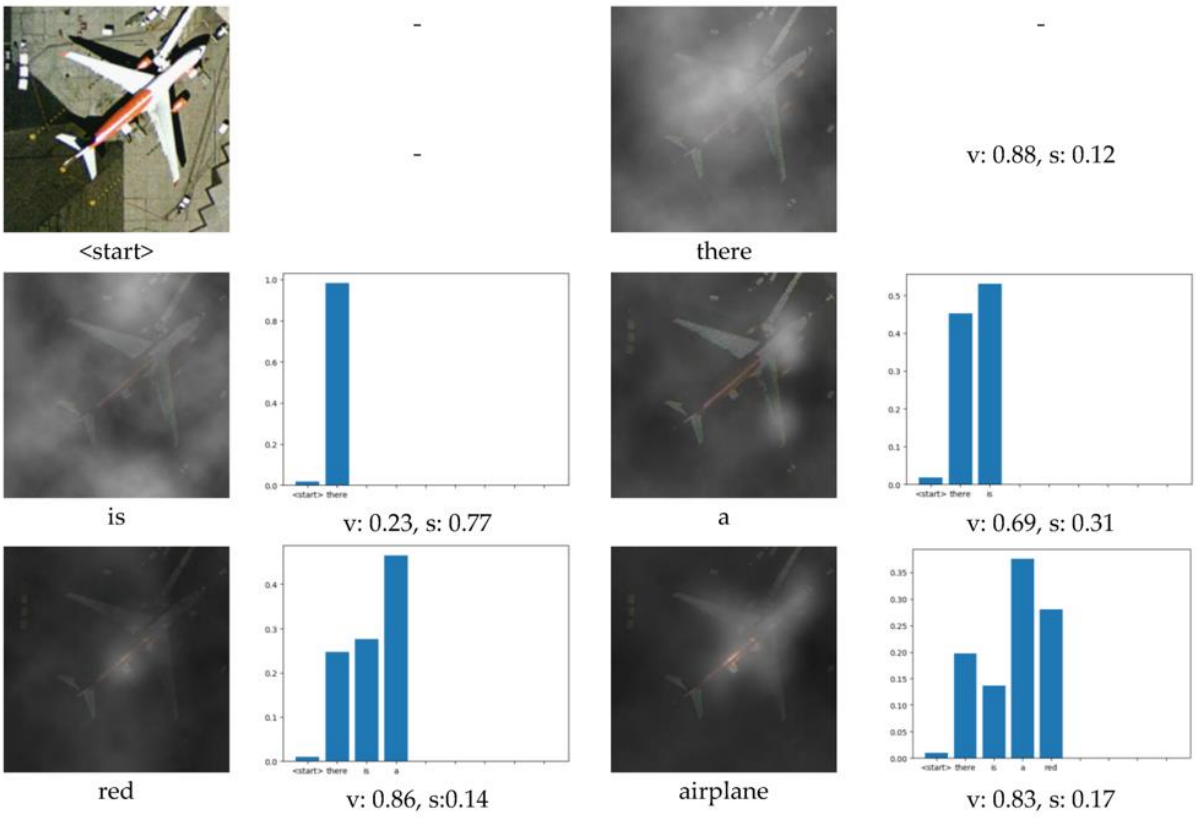


Рисунок 2. Пример работы механизма внимания при описании спутникового снимка: при генерации каждого слова предложения модель фокусируется на соответствующей области изображения (более яркие области указывают на больший «вес» внимания) [5]

Оценка качества и экономический эффект. Для количественной оценки описаний вычислены метрики **BLEU-4 (~0.45)** и **ROUGE-L (~0.60)**, что соответствует современным результатам для английских датасетов спутниковых изображений.

Экономический эффект внедрения ИИ-систем в недропользовании

Внедрение автоматизированных систем анализа спутниковых снимков трансформирует процесс геологоразведки, обеспечивая значительную экономию ресурсов. Традиционные методы требуют 80-120 человеко-часов на анализ территории площадью 100 км², в то время как применение ИИ сокращает это время до 12-20 человеко-часов. Точность выделения перспективных участков увеличивается с 10% до 35-40%, при этом количество необходимых экспедиций снижается на 40%. Общий экономический эффект достигает 15-20% от затрат на поисково-оценочные работы, а срок подготовки участка к лицензированию сокращается с 18-24 до 6-8 месяцев [6].

Выводы

Проведенное исследование подтверждает высокую эффективность современных методов анализа спутниковых снимков для задач недропользования. Модели глубокого обучения способны автоматически обнаруживать и классифицировать объекты горнодобывающей инфраструктуры с высокой точностью (около 95%), значительно превосходя традиционные алгоритмы. Автоматизированные системы могут в кратчайшие сроки обрабатывать огромные

массивы спутниковых данных и выделять зоны интереса для более детального изучения специалистами. Интеграция модулей генерации текстовых описаний позволяет создавать понятные отчеты на естественном языке, дополняющие картографическую информацию. Например, система может не только выдать координаты выявленного карьера, но и сопроводить их описанием: «Обнаружен крупный карьер открытого типа, окружающая территория преимущественно покрыта лесом, поблизости имеется отвальный массив».

Перспективы развития данного направления включают расширение номенклатуры выявляемых объектов, учет временной динамики по мульти-temporal снимкам и адаптацию моделей к данным разных спутников для получения более надежных результатов в любых условиях съемки.

Благодарности

Автор выражает признательность коллегам из Исследовательского центра искусственного интеллекта и цифровых технологий в сфере природопользования имени Л.З. Бобровникова.

Библиография

1. Jan, N., Minallah, N., Sher, M., Wasim, M., Khan, S., Al-Rasheed, A., & Ali, H. (2024). Advanced Mineral Deposit Mapping via Deep Learning and SVM Integration With Remote Sensing Imaging Data. Engineering Reports, 7(1), e13031 ([PDF] Advanced Mineral Deposit Mapping via Deep Learning and SVM Integration With Remote Sensing Imaging Data | CiteDrive).
2. Zhao, A., Yang, W., Chen, D., & Wei, F. (2023). Enhanced Transformer for Remote-Sensing Image Captioning with Positional-Channel Semantic Fusion. Electronics, 13(18), 3605 (Enhanced Transformer for Remote-Sensing Image Captioning with Positional-Channel Semantic Fusion).
3. Li, Y., Fang, S., Jiao, L., Liu, R., & Shang, R. (2020). A Multi-Level Attention Model for Remote Sensing Image Captions. Remote Sensing, 12(6), 939 (A Multi-Level Attention Model for Remote Sensing Image Captions).
4. Soulard, C. et al. (2016). Characterizing Mining Disturbance and Reclamation in the United States. Remote Sensing, 8(11), 913 (Mining and Tailings Dam Detection in Satellite Imagery Using Deep Learning - PMC).
5. Balaniuk, R., Isupova, O., & Reece, S. (2020). Mining and Tailings Dam Detection in Satellite Imagery Using Deep Learning. Sensors, 20(23), 6936 (Mining and Tailings Dam Detection in Satellite Imagery Using Deep Learning - PMC).
6. Yu, Q. et al. (2018). Mining Activity Monitoring Using Landsat and Multi-Source Data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, 50-62 (Mining and Tailings Dam Detection in Satellite Imagery Using Deep Learning - PMC).

Анализ функциональных возможностей платформы ArcGIS для обработки и визуализации геопространственных данных

Николич А.* (МГРИ, a.nikolich@yandex.ru),
Родионов Е.А. (МГРИ, rodionovea@mgri.ru)

Аннотация

Были рассмотрены функциональные возможности платформы ArcGIS, в качестве примера одной из ведущих геоинформационных систем, для обработки и визуализации геопространственных данных в картографических проектах.

Цель работы – изучение и анализ эффективности предлагаемых платформой методов привязки растровой геологической информации к векторной основе, интеграции картографических и описательных данных, создания базы данных, оптимально подходящей для анализа и поиска перспективных участков для последующего планирования геологоразведочных работ.

Ключевые слова

Геоинформационные системы, геопространственные данные, пространственный анализ, привязка растровых изображений, картографические проекты

Теория

ArcGIS представляет собой комплексную геопространственную платформу, предназначенную для интеграции и связи данных в географическом контексте. Данное программное обеспечение предоставляет широкие возможности для создания, управления, анализа, отображения и совместного использования.

Особые свойства ArcGIS, которые делают это программное обеспечение современным стандартом при создании региональных геологических ГИС:

- Мощная и гибкая модель данных (интегрированное управление табличными и географическими данными; векторная топология);
- Интеграция данных (интеграция многих сред, например, растровых и сканированных изображений; поддержка стандартных форматов изображений и цифровое изображение; взаимосвязь с системами спутниковой привязки; возможности обмена данными более чем в 30 стандартных форматах);
- Автоматическое картирование, составление отчетов и таблиц (отображение стандартных карт и производство таблиц; тематические карты, запросы и виды анализа);
- Интеграция баз данных и снабжение стандартами (прямой доступ к базам данных в среде ГИС; поддержка стандартных реляционных баз данных и сетевых функций; функции надежной безопасности баз данных; возможности управления библиотекой карт);

Одной из ключевых функций ArcGIS является привязка растровых изображений к векторной основе. Этот процесс включает присвоение растровому изображению координат, соответствующих его положению на векторном слое.

Векторный формат предпочтителен благодаря своей точности и компактности, в то время как редактирование растровых файлов требует значительных ресурсов.

Процесс оцифровки начинается с добавления растра в рабочую область программы, анализа данных и определения координат углов сетки. Привязка осуществляется с помощью инструмента «Пространственная привязка» (**Ошибка! Источник ссылки не найден.Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

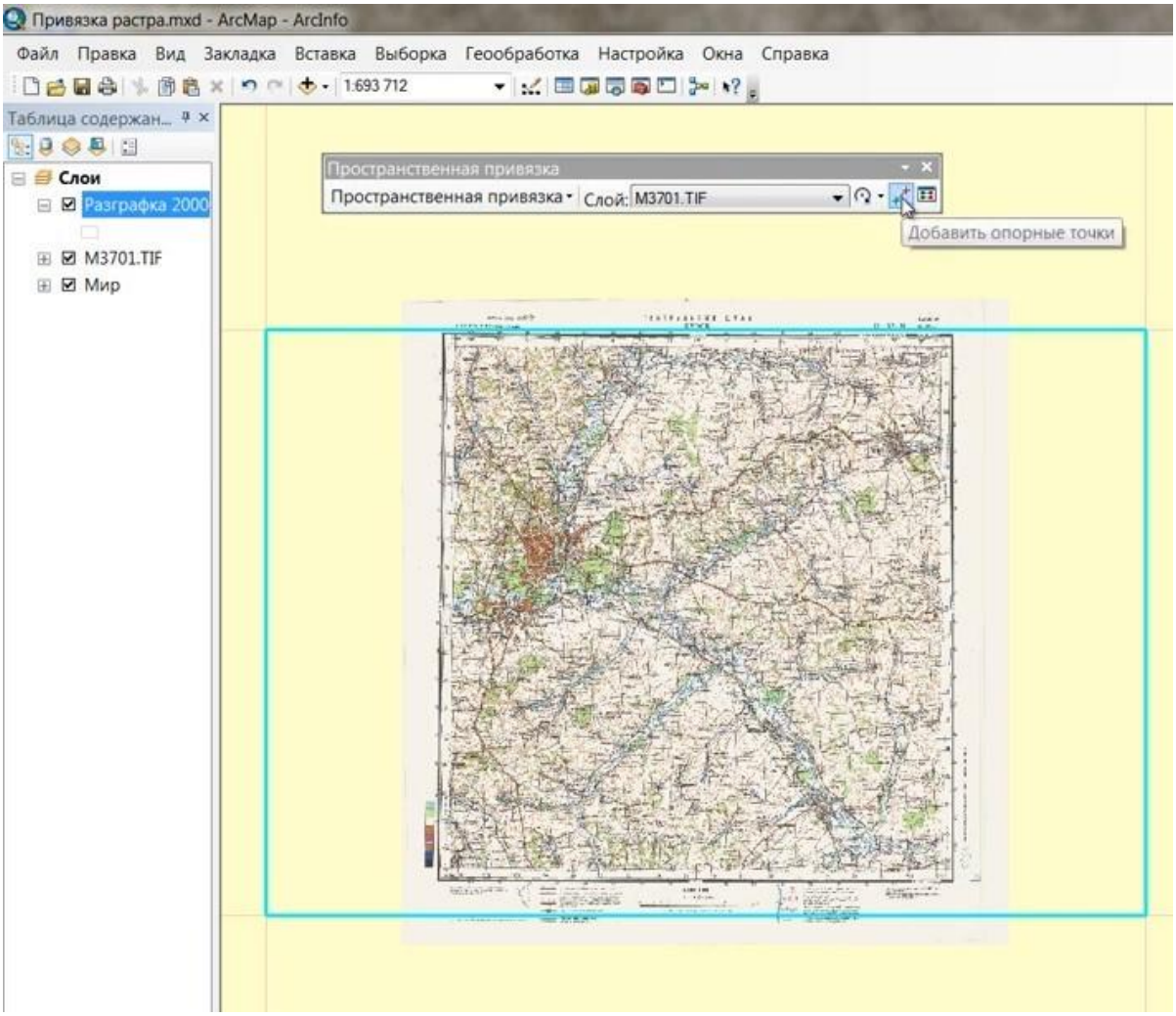


Рисунок 1. Использование инструмента «Пространственная привязка» для привязки растрового изображения к векторной основе

Базы данных в геоинформационных системах играют ключевую роль в организации, хранении, управлении и анализе геопространственной информации. Их использование обусловлено необходимостью структурированного подхода к работе с большими объемами данных, которые включают как пространственные (геометрические), так и атрибутивные (описательные) компоненты.

Ключевыми характеристиками работы с базами данных в ArcGIS являются:

- Уникальный формат данных Geodatabase, позволяющий хранение сложных пространственных объектов, топологий, сетей и др.;
- Интеграция с внешними СУБД (PostgreSQL, Oracle, SQL Server и др.) и пространственные расширения (PostGIS), что позволяет обеспечивать высокую производительность при работе с большими объемами данных;
- Версионность: синхронизация версий программы при многопользовательском доступе к одному проекту;
- Создание топологий: контроль за корректностью пространственных отношений между объектами;
- 3D-моделирование и анализ полученных 3D-объектов.

ArcGIS предлагает большой выбор функций анализа геопространственных данных, в частности операции геостатистики (Рисунок 2).

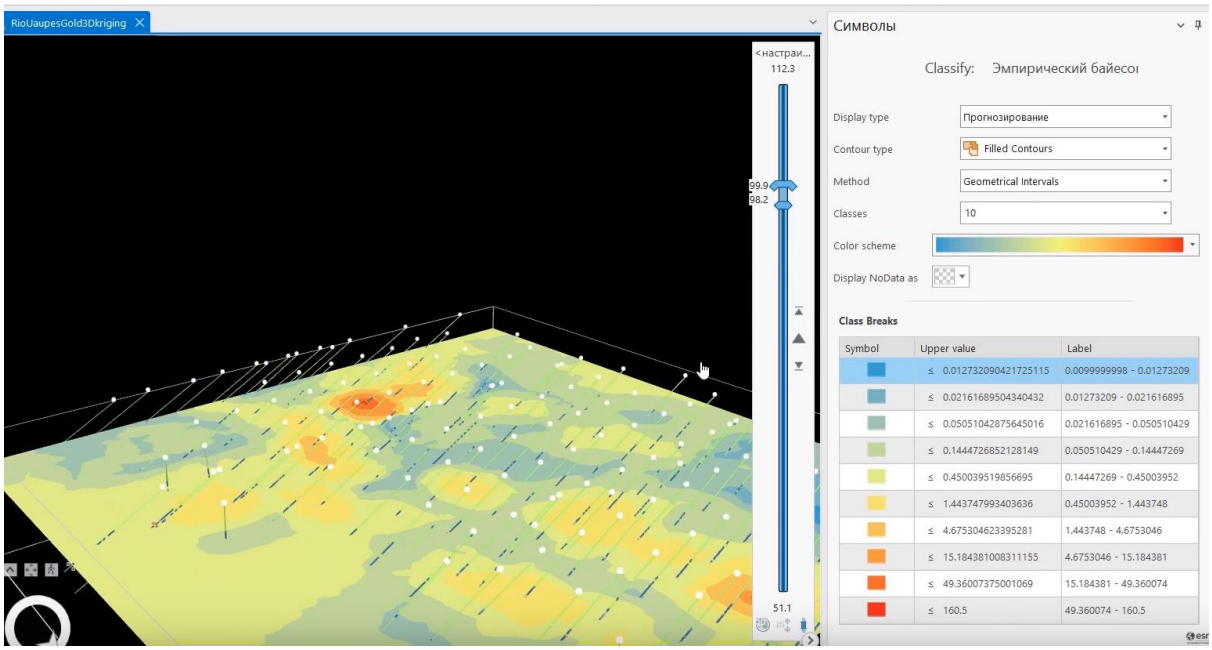


Рисунок 2. Пример результата выполнения операции «Эмпирический байесовский кригинг 3D» с помощью мастера геостатистики для данных опробования скважин

Выводы

Платформа ArcGIS является мощным инструментом для обработки и визуализации геопространственных данных. Ее функциональные возможности, такие как привязка растровых изображений, создание баз данных и пространственный анализ, делают ее незаменимой в картографических проектах. Особенно ценными являются инструменты для геологических исследований, включая интеграцию данных, расчет маршрутов и использование библиотеки Living Atlas.

Преимущества ArcGIS включают высокую точность обработки данных, широкие возможности визуализации и удобство интеграции с другими системами. Однако использование платформы требует значительных ресурсов и навыков работы с ГИС. Для оптимизации процессов рекомендуется проводить обучение сотрудников и активно использовать веб-сервисы для совместной работы.

В перспективе ArcGIS может быть использован для решения более сложных задач, таких как автоматизация анализа данных и разработка интеллектуальных картографических систем. Это открывает новые возможности для применения платформы в различных отраслях, включая экологию, урбанистику и управление природными ресурсами.

Библиография

1. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. – М.: Стандартинформ, 2006. – 14 с.

2. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Modeling and 2D/3D-visualization of geomagnetic field and its variations parameters // Proceedings of GISTAM 2015: 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. – 2015. – С. 35-42.

3. PostGIS Documentation / PostGIS PSC & OSGeo. – 2023. – URL: https://postgis.net/documentation (дата обращения 02.02.2025).
4. Краткое руководство по ArcGIS Online. – URL: http://esri-cis.ru/upload/iblock/336/QuickStartGuideToArcGISOnline_2013.pdf (дата обращения 02.02.2025).

Автоматизация системы контроля сроков строительства насосной станции с использованием Excel и VBA

Никульшин Н.И.* (МГРИ, nniculshin@mail.ru),
Оборнев Е.А. (МГРИ, obornevea@mgri.ru)

Аннотация

Настоящая работа посвящена разработке автоматизированной системы контроля сроков, позволяющей оперативно отслеживать дедлайны строительства насосной станции с использованием средств Excel и VBA. Использование Excel в сочетании с VBA (Visual Basic for Applications) позволяет автоматизировать процесс отслеживания сроков, создавая удобный и эффективный инструмент управления. В работе проведен анализ особенностей строительства насосной станции, изучены существующие методы контроля сроков, разработаны и сравнены алгоритмы автоматизации, а также созданы макросы на VBA для автоматического расчета и визуализации данных.

Разработка методов управления сроками, алгоритма автоматического контроля, создание интерфейса для удобного взаимодействия пользователей. Проведено тестирование и анализ эффективности предложенного решения. Ручной контроль сроков часто приводит к задержкам, ошибкам и дополнительным затратам.

Ключевые слова

Автоматизация, контроль сроков, строительство насосной станции, Excel, VBA, управление проектами, диаграмма Ганта, макросы

Теория

Основы управления проектом в строительстве:

Управление проектами в строительстве – это процесс, который включает планирование, контроль и координацию всех этапов строительства. Особенностью строительных проектов является их длительность, зависимость от внешних факторов (погодные условия, поставки материалов) и необходимость строгого соблюдения сроков.

Методы контроля сроков:

Диаграммы Ганта.

Первый формат диаграммы был разработан Генри Л. Гантом в 1910 году. Он отображал задачи в виде горизонтальных полос на временной шкале. Гант впервые использовал свою диаграмму для планирования и контроля производственных процессов в судостроение во время Первой мировой войны, что помогло организовать работу и распределение ресурсов. Этот вид диаграммы представляет собой сочетание таблицы и графика. Диаграмма Ганта состоит из полос, ориентированных вдоль оси времени. На графике в виде вертикальной диаграммы по оси X откладывается время, а по оси Y показываются отдельные задачи. Каждая задача отображается в виде горизонтальной полосы, длина которой соответствует времени выполнения (длительности) задачи. Ключевым понятием диаграммы Ганта является «веха» — метка значимого момента в ходе выполнения работ, общая граница двух или более задач. Вехи позволяют наглядно отобразить необходимость синхронизации, последовательности в выполнении различных работ. Диаграмма Ганта позволяет визуально оценить продолжительность проекта и последовательность выполнения задач, наглядно отслеживать прогресс их выполнения и выявляет возможные задержки. Так же Диаграмму проводит хронологию ресурсов в соответствие с расписанием проекта, выявляя конфликты и позволяя вносить коррективы. Пример диаграммы Ганта изображен ниже на рисунке. (см. 0).

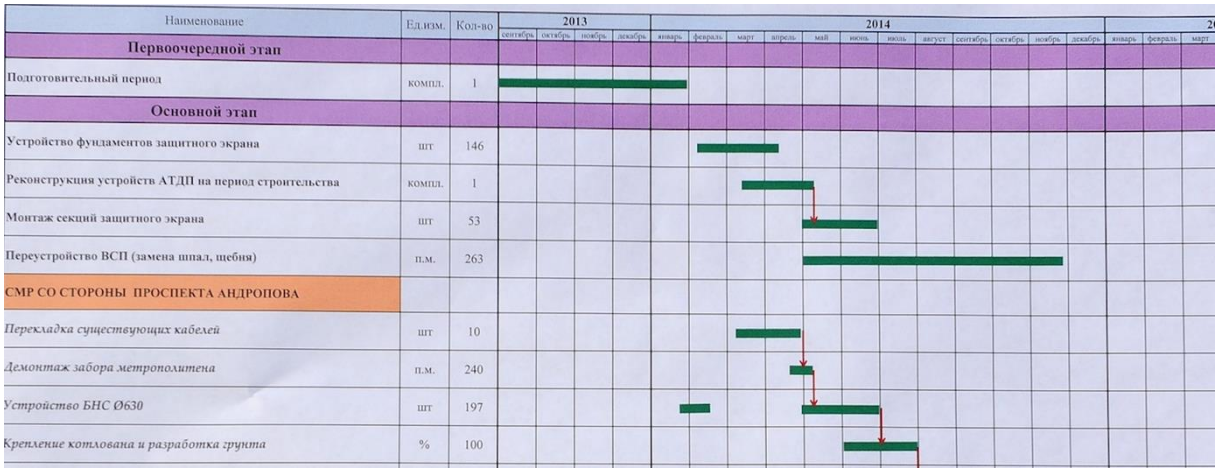


Рисунок 1. Диаграмма Ганта

Критический путь – используется для определения последовательности задач, которые определяют минимальное время завершения проекта и напрямую влияют на сроки завершения проекта. Этот метод помогает выявить критические задачи, задержка которых приведёт к задержке всего проекта. Критический путь — это самая длинная последовательность зависимых задач, которая определяет минимальное время выполнения проекта.

PERT-анализ – Program (Project) Evaluation and Review Technique.

Используется для оценки времени выполнения задач с учётом неопределённости. Он включает три оценки времени: оптимистичную, пессимистичную и наиболее вероятную. Среднее значение этих оценок используется для планирования. Метод PERT позволяет учитывать возможные отклонения от плана и более точно прогнозировать сроки выполнения проекта.

Предназначен для очень масштабных, единовременных, сложных, нерутинных проектов. Метод подразумевает наличие неопределённости, давая возможность разработать рабочий график проекта без точного знания деталей и необходимого времени для всех его составляющих. PERT был разработан главным образом для упрощения планирования на бумаге и составления графиков больших и сложных проектов. Метод в особенности нацелен на анализ времени, которое требуется для выполнения каждой отдельной задачи, а также определение минимального необходимого времени для выполнения всего проекта. Диаграмма PERT с работами на стрелках представляет собой множество точек-вершин (события) вместе с соединяющими их ориентированными дугами (работы). Всякой дуге, рассматриваемой в качестве какой-то работы из числа нужных для осуществления проекта, приписываются определённые количественные характеристики. Это — объёмы выделяемых на данную работу ресурсов и, соответственно, её ожидаемая продолжительность (длина дуги). Любая вершина интерпретируется как событие завершения работ, представленных дугами, которые входят в неё, и одновременно начала работ, отображаемых дугами, исходящими оттуда. Таким образом, отражается тот факт, что ни к одной из работ нельзя приступить прежде, чем будут выполнены все работы, предшествующие ей согласно технологии реализации проекта. Начало этого процесса — вершина без входящих, а окончание — вершина без исходящих дуг. Остальные вершины должны иметь и те, и другие дуги. Пример графика PERT-Анализа с работами на стрелках изображен ниже на рисунке. (см. 0).

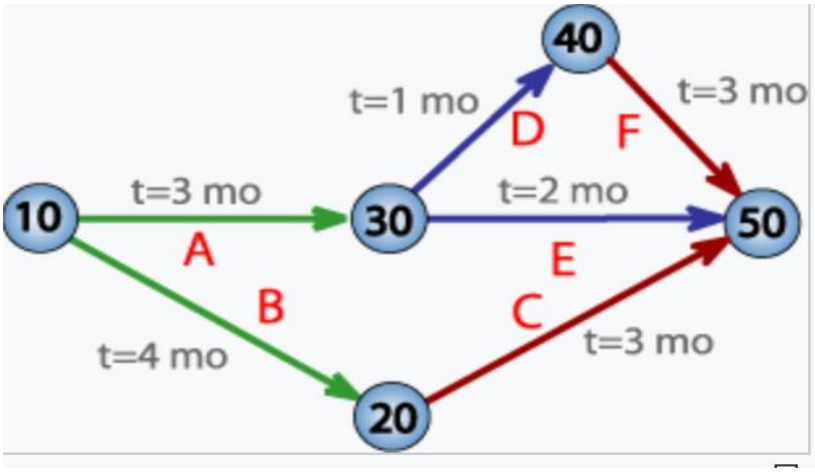


Рисунок 2. График PERT-Анализа сроков

Автоматизация процессов управления проектами: Автоматизация управления проектами позволяет значительно повысить эффективность контроля сроков, минимизировать ошибки и снизить трудозатраты. Современные инструменты автоматизации включают специализированные программы (MS Project, Primavera) и универсальные решения на основе Excel и VBA.

Актуальность данной работы дает:

- Возможность быстрого расчета сроков выполнения задач.
- Автоматическое формирование отчетов и визуализация данных.
- Удобство использования и интеграция с другими системами.
- Особенности строительства насосных станций

Строительство насосной станции включает несколько ключевых этапов:

- Подготовка площадки и земляные работы.
- Монтаж оборудования (насосы, трубопроводы, системы управления).
- Пуско-наладочные работы и тестирование системы.

Возможности Excel и VBA для автоматизации контроля сроков: Excel является универсальным инструментом для работы с данными, а VBA (Visual Basic for Applications) позволяет создавать макросы для автоматизации процессов. Основные возможности:

- Автоматический расчет сроков выполнения задач.
- Формирование диаграмм Ганта и других визуализаций.
- Создание пользовательских форм для удобства ввода данных.

Изучение существующих методов контроля сроков строительства:

Проведен анализ ручных и автоматизированных подходов к контролю сроков. Оценена применимость существующих решений для условий строительства насосных станций.

Разработка и реализация диаграммы Ганта в Excel.

Были определены ключевые этапы строительства насосной станции, сроки, длительности и их взаимосвязь всех работ между собой. Создана первоуровневая система планирования. Построена логическая схема автоматизации контроля сроков, для формирования отчетов и визуализации данных (графики, диаграммы Ганта, индикаторы выполнения). Был написан код для двух задач на VBA:

Задача 1: создать первичный календарь заданной работы в виде привычной табличной формы с датами, выстроенными по дням недели. Макрос анализирует поисковую строку, в

которой вписана название работы из диаграммы Ганта или графика и далее на календаре выделяются выбранным цветом все рабочие дни в календаре связанные с этой работой.

Задача 2: используя календарь из задачи 1, создаем программу, которая по выбору дня из календаря выводит все ресурсы в виде списка.

Тестирование системы: провести проверку работы макросов на реальных данных строительства насосной станции. Выполнить корректировки кода и устранить ошибки.

Выводы

Разработанная система автоматизации контроля сроков строительства насосной станции на основе Excel и VBA более эффективная, в отличии ручной работы. Внедрение системы позволит проводить оперативно анализ срока выполнения проекта и корректировать сроки выполнения отдельных работ, выявить критические пути на диаграмме, проводить анализ и распределение ресурсов. Перспективы дальнейшего развития: интеграция системы с другими инструментами управления проектами (например, MS Project, 1С), расширение функционала для контроля других объектов строительства.

Библиография

1. Иванов, А.А., Петров, В.В. "Автоматизация управления строительными проектами: современные подходы". – Журнал "Строительные технологии", 2021.
2. Смирнов, И.Н. "Использование Excel и VBA для автоматизации контроля сроков строительства". – Журнал "Управление проектами и программами", 2022.
3. Козлов, А.А., Батищев, А.В. "Телеграм-бот как простой и удобный способ получения информации". – Территория науки, 2017.
4. Гришков, Г.А., Устинов, С.А., Нафигин, И.О., Петров, В.А. "Нейронные сети и возможности их применения для анализа пространственных геологических данных". – Новые идеи в науках о Земле, 2021.
5. Кац, Я.Г., Полетаев, А.И., Румянцева, Э.Ф. "Основы линеаментной тектоники". – М.: Недра, 1986.
6. Степанов, П.П. "Искусственные нейронные сети". – Молодой ученый, 2017.
7. Тикунов, В.С. "Геоинформатика: учебное пособие для студентов". – М.: МГУ, 2008.
8. Чернова, И.Ю., Нугманов, И.И., Кадыров, Р.И. "Автоматизированный линеаментный анализ". – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012.
9. Егоров, С.В., Приезжев, И.И., Попова, П.Ф., Гладков, Е.А. "Применение алгоритмов машинного обучения для решения задач количественного прогноза ФЕС по сейсмическим и скважинным данным". – ГеоЕвразия 2018, 2018.
10. Пиманова, Н.Н., Спиридонов, В.А., Шаров, Н.В., Мицын, С.В. "Трехмерное плотностное моделирование земной коры юго-восточной части Фенноскандинавского щита в ГИС INTEGRO". – Геоинформатика, 2019.

Процедурная генерация синтезированной цифровой модели рельефа

Пинчевский В.А.* (МГРИ, drnemo86@gmail.com),
Бойко М.С. (Институт Карпинского, m.boyko@mfvsegei.ru)

Аннотация

Процедурная генерация — это способ создания контента “без участия человека”. То есть контент создается автоматически без участия человека[1]. Вместо того чтобы вручную проектировать каждый элемент, такие как горы, реки или леса, используются процедурные техники, которые позволяют автоматически генерировать сложные и разнообразные ландшафты. Этот процесс включает в себя использование таких методов, как фракталы, Шум Перлина и другие алгоритмические подходы, которые позволяют создать реалистичную геометрию и текстуры.

Ключевые слова

Процедурная генерация, Шум Перлина, генерация, фракталы

Теория

Создаваемый контент должен удовлетворять определённым условиям и таким образом решать соответствующие проблемы, и на практике чаще всего рассматриваются следующие свойства [3]:

1) Скорость: В зависимости от задачи требования разнятся от миллисекунд до месяцев, но в общем случае контент должен быть создан вовремя для удовлетворения нужд.
2) Надёжность: Гарантия выполнения критериев генерации.
3) Контролепригодность: способность контролировать сгенерированный контент исходя из ситуации.
4) Разнообразие: создание такого контента, который был бы уникальным на разных итерациях.
5) Креативность и правдоподобие: Генерация такого контента, который выглядит так, как будто его создал человек, а не генератор.

Для начала разработки необходимо разработать алгоритм, который будет служить основой для генерации. Это может быть простая концепция на основе случайных чисел или более сложные методы. На этом этапе важно продумать, какие входные данные и параметры будут использоваться, чтобы получить желаемый результат.

Некоторые из наиболее известных алгоритмов [2]:

1) Шум Перлина: Это алгоритм, который используется для создания реалистичных текстур и ландшафтов. Он позволяет генерировать гладкие, случайные поверхности и структуры, что делает его популярным выбором для генерации местности.
2) Фракталы: Фракталы могут быть использованы для генерации сложных геометрических форм и текстур. Например, они могут применяться для создания ландшафтов с горами, реками и деревьями, основываясь на математических принципах самоподобия.
3) Генерация на основе клеточных автоматов: Этот подход позволяет создавать сложные структуры, такие как карты городов, путём применения простых правил к каждой "клетке" на сетке.

После разработки алгоритма следует приступать к его тестированию и настройке. Это включает в себя запуск генерации с различными параметрами, проверку результатов и наблюдение за их качеством.

Когда алгоритм будет удовлетворительно функционировать, начинается этап интеграции с другими частями работы. Это может включать разработку интерфейсов для визуализации результатов или создание инструментов для настройки параметров генерации.

После успешного завершения всех шагов, проектирует процессы оптимизации и расширения возможностей генерации. Это может включать в себя добавление новых элементов, улучшение производительности алгоритма или даже внедрение машинного обучения для автоматического улучшения качества генерации.

Результатом работы процедурной генерации ландшафта является создание разнообразных и уникальных природных сцен, таких как горы, долины, реки, леса и другие элементы окружающей среды, либо же создание карты местности [4] (рис. 1).

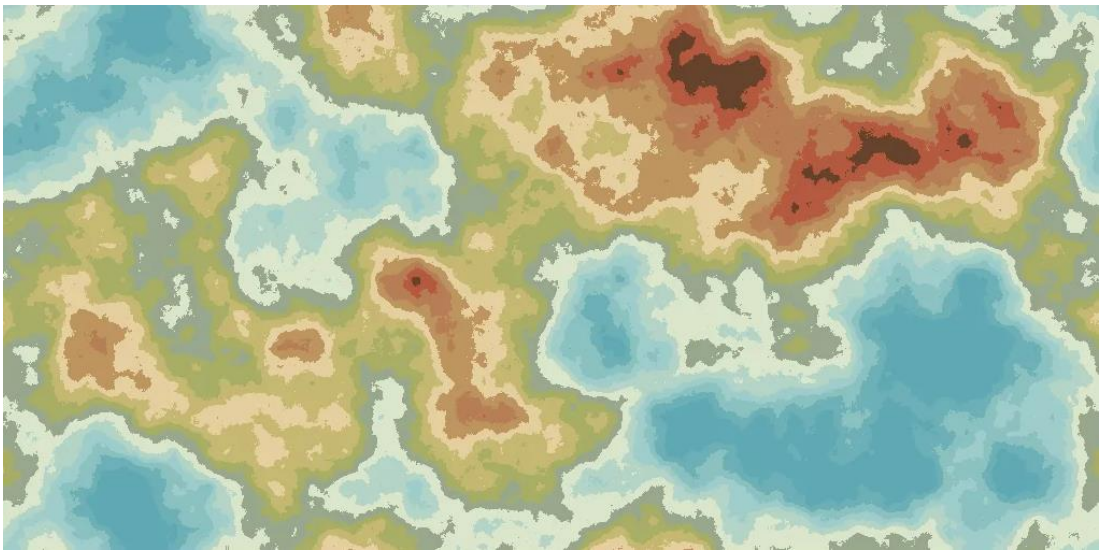


Рисунок 1. Пример результата работы процедурной генерации – уникальная карта местности

Выводы

В ходе выполнения работы была создана программа процедурной генерации ландшафта, которая позволяет создавать детализированные и уникальные модели местности.

Одним из основных преимуществ процедурной генерации является возможность быстрого создания масштабируемых и разнообразных ландшафтов для различных целей. В геологии такие модели помогают в исследовании геоморфологических процессов, формировании осадочных бассейнов и оценке природных ресурсов. Например, используя процедурные методы, геологи могут смоделировать сложные горные системы или предсказать развитие эрозионных процессов в различных условиях.

В ГИС процедурная генерация ландшафта способствует улучшению анализа пространственных данных. С помощью алгоритмических подходов можно создавать карты и визуализации, которые помогают в планировании использования земель, оценке воздействия на окружающую среду и мониторинге изменений ландшафта. Это позволяет исследователям и планировщикам более эффективно представлять данные, анализировать их и принимать обоснованные решения.

Библиография

1. Барсуков А. В. Применение алгоритма Midpoint-displacement в процедурной генерации ландшафтов // Науч.-образоват. журн. для студентов и преподавателей «StudNet». 2020. № 2. С. 1.

2. Мортин К. В. Методы и алгоритмы генерации синтезированных ландшафтов. 1-е изд. СПб. : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 4 с. : ил.

3. PCG book, 2016, p. 6-7: «PCG as the algorithmical creation of game content with limited or indirect user input»

4. H. Zhou, J. Sun, G. Turk, and J. M. Rehg, “Terrain synthesis from digital elevation models,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. vol.13, 2007.

Применение технологии NextGis Mobile для мониторинга развития опасных экзогенных процессов в густонаселённых районах

Прошин Д.А.* (МГРИ, proshinda@bk.ru),
Чесалов Л.Е. (Гидроспецгеология,* chesalovle@specgeo.ru*),
Оборнев Е.А. (МГРИ,* obornevea@mgri.ru*),
Рамазанов Д.В. (МГРИ, ramazanovdv@mail.ru)

Аннотация

Целью исследования является применение технологии NextGIS Mobile в мониторинге процесса развития опасных экзогенных процессов в густонаселённых районах.

Рассматривается процесс разработки технологии на базе NextGIS Mobile для оперативной полевой записи последующей обработки и анализа данных наблюдения за динамикой развития суффозионной воронки.

Авторам не удалось найти в открытых источниках применения данной технологии в сфере мониторинга опасных экзогенных геологический процессов. Данная технология позволит упростить и ускорить сбор информации для проведения экологического мониторинга в густонаселённых районах.

Ключевые слова

Мобильная ГИС, суффозионные процессы, полевой сбор данных, мониторинг и обновление данных

Теория

Сбор данных — один из ключевых этапов исследований в области опасных экзогенных процессов. Помимо местонахождения объекта исследования, например, суффозионной воронки необходимо собрать множество специфических характеристик описывающие размер воронки, состав геологической среды и подземных вод и т.п. Ранее для сбора данных использовались традиционные методы сбора данных такие как измерительные ленты, теодолиты и нивелиры, компас и бумажные карты. Эти методы определённо обеспечивали необходимую точность, но обладали рядом недостатков. Помимо необходимости спец подготовки требовалось наличие группы специалистов на объекте для проведения измерений. Измерительная лента могла давать неточные данные из-за сложного рельефа, а теодолиты и нивелиры обладают не малым весом. Сейчас в связи с улучшением технологий ГИС систем и мобильных устройств стало возможным облегчение процесса сбора данных как в обучении, так и в уменьшении количества участников исследования. Мобильные ГИС позволят проводить исследования имея с собой один телефон что сильно облегчит труд специалистов. Также при наличии интернет-соединения данные можно отправлять в базы данных на месте.

В этом исследовании будут рассмотрены опасные экзогенные геологические процессы. Экзогенные геологические процессы (ЭГП) — это геологические явления, происходящие на или около поверхности Земли, которые формируют ландшафт через внешние силы, такие как солнечная энергия, гравитация и атмосферные условия. Они включают выветривание, эрозию, массоперенос и отложение, которые постепенно изменяют рельеф.

Рассматривая вопрос конкретно будут исследованы точки, находящиеся в парке Покровское-Стрешнево, в котором находятся ряд суффозионных воронок, над которыми ведется наблюдение. Суффозионные воронки — это углубления на поверхности земли, возникающие в результате суффозии, процесса механического вымывания мелких частиц грунта (глины, ила, мелкого песка) подземными или просачивающимися водами. В отличие от карстовых воронок,

которые связаны с химическим растворением растворимых пород, суффозия — это физический процесс, происходящий в рыхлых, несцементированных отложениях.

Обзор технологий

В исследовании будет рассмотрена отечественная разработка NextGis Mobile. NextGis Mobile — это мобильное геоинформационное приложение, разработанное для сбора и редактирования геоданных как в онлайн-, так и в офлайн-режиме. Оно широко используется в различных областях, включая мониторинг окружающей среды, например, в проекте по мониторингу биоразнообразия в Таджикистане [1] или применение мобильных ГИС для экологических исследований [2].

В нашем случае мы хотим использовать эту технологию для мониторинга суффозионных процессов и ему подобных которых можно охарактеризовать как экзогенные.

Исследования проводились на примере сбора данных с точек в парке Покровское-Стрешнево, в котором находятся ряд суффозионных воронок, над которыми ведется наблюдение.

Реализация исследования разделена на три этапа.

Первый этап — это создание формы, с помощью которой будет произведён сбор данных об объекте. Создание формы происходит в программе NextGis Formbilder. В ней по средствам доступных элементов можно создать форму, которая будет удовлетворять всем требованиям. Примеры элементов формы: дата и время, списки, счётчики, фото, флажок, текстовое поле и т.п.

Используя данные элементы, был создан интерфейс формы, который участник сбора данных будет использовать.

На рисунке ниже представлен интерфейс созданной формы (см. 0).

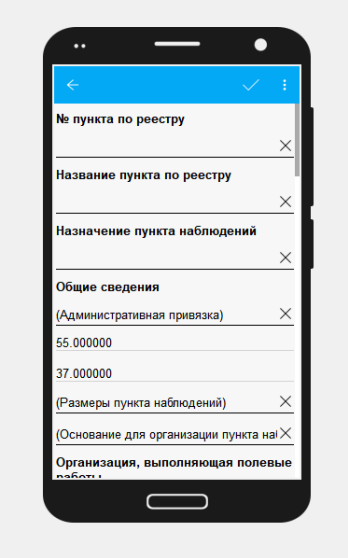


Рисунок 1. Интерфейс созданной формы на базе NextGIS Formbilder

Важно отметить, что при создании формы также создаётся таблица атрибутов, которая будет вмещать внесённые данные.

Второй этап заключается в создании проекта, в котором будет производится сбор. Он может включать в себя подложку точки, линии, полигоны объектов с координатами.

Третий этап — это подключение NextGIS Mobile сборщика к созданному проекту и непосредственный сбор данных с заполнением формы.

На рисунке ниже представлен интерфейс NextGIS Mobile на котором красные точки это суффозионные воронки с заполненными атрибутами и фотографиями (см. 0).

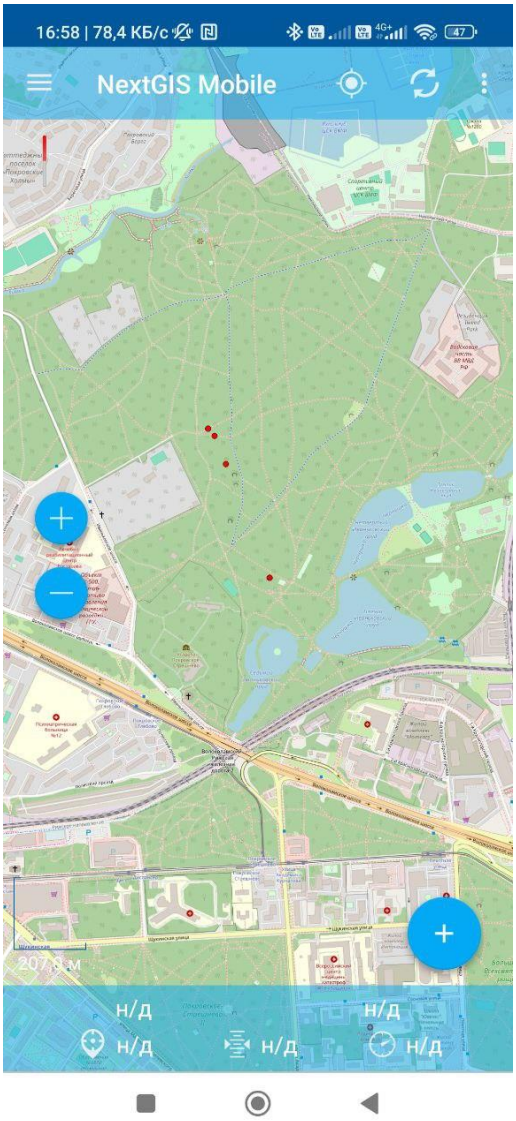


Рисунок 2. Интерфейс NextGIS Mobile

На рисунке изображен интерфейс NextGIS Mobile с картой парка Покровское-Стрешнево

Далее данные переходят по мобильному интернету к человеку за компьютером, который может произвести дальнейшую обработку данных и перенести обработанные данные в базы данных.

Для улучшения качества выставления точек по координатам может использоваться внешний GPS источник, который можно подключить к телефону с заменой GPS данных.

Выводы

Разработанное мобильное приложение для сбора данных ЭГП позволяет проводить периодические замеры с целью мониторинга динамики развития суффозионных процессов особенно в условиях городской застройки. Простота и рентабельность разработанного приложения позволяет его тиражировать для организаций массового сбора информации.

Библиография

1. Разработка и интеграция системы мониторинга биоразнообразия и автоматизированного сбора полевых данных для Таджикистана [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: https://nextgis.com/blog/undp_tajikistan/, свободный на 26.02.2025.

2. Мобильные ГИС-приложения для полевых экологических исследований: современное состояние [Электронный ресурс]. – 2020 – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989420302468, свободный на 26.02.2025.

3. ГИС-модели для оценки уязвимости береговой эрозии в тропической охраняемой зоне [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: https://www.mdpi.com/2220-9964/10/9/598, свободный на 26.02.2025.

4. NextGIS Mobile – документация NextGIS [Электронный ресурс]. – 2011-2025 – Режим доступа: https://docs.nextgis.ru/docs_ngmobile/source/toc.html, свободный на 26.02.2025.

Обработка и визуализация данных о работоспособности персонала на критических объектах горногеологических отраслей использованием библиотеки MediaPie

Ракипов В.Р.* (МГРИ, rakipovvr@mgri.ru),
Оборнев Е.А.* (МГРИ, obornevea@mgri.ru)

Аннотация

В докладе рассматриваются современные подходы к обработке и визуализации данных о работоспособности персонала на критических объектах горно-геологических отраслей. Особое внимание уделено использованию библиотеке MediaPie, который позволяет анализировать и интерпретировать данные, связанные с распознаванием признаков усталости и работоспособностью сотрудников.

Представлены методы интеграции данных из различных источников, их обработки и визуализации в реальном времени, с использованием веб-фреймворка Flask.

Результаты исследования демонстрируют возможность повышения безопасности и эффективности работы персонала за счет своевременного выявления и предотвращения потенциальных рисков.

Доклад может быть полезен специалистам в области науки о Земле, горного дела и охраны труда, а также всем, кто интересуется применением современных технологий для анализа данных.

Ключевые слова

Обработка данных, визуализация данных, фреймворк MediaPie, веб-фреймворк Flask

Теория

Горно-геологические отрасли относятся к числу наиболее опасных сфер деятельности, где персонал подвергается повышенным рискам для здоровья и жизни. Критические объекты, такие как шахты, карьеры, нефтяные и газовые платформы, требуют постоянного мониторинга состояния работников для предотвращения аварий и обеспечения безопасности. Работоспособность персонала напрямую влияет на эффективность и бесперебойность производственных процессов.

Компьютерное зрение — это область искусственного интеллекта, которая фокусируется на разработке алгоритмов и методов, позволяющих компьютерам "видеть" и интерпретировать визуальную информацию. Основная задача компьютерного зрения заключается в автоматическом анализе изображений и видео для извлечения полезных данных. Это включает в себя распознавание объектов, классификацию изображений, обнаружение аномалий, отслеживание движений и многое другое. В контексте мониторинга работоспособности персонала компьютерное зрение может использоваться для анализа позы, мимики и движений сотрудников, что позволяет оценивать уровень усталости, стресса и концентрации.

Для реализации задач компьютерного зрения активно используются нейронные сети, в частности сверточные нейронные сети (CNN), которые эффективно работают с изображениями. Современные библиотеки, такие как OpenCV, TensorFlow и PyTorch, предоставляют инструменты для обработки изображений, обучения моделей и их интеграции в приложения. Например, с помощью компьютерного зрения можно анализировать видеопоток с камер наблюдения на объекте, чтобы определить, насколько сотрудники соблюдают правила безопасности или выявить признаки переутомления.

Для распознавания признаков усталости персонала используются два источника данных: значение EAR – набор точек для определения уровня открытия глаз с помощью соотношения

сторон глаз; значение MAR – набор точек для определения положение и размеры рта, для вычисления доли открытости рта.

MediaPipe — это библиотека, которая предлагает кроссплатформенные настраиваемые решения на основе машинного обучения для онлайн и потоковых медиа. Библиотека реализует графическое преобразование видео, позволяя комбинировать компоненты машинного обучения с механической обработкой. В данной работе применяется модуль Face Mesh библиотеки MediaPipe, которая предоставляет 468 ориентиров (ключевых точек) на лице.

Flask — фреймворк для создания веб-приложений на языке программирования Python. Для визуализации данных в реальном времени с использованием Flask предлагается следующая последовательность работ: сбор данных, то есть передача значений EAR и MAR; обработка данных, данные обрабатываются с использованием Python-библиотек (например, Pandas) и передаются в Flask-приложение; визуализация Flask интегрируется с библиотеками визуализации, такими как Plotly или Chart.js, для создания интерактивных графиков и диаграмм; Flask предоставляет веб-интерфейс, который отображает данные в реальном времени и обновляет их автоматически.



Рисунок 1. Вид с камеры. Результат работы компьютерного зрения, алгоритм обнаружение сонливости. При помощи значений Eye aspect ratio (EAR) и Mouth aspect ratio (MAR)

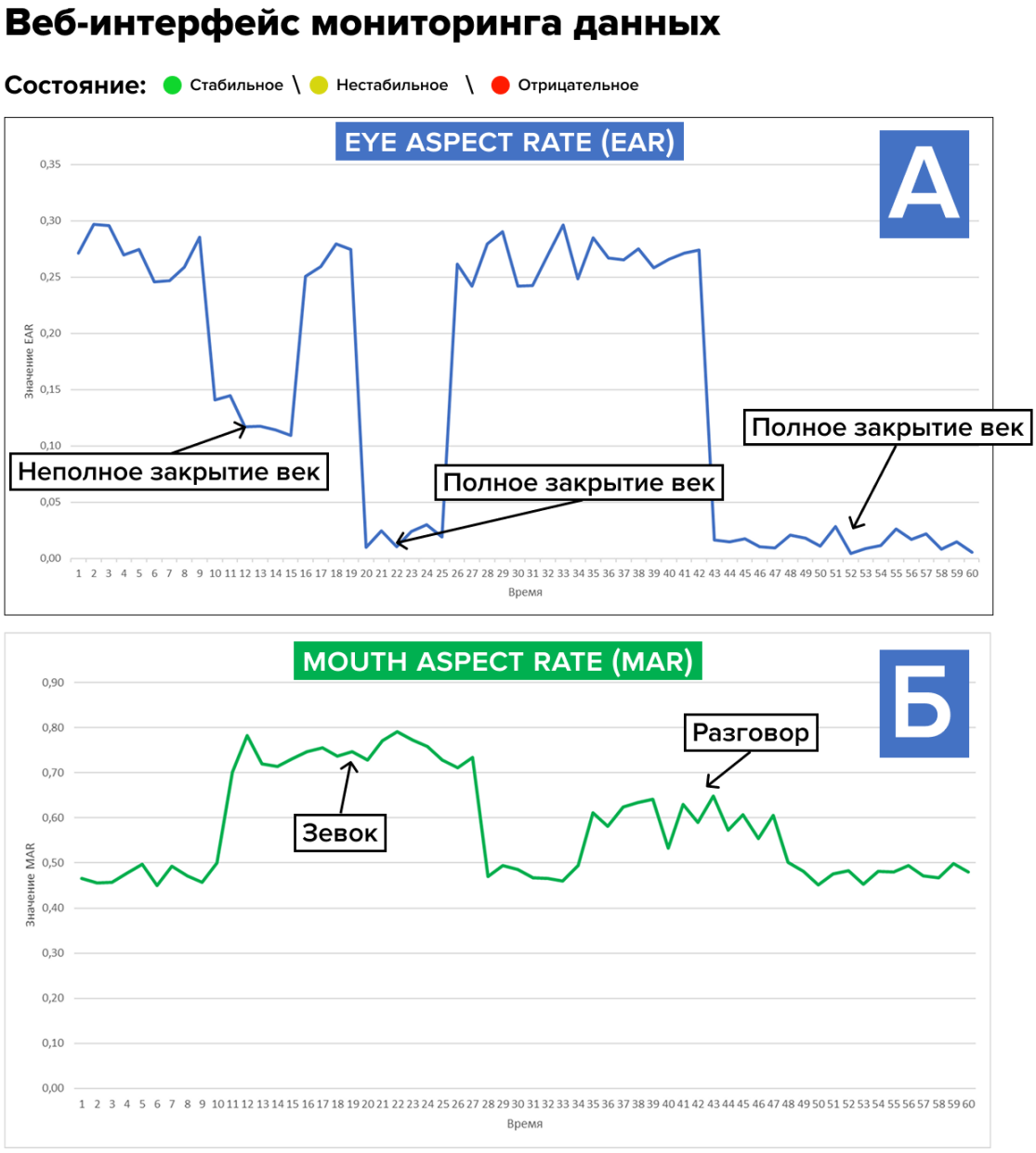


Рисунок 2. А) Визуализация данных определения открытости или закрытости глаз; Б) Визуализация данных определения открытия и закрытия рта (зевота)

Выводы

В современных условиях горногеологических отраслей, где безопасность и эффективность работы персонала на критических объектах являются приоритетными задачами, особое внимание уделяется мониторингу работоспособности сотрудников. Для решения этой задачи предлагается использовать библиотеку MediaPie для обработки данных о состоянии персонала, таких как уровень усталости, а также веб-фреймворк Flask для создания интерактивного веб-приложения, которое визуализирует эти данные в виде графиков.

Библиотека MediaPie обеспечивает сбор и обработку данных, например, с датчиков, отслеживающих физиологические показатели сотрудников. Эти данные затем передаются в веб-приложение на основе Flask, где с помощью библиотек для визуализации, таких как Matplotlib или Plotly, создаются интерактивные графики. Например, можно отображать динамику уровня усталости в течение рабочей смены, сравнивать показатели между сотрудниками или анализировать распределение нагрузки по объекту с помощью тепловых карт. Flask, благодаря своей гибкости и простоте, позволяет легко интегрировать такие визуализации в веб-интерфейс, делая данные доступными для руководителей и специалистов по безопасности.

Использование связки MediaPie и Flask создает мощный инструмент для мониторинга работоспособности персонала. Это решение помогает своевременно выявлять сотрудников с повышенным уровнем усталости, предотвращать переутомление и оптимизировать рабочие процессы. Таким образом, внедрение такого подхода способствует повышению безопасности на критических объектах и улучшению управления трудовыми ресурсами в горногеологических отраслях.

Библиография

1. Документация MediaPie : сайт. – URL: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=ru (дата обращения: 10.02.2025).
2. Документация Flask : сайт. – URL: https://flask.palletsprojects.com/en/stable/ (дата обращения: 10.02.2025).
3. Гринберг М. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python / М. Гринберг. – Москва : ДМК Пресс, 2020. – 250 с.
4. Пример работы фреймворка MediaPie : сайт. – URL: https://habr.com/ru/companies/oleg-bunin/articles/735024/ (дата обращения: 12.02.2025).

Разработка WEB-сервиса: решение прямой и обратной трёхмерной задачи магнитотеллурического зондирования

Раков М.С.* (МГРИ, miraxlxd@gmail.com),
Солнцев Э.С. (МГРИ,ski.rus.r@gmail.com),
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru),
Оборнев Е.А. (МГРИ, obornevea@mgri.ru),
Шуваева Ю.Д. (МГРИ, shuvaeva.julia@mail.ru)

Аннотация

Магнитотеллурическое зондирование основано на изучении естественного электромагнитного поля Земли. Электромагнитные поля атмосферного и ионосферного происхождения позволяют получить природный источник мощных вариаций так называемого магнитотеллурического поля в широком диапазоне частот. Солнце периодически испускает потоки заряженных частиц – солнечный ветер. После взаимодействия с магнитосферной и ионосферой имеется источник электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0,0001 Гц до первых сотен Гц.

Трехмерная обратная задача магнитотеллурического зондирования - один из методов индукционных зондирований Земли, использующий измерения естественного электромагнитного поля. Решение трёхмерной обратной задачи является наиболее востребованным при глубинных геофизических исследованиях.

В качестве одной из целей, авторы выбрали задачи, которые связаны размещением публичного WEB-сервиса для предобработкой полевых измерений по времени в формат передаточных функций, решением прямой и обратной задачи с возможностью импорта исходных файлов, настройкой сетки моделирования, экспорта результирующих файлов формата *vtk* (Visualization Toolkit), предварительный просмотр трёхмерной модели на странице сервиса в специализированном блоке просмотра.

Ключевые слова

МТЗ, 3D прямая и обратная задача, web-сервис, Visualization Toolkit

Теория

В данной работе объектом исследования является геоэлектрический разрез участка Земли в трехмерном пространстве.

Структура WEB-сервиса подразумевает импорт полевых физических замеров приведенных к формату передаточных функций, организацию очереди пользователей для последовательного расчёта задачи, получение решения (геоэлектрический разрез 3D) в виде *vtk*-файла, и возможность его просмотра на странице сервиса.

Для решения прямой трехмерной задачи МТЗ программный продукт исследует куб данных геоэлектрического разреза с известных координат точек съемки на заданных пользователем частотах, учитывая топографическую поверхность. Результатом исследования является набор изображений действительной и мнимой компоненты импеданса от каждой точки наблюдения в разных проекциях на определенной частоте (см. рисунок 1).

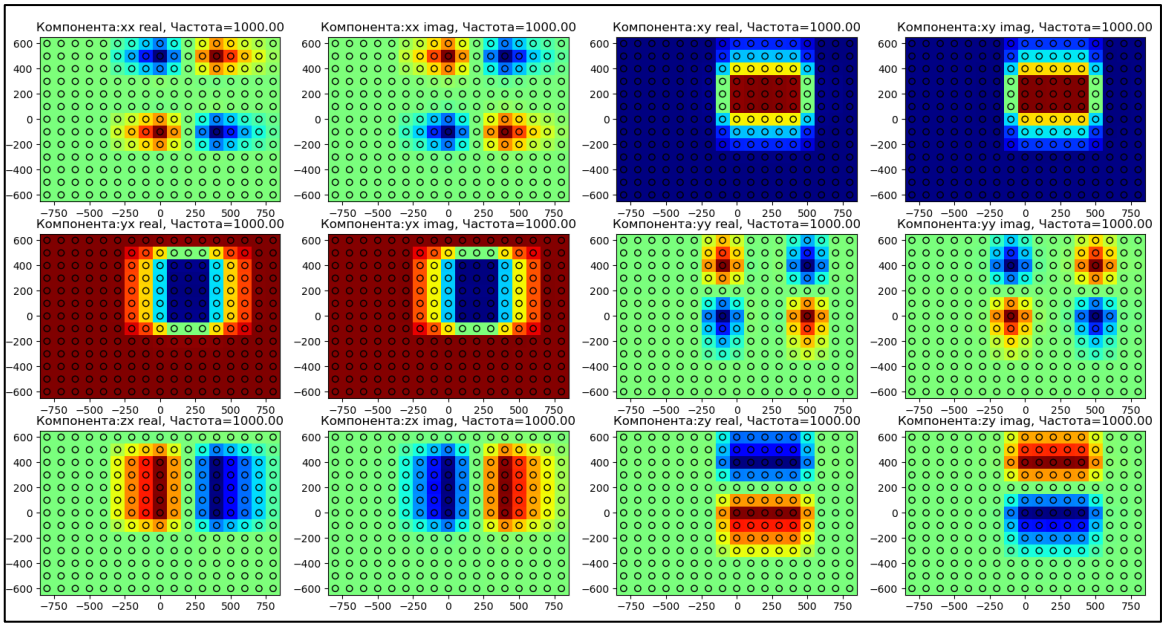


Рисунок 1. Результирующий набор изображений решения прямой трехмерной задачи МТЗ

Решение прямой трехмерной задачи МТЗ вычислительно трудоемко. Настоящая работа использует библиотеки SimPEG [4, 6], а также модуля Pardiso для решения разряженных матриц и линейной алгебры.

В работе исследовалась задача предобработки сигналов (см. рисунок 2) с приемников МТ-поля во временной области (формат «.ats».) в формат передаточных функций (импеданс). Данные операции необходимы для решения обратной трехмерной задачи МТЗ (FEMTIC).

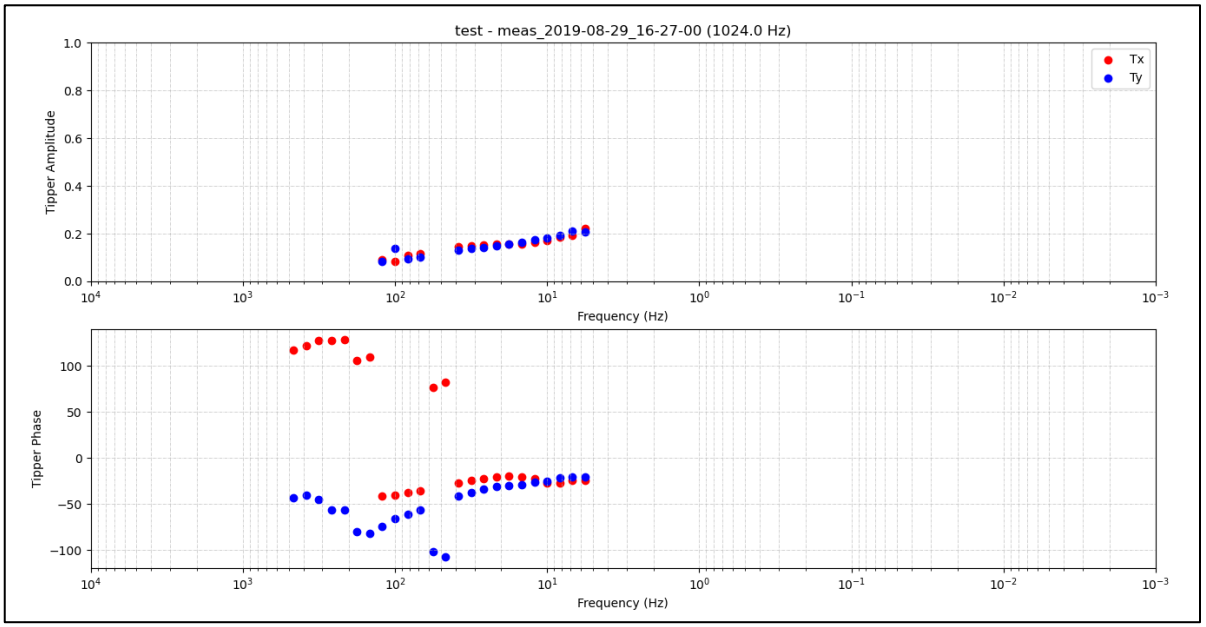


Рисунок 2. Результат предобработки сигналов с приемников МТЗ

При решении обратной задачи используется не само поле, а его нормированная величина, так называемое «кажущееся сопротивление». При решении обратной задачи необходимо найти

такое распределение удельной электропроводности $\rho(x, y, z)$, которое при заданном источнике дает расчётное поле (прямая задача) в зависимости от частоты совпадающее с измеренными полями [2].

Обратная задача МТЗ 3D вычислительно затратна (память, быстродействие). Существующие решения: Weerachai Siripunvaraporn*, Gary Egbert и др.-WSInv3DMT представлены отдельным рабочим программным продуктом; Gary Egbert (ModEM). Расчеты этих программных продуктов занимают до нескольких суток.

В работе исследуется программа FEMTIC (Finite Element MagnetoTelluric Inversion Code) [1, 3], использующая мощные вычислительные библиотеки и шаблоны: распараллеливание MPI (Message Passing Interface), позволяющий равномерно и производительно распределить нагрузку на вычислительные компоненты; MKL (Math Kernel Library) – библиотека оптимизированных математических процедур (BLAS, LAPACK, ScaLAPACK), позволяющая ускорить расчёт сложных математических моделей.

Для применения FEMTIC необходимы значительные вычислительные ресурсы. В работе в качестве вычислительной системы выступает компьютер, оснащенный процессором Intel Core i9 9900kf с тактовой частотой 4,8 ГГц и оперативной памятью DDDR4 на частоте 2,8 ГГц. Расчёты на тестовом наборе данных с занимают, в среднем, не более трёх минут.

Результаты

Результатом работы является файл трёхмерного геоэлектрического разреза участка Земли в популярном для просмотра расширении *.vtk.

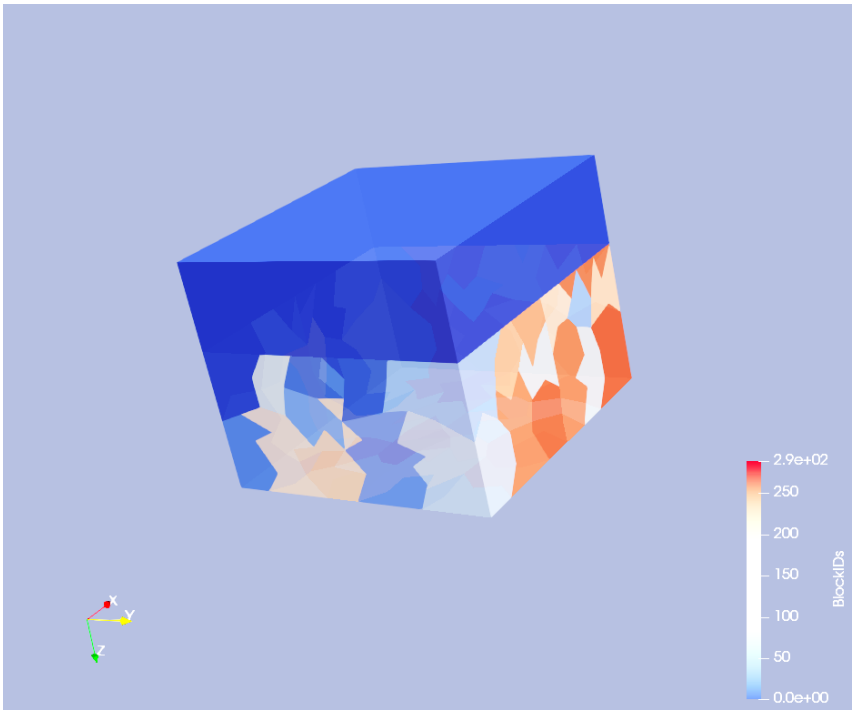


Рисунок 3. Трёхмерный геоэлектрический разрез участка Земли

Выводы

Разработан WEB-сервис для решения трёхмерной обратной задачи магнитотеллурического зондирования.

Данная разработка может быть полезна для интерпретации глубинных геофизических исследований, с точки зрения автоматизации расчёта модели, удалённого доступа к решению, а также отсутствия необходимости в больших вычислительных ресурсах.

Библиография

1. ГитХаб репозиторий с исходным кодом FEMTIC – Режим доступа: https://github.com/yoshiya-usui/femtic.
2. Дмитриев В.И. Обратные задачи геофизики. -М. Макс-Пресс, 2012, 340с.
3. Сайт профессора Токийского университета Yoshiya Usui - Режим доступа: https://sites.google.com/view/yoshiyausui/femtic.
4. Cockett, Rowan, Seogi Kang, Lindsey J. Heagy, Adam Pidlisecky, and Douglas W. Oldenburg. "SimPEG: An Open Source Framework for Simulation and Gradient Based Parameter Estimation in Geophysical Applications" Computers & Geosciences, September 2015. doi:10.1016/j.cageo.2015.09.015.
5. Egbert G. D., Kelbert A. (2012). Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophys. J. Int. (2012) 189, 251–267.
6. Lindsey J. Heagy, Rowan Cockett, Seogi Kang, Gudni K. Rosenkjaer, Douglas W. Oldenburg. "A framework for simulation and inversion in electromagnetics" Computers & Geosciences, September 2017. doi:10.1016/j.cageo.2017.06.018.
7. Weerachai Siripunvaraporn; Gary Egbert. WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. , 173(3-4), 0–329. doi:10.1016/j.pepi.2009.01.013.

Создание модуля для хранения данных мониторинга опасных экзогенных процессов в СУБД PostgreSQL

Рамазанов Д.В.* (МГРИ, ramazanovdv@mail.ru),
Чесалов Л.Е. (Гидроспецгеология, chesalovle@specgeo.ru),
Оборнев Е.А. (МГРИ, obornevea@mgri.ru),
Прошин Д.А. (МГРИ, proshinda@bk.ru)

Аннотация

Целью исследования является применение технологии NextGIS в хранении данных мониторинга опасных экзогенных процессов для последующего их анализа в СУБД PostgreSQL. Рассматривается процесс разработки технологии на базе NextGIS QGIS для эффективных обработки и анализа данных, наблюдение за динамикой развития суффозионной воронки. Данная технология позволит облегчить манипуляции с данными, собранными в процессе исследований опасных экзогенных процессов.

Ключевые слова

PostgreSQL, Python API, суффозионные геологические процессы, QGIS

Теория

Опасные экзогенные процессы, такие как эрозия, суффозия и другие природные явления, требуют интеграции и анализа больших объемов данных, получаемых из различных источников.

В этом исследовании будут рассмотрены опасные экзогенные геологические процессы. Экзогенные геологические процессы (ЭГП) — это геологические явления, происходящие на или около поверхности Земли, которые формируют ландшафт через внешние силы, такие как солнечная энергия, гравитация и атмосферные условия. Они включают выветривание, эрозию, массоперенос и отложение, которые постепенно изменяют рельеф.

В нашем случае мы будем рассматривать данные по суффозионным воронкам в парке Покровское-Стрешнево. Суффозионные воронки — это углубления на поверхности земли, возникающие в результате суффозии, процесса механического вымывания мелких частиц грунта (глины, ила, мелкого песка) подземными или просачивающимися водами. В отличие от карстовых воронок, которые связаны с химическим растворением растворимых пород, суффозия — это физический процесс, происходящий в рыхлых, несцементированных отложениях.

Для решения задачи интеграции и анализа больших объёмов данных предлагается разработка специализированного модуля, который обеспечит автоматизированный перенос и хранение данных полевых наблюдений опасных экзогенных процессов из мобильного приложения в систему управления базами данных (СУБД) PostgreSQL. Выбор PostgreSQL обусловлен её открытостью, поддержкой сложных запросов, масштабируемостью и наличием расширения PostGIS, позволяющего эффективно работать с геопространственными данными, об этом говорится в многих научных статьях, например Кузнецова А. В. и Иванова П. С. [1], а также Драч В.Е. и Ильичев В.Ю. [2]. Цель проекта — создать инструмент, который упростит интеграцию разнородных данных в единую структурированную систему, обеспечит их целостность и доступность для дальнейшего анализа, моделирования и визуализации.

PostgreSQL - свободная объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД). Существует в реализациях для множества UNIX-подобных платформ. С её помощью можно гибко управлять базами данных: создавать, изменять или удалять в них записи, а также отправлять транзакции - наборы последовательных операций на языке SQL.

Модуль реализует автоматизированный процесс извлечения, преобразования и загрузки данных, используя язык программирования Python и соответствующие библиотеки для работы с

API. Модуль включает механизмы для обеспечения актуальности и достоверности загружаемой информации, а также функционал для мониторинга и логирования операций.

Обзор технологий

В данном исследовании будет рассмотрен процесс обработки данных, собранных в парке Покровское-Стрешнево. Исследования проводились на основе сбора данных с точек внутри парка, где расположены ряд суффозионных воронок, подлежащие наблюдению. В процессе работы были собраны координаты точек, однако их точность была снижена из-за погрешностей GPS мобильных устройств, использовавшихся для сбора данных.

Для устранения этой проблемы данные будут интегрированы с ближайшими официальными точками с помощью специализированного модуля QGIS. Этот модуль позволяет объединять и обновлять атрибуты точек, что способствует коррекции неточностей, возникающих при использовании GPS. На рисунке (см. Рисунок 1) представлен проект с собранными точками. Красные точки обозначают координаты, полученные в полевых условиях, в то время как фиолетовые точки представляют официальные данные. На следующем рисунке (см. 0) изображена суффозионная воронка одной из точек наблюдений.



Рисунок 1. Пример визуализации места проведения экологического мониторинга в районе парка Покровское-Стрешнево. Исследования проводились на основе сбора данных на точках (выделены красным) внутри парка, где расположены суффозионные воронки, подлежащие наблюдению



Рисунок 2. Суффозионная воронка, находящаяся в парке Покровское-Стрешнево

После первоначальной обработки, собранные данные переходят в базу данных PostgreSQL. Передача данных производится автоматически, что минимизирует вероятность ошибок и способствует более быстрому обновлению уже существующей базы данных. Такой подход позволяет систематизировать информацию и делает её более доступной для последующего анализа.

Кроме того, использование PostgreSQL предоставляет возможность применить расширенные функции анализа данных. База данных позволяет выполнять геоаналитические запросы, что обеспечивает возможность изучения пространственных взаимосвязей между различными элементами, такими как суффозионные воронки и другие географические особенности парка.

Разрабатываемый модуль создаётся на языке Python с использованием библиотеки «*psycopg2*» для взаимодействия с PostgreSQL. Он автоматически обнаруживает файлы данных в заданной директории, обрабатывает их и переносит содержимое в базу данных. Основные компоненты модуля:

Анализ входных данных*:* Модуль сканирует директорию на наличие файлов CSV и JSON, содержащих данные экзогенных процессов (например, измерения эрозии или осадков).

Проектирование базы данных: Таблица «*exogenous_data*» включает поля «*id*» (автоинкремент), «*timestamp*» (время), «*value*» (значение), «*location*» (координаты).

Алгоритм переноса:

Автоматическое обнаружение файлов в директории.

Пакетная вставка в PostgreSQL с обработкой ошибок.

Пример наработок кода представлен на рисунке (см. 0). Пока что код автоматически обрабатывает только CSV-файлы из указанной директории.

```python
import psycopg2
import pandas as pd
import os

# Директория с данными
data_dir = "data_folder"

# Проверка существования директории
if not os.path.exists(data_dir):
    print(f"Директория {data_dir} не найдена.")
else:
    # Подключение к PostgreSQL
    try:
        with psycopg2.connect(dbname="research", user="user", password="pass") as conn:
            with conn.cursor() as cur:

                # Функция обработки CSV
                def process_csv(file_path):
                    try:
                        data = pd.read_csv(file_path)
                        for index, row in data.iterrows():
                            cur.execute("INSERT INTO exogenous_data (timestamp, value, location) VALUES (%s, %s, %s)",
                                        (row['time'], row['value'], row['coords']))
                        conn.commit()
                        print(f"Обработан файл: {file_path}")
                    except Exception as e:
                        print(f"Ошибка в файле {file_path}: {e}")
                        conn.rollback()

                # Автоматическая обработка файлов
                for filename in os.listdir(data_dir):
                    if filename.endswith(".csv"):
                        file_path = os.path.join(data_dir, filename)
                        process_csv(file_path)
    except Exception as e:
        print(f"Ошибка подключения к базе данных: {e}")
```

Рисунок 3. Наработки программного кода модуля для автоматического переноса данных экзогенных процессов в PostgreSQL

В дальнейшем планируется расширить функциональность модуля, добавив поддержку обработки JSON-файлов с метаданными опасных экзогенных процессов, интеграцию с геоинформационными системами через расширение PostGIS для анализа пространственных данных, а также внедрение системы логирования для отслеживания ошибок и статистики импорта.

Выводы

Предложенная концепция модуля для переноса и хранение данных полевых наблюдений опасных экзогенных процессов из мобильного приложения в СУБД PostgreSQL демонстрирует потенциал для эффективного решения задач хранения и анализа геологических данных. Использование PostgreSQL с расширением PostGIS обеспечивает поддержку пространственных запросов и гибкость структуры базы данных, что достаточно важно для работы с разнородными данными, такими как координаты, временные ряды и количественные параметры.

Библиография

1. Кузнецов А. В., Иванов П. С. "Анализ производительности баз данных PostgreSQL/PostGIS и MongoDB для геопространственных задач" [Электронный ресурс]. – 2020 – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/339123456, по бесплатной регистрации на 28.02.2025.

2. Драч В.Е. **и** Ильичев В.Ю. "Анализ популярных реляционных систем управления базами данных" [Электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: https://drach.pro/blog/hi-tech/item/196-popular-relational-dbms-2022, свободный на 28.02.2025.

3. PostgreSQL — Википедия [Электронный ресурс]. – 2025 – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/PostgreSQL, свободный на 28.02.2025.

4. PostGIS [Электронный ресурс]. – 2023 – Режим доступа: https://postgis.net/, свободный на 28.02.2025.

Объектно-ориентированный подход при решении двумерной прямой задачи МТЗ

*Родионов Е.А. (ИФЗ РАН, **rodionovea@ifz.ru**),*
Градин И.С. (МГРИ, gradin505@gmail.com)*

Аннотация

Доклад посвящен разработке модульного программного комплекса для моделирования магнитотеллурических полей в двумерных неоднородных средах на основе объектно-ориентированной парадигмы. Представлена иерархия классов, реализующих три метода численного решения уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. метод конечных разностей, вариационно-разностный метод, метод конечных элементов в сочетании с методом Галеркина.

Ключевые слова

ООП, МТЗ, прямая задача, краевая задача, численные методы решения СЛАУ

Теория

Взаимодействие электромагнитного поля ($\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$, $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$) и двумерной среды, характеризующейся удельным сопротивлением $\rho(y,z)$, в квазистационарном приближении систем уравнений Максвелла в частотной области на заданной циклической частоте ω сводится к двум независимым системам уравнений в частных производных

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial z}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial y}\right)+\mathrm{i}\omega\mu H_x(y,z)=0, \\ E_y(y,z)=\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial z}, \\ E_z(y,z)=-\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial y}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial z^2}+\dfrac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial y^2}+\dfrac{\mathrm{i}\omega\mu}{\rho(y,z)}(y,z)E_x(y,z)=0, \\ H_y(y,z)=\dfrac{1}{\mathrm{i}\omega\mu}\dfrac{\partial E_x(y,z)}{\partial z}, \\ H_z(y,z)=-\dfrac{1}{\mathrm{i}\omega\mu}\dfrac{\partial E_x(y,z)}{\partial y}, \end{cases}$$

здесь i – мнимая, μ – магнитная проницаемость вакуума. Первая система носит название E-поляризации, вторая – H-поляризации.

Для первых уравнений этих систем можно сформулировать краевые задачи со смешанными граничными условиями в прямоугольной области $[0,y_B]\times[z_0, z_B]$ следующим образом: для H-поляризации,

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial z}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\rho(y,z)\dfrac{\partial H_x(y,z)}{\partial y}\right)+\mathrm{i}\omega\mu H_x(y,z)=0, \\ H_x(y,z_B)=0, H_x(y,z_0)=const, \quad 0\le y\le y_B, \\ \dfrac{\partial H_x(0,z)}{\partial y}=\dfrac{\partial H_x(y_B,z)}{\partial y}=0\,, \quad z_0\le z\le z_B, \end{cases}$$

и для E-поляризации,

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial z^2} + \dfrac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial y^2} + \dfrac{\mathrm{i}\omega\mu}{\rho(y,z)} E_x(y,z) = 0, \\ E_x(y,z_B) = 0, E_x(y,z_0) = const, \qquad 0 \le y \le y_B, \\ \dfrac{\partial E_x(0,z)}{\partial y} = \dfrac{\partial E_x(y_B,z)}{\partial y} = 0, \qquad z_0 \le z \le z_B, \end{cases}$$

где z_0 можно положить равным –110 км (высота, на которой находится естественный источник). Значение $const$ зависит от источника и выбранной частоты, эта константа сокращается при расчете итоговых характеристик на поверхности Земли: двух компонент тензора импеданса,

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}, \qquad Z_{xy} = \frac{E_y}{H_x},$$

и типпера,

$$W_{zy} = \frac{H_z}{H_y}.$$

Авторами реализованы три способа решения уравнений этих задач: метод конечных разностей [2], вариационно-разностный метод [3,5] и метод конечных элементов в совокупности с методом Галеркина [4].

В ходе решения уравнений каждым из указанных способов возникает система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с блочной трехдиагональной матрицей, которая может решаться методом матричной прогонки или итерационными методами, такими как метод Якоби, Гаусса-Зейделя или метод верхней релаксации [1].

Объектно-ориентированный подход

Для реализации различных упомянутых численных методов и подходов решения прямой задачи МТЗ разработана модульная объектно-ориентированная архитектура на языке Python. Ее ядром является иерархия классов, обеспечивающая унификацию расчетов для разных поляризаций и различных способов решения и численных методов.

Базовый класс MTSSolverBase инкапсулирует общую логику задачи.

- управление геометрией расчетной области через объект ResistivityGrid, содержащий параметры сетки.
- расчет коэффициентов СЛАУ для H- и E-поляризаций;
- реализация методов решения СЛАУ (матричная прогонка, блочные итерационные алгоритмы);
- постобработка результатов (вычисление компонент тензора импедансов, типпера, кажущихся сопротивлений, фаз).

Абстрактные методы класса (_calc_hpol_coefficients, _apply_boundary_conditions и др.) задают шаблон для реализации специфичных алгоритмов в дочерних классах.

Производные классы реализуют построение конкретной СЛАУ:

1. FD_MTSolver (метод конечных разностей).
2. VD_MTSolver (вариационно-разностный метод).
3. FE_MTSolver (метод конечных элементов).

Вспомогательные классы завершают архитектуру:

- ResistivityGrid автоматизирует построение адаптивных сеток: задает аномальную область с детализацией, добавляет переходные зоны с экспоненциальным ростом шага, генерирует воздушные слои.
- MultiPeriodSolver организует мультичастотные расчеты: инициализирует решатель для каждого периода, агрегирует результаты, предоставляет инструменты визуализации (рис. 1, графики кажущихся сопротивлений, фаз импедансов и др.) и экспорта данных.

Преимущества архитектуры:

- инкапсуляция: каждый класс отвечает за отдельный аспект задачи (сетка, дискретизация, решение СЛАУ, мультичастотный анализ), что упрощает отладку и модификацию кода.
- Полиморфизм: единый интерфейс вызова методов решения (solve_system()) для всех типов дискретизации. Переключение между тремя способами решения или между доступными методами решения СЛАУ требует изменения лишь одного параметра.
- Расширяемость: добавление новых методов сводится к созданию класса-наследника MTSSolverBase с переопределением абстрактных методов, не затрагивая существующую логику.

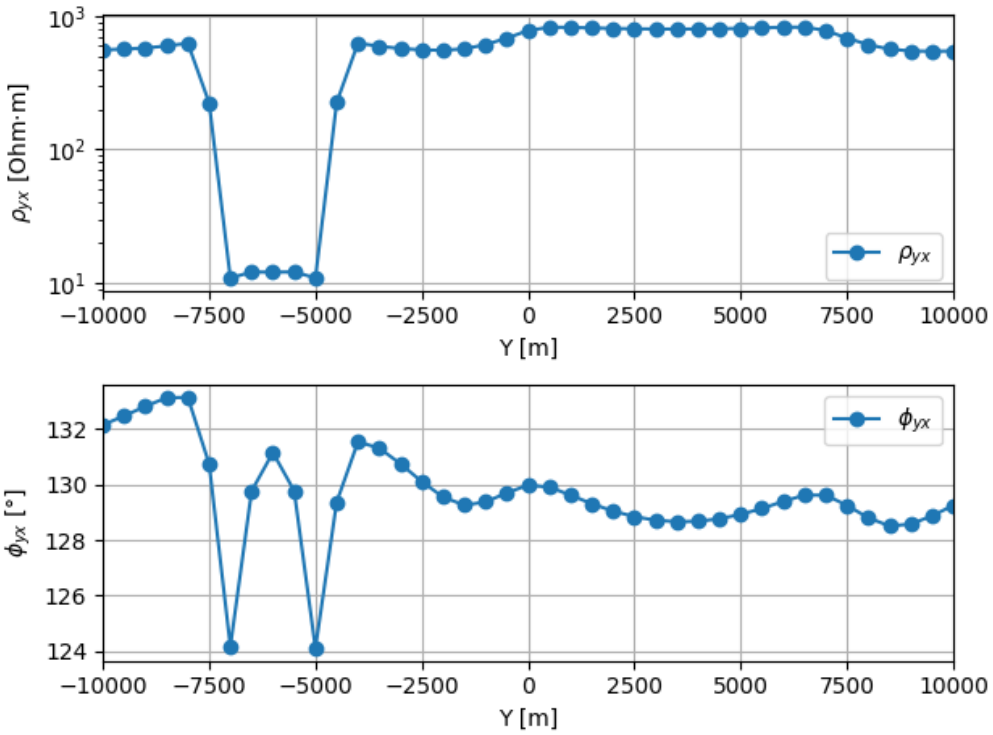


Рисунок 1. Визуализация графиков кажущегося сопротивления и фазы импеданса для случая H-поляризации

Выводы

Разработан объектно-ориентированный фреймворк для решения двумерных прямых задач МТЗ, объединяющий методы конечных разностей, вариационно-разностный подход и метод конечных элементов в единую модульную структуру. Это позволяет гибко выбирать алгоритм под конкретную геоэлектрическую модель, автоматизировать расчеты для сетки периодов и

сравнивать результаты разных методов в идентичных условиях. Унификация интерфейсов и наследование классов упрощают расширение функционала (например, добавление 3D-расчетов).

Библиография

1. Самарский А.А., Гулин. А.В. Численные методы. –М.: Наука, 2003, 432 с.
2. Численные методы [Электронный ресурс]/. Бахвалов Н. С, Жидков Н. П., Кобельков Г. М. . — 8-е изд. (эл.). — Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 639 с.). — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — (Классический университетский учебник).
3. Юдин М.И., Казанцева Е.В. «Вычисление коэффициентов разностной схемы на основе вариационного подхода при решении прямой задачи МТЗ методом сеток в двумерной среде». Известия высших учебных заведений, раздел «Геология и разведка», 1981, № 1948-81 деп.
4. Červ V. Numerical modelling of geoelectric structures using the Galerkin and finite elements methods. Studia Geophysica et Geodaetica, №22. 1978, P. 283-294.
5. Rodi. William L. «A Technique for Improving the Accuracy of Finite Element Solutions for Magnetotelluric Data». Geophysical Journal International, Volume 44, Issue 2, February 1976, Pages 483–506.

Прогноз замещения недостающих данных на картах методами машинного обучения

Тюрин Ф.А.* (МГРИ, shepard182@mail.ru),
Ахметсафин Р.Д. (МГРИ, ahmetsafinrd@mgri.ru)

Аннотация

Исследование направлено на оценку возможностей данных алгоритмов для автоматизированного восстановления «белых пятен» в геоданных, что позволит повысить полноту анализа картографических данных.

Экспериментальная часть работы будет включать предварительную обработку реальных геоданных, их анализ и обучение моделей с последующей оценкой результатов. Заострим внимание на оценке ошибок прогнозирования и вычислительной эффективности методов, что имеет практическую значимость для оперативной интерпретации пространственной информации в условиях ограниченности исходных данных.

Как результат, разрабатывается плагин QGIS для работы с векторными слоями с применением методов машинного обучения.

Используемые методы

В данной работе планируется разработка и апробация методологии прогнозирования замещения недостающих данных на геофизических картах с использованием методов машинного обучения. Будут рассмотрены и сравнительно проанализированы такие методы, как искусственные нейронные сети (ANN), Адаптивные сети на основе системы нечеткого вывода (ANFIS), Нечеткие регрессионные прогнозные модели (FM), метод опорных векторов (SVR), метод k-ближайших соседей (k-NN), регрессия гауссовского процесса (GPR), деревья регрессии (RT) и ансамблевый метод «случайный лес» (RF).

Обработка результатов

Полученные результаты позволят сформировать рекомендации по оптимальному выбору методов машинного обучения для задач замещения недостающих данных в геоинформационных системах, способствуя повышению надежности и автоматизации геофизического анализа.

Ключевые слова

ГИС, картография, прогнозирование, замещение данных, машинное обучение

Теория

Современные геоинформационные системы (ГИС) часто сталкиваются с проблемой наличия «белых пятен» – областей, где данные отсутствуют или представлены неполно. Это связано с ограничениями измерительных технологий, трудностями доступа к некоторым территориям и другими внешними факторами. Неполные данные негативно сказываются на точности картографических анализов, что в свою очередь может приводить к ошибочным выводам при планировании и принятии управленческих решений. Теоретическая база данной работы опирается на современные методы машинного обучения (ML), способные не только восстанавливать недостающие значения, но и автоматизировать процесс анализа пространственной информации.

Работая с картографическими данными, аналитик часто сталкивается с частично испорченными или отсутствующими данными, которые негативно влияют на анализ данных. Поэтому использование алгоритмов машинного обучения для автоматизированного восстановления пропусков представляет собой перспективное направление, способное повысить полноту и качество картографической информации.

В рамках исследовательской работы планируется провести анализ следующих ML-алгоритмов:

ANN(Artificial Neural Networks) Искуственные нейронные сети. Основными обрабатывающими элементами искусственной нейронной сети являются нейроны. В нейронной сети блоки нейронов размещаются слоями и соединяются таким образом, что информация передается однонаправленно, от входных блоков - через блоки, расположенные на скрытых слоях - к блокам в выходном слое. Нейрон в основном выполняет линейную регрессию, за которой следует нелинейная функция. Нейроны разных слоев связаны между собой соответствующими связями (весами). Задача алгоритма обучения состоит в том, чтобы найти набор весов, который гарантирует, что для каждого входного вектора результирующий вектор из сети будет таким же или достаточно близким к выходному вектору.

ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*): Адаптивные сети на основе системы нечеткого вывода. Это искусственная нейронная сеть, основанная на нечеткой системе вывода Такаги-Сугено.

FM (Fuzzy Models): Нечеткие регрессионные прогнозные модели. Метод разработан Робертом Бабушка (Babuška R.) в конце 1990-х годов. Метод предполагает 3 этапа обучения: (1) кластеризация по алгоритму Густафсона-Кесселя (Gustafson-Kessel); (2) построение по МНК регрессионных моделей (как линейных так и нелинейных) для каждого кластера; (3) построение нечеткой системы вывода (Такаги-Сугено) для набора регрессионных моделей.

SVR (*Support-Vector Regression*): Метод опорных векторов. Метод предложен Владимиром Вапником (Vapnik V.N.) в конце 1960-х годов. Первоначально он был разработан как метод линейной классификации, позднее обобщен на нелинейный классификатор и, наконец, был применен к регрессионным задачам. Основная идея метода заключается в трансформации входных объектов в некоторое многомерное пространство, где они могут быть линейно разделены на классы гиперплоскостями.

k-NN (*k-Nearest Neighbors*): Метод *k*-ближайших соседей. Простой алгоритм, который хранит все (!!!) доступные случаи и предсказывает числовую цель на основе меры подобия (например, функции расстояния). Используется в статистической оценке и распознавании образов с начала 1970-х годов как непараметрический метод. Основной принцип метода - объект <**x**, **y**> относится к тому классу, которому принадлежит большинство из его соседей.

GPR (*Gaussian Process Regression*): Регрессия гауссовского процесса является еще одним методом ML на основе ядер для задач нелинейной регрессии. Чтобы вывести неизвестную функциональную зависимость из обучающего набора данных, метод сначала извлекает предшествующую GPR для ограничения возможных форм неизвестной функции (начальная GPR задается или генерируется случайным образом), а затем обновляет ее по обучающей выборке (из обучающего набора) для построения последующей GPR в качестве прототипа окончательной функциональной модели.

RT (*Regression Tree*) Для формирования RT из набора данных выполняется рекурсивное секционирование и множественные регрессии. Начиная с корневого узла, процесс разделения данных в каждом внутреннем узле правила дерева повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие остановки. К каждому из конечных узлов, или листьев, прикрепляется простая регрессионную модель. После завершения процесса формирования дерева может быть применена обрезка с целью улучшения способности дерева к обобщению путем уменьшения его структурной сложности.

RF (*Random Forests* (Ensemble Regression)): «Случайный лес», ансамблевые методы прогнозирования. Алгоритм машинного обучения, предложенный Лео Брейманом и Адель Катлер (Leo Breiman and Adele Cutler), заключающийся в применении ансамбля решающих деревьев. Алгоритм, применяется для решения задач классификации, регрессии и кластеризации. Основная идея заключается в использовании большого ансамбля решающих деревьев, каждое из которых само по себе даёт очень невысокое качество классификации или регрессии, но за счёт их большого количества результат получается хорошим.

Применение ML методов в ГИС

Использование описанных методов в задачах восстановления недостающих данных позволяет значительно повысить качество пространственного анализа. Автоматизация обработки и прогнозирования с применением ML-алгоритмов способствует оперативной интерпретации пространственной информации, что имеет важное практическое значение. Планируется интегрировать разработанные алгоритмы в плагин для QGIS, что позволит работать с векторными слоями и проводить обработку данных непосредственно в рамках стандартных ГИС-инструментов.

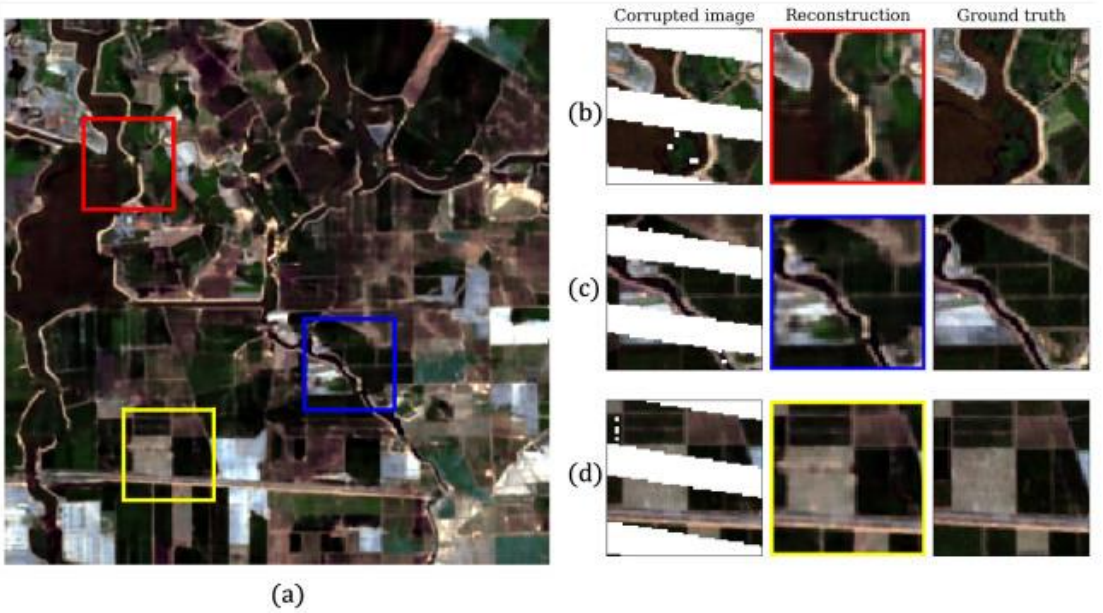


Рисунок 1. Пример восстановления маскированных частей изображения. Исходное изображение (a). Результаты заполнения «белых пятен» (b-d)

Выводы

Исследование предполагает, что применение методов машинного обучения для замещения недостающих данных в геоданных позволит значительно повысить полноту и точность картографического анализа. Ожидается, что сравнительный анализ алгоритмов (ANN, ANFIS, FM, SVR, k-NN, GPR, RT и RF) выявит их ключевые преимущества и ограничения, что позволит оптимально подобрать методику восстановления «белых пятен» для конкретных ГИС-приложений.

Интеграция разработанных алгоритмов в плагин для QGIS должна обеспечить автоматизацию обработки векторных слоев и упростить практическое применение методологии в реальных условиях. Планируется, что оценка ошибок прогнозирования и вычислительной эффективности позволит сформировать рекомендации по оптимальному выбору методов для задач геофизического анализа.

Таким образом, ожидается, что результаты исследования подтвердят перспективность использования машинного обучения для восстановления недостающих данных и внесут вклад в повышение надежности и автоматизации геофизического анализа в современных картографических системах.

Библиография

1. Белозеров Б. В., Бочков А. С., Ушмаев О. С., Фукс О. М. Использование метода ближайших соседей при восстановлении обстановки осадконакопления //Машинное обучение и анализ данных. – 2014. – Т. 1. – №. 9. – С. 1319-1329.
2. Егоров С. В., Приезжев И. И., Попова П. Ф., Гладков Е. А. Применение алгоритмов машинного обучения для решения задач количественного прогноза ФЕС по сейсмическим и скважинным данным //ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 259-262.
3. Ashena R., Thonhauser G. Application of Artificial Neural Networks in Geoscience and Petroleum Industry //Artificial Intelligent Approaches in Petroleum Geosciences. – Springer, Cham, 2015. – С. 127-166.
4. Asante-Okyere S., Shen C., Yevenyo Ziggah Y., Moses Rulegeya M., Zhu, X. Investigating the predictive performance of gaussian process regression in evaluating reservoir porosity and permeability //Energies. – 2018. – Т. 11. – №. 12. – С. 3261.
5. Babuška R. Fuzzy modelling and identification toolbox //Control Engineering Laboratory, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, version. – 2000. – Т. 3.
6. Bahrpeyma F., Golchin B., Cranganu C. Fast fuzzy modeling method to estimate missing logsin hydrocarbon reservoirs //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – Т. 112. – С. 310-321.
7. Breiman L. Random forests //Machine learning. – 2001. – Т. 45. – №. 1. – С. 5-32.

Применение нейросетевых архитектур для решения трехмерных структурных обратных задач в геофизике

Шимелевич М.И. (МГРИ, shimelevich-m@yandex.ru),
Оборнев Е.А. (МГРИ,* obornevea@mgri.ru*),
Оборнев И.Е.* (НИИЯФ МГУ,* o_ivano@mail.ru*),
Родионов Е.А. (ИФЗ РАН, rodionovea@mgri.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается применение адаптивных свёрточных нейросетевых архитектур для решения трехмерных обратных задач в структурной геофизике. Разработан объектно-ориентированный подход к моделированию геофизических данных, включающий создание базы данных типовых иерархических структурных моделей (грабены, горсты, нормальные и обратные разломы) и расчет прямых задач.

Использование свёрточных нейронных сетей с архитектурами, извлекающими локальные признаки, а также методов трансферного обучения позволило улучшить обобщающую способность моделей и адаптировать их к специфике различных геофизических классов по сравнению с многослойными персептронами.

Полученные численные результаты демонстрируют принципиальную возможность применения предложенного подхода к решению структурных обратных задач в геофизике. Дополнительно обсуждаются возможные перспективы расширения методологии для анализа сложных неоднородных сред, а также адаптация модели для работы с разнородными источниками геофизических данных.

Ключевые слова

Геофизическое моделирование, свёрточные нейронные сети, обратные задачи

Источники финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00266, https://rscf.ru/project/24-11-00266/

Введение

Нейронные сети обладают уникальными аппроксимационными и интерполяционными свойствами, что делает их эффективным инструментом для решения задач вычислительной математики. С 90-х годов XX века они успешно применяются для решения обратных задач математической физики, включая задачи геофизики. Основной подход заключается в представлении неизвестного оператора обратной задачи в виде нейронной сети, параметры которой оптимизируются на основе банка решений прямых задач. Однако традиционные нейронные сети сталкиваются с ограничениями при обработке данных высокой размерности, особенно в условиях ограниченного объёма обучающих данных.

В данной работе предлагается использование адаптивных сверточных нейронных сетей, способных учитывать специфические особенности структур входных данных и обеспечивать высокую точность и устойчивость решений. Исследование основано на результатах, опубликованных ранее авторами [1-3], и является развитием методологий проекта РНФ № 19-11-00333П.

Методология

Описание структуры базы данных

Для решения задач трёхмерного моделирования была создана иерархическая модель классов, включающая типовые структуры, такие как грабены, горсты, сбросы и взбросы. База

данных содержит синтезированные решения прямых задач для трёх методов геофизических измерений: гравиразведка, магнитометрия и электроразведка. Разработанная схема интегрирована в запатентованную базу данных типовых иерархических геофизических структур [4].

1. **Базовый класс LR0:** Служит основой для генерации многослойных данных с переменными границами. Включает функции сглаживания с использованием гауссовых фильтров. В классе LR0 было создано 30 000 примеров.
2. **Наследуемые подклассы:** Созданы подклассы для различных типов структур (сбросы, взбросы, горсты и грабены), каждый из которых содержит по 5 000 примеров.
3. **Параметризация моделей:** Каждая модель описывалась геометрическими параметрами трёх границ слоёв на площади 15×15 км с шагом измерения 0,5 км. Сила разлома варьировалась от 100 до 300 метров.

Для всех классов структур были рассчитаны базы данных, которые включали синтезированные решения прямых задач для трёх методов геофизических измерений: гравиразведка (G), магнитометрия (M) и электроразведка (E). Каждая запись базы данных содержала полное соотношение между параметрами среды и синтезированным полем, что обеспечивало возможность детального анализа обратных задач.

Решение обратной задачи

Решалась задача определения геометрических параметров трёх границ слоёв моделей. В качестве базовых алгоритмов использовались:

1. **Метод проекций на латентные структуры (PLS):** Линейный метод, который показал базовый уровень качества.
2. **Алгоритм случайного леса (RF):** Использовалось 10 деревьев с глубиной 3.
3. **Гистограммный градиентный бустинг (HGB):** Настроен с использованием 100 итераций, скорости обучения 0.1, максимальной глубины дерева 3 и минимального размера листа 20.
4. **Многослойный перцептрон (MLP):** Архитектура с тремя скрытыми слоями (64, 32 и 16 нейронов) и логистической функцией активации в скрытых слоях.
5. **Адаптированные нейронные сети с выделением свёрточного окна (NNA):** Этот метод сочетает преимущества сверточных нейронных сетей в извлечении пространственных зависимостей и стандартных полносвязных слоёв для интеграции информации.

Обучение проводилось на всей базе данных без разделения на подклассы. Анализ результатов (рис.1) показал, что нелинейные методы (HGB и нейронные сети) демонстрируют более высокую точность по сравнению с линейными методами. Особенно эффективными оказались адаптированные нейронные сети с выделением свёрточного окна, которые учитывают локальные особенности данных.

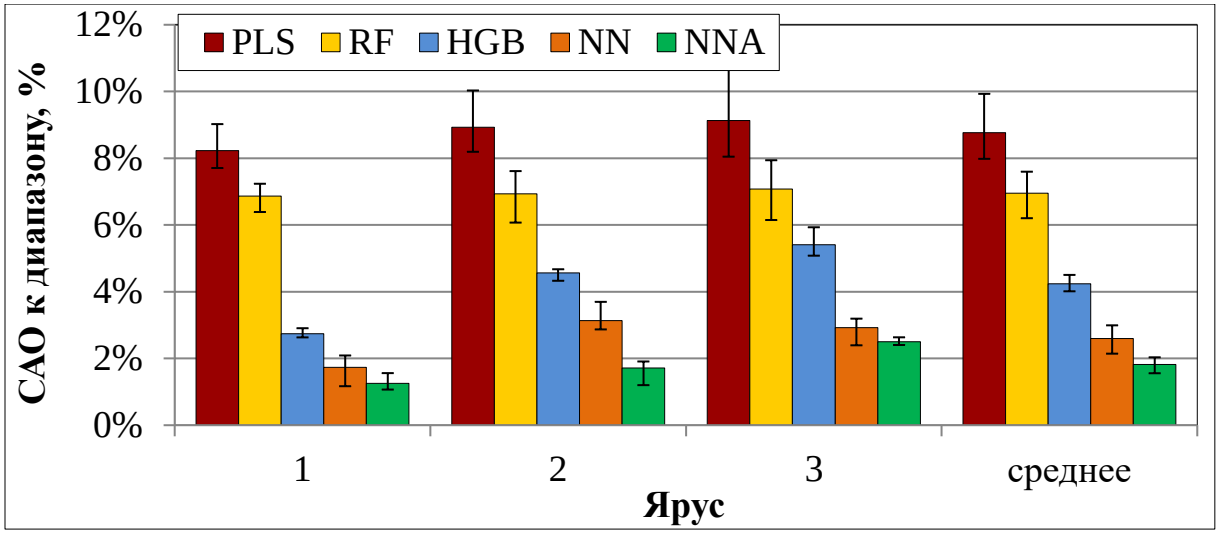


Рисунок 1. Сравнение результатов решения обратной задачи разведочной геофизики различными методами машинного обучения

Двухэтапное решение задачи

Решение задачи было разделено на два этапа:

Классификация: На первом этапе разработан классификатор для определения принадлежности входных данных к конкретному классу. Сравнивались три подхода:

- **Классическая нейронная сеть (NN):** Простая архитектура с полносвязными слоями.
- **Свёрточная нейронная сеть (CNN):** Использует свёрточные слои для выделения значимых признаков.
- **Улучшенная свёрточная нейронная сеть (CNN+):** Включает дополнительные слои, такие как Dropout, для повышения устойчивости модели.

Наилучшие результаты показала CNN+, которая учитывает пространственные особенности данных и предотвращает переобучение.

Регрессия: На втором этапе применялся аппроксиматор на основе адаптированных нейронных сетей с выделением свёрточного окна (NNA). Этот подход позволил учитывать специфические особенности каждого класса, что значительно повысило точность решений. Адаптация свёрточного окна позволила модели учитывать тонкости структуры данных, характерных для конкретного класса, что существенно улучшило общую производительность и точность модели.

Выводы

В работе продемонстрирована эффективность двухэтапного подхода к решению обратных задач в трёхмерных иерархических структурах. Использование улучшенных свёрточных нейронных сетей (CNN+) для классификации и адаптированных нейронных сетей с выделением свёрточного окна (NNA) для регрессии позволило достичь высокой точности и устойчивости решений. Результаты подтверждают возможность дальнейшего применения данного подхода для анализа данных высокой размерности.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Библиография

1. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Оборнев И.Е., Родионов Е.А. Алгоритм решения обратных задач геоэлектрики на основе нейросетевого аппроксимационного метода // Numerical Analysis and Applications. – 2018. – Т. 11(4). – С. 359–371.

2. Оборнев Е.А., Оборнев И.Е., Родионов Е.А., Шимелевич М.И. Применение нейросетевых методов в нелинейных обратных задачах геофизики // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2020. – Т. 60(6). – С. 1025–1036.

3. Шимелевич М.И., Родионов Е.А., Оборнев И.Е., Оборнев Е.А. 3D-нейросетевой инверсный анализ полевых геоэлектрических данных // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2022. – Т. 58(5). – С. 605–614.

4. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Оборнев И.Е., Родионов Е.А., Доленко С.А., Исаев И.В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623655 от 26 октября 2023 г.

Цифровые модели управления сбытовыми сетями: сравнительный анализ на примере предприятий минерально-сырьевого комплекса

Симонцев Д.А.* (МГРИ, simontsevdenis@gmail.com),
Савотченко С.Е. (МГРИ,* savotchenkose@mgri.ru*)

Аннотация

В работе проведен сравнительный анализ моделей управлений на примере предприятий минерально-сырьевого комплекса в условиях ускоренной цифровизации. Выявлены преимущества и недоставки используемых моделей. Сформулированы основные критерии эффективности применения цифровых моделей управления. Предложеныь рекомендации для развития сбытовой сети в условиях цифровой трансформации экономики и управления. Особое внимание уделено применению технологий Big Data и искусственного интеллекта в управлении сбытовой сетью.

Ключевые слова

Цифровые модели; цифровизация; цифровая трансформация; минерально-сырьевой комплекс; управление

Теория

Эффективность управления сбытовой сетью для предприятий минерально-сырьевого комплекса определяется множеством внешних и внутренних факторов, влияющих на устойчивость и гибкость системы дистрибуции. К внешним факторам, оказывающим воздействие на сбыт, относится экономическая ситуация, определяющая покупательскую способность и инвестиционную активность в сельском хозяйстве [1]. В условиях ускоренной цифровизации и возрастающей конкуренции традиционные методы управления дополняются современными подходами, такими как автоматизация процессов, внедрение CRM и ERP-систем.

Проанализируем применение цифровых моделей в управлении сбытовой сетью в крупных производственных холдингах минерально-сырьевого комплекса на примере компаний «ФосАгро» и «ЕвроХим». Группа «ФосАгро» – крупнейший поставщик всех видов удобрений на российском рынке. Компания располагает горнодобывающими и перерабатывающими предприятиями с собственной логистической инфраструктурой. Группа «ЕвроХим» разрабатывает месторождения калийной и фосфатной руды высокого качества, а также залежи железной руды и бадделеита. Компания «ФосАгро», используя модель «управляющая компания — группа управляемых предприятий», активно внедряет цифровые технологии. «ЕвроХим» использует цифровые платформы и автоматизацию для достижения высокой гибкости.

Таким образом, современные методы управления сбытовыми сетями в производственных холдингах сочетают традиционные подходы с новыми технологиями, что позволяет компаниям не только поддерживать стандарты обслуживания и оперативно реагировать на изменения рынка, но и формировать устойчивые конкурентные преимущества. [2]. Основные цифровые инструменты и технологии, применяемые в управлении сбытовой сетью представлены в Таблице 1.

Выделим основные критерии эффективности применения цифровых моделей управления и сравним их на примере рассматриваемых компаний.

1. Цифровая трансформация сбытовой сети. Она предполагает внедрение цифровых технологий и платформ для управления процессами дистрибуции, взаимодействия с клиентами и анализа данных [3]. Включение цифровых инструментов позволяет автоматизировать рутинные операции, получать своевременные данные и обеспечивать прозрачность на всех уровнях [4].

Пример применения: «ФосАгро» активно внедряет цифровые инструменты, такие как CRM-системы, которые позволяют компании получать информацию о потребностях клиентов и улучшать взаимодействие с ними на региональном уровне. Система централизованно управляется управляющей компанией и поддерживает стандарты обслуживания, при этом региональные подразделения могут адаптироваться к особенностям своего рынка.

2. Автоматизация процессов и использование цифровых платформ. Она позволяет холдингам снизить расходы на операционные процессы, повысить скорость и точность выполнения заказов [5]. Автоматизированные платформы позволяют компании контролировать запасы на складах, координировать поставки, управлять логистикой и оптимизировать маршруты доставки.

Пример применения: В «ЕвроХим» автоматизация помогает сократить затраты на логистику и минимизировать ошибки в обработке заказов. Использование централизованных цифровых платформ дает компании возможность координировать операции между региональными центрами и центральным офисом.

3. Внедрение CRM и ERP-систем. CRM-системы помогают управлять отношениями с клиентами, отслеживать историю взаимодействий, анализировать потребности и повышать уровень удовлетворенности. ERP-системы обеспечивают интеграцию всех бизнес-процессов, включая производство, дистрибуцию, логистику и финансы, что позволяет компании централизованно управлять всей цепочкой поставок.

Пример применения: В компании «ФосАгро» CRM-системы помогают улучшить взаимодействие с клиентами на местах, оперативно реагировать на запросы и обеспечивать высокий уровень сервиса. ERP-системы в свою очередь поддерживают управляемость всех операций, от производства до складирования и доставки.

4. Модель управления на основе данных (Data-Driven Management). Управление на основе данных предполагает использование Big Data и аналитических инструментов для оценки спроса, выявления сезонных колебаний и определения ключевых потребностей клиентов. Аналитика данных позволяет точнее прогнозировать объемы продаж, что помогает избегать дефицита или излишков продукции и оптимизировать работу складов.

Пример применения: «ФосАгро» использует аналитику данных для прогнозирования спроса и планирования поставок, что позволяет компании минимизировать затраты на хранение и логистику, а также своевременно обеспечивать потребности клиентов.

Рассмотрим и сравним далее применение цифровых моделей. Компания «ФосАгро», благодаря модели «управляющая компания — группа управляемых предприятий», эффективно использует цифровые технологии для управления своей сбытовой сетью. Подходы «ФосАгро» и «ЕвроХим» к управлению сбытовой сетью представляют собой две различные модели, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками. «ФосАгро» использует высокоцентрализованное управление, которое позволяет поддерживать стандарты обслуживания и оптимизировать процессы на всех уровнях, однако снижает гибкость на местах. «ЕвроХим», напротив, полагается на децентрализованное управление, которое дает региональным офисам большую свободу действий и возможность быстрой адаптации к локальным условиям, но затрудняет стандартизацию и централизованное внедрение цифровых технологий.

Таблица 1. Основные цифровые инструменты и технологии, применяемые в управлении сбытовой сетью

Элемент цифровой трансформации	Описание и функции	Применение в компаниях
CRM-системы (Customer Relationship Management)	Управление клиентскими данными, история взаимодействий, повышение удовлетворённости клиентов	Используются обеими компаниями, в «ФосАгро» – централизованно
ERP-системы (Enterprise Resource Planning)	Интеграция всех бизнес-процессов: производство, логистика, финансы	В «ФосАгро» полная интеграция, в «ЕвроХим» частичная, на уровне регионов
Автоматизация логистики и склада	Управление поставками, оптимизация маршрутов, контроль запасов	В обоих холдингах, у «ЕвроХим» акцент на региональной гибкости
Цифровые платформы управления	Координация операций, централизованное хранение данных	В «ФосАгро» централизованная платформа, в «ЕвроХим» – децентрализованные
Big Data и аналитика	Прогнозирование спроса, выявление трендов, оптимизация работы складов	В «ФосАгро» используется централизованный аналитический подход
Искусственный интеллект (AI)	Интерпретация больших массивов данных, выявление скрытых закономерностей	Рекомендовано к интеграции обеими компаниями в рамках дальнейшей трансформации

Преимущества модели «ФосАгро»:

1. Высокий уровень контроля и стандартизации: централизованное управление позволяет компании сохранять высокое качество обслуживания и единые стандарты для всех зависимых региональных структур.

2. Эффективное использование цифровых технологий: управляющая компания координирует процессы с помощью ERP и CRM-систем, что позволяет оптимизировать логистику, прогнозировать спрос и минимизировать операционные издержки.

3. Централизованное принятие решений: модель позволяет компании быстро внедрять стратегические изменения и управлять сетью на основе централизованного анализа данных.

Недостатки модели «ФосАгро»:

1. Ограниченная гибкость управляемых предприятий: высокая степень стандартизации снижает возможности региональных структур оперативно адаптироваться к локальным условиям и потребностям клиентов.

2. Меньше возможностей для локальных инноваций: централизованная модель ограничивает возможности управляемых предприятий в разработке и тестировании новых подходов, которые могли бы быть эффективными в конкретных регионах.

Преимущества модели «ЕвроХим»:

1. Высокая адаптивность к локальным рынкам: децентрализованное управление позволяет региональным офисам оперативно реагировать на изменения в спросе и адаптироваться к специфическим условиям каждого региона.

2. Повышенная автономия региональных структур: региональные подразделения могут выбирать наиболее подходящие инструменты и подходы к работе с клиентами, что делает компанию более гибкой и конкурентоспособной в различных рыночных условиях.

Недостатки модели «ЕвроХим»:

1. Сложности в контроле и стандартизации: отсутствие строгого контроля со стороны центрального офиса может приводить к неединообразной политике обслуживания клиентов и к неравномерному уровню качества.

2. Трудности в интеграции цифровых решений: внедрение централизованных цифровых систем может быть затруднено, так как региональные подразделения используют разные подходы и платформы, что может усложнять обмен данными.

Можно предложить следующие рекомендации для развития сбытовой сети в условиях цифровой трансформации экономики и управления.

1. Ускорение цифровизации процессов управления сбытовой сетью. Это позволит снизить операционные издержки, оптимизировать управление запасами и улучшить координацию между управляемыми предприятиями

2. Внедрение интегрированной системы управления на основе современных цифровых технологий. Такая система позволяет объединить стратегическое планирование и контроль, осуществляемый центральным офисом, с оперативным управлением на уровне управляемых предприятий. Она создаёт условия для синхронизации действий между уровнями управления, что особенно важно для компаний с разветвлённой сетью подразделений.

3. Использование Big Data [6], искусственного интеллекта для анализа данных по производительности сбытовой сети, прогнозирования спроса и оптимизации запасов складского хранения. Благодаря этим инструментам можно не только анализировать производительность сбытовой сети, но и прогнозировать спрос, оптимизировать управление запасами и улучшать координацию между управляющей компанией и управляемыми предприятиями [7]. Искусственный интеллект помогает интерпретировать эти данные, выявляя скрытые закономерности и зависимости [8].

Интеграция Big Data и искусственного интеллекта в работу компании создаёт основу для более быстрого и точного принятия решений. Это не только снижает операционные издержки, но и улучшает взаимодействие между подразделениями, делая всю структуру управления более гибкой и адаптивной. В результате компания получает значительные конкурентные преимущества, укрепляя свои позиции на рынке и повышая долгосрочную устойчивость.

Библиография

1. Зворыкина Ю.В. Управление отходами недропользования в Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации / Ю.В. Зворыкина, Т.С. Будина, И.С. Кайманаков / Горная промышленность. 2024. № 5. С. 59-65. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-59-65.

2. Симонцев Д.А. Совершенствование системы управления региональной сбытовой сети производственного холдинга // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т.13. № 5А. С. 266-271. DOI: 10.34670/AR.2023.70.66.104.

3. Мелехова,В.Д. Цифровая трансформация в управлении цепочкой поставок // Human Progress. 2019. Т. 5. № 2. С. 1-11. DOI: 10.34709/IM.152.1.

4. Веретёхин А.В. Цифровые трансформации компании: классификация подходов к определению и специфика управления // E-management. 2023. Т. 6, № 2. С. 91-101. DOI https://doi.org/10.26425/2658-3445-2023-6-2-91-101.

5. Горобченко С.Л. Основные направления автоматизации цифровых платформ, структура и алгоритм интегрированного планирования / С.Л. Горобченко, Д.А. Ковалёв, С.А. Войнаш, А.В. Теппоев, Д.А. Нестеров / Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №7. С. 192-198. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-192-193.

6. Kaynak Okyay. Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends [Point of View] / Okyay Kaynak, Shen Yin / Proceedings of the IEEE. 2015. V. 103. P. 143-146. – DOI 10.1109/JPROC.2015.2388958.

7. Савотченко С.Е. Искусственный интеллект: проблемы определения и правового регулирования / С.Е. Савотченко, В.А. Захаров, В.Л. Акапьев / Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IX Международной научной конференции. Том 2: Физические, химические, технические и компьютерные науки. Часть 2. Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. С.238-240.

Актуальность применения анализа больших данных в минерально-сырьевом комплексе в контексте цифровизации экономики и промышленности

Баракин Б.С.* (МГРИ, bbarakin@yandex.ru),
Савотченко С.Е. (МГРИ, savotchenkose@mgri.ru)

Аннотация

В работе анализируется актуальность применения технологий анализа больших данных в минерально-сырьевом комплексе в условиях цифровой трансформаций общества. Описан опыт и обозначены перспективы расширения возможностей применения технологий анализа больших данных в горной промышленности, геологоразведочной деятельности, нефтедобывающей отрасли. Выделены основные преимущества использования технологий больших данных в данных отраслях с указанием конкретных аспектов.

Ключевые слова

Большие данные; цифровизация; цифровая трансформация; минерально-сырьевой комплекс; полезные ископаемые

Теория

В современном высокотехнологическом обществе происходят процессы цифровой трансформации всей экономики и промышленности, в том числе минерально-сырьевого комплекса, горнодобывающей и геологоразведочной отраслей. В условиях интенсификации цифровизации общества технологии больших данных играют ключевую роль в оптимизации управленческих решений и повышении эффективности предприятий, особенно в таких ресурсноемких отраслях, как минерально-сырьевой комплекс [1]. В этом контексте, использование больших данных позволяет не только увеличить производственные показатели, но и значительно улучшить стратегическое планирование и контроль выполнения производственных процессов.

Сущность технологий больших данных (BigData) заключается в обработке и анализе огромных объемов информации, создаваемой различными источниками: от датчиков и промышленных оборудования до финансовых записей и социальных медиа. Применение этих технологий в минерально-сырьевом комплексе открывает новые горизонты для улучшения практически всех аспектов деятельности предприятий, начиная от разведки и добычи полезных ископаемых и заканчивая их переработкой и реализацией на рынке. Технология больших данных предназначена в первую очередь для сбора и обработки большого объема информации разнопланового характера, с цель ее систематизации и оптимизации применения. При использовании данной технологии следует выделить масштабирование возможностей обработки больших данных и расширение областей их использования. В современной литературе выделяют 5 основных принципов работы с большими данными [2], которые схематично представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Принципы работы с большими данными

Современные тренды развития экономики минерально-сырьевого комплекса неразрывно связаны с использование больших данных. Успешный опыт и перспективы расширения в данных отраслях технологий анализа больших данных отмечают многие авторы. В частности, в работе [3] проанализирован опыт их использования при освоении месторождений твердых полезных ископаемых на примере обработки больших данных из различных источников, содержащих информацию о массивах горных пород. Авторы работы [4] рассматривают возможности применение технологий анализа больших данных для оптимизации работы погрузочной техники и автотранспорта в ходе организации горных работ. Низамова А.Т отмечает положительный опыт анализа больших данных в маркшейдерском мониторинге геомеханических процессов на примере горнодобывающих предприятий Узбекистана [5]. По мнение Фадиля Д. М., их внедрение в производственную деятельность в нефтедобывающей отрасли представляет собой сложный процесс, растянутый во времени на несколько этапов [6].

От использования больших данных в деятельности компаний горной промышленности геологоразведочной и нефтедобывающей отраслей ожидается получения целого ряда преимуществ [7]. Одним из главных преимуществ использования технологий больших данных является возможность получения более точных и своевременных управленческих решений. Благодаря анализу больших данных руководители минерально-сырьевых предприятий могут оперативно реагировать на изменения в рыночной конъюнктуре, оптимизировать производственные процессы и снижать издержки. Например, анализ исторических данных позволяет выявить неэффективные технологические цепочки и предложить решения для их оптимизации, что ведет к сокращению затрат и увеличению прибыли.

Еще одним важным аспектом применения больших данных является повышение уровня безопасности на производстве. Технологии больших данных позволяют прогнозировать возможные аварии и аварийные ситуации, анализируя данные с промышленных датчиков и других источников. Это позволяет своевременно выявлять потенциальные угрозы и принимать меры по их предотвращению, что значительно снижает риск аварий и повышает безопасность труда. В частности, на предприятиях минерально-сырьевого комплекса данные с датчиков, установленных на горнодобывающей технике, могут быть использованы для прогнозирования технических неисправностей. Так, алгоритмы больших данных могут выявлять аномалии в работе оборудования, которые могут стать предвестниками серьезных поломок, и своевременно информировать инженеров об этом. Анализ данных о сырье, поступающем на переработку, и производственных процессах позволяет более точно контролировать качество конечного продукта и оперативно вносить изменения в технологический процесс при выявлении

отклонений от нормативных показателей. Это обеспечивает стабильное качество продукции и повышает конкурентоспособность предприятия на рынке [7].

Важным аспектом использования больших данных является также возможность создания и внедрения предиктивных моделей, которые позволяют прогнозировать будущее развитие той или иной ситуации. При этом актуализируются проблемы разработки и совершенствования алгоритмов анализа больших данных, в том числе с использованием технологий машинного обучения, с учетом их адаптации для решения задач геологии и горнодобывающей отрасли [8].

С внедрением технологий больших данных возрастает значение кибербезопасности [9]. Огромные объемы данных, циркулирующих в цифровом пространстве, становятся мишенью для кибератак. Поэтому предприятия, использующие большие данные, должны придавать особое значение защите информации, внедряя современные средства информационной безопасности и регулярно обновляя их. Проблемы обеспечения безопасности и конфиденциальности больших данных являются очень актуальными и требующими специализированных программно-технических решений. Основа иерархической схемы обеспечения безопасности и конфиденциальности больших данных представлена на рис. 2.



Рисунок 2. Обеспечение безопасности и конфиденциальности больших данных

Не менее значимым аспектом является также этическая сторона использования больших данных. Важно учитывать вопросы приватности и защиты персональных данных, особенно в случаях, когда речь идет о данных сотрудников или персонала подрядных организаций. Необходимо обеспечивать, чтобы сбор и анализ данных проводились в строгом соответствии с законодательством и этическими нормами, а персональные данные были надежно защищены [10].

В заключение стоит отметить, что технологии больших данных предоставляют предприятиям минерально-сырьевого комплекса множество возможностей для повышения эффективности и конкурентоспособности. Однако для того чтобы полностью реализовать эти возможности, необходимо не только инвестировать в техническую инфраструктуру и обучение персонала, но и уделять внимание вопросам безопасности и этики. Только таким образом можно обеспечить устойчивое развитие и успешное функционирование предприятий минерально-сырьевого комплекса в условиях стремительно меняющегося технологического ландшафта современного мира и цифровой трансформации экономики, промышленности и общества в целом.

Библиография

1. Мирончук, В.А. Интеграция больших данных и аналитических возможностей в современные системы поддержки принятия решений / В.А. Мирончук, А.Л. Золкин, А.В. Батищев, А.Б. Урусова // Вестник Академии знаний. 2023. № 5(58). С. 227-230.

2. Kaynak, Okyay. Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends [Point of View] / Okyay Kaynak, Shen Yin // Proceedings of the IEEE. 2015. V. 103. P. 143-146. – DOI 10.1109/JPROC.2015.2388958.

3. Рыльникова, М.В. Технологии сбора и обработки больших данных -основа повышения достоверности первичной информации о массивах горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых и техногенных образований / М.В. Рыльникова, М.В. Цупкина, А.Е. Кирков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 1-1. С. 308-327. DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-308-327.

4. Рыльникова, М.В. Большие данные для оптимизации работы погрузочной техники и автотранспорта на горных работах / М.В. Рыльникова, М.А. Макеев, М.В. Кадочников, Д.А. Клебанов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 4. С. 343-354.

5. Низамова, А.Т. Использование систем больших данных в маркшейдерском мониторинге геомеханических процессов // Экономика и социум. 2023. № 4(107)-2. С. 673-679.

6. Фадиль, Д.М. Методы анализа больших данных для оптимизации деятельности нефтяных компаний. Информатика и вычислительная техника и управление. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 11. С. 62-67.

7. Мацко, Н.А. Цифровизация горной промышленности и состояние минерально-сырьевой базы / Н.А. Мацко, М.Ю. Харитонова // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. 2022. № 3(103). С. 37-47. DOI 10.24866/2311-2271/2022-3/37-47.

8. Савотченко, С.Е. Использование алгоритмов оптимизации в задачах трехмерной инверсии массивов геофизических данных / С.Е. Савотченко, С.А. Настасенко / Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IX Международной научной конференции. Том 1: Механико-математические, компьютерные науки, управление / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. С. 200-202

9. Савотченко С.Е., Системная актуализация мероприятий, повышающих эффективность кибербезопасности в условиях цифровизации общества / С.Е. Савотченко, В.Л. Акапьев / Охрана, безопасность, связь. 2024. № 9-1. С. 232-237.

10. Савотченко, С.Е. Искусственный интеллект: проблемы определения и правового регулирования / С.Е. Савотченко, В.А. Захаров, В.Л. Акапьев / Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IX Международной научной конференции. Том 2: Физические, химические, технические и компьютерные науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. С.238-240.