

МИНОБРНАУКИ РОССИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ» (МГРИ)

На правах рукописи

homes

ФАН ТХИ ХОНГ

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ВЬЕТНАМА)

Специальность 1.6.9 – Геофизика (геолого-минералогические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

> Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Петров А. В.

оглавление

ВВЕДЕНИЕ
1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ 12
1.1 Компьютерная технология «GEOSOFT» 13
1.2 Компьютерная технология «GMT» (Generic mapping tool) 17
1.3 Компьютерная технология «Model Vision» 21
1.4 Компьютерная технология «ГИС INTEGRO»
1.5 Компьютерная технология комплексной интерпретации данных
гравиразведки и магниторазведки «СИГМА 3D»
1.6 Программное обеспечение анализа геофизической информации
«ITATII EA»
1./ Компьютерная технология статистического и спектрально- корреляционного анализа ланных «КОСКАЛ 3D»
территории центрального Вьетнама
2 ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ И ГРАДИЕНТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ С
ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ ГРАНИЦ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЛАСТЕЙ И
ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДИСЛОКАЦИЙ
2.1 Особенности оценки статистических атрибутов магнитного и
гравитационного поля в скользящих окнах
2.2 Алгоритм адаптивного скользящего окна
2.3 Алгоритм адаптивного скользящего окона «живой» формы 47
2.4 Результаты оценки статистических атрибутов гравитационного и
магнитного полей центрального Вьетнама 50
2.5 Градиентные характеристики потенциальных геофизических полей 55
2.6 Результаты оценки градиентных характеристик гравитационного и
магнитного полей центральной части Вьетнама 59
3 ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГРАВИТАЦИОННОГО И

МАГН	НИТНОГО	ПОЛЕЙ	ПОСРЕДС	CTBOM	МЕТОДОІ	з линейной	
ΟΠΤΙ	ІМАЛЬНОЙ	ФИЛЬ	ТРАЦИИ	С	ЦЕЛЬЮ	выделения	
РАЗН	ОГЛУБИНН	AH AH	ОМАЛИЕО	БРАЗУЮ	ЩИХ ГН	ЕОЛОГИЧЕСКИХ	
ОБЪЕКТОВ							
3.1	Методы лин	ейной опти	мальной фи	льтрации	в геофизике		
3.2	3.2 Разложение гравитационного и магнитного полей на составляющие 66						
3.3 Оценка и анализ высокочастотной «шумовой» компоненты магнитного поля 75							
4 TE	ЕХНОЛОГИЯ	РАЙОНИ	РОВАНИЯ Т	ГЕРРИТО	РИЙ НА ОД	цнородные по	
МАГНИТНОМУ И ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЯМ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ							
МЕТОДОВ КЛАСТЕР АНАЛИЗА							
4.1	Классифика	ционныеи а	лгоритмы				
4.2 магн	Геологичесн ниторазведки.	кое районир	ование цент	тральной ч	насти Вьетна	ма по данным 93	
4.3	Районирова	ние централ	ьной части	Вьетнама	по данным г	равиразведки 100	
4.4 магн	Районирова ииторазведки.	ние централ	ьной части	Вьетнама	по данным г	равиразведки и 105	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 110							
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ							

введение

Актуальность работы. Двустороннее сотрудничество между Вьетнамом и Российской Федерацией продолжается уже несколько десятилетий и в 2022 будет преобразовано во всеобъемлющее стратегическое сотрудничество. Планируется области дальнейших взаимосвязей и В наук развитие 0 земле между Министерством образования РФ и Вьетнама, включающих совместные научные обмен исследования, студентами Представленная аспирантами. И диссертационная работа является результатом сотрудничества В рамках соглашения между двумя странами согласно постановлению № 3730/QĐ-BGDĐT от 23 сентября 2018 г.

Сегодня, для Вьетнама, решение задачи создания геологических и структурно-тектонических карт является очень востребованной, но встречающей большое трудностей, таких как отсутствие детальных геофизических съемок (магнитных, гравитационных, электроразведочных, радиометрических), соответствующего программного обеспечения интерпретационной обработки геофизических наблюдений, отсутствие собственной научной школы в этой области.

Сотрудничество Вьетнамский компаний с иностранными фирмами и экспертами достаточно ограничено в силу отсутствия интереса решения ими общегеологических задач, не связанных с лучением прямых прибылей.

По большому счету основной задачей данной работы является изучение возможностей российской зарубежной научных области И школ B обработки геофизических интерпретационной потенциальных полей, их опробование на результатах геофизических съемок территории Вьетнама, и создание новых методик и технологий анализа геофизических данных с учетом специфики и особенностей геологического строения центральной части Вьетнама.

Диссертационная работа базируется на использовании результатов аэромагнитной съемки и наземной гравиметрической съемок масштаба 1:50000,

проведенных главным управлением геологии и полезных ископаемых Вьетнама, при участии российских экспертов в рамках договора о передаче технологий между компанией научно-техническим предприятием «Гравиметрические технологии»" и генеральным департаментом геологии и полезных ископаемых Вьетнама 1998 года.

Площадь исследуемого района составляет 24240 км^{2,} и он расположен в центральной части Вьетнама (от 13°40' широты до 15°20', от 107°30' долготы до 109°20'). Район является стратегически важным для Вьетнама и по существу является воротами для экономической торговли со странами АСЕАН.

Геологическая изученность района позволяет судить о его высоком потенциале с точки зрения наличия месторождений рудных полезных ископаемых и других минеральных ресурсов. Особенно это касается скрытых месторождений металлических руд. Кроме этого, по результатам проведенных ранее поисковых геологических работ было отмечено много проявлений рудных полезных ископаемых, но детальные исследования не проводились.

Результаты геологических исследований вдоль отдельных, не многочисленных маршрутов, сопровождающие их минералогические исследования показали, что центральная область Вьетнама имеет большой потенциал с точки зрения наличия руд золота, железа, меди, свинца, олова и вольфрама.

Проведение поисковых работ одновременно с геологическим картированием или на основе материалов предшествующих геолого-съёмочных работ предполагает использование геофизических методов исследования для решения задачи поиска месторождений.

Использование результатов интерпретационной обработки геофизических наблюдений в процессе структурно-геологического картирования и районирования исследуемых территорий является актуальной и широко востребованной в прикладной геологии задачей.

Эффективность включения геофизических исследований для достижение этой цели стало возможным благодаря появлению новых интерпретационных и

обрабатывающих компьютерных технологий, стремительному росту производительности современных компьютеров, возможностям средств визуализации и разработке программного обеспечения, ориентированного на обработки решение задач интерпретационной данных гравиразведки И магниторазведки.

Отметим, что если раньше привлечение геофизических методов исследования в процесс структурно-геологического районирования успешно использовалось при поисках месторождений нефти и газа, в достаточно простых геологических условиях слоистых сред, то сегодня становится актуальной решения этой задачи в условиях сложных высокогетерогенных геологических сред с сильной дифференциацией свойств горных пород в пространстве.

Использование гравиразведки и магниторазведки представляет особую актуальность потому, что для центрального части Вьетнама имеются карты магнитного и гравитационного полей. Полученные в работе результаты могут быть успешно использованы при решении прогнозных задач на углеводородное сырье и твердые полезные ископаемые, изучении осадочного чехла и кристаллического фундамента.

Предлагаемые в диссертационной работе технологии интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки позволяет существенно снизить, имеющуюся неоднозначность при решении задач структурнотектонического картирования и прогноза месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, включение результатов интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки с использованием современных компьютерных технологий представляет актуальную и востребованную задачу прикладной геологии.

Цели исследования. Создание графов интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки на основе функционального наполнения компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных *«КОСКАД 3D»* для выделения геологических объектов линейной, кольцевой

и произвольной формы, оценки положение кристаллического фундамент, геологического картирования территории центрального Вьетнама.

Задачи исследования

1. Оценка возможностей методов и алгоритмов, реализованных в компьютерной технологии «*КОСКАД 3D*» для решения задач структурногеологического районирования и геологического картирования;

2. Использование метолов оценки статистических спектрально-И корреляционных характеристик, полного градиента магнитного И гравитационного полей для выделения границ геологических аномалииобразующих объектов линейной, кольцевой и произвольной формы;

3. Применение методов адаптивной линейной фильтрации гравитационного и магнитного полей с целью выделения разноглубинных аномалииобразующих геологических объектов в земной коре и оценке положения кристаллического фундамента;

4. Использовании алгоритмов кластерного анализа при решении задач структурно-геологического картирования и районирования.

Методологическую основу исследования составляют современные методы математического анализа, теории вероятностей, статистических оценок, многомерной статистики, кластерного анализа, спектрально-корреляционного анализа, оптимальной фильтрации.

Научная новизна

1. Разработка оригинальных графов обработки данных гравиразведки и магниторазведки для решения задач геологического районирования на основе функционального наполнения компьютерной технологии статистического и спектрального анализа данных *«КОСКАД 3D»*.

2. Использование результатов оценки статистических атрибутов, полного градиента гравитационного и магнитного полей с целью оконтуривания геологических аномалииобразующих объектов произвольной формы.

3. Использование для оценки положения разноглубинных геологических объектов в земной коре и положения кристаллического фундамента результатов гравитационного автоматического разложения И магнитного полей на линейной составляющие с помощью методов адаптивной оптимальной фильтрации;

4. Включением в процесс структурно-геологического картирования районирования результатов автоматической классификации территорий на однородные по статистическим и спектрально-корреляционным атрибутам гравитационного и магнитного полей области.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в создании компьютерных технологий и сценариев интерпретационной обработки данных грави- и магниторазведки в режиме реального для обоснованного выделения геологических блоков и оценки их потенциальной рудоносности, внедрении программно-алгоритмического обеспечения в научно-исследовательских и производственных геологических организациях Республики Вьетнам.

Защищаемые положения

1. Предложена технология оценки статистических атрибутов магнитного и гравитационного полей в адаптивных скользящих окнах, позволяющая обоснованно выделять границы геологических объектов линейной, кольцевой и произвольной формы;

2. Предложена технология разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие и оценки *«шумовой»* компоненты магнитного поля, позволяющая выделить в Центральном Вьетнаме разноглубинные геологические объекты в земной коре и оценить положение кристаллического фундамента;

3. Предложена технология районирования территории Центрального Вьетнама на однородные по плотностным и магнитным характеристикам области на основе методов кластер анализа, позволяющая повысить достоверность и точность результатов геологического районирования и выделения областей потенциального проявления рудной минерализации.

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту и полученные результаты исследований получены автором. Проведены исследования по выбору оптимального комплекса атрибутов гравитационного и магнитного полей с целью решения задач структурно-геологического картирования и районирования. выбору наиболее Получены результаты адекватных алгоритмов ПО классификации для решения задачи разбиения исследуемой территории на однородные по гравитационному и магнитному полям области. Проведена апробация практическая предложенных технологий интерпретационной обработки данных аэромагнитной съемки масштаба 1:50000 и наземной 1:1000000 гравитационной съемки масштаба методами вероятностностатистического подхода на примере центральной части Вьетнама.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в системах SCOPUS и в системах Вьетнама.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследования были представлены автором в 6 научных докладах на следующих конференциях: IX Международная научная конференция молодых ученых «Молодые – Наукам о Земле», МГРИ, Москва, 23 октября 2020 года; XV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле», МГРИ, Москва, 01-02 апреля 2021 года; II Молодежная научнообразовательная конференция ФГБУ "ЦНИГРИ" «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов - От прогноза к добыче», ЦНИГРИ, Москва, 17–19 февраля 2021 г.; 2-ая всероссийская научно-практическая конференции «Разведочная геофизика и геоинформатика» МГРИ, Москва, 02 марта 2021 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 120 страниц, в том числе 47 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 75 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель исследования и его основные задачи, указаны научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о практической ценности.

В части первой работы проведен сравнительный анализ возможностей современных компьютерных технологий России и других стран мира в задачах интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки. Отмечено преимущество функционального наполнения программного комплекса статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» при обработке данных гравиразведки и магниторазведки и решения задач интерпретационной обработки данных центральной части Вьетнама.

Во второй части представлена технология оценки статистических и градиентных характеристик гравитационного и магнитного полей с целью уточнения границ нестационарных областей и выделения областей тектонических дислокаций.

B третьей части представлена технология оценки составляющих гравитационного магнитного полей посредством линейной И методов оптимальной фильтрации целью выделения разноглубинных с аномалииобразующих геологических объектов.

В четвертой части представлена технология районирования территорий на однородные по магнитному и гравитационному полям области на основе классификационных алгоритмов.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору *Петрову Алексею Владимировичу* и доктору физико-математических, профессору *Никитину Алексею Алексеевичу* за внимание, помощь и поддержку, советы и ценные замечания, оказываемые за годы совместной работы; специалистам кафедры геофизики за консультации и конструктивную критику; сотрудникам геофизического и геологоразведочного факультета МГРИ-РГГРУ за моральную

поддержку.

В то же время автор выражает благодарность проф. *Игнатову Петру Алексеевичу*, давшему мне ценные советы в области геологии при написании диссертации.

Также автор благодарит Главное управления геологии и полезных ископаемых Вьетнама, которое позволило использовать данные гравиразведки масштаба 1:100 000 и магниторазведки масштаба 1:50 000 в диссертационной работе.

1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

В процессе интерпретационной обработки геолого-геофизической информации, помимо требований экономической эффективности особое внимание уделяется возможностям используемых компьютерных технологий, их функциональному наполнению и адекватности получаемых с его помощью результатов.

Наряду с развитием информационных и цифровых технологий в различных областях человеческой деятельности, в разведочной геофизике были созданы и широко используются компьютерные технологии, направленные на решение задач обработки и интерпретации данных геофизических съемок, как пометодных, так и комплексных.

Рассмотрим наиболее распространенные и широко используемые в производственных и научных геологических организациях России и за рубежом компьютерные технологии:

- Компьютерная технология «GEOSOFT»;

- Универсальный инструмент для картирования «*GMT*»;

- Система магнитной и гравитационной интерпретации «ModelVision»;

- Компьютерная технология «ПАНГЕЯ»;

- Геоинформационную систему «ГИС INTEGRO»;

– Интерпретационную технологию обработки и интерпретации «СИГМА 3D»;

– Компьютерная технология статистического и спектральнокорреляционного анализа данных «*КОСКАД 3D*».

Использование компьютерных технологий в конечном счете существенно повышает объем полезной информации, содержащейся в исходных

геофизических наблюдениях, тем самым повышает качество планирования поэтапного планирования геологами геологических и геолого-поисковых работ.

С появлением широкого спектра программного обеспечения у интерпретатора-геофизика появилась возможность выбирать различные модули и алгоритмы, реализованные в перечисленных технологиях, для получения наиболее достоверных и надежных геологических результатов. Сравнивать, полученные с использованием разных технологий результаты и полученные окончательные решения той или иной геологической задачи.

Сравнение программного обеспечения необходимо проводить на основе комплекса следующих критериев: стоимости компьютерной технологии, качества и практической ценности информации, получаемой с использованием разных технологий и содержания реализованных в них математических алгоритмов и методов обработки.

В данной приводится сравнительный анализ функционального наполнения и алгоритмов, включенных в состав широко используемых в мире компьютерных технологий «*KOCKAД 3D*», «*GEOSOFT*», «*GMT*», «*MODEL VISION*», «*ГИС INTEGRO*», «*СИГМА 3D*», «*ПАНГЕЯ*» с целью решения задач интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки.

1.1 Компьютерная технология «GEOSOFT»

Первая реализация компьютерной технологии «*GEOSOFT*» была впервые представлена в 1982 году в Toronto, CANADA, двумя экспертами Яном Маклаудом и Колином Ривзом для решения задач в области поисковой геофизики и прикладной геоинженерии [70].

В 1984 году программное обеспечение было приобретено компанией Paterson, Grant and Watson Ltd., создавшей бренд «*GEOSOFT*» и продолжающей разрабатывать и создавать новые современные программные модули для геофизических приложений. Программное обеспечение «*GEOSOFT*» разработано для многих компьютерных платформ (*DOS, UNIX, WINDOWS*) и включает широкий спектр прикладных приложений (Рисунок 1.1).

Приложение *Oasis Montaj* предназначено для обработки данных и решения задач картографии в области геофизических исследований и геологического моделирования при разведке месторождений полезных ископаемых и минеральных ресурсов. В технологии имеется возможность включать новые функциональные плагины, разработанные непосредственно пользователями, с помощью инструментальной среды *GX Developer*. [46, 52, 54].

Приложение Geosoft's Target используется при проведении работ на стадии поисков детальной разведки месторождений полезных И ископаемых. Реализованное в нем программное обеспечение направлено на решении задач процесса добычи полезных ископаемых, информационном организации сопровождении процесса разведочного бурения, геологического моделирования и оценки запасов [64].

Блок *ArcGIS* ориентирован на решение задач объемного картирования и анализ данных в географической информационной системе [44, 68].

Модуль *GM-SYS-3D* (содержит инструментарий для построения геологических моделей с использованием аппарата решения прямых и обратных задач магниторазведки и гравиразведки) [65, 69],

Раздел *UX-Detect* (позволят решать задачи поиска неразорвавшихся боеприпасов, бомб, мин, гранат и т.д. [56].

Наконец, наполнение блока *Geosoft's DAP server* предназначено для решения задач управления рудниками, предоставляет услуги для каталогизации информации, ведения специализированных баз данных, графического предоставления и визуализации больших объемов пространственных, геологогеофизических данных [45].

С момента создания и до настоящего времени (более 30 лет) технология постоянно обновлялись и развивалась, последняя версия – версия 9.9 была выпущена в июне 2020 года [63].



Рисунок 1.1 – Основной интерфейс технологии «GEOSOFT» версии 8.4

Для проведения геофизических исследований И геологического используются в основном два блока: Geosoft Oasis Montaj u моделирования GMSYS. Эти подсистемы включают модули, реализующие алгоритмы фильтрации (фильтр низких частот, фильтр высоких частот, и т.д.), гридования геолого-геофизической информации, полученной по нерегулярным сетям наблюдения (с помощью метода *kriging*, базирующемся на методе наименьших квадратов).

Функциональное наполнение подсистем позволяет осуществлять различные геометрические преобразования, оценить производные по направлениям (x, y, z), реализовать оператор свертки (Euler 3D), оценить корреляционные и спектральные свойства данных, выполнить декомпозицию геофизических полей для одномерного (1D), двумерного (2D) и трехмерного (3D) случаев. [51, 74].

Технология работает с данными, организованными в наиболее распространенные цифровые форматы для работы с геолого-геофизической информацией. Система позволяет визуализировать информацию в виде цветного растра и карт изолиний данные, хранящиеся в форматах (GRID, DAT, FLT, HDR, INI, FAST, MSS, HGD, и т.д.); форматах для хранения объемных данных (LYR,

SHP, DXF, DM, PLT, MIF, Maxwell plate файл, 2D and 3D SEG-Y файл и т.д.); форматах ввода данных обследования (GDF, ESF, EXCEL, XYZ, UBC mag3D моделей файлы и т.д.); графических форматах (BMP, ECW, EPS, GIF, GRD, JPG, PNG и т.д.). Предусмотрен экспорт полученных результатов обработки в виде ГИС проектов, карт, баз данных, гридов, графических изображений.

Помимо широкого спектра модулей, реализующих процедуры импорта/экспорта информации в другие программные продукты, технология GEOSOFT включает ряд функциональных процедур, позволяющих осуществлять фильтрацию геолого-геофизических данных В скользящих окнах использованием алгоритмов низкочастотной, высокочастотной и полосовой фильтрации. При этом размеры скользящего окна фиксированы и задаются пользователем исходя из характера решаемых задач. С помощью методов сглаживания, фильтрации решаются задачи исключения локальных И малоконтрастных аномалий, выделения аномалий определенной протяженности и амплитуды [39].

Чтобы оценить достоинства и недостатки алгоритмов фильтрации, реализованных в компьютерной технологии *Geosoft Oasis Montaj*, автором проведено тестирование алгоритмов на модельных данных.

Модельное поле включало три аномальных объекта: L-образную линейную аномалию и три прямоугольных аномалии меньших размеров, осложненных нормально распределенной помехой. При этом амплитуда помехи выбрана соизмеримой с амплитудой аномалий. Размеры модельного поля составили 1000 × 1000 метров.

На рисунке 1.2 (б) видно, что использование алгоритма низкочастотной фильтрации программного комплекса «*GEOSOFT*» позволило выделить наиболее энергоемкую и протяженную аномалию, с искажением действительной формы модельного сигнала, при этом менее интенсивные и небольшие по размерам аномалии практически не выделяются.



Результат фильтрации на программе "GEOSOFT"

Рисунок 1.2 – Результат фильтрации в окне фиксированного размера 350×350 метров на программе «GEOSOFT»

В программном блоке Geosoft Oasis Montaj отсутствуют алгоритмы районирования исследуемой площади на области, однородные по одному или нескольким геолого-геофизическим атрибутам полям И ИХ на основе классификационных алгоритмов. Это очень востребованная процедура интерпретационной обработки геофизической и оцифрованной геологической информации, помогающая решать задачи геологического картирования и прогноза месторождений полезных ископаемых.

1.2 Компьютерная технология «GMT» (Generic mapping tool)

Компьютерная технология *«GMT» (Generic Mapping Tool)* это комплекс программ для обработки геолого-геофизических наблюдений, визуализации и представления результатов обработки. Программное обеспечение включает процедуры гридования, функциональные модули, которые позволяют выполнять частотную и направленную фильтрацию потенциальных геофизических полей, проводить пересчет вверх и вниз потенциальных геофизических полей, оценивать производные вдоль профилей (1D), по площади (2D) и объеме (3D) [44, 59, 69].

Имеется возможность представлять результаты обработки в виде цветных и черно-белых графиков, карт изолиний, трехмерных изображений хорошего качества в формате файлов *PostScript*. Используемая система координат может быть линейной, логарифмической или экспоненциальной в 25 различных географических проекциях.

Программный продукт был создан в 1987 году в астрономической обсерватории LMONT-Doherty Колумбийского университета двумя студентами Paul Wessel и Walter H.F.Smith. Первая версия программы в свободном доступе для студентов и ученых появилась в июле 1988 года. Компьютерная технология «*GMT*» постоянно обновляется и расширяется исследователями со всего мира. С момента своего создания вышло 11 версий программного продукта. Последняя версия 6.2.0 появилась в 2020 году [47, 57-59, 61].

Программное обеспечение «*GMT*» состоит из широко спектра программных модулей, реализующих те или иные процедуры обработки. Кроме этого, имеется возможность создавать оригинальные графы обработки с использованием отдельных автоматических операций.

Важным и полезным элементом системы *«GMT»* является вспомогательная база данных, содержащая информацию о границах государств, координаты береговых линий морей и океанов, речных сетей (Рисунок 1.3).

Таким образом, технология «*GMT*» очень эффективна для отображения и визуализации координатно-привязанной геолого-геофизической информации на экране дисплея, принтерах и графопостроителях в 25 различных географических проекциях и разных масштабах.



Рисунок 1.3 – Интерфейс программного обеспечение «GMT»

Файлы изображений можно экспортировать в такие приложения как Gsview, Acrobat, CorelDraw, a содержательную информацию в Notepad, WordPad, Excel и т.д.

Технология *«GMT»* работает в пакетном режиме с использованием командных файлов. На рисунках 1.4 и 1.5 представлены примеры таких командных файлов, а на рисунке 1.6 результат их выполнения.



Рисунок 1.4 – Текст командного файла для рисования контура карты Вьетнама и границ стран в технологии «GMT»

Пакетный режим реализован на основе специального, доступного для интерпретатора языка программирования, включающего набор функциональных процедур и функций. Пример командного файла в формате *«GMT»* приведен на рисунке 1.5.

1	C:\Windows\system32\cmd.exe		X
	UE.txt -R -JM6 -Sc0.05 -W2.5p/255/0/0 -O -P -K 1>>topo_vienam.ps		^
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kvnc_vietnam_dia chat xuan bao\KUNC tren lanh tho UN OCHIMINH.txt -R -JM6 -\$c0.05 -W2.5p/255/0/0 -0 -P -K 1>>topo_vienam.	1\Xuly_c _GMT>psxu ps	or J H
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kvnc_vietnam_dia chat xuan bao\KUNC tren lanh tho UN anhgioi_KUNC.txt -R -JM6 -0 -K -W3p/0 -L 1>>topo_vienam.ps	1\Xuly_d _GMT>psxy	:or jr≡
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kunc_uietnam_dia chat xuan bao\KUNC tren lanh tho UN po.grd	1\Xuly_c _GMT>del	or to
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kvnc_vietnam_dia chat xuan bao\KVNC tren lanh tho VN u.cpt	1∖Xuly_d _GMT>del	or ma
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kunc_uietnam_dia chat xuan bao\KUNC tren lanh tho UN g_bubbi.grd	1\Xuly_d _GMT>del	or ma
	D:\1_Luan an\01_Noi dung luan an\00_NOI DUNG LUAN AN\Tai lieu\chapter ell\corell_topo kunc_uietnam_dia chat xuan bao\KUNC tren lanh tho UN Press any key to continue	l\Xuly_c _GMT>paus	or se

Рисунок 1.5 – Командный файл для рисования рамки карты Вьетнама и граничащих стран в программном обеспечении «GMT»

Отметим недостатки компьютерной технологии «GMT»:

– Ограничения на используемую систему координат, то есть невозможность одновременно использовать прямоугольную или географическую систему координат. Такой подход оптимален только для решения задач крупномасштабного общенационального, национального, глобального картирования [36, 37, 49].

Функции обработки представляют собой простейшие алгоритмы, поэтому результаты обработки обычно качественные и относятся к региональным исследованиям большой площади (региональные объекты, глубокие структуры и т.д.).

Для решения более детальных задач (определения глубины положения кристаллического фундамента или поверхности Мохоровичича, мощности осадочного чехла, границы Конрада) необходимо использовать компьютерные продукты MATLAB [36, 37, 49], VISUAL BASIC, С⁺⁺ и создания соответствующих процедур. Для использования прямых и обратных задачи в одномерном варианте, также необходимо использовать языки программирования высокого уровня.



Рисунок 1.6 – Результаты построения топографической карты территории Вьетнама в технологии «GMT» в масштабе 1:500 000

1.3 Компьютерная технология «Model Vision»

Программное обеспечение программного комплекса *«Model Vision»* включает широкий спектр инструментов для интерпретационной обработки геолого-геофизической информации, включающий алгоритмы фильтрации, гридования, псевдо-гравитационных преобразований, быстрого преобразования Фурье (FFT). Функциональное наполнение технологии позволяет решать прямые

(1D), (2D) и (3D) задачи для потенциальных полей, делать оценки распределения магнитных и плотностных масс в объеме по наблюденным гравитационным и магнитным полям (Рисунок 1.7).



Magnetic & Gravity Interpretation System



Рисунок 1.7 – Интерфейс программного обеспечения «ModelVision» версии 17.0

Программное обеспечение широко используется при решении задач поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, геоэкологии, гидрогеологии и т.д. [48].

Компьютерная технология была создана в 1994 году геофизиками David Pratt, Tonny White, и Blair McKenzie, позже передана австралийским компаниям Pitney Bowes Software Pty Ltd и Tensor Research Pty Ltd. [66]. Технология постоянно обновляется до последней версии V.17 в 2020 году.

Программное обеспечение работает с различными форматами данных, такими как профильные наблюдения, точечные данные, скважинная информация (ASCII), гриды, форматы Geosoft и Intrepid. Результаты обработки экспортируются в другие системы в виде карт, цифровой информации, гридов и графических изображений.

Технология «*ModelVision*», так же, как и технология «*GEOSOFT*» содержит фильтрационные процедуры, которые не учитывают естественную нестационарность исходных потенциальных геофизических полей.

К недостаткам технологии можно отнести фильтрацию данных только в скользящих окнах фиксированного размера, что приводит к неправильному сглаживанию исходных данных, искажению формы аномалий и некачественным конечным результатам, приводящим к ошибкам в процессе интерпретации.

На рисунке 1.8 представлен пример низкочастотной фильтрации модельного поля, описанного выше в программном комплексе *«ModelVision»*, иллюстрирующий несостоятельность алгоритмов фильтрации в задачах выделения аномалий разного размера и простирания на фоне осложняющих помех.





Рисунок 1.8 – Результат фильтрации в окне фиксированного размера 350×350 метров на технологии «ModelVision»

1.4 Компьютерная технология «ГИС INTEGRO»

Программно-технологический комплекс «*ГИС INTEGRO*» разработан во ФГУП ГНЦ РФ ВНИИГеосистем (1998-2015). Сегодня его сопровождение и развитие обеспечивается в рамках деятельности отделения Геоинформатики "ВНИИГеосистем" ФГБУ "ВНИГНИ". Комплекс представляет все необходимые возможности для реализации ГИС-проектов и картографической основы для выполнения работ по изучению недр [71]

В программном комплексе много разных прикладных блоков: *базовый* блок, блок *«Прогноз»*, блок *«Геофизика»*, блок *«ЗД-моделирование»*, блок *«Геолкарта»*, блок *«Скважины»*. При обработке геофизических данных особый интерес представляет технология обработки с использованием блока *«Геофизика»*.

«ГИС INTEGRO – Геофизика» содержит программно-технологическое обеспечение решения задач анализа и обработки двух и трехмерных массивов геофизической информации (волновых и потенциальных полей, результатов обработки МТЗ), включая процедуры фильтрации, статистического анализа (оценка распределений, статистик как по массивам в целом, так и в скользящих окнах), решение прямых и обратных задач грави- и магниторазведки, расчет различных модификаций градиентных характеристик, в том числе нормированных, как необходимого инструмента интегрирования разнородной геофизической информации (Рисунок 1.9).

Блок «*Геофизика*» включает в себя исчерпывающий набор формальных процедур обработки гравитационных и магнитных данных [*33*]:

Одномерная автокорреляционная функция, двумерная автокорреляционная функция (ДАКФ), расчет интервалов корреляции по ДАКФ, одномерные спектры, одномерные автокорреляционные функции;

– Разделение на компоненты (фильтрация): фильтрация с постоянными коэффициентами (энергетическая, энтропийная, осреднение, полиномиальная, треугольная, метод вариаций), адаптивная фильтрация (осреднение в круглом окне, треугольная фильтрация в круглом окне, фильтрация поля целиком, метод главных компонент);

 Обнаружение аномалий на фоне помех: обнаружение линейных аномалий, обратные вероятности, коэффициент Спирмена, самонастраивающаяся фильтрация, непараметрическая адаптивная фильтрация, построение осей

линейных аномалий;

– Расчет характеристик: статистики в скользящих окнах, статистики в закрепленных окнах, статистики в круглом скользящем окне, парная корреляция в скользящем окне, парная корреляция в адаптивном окне (парная корреляция в адаптивном окне с учетом районирования, парная корреляция в адаптивном окне без учета районирования), аппроксимация полиномом, производные и градиенты в скользящих окнах, производные и градиенты (квадратные окна);

 Зондирование: статистическое, взаимно-корреляционное, градиентное, на основе треугольной фильтрации.



Рисунок 1.9 – Примеры обработки потенциальных полей, обрабатываемых

Все описанные выше процедуры статистического и спектральнокорреляционного анализа геолого-геофизической информации были заимствованы на договорной основе из компьютерной технологии *«КОСКАД 3D»* в 90-е годы прошлого столетия и с тех пор практически не обновлялись.

1.5 Компьютерная технология комплексной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки «СИГМА 3D»

Программа «*СИГМА 3D*» разработана коллективом авторов: Бабаянц Павел Суренович (Главный геофизик АО "ГНПП Аэрогеофизика"), Блох Юрий Исаевич (профессор, доктор физико-математических наук), и Трусов Алексей Андреевич (начальник отдела интерпретации данных АО "ГНПП Аэрогеофизика", кандидат технических наук) [73].

Пакет программ «*СИГМА 3*D» предназначен для структурной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Используется для решения разнообразных геологических задач:

 Структурно-вещественное картирование и изучение внутреннего строения метаморфического фундамента платформ;

– Разделение аномальных полей от пород фундамента и осадочного чехла;

– Изучение глубинного строения земной коры на региональных геотраверсах;

- Обнаружение геологических объектов с заданными свойствами;

 Обнаружение следов миграции углеводородов по изменениям петрофизических характеристик вмещающих осадочных пород;

 Обнаружение и картирование нефтегазоперспективных структур в осадочном чехле на основе мультипольного подхода;

– Обнаружение и количественное описание объектов трубочного типа, в том числе кимберлитовых и урановых и т.д.

Пакет программ «*СИГМА 3D*» (Рисунок 1.10) состоит из следующих программ: «REIST», «DVOP», «ROMGAS», «CLASS2», «QUASI», «OPRES», «MGK». Дополнительные программы, не входящие в пакет: «IGLA», «RELMASS», «СИНГУЛЯР», «KORPRO», «PREDICTAR», «TRANSGRID».



Рисунок 1.10 – Программный интерфейс «СИГМА-3D»

Технология «*СИГМА 3D*» в основном ориентирована на анализ и обработку данных аэрогеофизических наблюдений, чаще всего магниторазведки. В технологии отсутствуют методы анализа нестационарных геофизических наблюдений, а задачи кластер анализа решаются эмпирическим путем и ограничены размерностью признакового пространства.

1.6 Программное обеспечение анализа геофизической информации «ПАНГЕЯ»

Система «ПАНГЕЯ» является российским программным продуктом, включает наиболее ценные разработки российской геофизической школы и создана в начале 21 века. Технология апробирована на сотнях проектов в различных сейсмогеологических условиях РФ, Ливии, Китая, Индии, Намибии, Ирака, Казахстана. Технология «ПАНГЕЯ» и зарегистрирована в Российском агентстве по патентам и товарным знакам (Роспатент), свидетельство № 990803 от «11» ноября 1999 г. [75]. Система «ПАНГЕЯ» включает технологии решения сложных задач геологического моделирования и анализа комплексной информации.

Кроме этого, технология «ПАНГЕЯ» включает блок интерпретации сейсмических данных с параллельным анализом гравиметрических, магнитных данных и другой геолого-геофизической информации, отражающей свойства геологической среды, то есть блок компьютерного моделирования.

Несмотря на широкий спектр задач интерпретационной обработки геофизической информации, реализованный в функциональном наполнении отсутствуют технологии, В ней методы И алгоритмы, учитывающие геофизических полей, нестационарность что не позволяет полноценно использовать технологии, базирующиеся на применении скользящих окон.

1.7 Компьютерная технология статистического и спектральнокорреляционного анализа данных «КОСКАД 3D»

Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «*КОСКАД 3D*» разработана в Российском Государственном геологоразведочном университете (МГРИ-РГГРУ) в 1985 году (*Никитин А.А.*, *Петров, А.В., Алексашин А.С.*) [72]. Технология была реализована в операционных системах ЕС ЭВМ, Unix, MS DOS. Последняя версия выпущена 2021 году (Петров А.В., Никитин А.А.) для операционной системы Windows10 (Рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Программный интерфейс «КОСКАД 3D» версия 2021 г

Технология оснащена системой управления базой данных, позволяющей импортировать и экспортировать информацию, организованную в (1D), (2D) и (3D) регулярные сети, в технологии SURFER, GEOSOFT, PETREL, ГИС INTEGRO, ArcInfo и др.

В подсистеме «КОСКАД ПРОФИЛЬ» реализованы функциональные модули, работающие с информацией, организованной в нерегулярные профильные сети наблюдения. В подсистему возможен импорт информации из файлов формата нерегулярных и профильных сетей наблюдения.

Технология включает, как оригинальные алгоритмы, реализующие процедуры гридования двумерных и трехмерных сетей, так и гридование с использованием стандартного двумерного крайгинг метода.

Компьютерная технология «КОСКАД 3D» предназначена для обработки и интерпретации цифровой геолого-геофизической информации, организованной в

одно-, двух- и трехмерные регулярные сети, методами вероятностностатистического подхода.

Компьютерная технология позволяет:

 Провести полный статистический, спектрально-корреляционный и градиентный анализ геофизических полей;

Оценить спектральные, корреляционные и градиентные характеристики геофизических полей;

 Рассчитать статистические характеристики геофизических полей в скользящих окнах динамического размера;

 Осуществить статистическое зондирование геофизических полей с целью статистических атрибутов для разных частотных компонент исходных полей;

– Оценить относительное (3D) распределение магнитных и гравитационных масс в объеме [10, 28, 72];

– Провести тренд анализ потенциальных геофизических полей и разложить наблюденные поля на составляющие по энергии и протяженности;

– Исключить высокочастотные помехи на основе методов линейной оптимальной адаптивной фильтрации [10, 19, 28, 72];

– Решать задачи обнаружение слабых, соизмеримых с уровнем помех аномалий, слабоконтрастных аномалииобразующих объектов, слабо проявленных тектонических нарушений на основе статистической теории обнаружения сигналов [10, 72];

— Провести анализ многопризнаковой геолого-геофизической информации методами кластер анализа и распознавания образов на основе многомерного статистического, регрессионного и дисперсионного анализа [10, 22, 72].

Чтобы наглядно показать эффективность обработки данных в технологии «*КОСКАД 3D*» рассмотрим результат решения задачи, рассмотренной выше, с использованием других программных комплексов.

На рисунке 1.12 приведены результаты линейной адаптивной фильтрации модельных данных в окне «живой» формы. Полученный результат показывает, что форма и положение выделенных аномалий полностью соответствуют модельным построениям и в нем отсутствуют недостатки присущие алгоритмам, реализованным в программных комплексах «*GEOSOFT*», «*GMT*», «*ModelVision*». Результат фильтрации на программе "*KOCKAД 3D*"



Рисунок 1.12 – Результат фильтрации в скользящем окне размером 350×350 метров с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D»

Получить положительные результаты выделения модельных аномалий в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» удается за счет учета нестационарности адаптивной исходных данных непосредственно В алгоритмах линейной фильтрации, реализованных в программном комплексе. Такой подход является обрабатывающих оригинальным отсутствует современных И В И интерпретационных компьютерных технологиях, как отечественных, так И зарубежных.

Кроме методов адаптивной фильтрации в технологии *«КОСКАД 3D»* имеется еще много оригинальных процедур интерпретационной обработки геолого-геофизических наблюдений не имеющих аналогов в мире. Среди них можно отметить модули обнаружения слабых, соизмеримых с уровнем помех

аномалий (однопризнаковых и комплексных), процедуры автоматического трассирования осей и точек перегиба геофизических аномалий, алгоритмы оценки статистических характеристик в адаптивных скользящих онах, методы адаптивной фильтрации, алгоритмы кластер анализа и распознавания многопризнаковых, комплексных аномалий.

Таким образом, с учетом выше сказанного, можно утверждать, что компьютерная технология «*КОСКАД 3D*» позволяет наиболее эффективно и адекватно решать задачи интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки, используя методы вероятностно-статистического подхода и учитывая нестационарность исходных данных.

Поэтому, решая задачи геологического картирования, прогноза и поиска скрытых месторождений полезных ископаемых в центральной части Вьетнама на основе анализа данных гравиразведки и магниторазведки, автор использует широчайший спектр интерпретационных алгоритмов, реализованных в компьютерной технологии статистического и спектрально корреляционного анализа данных «*КОСКАД 3D*».

1.8 Общая характеристика исходной геофизической информации исследуемой территории центрального Вьетнама

Центральная область Вьетнама – это территория развития и пересечения крупных геологических образований, таких как зона шва Тамки-Фуоксон, структура Поко, Контумская антиклиналь, ограниченных разломами широтного и юго-западного направлений [3, 2, 55, 50] (Рисунок 1.13 а). Широкое распространение имеют древние метаморфические породы, прорванные и трансформированные магматическими образованиями, кислотного и основного состава, выходящей на поверхности. Такие геологические и тектонические условия благоприятны для образования эндогенных месторождений полезных ископаемых (золота, железа, меди, свинца, олова и вольфрама) [34, 35, 38, 40, 43], а определение геологических структур, связанных с эндогенным месторождений полезных ископаемых, является важной и приоритетной задачей на ближайшие

годы.

Геологические образования, связанные с эндогенными месторождениями полезных ископаемых, показаны на карте магнитного поля. Поле сильно дифференцировано и представляет собой аддитивную сумму от источников разных размеров, расположенных на разных глубинах, что делает интерпретацию наблюдений сложным и неоднозначным процессом.



Рисунок 1.13 – Упрощенная, структурно-тектоническая карта Юго-Восточной Азии (а), карта рельефа исследуемого района (б) и схема аэромагнитных и гравитационных съемок территории в центральной части Вьетнама (в)

Исследуемая территория размером $194 \times 194 \ \kappa m$ включает результаты четырех аэромагнитных съемок в районах Мангзим, Дакто, Контум и восточный Контум (Рисунок 1.13 в) [41, 42]. Район исследования характеризуется достаточно сложным рельефом с высокогорными хребтами (H>700 m), в основном меридионального простирания, образующими множество узких долин бурных рек (Рисунок 1.13 б).

Погрешность измерения составляла ±10.5 *nT* [41, 42]. Учитывая то, что исследуемая территория расположена в экваториальной части Земли, было



Рисунок 1.14 – Карты исходного аномального магнитного поля dT (a) и аномального магнитного поля dT приведенное к полюсу в центральной части Вьетнама масштаба 1: 50 000 (б)

На рисунке 1.14 (б) видно, что диапазон изменения магнитного поля меняется от -400 до 550 nT. В поле выделяются 2 основных простирания магнитных аномалий: юго-восточное и юго-западное. На западе исследуемой территории наблюдается крупная положительная аномалия амплитудой от 100 до 550 nT, в центральной части аномалии имеют юго-восточное простирание и амплитуду от 50 до 400 nT.

Магнитное аномальное поле сильно дифференцировано и содержит много локальных аномалий, особенно в центральной части с амплитудой более 350 *nT*. В юго-восточной области отмечается крупная кольцевая аномалия амплитудой более 300 *nT*.

Информацией о гравитационном поле исследуемой территории послужили результаты гравитационной съемки масштаба 1:100 000 – аномальное гравитационное поле в редукции Буге с плотностью промежуточного поля 2.67 c/cm^3 и учетом рельефа местности по Prisivanco L.N [26]. Точность оценки аномального гравитационного поля по всей площади исследования составила 0.1 $\div 0.25 \ mG \ [41, 42]$.

Визуальный анализ аномального гравитационного поля позволяет выделить трендовую компоненту широтного простирания, с увеличением значений гравитационного поля от -70 mG на северо-западе, до 10 mG на юго-востоке (Рисунок 1.15). Северо-западный участок характеризуется самыми низкими значениями аномального гравитационного поля со значениями от -70 mG до -40 mG, что отчасти связано с рельефом местности. На востоке и юго-востоке значения аномального поля изменяются от -30 mG до 10 mG и поле имеет меридиональное простирание.



Аномальное гравитационное поле dG в редукции Буге

Рисунок 1.15 – Карта исходного аномального гравитационного поля dG в редукции Буге в центральной части Вьетнама масштаба 1:100 000

В региональном плане в исходном поле выделятся несколько гетерогенных блоков со значениями поля, изменяющимися от -10 mG до 5 mG, сконцентрированных в северной, центральной и южной областях исследуемой площади. В юго-восточной части отмечаются положительные аномальные зоны амплитудой от -30 mG до -5 mG.

2 ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ И ГРАДИЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ ГРАНИЦ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДИСЛОКАЦИЙ

С внедрением вычислительной техники и особенно персональных компьютеров в процесс интерпретационной обработки геолого-геофизических наблюдений широкое распространение получил атрибутный анализ геофизических полей. Наличие доступного графического потенциальных интерфейса, высокие вычислительной скорости персональных компьютеров разрабатывать обрабатывающих широкий спектр позволило И интерпретационных систем, базирующихся на достижениях различных разделов математики.

Традиционно используемой при анализе не только геолого-геофизических данных, но и экспериментальной информации вообще, является теория вероятностей и математическая статистика. Среди методов теории вероятностей особенно востребованы алгоритмы оценки первых статистических моментов случайных величин и методов проверки статистических гипотез.

Математической моделью при вычислении статистических атрибутов геофизических данных является случайная величина X, принимающая ряд дискретных значений $X_1, X_2, ..., X_n$. Такими значениями могут быть представлены измерения физических свойств горных пород и физических полей. Для оценки статистических характеристик геофизических полей, чаще всего, реализуется методика скользящего окна, что связано с особенностями геофизических наблюдений и их статистической нестационарностью. При измерениях геофизических полей вдоль профиля, трассы или скважине окно – одномерное и содержит *n*-значений случайной величины, при площадных измерениях и при

анализе временного разреза окно – двумерное, при обработке трехмерных данных скользящее окно трехмерное.

Для случайной величины X в скользящих окнах могут быть оценены различные статистические характеристики или атрибуты анализируемого поля. В качестве таких статистических атрибутов, рассчитываемых в скользящем окне [10, 15, 21, 25], используются:

- Среднее значение $\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i;$
- Дисперсия $D = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i \overline{X})^2;$
- Среднеквадратическое отклонение $\sigma = \pm \sqrt{D}$;
- Асимметрия $A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_i \bar{X})^3 / \sigma^3;$
- Эксцесс $E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_i \bar{X})^4 / \sigma^4 3;$

– Медиана Me или квантиль порядка 0.5, при котором вероятность P значений случайной величины X, больших или меньших Me равны, т.е. H(X < Me) = P(X > Me) = 0.5;

- Коэффициент вариации $V = \sigma / \overline{X}$;

– Энтропия $H = -\sum_{i=1}^{K} p_i log_2 p_i$, где p_i – частость *i*-го интервала группирования, а *K* – число интервалов группирования.

– *Анизотропия*, как отношение G / G_{90} , где G значение полного градиента поля в точке, G_{90} – значение градиента поля в направлении перпендикулярном направлению полного градиента G.

Энтропия характеризует степень сложности (беспорядка) явления или объекта. Чем выше показатель энтропии, тем сложнее явление. Применительно к геофизике это означает, что если показатель энтропии стремится к нулю, то мы имеем дело с однородным, безаномальным полем и наоборот, максимум энтропии свидетельствует о повышенной степени дифференциации геофизического поля.

Перечисленные выше статистические атрибуты широко используются при анализе как потенциальных, так и волновых полей. Их оценка позволяет более эффективно решать актуальную задачу районирования исследуемых территорий
на стационарные области по геофизическим данным, так как экстремальные значения статистических атрибутов, за исключением среднего значения, контролируют области нарушения статистической нестационарности потенциальных геофизических полей, которые в свою очередь приурочены к геологическим границам или тектоническим дислокациям.

На рисунках 2.1 и 2.2 иллюстрируется поведение оценок среднего, дисперсии, асимметрии и эксцесса в скользящем одномерном окне, которое подтверждает, что оценки статистических атрибутов контролируют границы геофизических аномалий экстремумами, как положительными, так и отрицательными.



Рисунок 2.1 – Оценка статистические характеристик в одномерном скользящем окне: красный цвет - модельное поле, зеленый – оценка среднего; синий – оценка дисперсии



Рисунок 2.2 – Оценка статистические характеристик в одномерном скользящем окне: красный цвет - модельное поле, зеленый – оценка асимметрии; синий – оценка эксцесс

На рисунке 2.3 представлены оценки среднего в скользящем окне в двуменом скользящем окне. Слева изображено магнитное поле, в центре оценка среднего в скользящем двумерном окне, справа оценка дисперсии. Здесь также экстремумы поля дисперсии контролируют границы аномалий уже по площади.

Максимумы анизотропии позволяют трассировать границы аномалий, которые обычно соответствует областям нарушения стационарности поля.

Минимумы – обычно приурочены к экстремальным (минимальным или максимальным) значениям поля, соответствующим положению осей аномалий.



Рисунок 2.3 – Наблюденное магнитное поле dT (слева), оценка среднего в скользящем окне (в центре), оценка дисперсии (справа)

Наряду с другой информацией, коэффициент анизотропии может быть использован в задачах геологического районирования.

Эффективное И использование математических методов анализа информации в любой прикладной области должно базироваться на соблюдении всех предпосылок, относительно исходных данных, заложенных непосредственно алгоритме. Невыполнение этих условий приводит том ИЛИ ИНОМ В К неправильным конечным результатам и снижению эффективности использования метода. Рассмотрим основные особенности геофизических наблюдений, которые необходимо учитывать при применение аппарата теории статистических оценок математической статистики.

2.1 Особенности оценки статистических атрибутов магнитного и гравитационного поля в скользящих окнах

Важнейшей особенностью геофизических съемок представляется то, что они являются пространственными и координатно-привязанными, то есть всегда сопровождающимися значениями координат точки наблюдения (*x*, *y*, *z*) или времени *t*.

Другой особенностью геолого-геофизических измерений является то, что выборка, получаемая в результате наблюдения геофизического признака в различных точках наблюдения, даже соседних, не является однородной и представлена набором нескольких случайных величин. То есть точки наблюдения на профиле, в скважине или сейсмической трассе представляют собой разные случайные величины. Это связано с естественным изменением статистических характеристик геофизических полей в пространстве и времени (статистической нестационарностью геофизических полей) [1, 5, 9, 23, 24].

Таким образом, наблюдения геофизического признака в различных точках площади исследования являются элементами выборок разных случайных величин, а отсутствие выборки для оценки статистического атрибута не позволяет использовать аппарат математической статистики корректно И теории вероятностей в процессе обработки и интерпретации геофизических наблюдений. Изменяя состав выборки, посредством выбора значений в соответствии с их пространственным расположением, получать различные можно оценки статистического параметра.

С появлением компьютерной техники решение возникшей проблемы стало возможным благодаря использованию скользящих одномерных и двумерных скользящих окон. Что является, вполне логичным, так как позволяет сформировать выборку для непосредственно оценки статистического атрибута и сформировать ее по значениям параметра в точках, ближайших к анализируемой точке.

Исторически, первоначально появились программные реализации одномерных (вдоль профилей и сейсмотрасс) скользящих окон, позже двумерных скользящих окон (по всей площади наблюдения и сейсмическому разрезу).

В одномерном случае алгоритм скользящего окна сводится к следующему. Рассмотрим профиль наблюдения геофизического признака, включающего N точек f_1, f_2, \ldots, f_N , расположенных через определенный интервал Δx . Сначала расположим скользящее окно, размером k точек, в левой части профиля. По значение конкретного окно $f_1, f_2, ..., f_k$ оценим точкам, попавшим В статистического параметра. Значение оценки статистического атрибута отнесем к точке на профиле, совпадающей с положением центральной точки окна. Затем, сместим окно на один пикет вправо вдоль профиля, и процедура оценки статистического атрибута повторяется рисунке 2.4. Здесь график исходного магнитного поля представлен красным цветом, а график соответствующих оценок статистического атрибута чёрным цветом. Положения окна, при перемещении вдоль профиля, обозначены разными цветами.



Рисунок 2.4 – Наблюденное магнитное поле dT (слева), оценка среднего в скользящем окне (в центре), оценка дисперсии (справа)

В площадном варианте двумерное окно располагается в левом верхнем углу исследуемой площади (сейсмического разреза), затем перемещается на один пикет вправо и т.д. По достижению правого верхнего угла профиля, окно смещается на один профиль (отсчёт) вниз и скольжение окна вдоль профиля повторяется. Конечное положение скользящего окна – правый нижний угол. Рассчитанное значение статистического параметра при каждом конкретном положении окна, относится к пикету профиля, совпадающего с положением

центральной точкой окна. В результате такой процедуры получается оценка статистической характеристики в каждом пикете исследуемой площади.

Необходимо отметить, что важнейшими параметрами окна, влияющими на оценки параметров, являются его размеры. Так, например, при оценке среднего увеличение размеров окна приводит к большему сглаживанию кривой.

При оценке статистического атрибута в скользящих одномерных и двумерных окнах определяющим является размеры окна и его наклон для двумерного случая.

На рисунке 2.5 приведен пример расчета среднего вдоль профиля наблюдений магнитного поля (красный цвет), состоящего из 200 пикетов, в скользящих окнах разного размера: 7 (зеленый цвет), 11 (синий цвет) и 25 (фиолетовый цвет) пикетов. Из данного примера видно, что при максимальном размере окна наблюдается наибольшее размытие аномалий и некоторое их смещение относительно положения исходных аномалий.



Рисунок 2.5 – Оценка среднего по аномальному магнитному полю в окне разных размеров

Важную роль в технологии двумерного скользящего окна играет его наклон окна на рисунке 2.6. Наклон окна *w* определяется как смещение между соседними профилями осевой линии окна, выраженное в пикетах. Естественно, о наклоне окна можно говорить только в двухмерном или трёхмерном случае. Трёхмерное окно описывается двумя наклонами, первое в плоскости пикетов и профилей, второе в плоскости пикетов и слоёв. Наклон окна может быть как положительной величиной, так и отрицательной, при нулевом наклоне окно становится прямоугольным.

На рисунке 2.6 иллюстрируется положение окна при различных его наклонах, зеленым цветом изображено *«окно»*, имеющее нулевой наклон, фиолетовым – плюс один, желтым – плюс два, красным – минус один и синим – минус два.



Рисунок 2.6 – Иллюстрация положения окна при различных наклонах: желтое (+2), фиолетовое (+1), зеленое (0), красное (-1), синее (-2)

Примеры скользящих окон изображены ниже



Рисунок 2.7 – Примеры скользящих окон разной конфигурации

Наклонные окна часто используются в случаях, когда необходимо подчеркнуть свойства аномалий, имеющих определённое простирание.

Одной из первых программных реализаций способа скользящего окна можно считать алгоритм расчета оценки среднего вдоль профиля. Алгоритм, с одной стороны, позволяет получать оценку статистического параметра (среднего значения) вдоль профиля, с другой решить задачу исключения высокочастотной помехи. В этом, простейшем случае уже отмечаются недостатки, которые связаны с нестационарностью геофизических наблюдений, даже вдоль отдельного профиля наблюдений. Так, появляются ложные аномалии при оценке на краях профилей и наблюдается сильная зависимости конечных результатов от выбранных размеров скользящего окна.

С появлением алгоритмов, базирующихся на применении двумерных скользящих окон фиксированного размера, отмеченные выше недостатки стали более заметными. Кроме этого, появились и новые проблемы. К ним следует отнести сильное искажение формы аномалий, вытянутых вдоль определенного направления при оценке среднего значения в скользящем окне, ошибки, возникающие при оценке статистических и спектрально-корреляционных характеристик геофизических полей, связанные с неправильным выбором параметров двумерных скользящих окон, особенно его наклона, краевые эффекты по площади и т.д.

На рисунке 2.8 изображено наблюденное магнитное поле в nT (слева), результат оценки среднего значения поля в квадратном окне без наклона (в центре) и наклонном окне северно-западного простирания (справа).

На рисунке 2.9 изображен фрагмент наблюденного гравитационного поля в редукции Буге в mG (слева), результат оценки среднего значения поля в окне северо-восточного простирания (в центре) и наклонном окне северно-западного простирания (справа).

Получение отрицательных результатов при использовании скользящих окон фиксированного размера связано с естественным изменением статистических и спектрально-корреляционных характеристик геофизических полей по площади наблюдения, то есть его нестационарностью.



Рисунок 2.8 – Иллюстрация недостатков оценки статистических атрибутов в скользящих двумерных окнах фиксированного размера



Рисунок 2.9 – Иллюстрация недостатков оценки статистических атрибутов в скользящих двумерных окнах фиксированного размера

Стационарная выборка геолого-геофизических данных должна отвечать следующим требованиям: постоянство математического ожидания и дисперсии, а также независимости корреляционных характеристик от времени или координат.

В связи с этим возникает ряд задач, связанных с оценкой стационарности статистических выборок, определения объёма и пространственного расположения точек, входящих в состав статистических выборок.

Сказанное выше привело к тому, что в конце 80-х годов популярность алгоритмов в скользящих окнах резко снизилась, а количество разработок в этом направлении уменьшилось. Очевидно, что низкая эффективность применения этих алгоритмов связана не с самой возможностью применения методов, базирующихся на достижениях теории статистических оценок, линейной оптимальной фильтрации в процессе обработки и интерпретации геофизических наблюдений, а с несовершенством реализующих их алгоритмов, в которых не учитывались особенности геофизических полей, среди которых одной из основных является их нестационарность.

Для решения проблемы корректной обработки нестационарных геологогеофизических наблюдений, в компьютерной технологии «*КОСКАД 3D*» были разработаны алгоритмы и программные реализации технологии одномерных и двумерных адаптивных скользящих окна.

Одним из первых алгоритмом, в котором, чисто интуитивно, была предпринята попытка учета площадной нестационарности наблюдаемых геофизических полей, можно считать метод самонастраивающейся фильтрации (Демура Г.В., Никитин А.А.). В алгоритме решалась задача обнаружения слабых линейных аномалий на основе оценки статистики Хоттелинга в скользящем двумерном вращающемся окне.

В середине 80-х годов был предложен модифицированный алгоритм энергетической фильтрации (*O.A. Кучмин, А.В. Эрастов, МГРИ*). В алгоритме предлагалась реализация энергетического фильтра, учитывающая простирание аномалий и изменение корреляционных характеристик сигнала и помех по площади непосредственно в процессе фильтрации.

В начале 90-х годов, в компьютерную технологию «*КОСКАД 3D*» был включен модуль *«Двумерная адаптивная фильтрация»* [1, 15, 26, 72], ориентированный на корректную фильтрацию именно нестационарных геофизических полей, посредством автоматической настройки параметров фильтра (высота, ширина, наклон окна, весовые коэффициенты) к изменению спектрально - корреляционных свойств аномалий и помех по площади

непосредственно в процессе фильтрации. Использование адаптивных окон позволило резко повысить качество результатов фильтрации и исключить негативные эффекты, присущие неадаптивным фильтрам [4]. На основе технологии, которая применялась при построении двумерных адаптивных фильтров, был разработан и алгоритм для оценки статистических и спектральнокорреляционных характеристик потенциальных геофизических полей в окнах с изменяющимися размерами и наклоном.

С целью лучшего понимания проблемы остановимся подробно на алгоритмах, разработанных для учёта нестационарности геофизических наблюдений на примере расчёта статистических характеристик.

2.2 Алгоритм адаптивного скользящего окна

Предлагаемый алгоритм оценки статистических атрибутов в адаптивных окнах позволяет оптимальным образом оценить параметры окна, его наклон непосредственно в процессе оценки атрибута [11, 18, 19]. Суть алгоритма заключается в следующем:

– Как и при оценке статистического атрибута в окне фиксированного размера для определения корреляционных характеристик и размеров наиболее энергоемких (чаще всего и протяженных) аномалий рассчитывается двумерная автокорреляционная функция ДАКФ (*m*, *p*);

– По значениям радиуса корреляции r_x вдоль профилей и между ними r_y выбираются размеры так называемого двумерного *базового окна*, которые заведомо больше размеров самых энергоемких аномалий;

 Базовое окно размещается в левом верхнем углу исследуемой площади и по значениям поля, попадающим в окно, рассчитывается текущая двумерная автокорреляционная функция ДАКФ_T (m, p);

- По $\mathcal{A}K\Phi_T(m, p)$ определяются текущие значения радиусов корреляции между пикетом r_{xm} и профилем r_{ym} , а по ним значения ширины, высоты и наклона текущего окна фильтрации;

 Осуществляется оценка статистического атрибута по точкам, попадающим в текущее адаптивное окно; Базовое окно смещается по пикетам и профилям, и процедура повторяется, начиная с третьего шага схемы.

Таким образом, при двумерном адаптивном окне в каждой точке наблюдений оценки статистического атрибута поля осуществляются при разных размерах окна и его наклона, которые, по существу, настраиваются на изменение спектрально-корреляционных характеристик поля от точки к точке и от профиля к профилю. Так, если в окрестностях определенной точки отсутствуют аномалии, то ширина и высота окна будут минимальными. При наличии в окрестностях точки самых энергоемких и протяженных аномалий ширина и высота окна будут максимальными, но не превышающими размеры базового окна.

2.3 Алгоритм адаптивного скользящего окна «живой» формы

Алгоритм оценки статистических атрибутов в скользящем адаптивном окне показал его существенные преимущества перед традиционными методами оценки в скользящих окнах, фиксированного размера и наклона. В то же время были выявлены ряд недостатков [11, 18, 19]. Наиболее существенные из них следующие:

Большие вычислительные затраты связанные с пересчетом *АКФ (m)* и,
тем более, *ДАКФ (m,p)* в каждой точке поля в окрестностях базового окна.

 Резкие изменения наклона и размеров окна для соседних точек поля приводит к нарушению плавности значений статистических атрибутов поля (характерного для потенциальных полей).

Первый недостаток, был исключен за счет использования алгоритма рекурсивных способов расчета *АКФ(m)* и *ДАКФ(m,p)* в пределах скользящего базового окна. Алгоритм базируется на учете результатов, полученных при оценке этих функций в окрестностях базового окна предыдущей точки, что позволяет существенно уменьшить затраты машинного времени.

Суммарное количество вычислений, необходимых для оценки автокорреляционной функции в окрестностях базового окна, при таком подходе, для всех точек на профиле приблизительно равно числу операций, необходимых для расчета обычной автокорреляционной функции для всего профиля.

Суть второго принципиального изменения алгоритма оценки

статистических атрибутов в адаптивном скользящем окне заключается в том, что форма скользящего окна «живой» формы не является параллелограммом с заданными размерами и наклоном, а совпадает с формой $\mathcal{AK}\Phi(m,p)$ при $\mathcal{AK}\Phi(m,p) > 0.15$, что исключает, в силу интегральной природы $\mathcal{AK}\Phi(m,p)$, резкого изменение его формы скользящего окна.

Коротко технология скользящего окна «*живой*» формы для оценки статистических характеристик геофизических полей заключается в одномерном случае в следующем.

Если при адаптивной фильтрации в каждой точке поля двумерной сети наблюдения выбирают параметры двумерного скользящего окна, то в алгоритме адаптивного скользящего окна *«живой»* формы вместо окна в виде наклонного параллелограмма, в выборку попадают лишь те точки базового окна, которые коррелируются с центральной. Корреляция каждой точки, попадающей в базовое окно, с центральной точкой базового окна определяется по характеру текущей двумерной автокорреляционной функции **ДАКФ** (*m*).

На рисунке 2.10 иллюстрируется технология скользящего окна *«живой»* формы, на примере гравитационного поля центрального Вьетнама, выполненная автором. В ней видно, как изменяется двумерная автокорреляционная функция при разном расположении базового окна $\mathcal{A}K\Phi(m,p)$, и форма окна *«живой»* формы, ограниченная изолинией 0.2. Так при положении базового окна на рисунке 2.10 (5) аномальное поле имеет северо-восточное простирание, а на рисунке 2.10 (4)- северо-западное и т.д.

Таким образом в окно произвольной формы, попадают точки, которые коррелируются с центральной на уровне 0.2.

Термин «живой» формы был выбран после просмотра изменений формы ДАКФ(*m,p*), от точки к точки (всего 250000 точек) в виде мультфильма, каждый кадр которого соответствовал текущей ДАКФ(*m,p*). Фильм напоминал движение медузообразного живого организма.

Таким образом, согласно рассмотренному выше алгоритму, видны преимущества технологии адаптивного двумерного скользящего окна *«живой»* формы в сравнении с традиционными скользящими окнами фиксированного



размера и наклона и адаптивными методами.

Расположение и площадь базового окна в аномалии гравитационных полях Форма и размер окна двумерного фильтра в соответстви с корреляционной Функцией ДАКФ (m,p) представлены на рисунке (a)

Рисунок 2.10 – Форма ДАКФ(m,p) при различных положениях базового окна гравитационного поля dG в центральной части Вьетнама

Резюмируя, можно сказать, что появление алгоритмов динамических скользящих окон и окон *«живой»* формы, как одномерных, так и двумерных в компьютерной технологии статистического и спектрально – корреляционного анализа данных *«КОСКАД 3D»* позволили совсем на другом качественном уровне реализовывать множество методов интерпретационной обработки геолого-геофизической информации, связанных со скользящими окнами.

Среди них методы статистического и спектрально - корреляционного зондирования потенциальных геофизических полей [18, 21, 22], алгоритмы оценки объемного распределения магнитных и плотностных масс на основе двумерной адаптивной полосовой фильтрации, оценки статических характеристик потенциальных геофизических полей для разных частотных составляющих поля и т.д.

2.4 Результаты оценки статистических атрибутов гравитационного и магнитного полей центрального Вьетнама

В исходных картах гравитационного поля в редукции Буге (Рисунок 2.11), аномального магнитного поля (Рисунок 2.12), а также в поле локальной компоненты гравитационного поля (Рисунок 2.13) однозначно трудно выделить границы аномалий различной амплитуды и системы разломов различного простирания.

С другой стороны, оценок атрибутов В полях статистических гравитационного и магнитного полей на рисунках 2.11, 2.12, 2.13 содержится широкий спектр аномальных объектов, положительные значения которых (в поле дисперсии, асимметрии, эксцесса, коэффициента вариации гравитационного и магнитного полей) контролируют границы аномалий И соответственно неоднородных геологических образований их индуцирующих.

В полях статистических атрибутов наблюденного гравитационного поля (Рисунок 2.11) находят отражение особенности геологических образований, расположенных на больших глубинах, от 3÷5 *км* и до границы Мохоровичича, включая особенности положения кристаллического фундамента.

В полях статистических атрибутов локального гравитационного поля на отражены особенности распределения аномалииобразующих рисунке 2.13 объектов в верхней части разреза, на глубинах до 3÷5 км. Здесь положительные экстремальные значения В полях статистических атрибутов локального гравитационного поля (дисперсии, асимметрии, эксцесса) вытянуты в трех основных направлениях: в юго-западном, юго-восточном и субширотном. На северо-востоке, юго-западе и юго-востоке анализируемой территории поля свидетельствует атрибутов дифференцированы, сильно что 0 сложном геологическом строении И возможной, разновозрастной, тектонической активности в этих областях.

В полях статистических атрибутов локальной компоненты гравитационного поля рисунка 2.13 отражаются границы нарушения стационарности, а значит и

изменения геологического строения для верхней части разреза. Здесь выделяется большое количество аномальных зон различного простирания и формы, кольцевых и линейных структур. Полученная информация может быть использована при поисковых работах на отдельные виды рудных полезных ископаемых в будущем.

Характер полей статистических атрибутов локальной компоненты гравитационного поля рисунка 2.13 (в, г, д, е) позволяет выделить границы аномальных блоков по положительным экстремумам значениям статистических атрибутов. Блоки с повышенной избыточной плотностью сконцентрированы в основном на юго-западе, юго-востоке и северо-востоке анализируемой территории. Что позволяет предположить о высоком потенциале этих территорий с точки наличия залежей полезных ископаемых, скрытых зрения осадочными образованиями и учитывать при проведении поисковых работ в будущем.

В полях статистических атрибутов магнитного поля отражены границы разно амплитудных магнитных аномалий (Рисунок 2.12), индуцированных геологическими образованиям, расположенными на глубинах до 10÷15 км.

Основной вклад в наблюденное магнитное поля вносят особенности положения и состава пород кристаллического фундамента. На западе поля статистических атрибутов характеризуется наличием положительных аномальных зон, вытянутых с севера на юг.

В центральной и южной частях четко отмечаются границы 3 крупных локальных неоднородных блоков с положительными значениями магнитной восприимчивости, размером около 5 *км*, индуцируемых геологическими объектами, приуроченными к глубинам от 1 до 3 *км*. Возможно, эти аномальные зоны связаны с интрузивным магматизмом (хотя в полях атрибутов гравитационного поля эта информация отражена довольно слабо).

В восточной части полей статистических атрибутов магнитного поля отмечается уменьшение его дифференциации, что отражает относительную стабильность, в геологическом развитии этого района и выходу к границам океанической коры.



Статистические характеристики в скользяшем окне гравитационного поля dG Аномальное гравитационное поле dG

52

Рисунок 2.11 – Оценка статистических характеристик гравитационного поля в скользящем окне «живой» формы в центральной части Вьетнама



Статистические характеристики в скользяшем окне магнитного поля dT

Аномальное магнитное поле dT приведенное к полюсу Среднее магнитного поля dT

Рисунок 2.12 – Оценка статистических характеристик магнитного поля dT в скользящем окне «живой» формы в центральной части Вьетнама



Рисунок 2.13 – Оценка статистических характеристик локальной компоненты гравитационного поля dG в окне «живой» формы в центральной части Вьетнама

Статистические характеристики в скользяшем окне локального гравитационного поля

2.5 Градиентные характеристики потенциальных геофизических полей

Известно, что для детализации особенностей поведения любой математической функции (определения точек перегиба, экстремальных значений и т.д.) в математике используются ее производные первого и высших порядков. В случае функции двух переменных вычисляются ее производные по направлению или градиенты. Очевидно, что знание статистических оценок градиентов геофизических полей также позволит исследователю детализировать особенности поля и подчеркнуть границы аномальных объектов. Вычисление оценок *градиентных характеристик* в окрестностях каждой точки исходной сети наблюдения позволяет получить поля градиентов исходного поля [10, 13, 22, 32].

При анализе градиентных характеристик площадных геологогеофизических наблюдений обычно вычисляется градиент поля вдоль простирания профилей $\Delta x = \delta f / \delta x$, вкрест простирания профилей $\Delta y = \delta f / \delta y$, полный градиент $\Delta_{xy} = \sqrt{(\delta f / \delta x)^2 + (\delta f / \delta y)^2}$ и его направление $\alpha = arctg(\Delta y / \Delta x)$.

Так как геофизические поля не являются непрерывными функциями, то использование стандартных математических приемов для оценки их производных невозможно. Для оценки градиентных характеристик геофизических полей существуют несколько вычислительных алгоритмов. Как показывает практика их использования, наиболее эффективные оценки градиентов получаются при использовании алгоритма, заключающегося в расчете, по методу наименьших квадратов¹, аппроксимирующего полинома первой степени по трем точкам поля - анализируемой и двумя соседними с ней (соответственно по пикетам для градиента вдоль профилей и профилям для градиента вкрест простирания профилей).

В случае трехмерных наблюдений, кроме градиентов Δx и Δy можно оценить градиент по оси *z* (высоте или глубине) $\Delta z = \delta f / \delta z$. В этом случае формула для

¹ В главе 2 подробно рассматриваются метод наименьших квадратов и вопросы полиномиальной аппроксимации геофизических наблюдений.

расчета полного градиента примет вид: $\Delta f = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$. Направления полного градиента в пространстве для трехмерного случая определяется двумя углами. Первый в плоскости пикетов и профилей $\alpha = arctg(\Delta y/\Delta x)$ и второй, между полным градиентом в плоскости пикетов и профиле и градиентом вдоль оси z: $\beta = arctg(\Delta_{xy}/\Delta z)$.

Анализ результатов обработки большого количества реальных геологогеофизических наблюдений позволяет сделать следующие выводы, которые необходимо учитывать при интерпретации полей градиентных характеристик:

– Границы аномальных объектов отмечаются экстремумами в полях градиентов вдоль осей и максимумами в поле полного градиента;

– Экстремумами, в полях градиентных характеристик, отмечаются границы аномалий различных амплитуд, что позволяет при визуализации увидеть одновременно контуры аномалий различной амплитуды;

– Градиентные характеристики вдоль определенного направления позволяют подчеркнуть границы аномалий, простирание которых перпендикулярно этому направлению;

– Поле направления полного градиента позволяет оценить простирание аномалий в каждой точке исходной сети наблюдений, а контрастные переходы, от минимальных значений к максимальным значениям, контролируют положение осей аномалий;

– В оценке градиентных характеристик геофизических полей экстремумами трассируются границы, как высокоамплитудных аномалий, так и аномалий небольшой амплитуды, что позволяет одновременно видеть на картах границы всех аномалий.

На рисунке 2.14 приведена оценка градиента для простейшей положительной одномерной (слева) и двумерной (справа) аномалии.



Рисунок 2.14 – Пример оценки градиента поля для одномерной (слева), двумерной(справа) аномалии

На рисунке 2.15 представлены оценки полного градиента волнового поля регионального сейсмического профиля 1-СБ (Забайкальский этап) 800 *пог. км.* с целью уточнения положения границы Мохоровичича.



Рисунок 2.15 – Оценка полного градиента волнового поля регионального сейсмического профиля 1 СБ (Забайкальский этап 800 пог. км.) с целью уточнения положения границы Мохоровичича

На рисунке 2.16 представлены оценки градиента магнитного поля вдоль регионального профиля 2-ДВ-А (Анадырь-Хатынка, 550 км) с целью уточнения положения слабо проявленных внутрикоровых границ.



Рисунок 2.16 – Оценка поля полного градиента (справа) магнитного поля (слева) в окрестностях регионального профиля 2-ДВ-А (Анадырь-Хатынка, 550 км) с целью уточнения положения слабо проявленных внутрикоровых границ

Необходимо отметить, что экстремумы градиента поля по оси X контролируют границы аномалий меридионального простирания, по оси Y - широтного простирания. Максимумы полного градиента поля оконтуривают аномалии произвольной формы.

Наряду с градиентными характеристиками, при обработке и интерпретации геофизических данных часто используется величина *коэффициента* анизотропии поля G/G_{90} G/G_{90} . Здесь G - значение полного (максимального) градиента поля в точке, G_{90} - значение градиента поля в направлении, перпендикулярном направлению полного градиента G. На практике, для оценки анизотропных свойств поля, используется величина $\log_{10}(G/G_{90}+1)$. Это связано с тем, что величина отношения G/G_{90} часто принимает очень большие значения, при близких к нулю значениях знаменателя G_{90} .

2.6 Результаты оценки градиентных характеристик гравитационного и магнитного полей центральной части Вьетнама

В исходных полях гравитационного поля (Рисунок 2.17 а) и аномального магнитного поля (Рисунок 2.18 а) однозначно трудно выделить границы аномалий различной амплитуды и системы разломов различного простирания. С другой стороны, результаты оценки статистических характеристик, оценки полного градиента магнитного и гравитационного полей (Рисунок 2.11, 2.12, 2.17 б), позволяют оконтурить многие аномалии, которые контролируются значениями максимумов полного градиента и экстремумами в полях первых статистических моментов. При этом, возможно, оконтуривание аномалий произвольной формы - линейных, кольцевых и соответственно положение геологических объектов их индуцирующих.

В поле полного градиента гравитационного поля (Рисунок 2.17 б) четко отражаются границы аномалиобразующих объектов, приуроченных к глубинам до 3÷5 км. Эти геологические структуры представлены в виде полос максимальных значений полного градиента гравитационного поля и имеют северо-восточное простирание.

Линейные положительные максимумы в поле полного градиента гравитационного поля, скорее всего, связаны с областями развития тектонических нарушений, которые имеют юго-западное, юго-восточное и субширотное простирание.

В поле полного градиента гравитационного поля оконтуривается большое количество кольцевых аномалий небольших размеров, как положительных, так и отрицательных, сосредоточенных в основном в северо-западной и центральной частях региона.

Линейные аномалии в поле полного градиента контролируют области развития тектонической деятельности и могут быть связаны с проявлением магматизма, который в свою очередь, сопровождает формирование потенциальных рудных месторождений полезных ископаемых. В поле полного градиента наблюденного магнитного поля (Рисунок 2.18 б) четко отражается положение пород кристаллического фундамента, которые связаны с максимальными значениям полного градиента магнитного поля.

На карте градиентного поля отмечаются граница множества блоков неправильной формы, характеризующихся амплитудой более 0.3 *nT/m*, индуцируемых геологическими объектами, приуроченными к глубинам от 1 до 3 *км*. Скорее всего, эти аномальные зоны связаны с интрузивным магматизмом (хотя в полях полного градиента гравитационного поля эта информация отражена довольно слабо).

В восточной части поля полного градиента магнитного поля отмечается уменьшение его дифференциации, что связано с увеличением мощности осадочных отложений в этом районе и выходу к границам океанической коры.



Рисунок 2.17 – Аномальное гравитационное поле dG в редукции Буге (a) и поле полного градиента гравитационного поля dG (б)

Результаты, полученные во второй части диссертационной работы, позволяют сформулировать первое защищаемое положение.



Магнитное поле dT приведенное к полюсу Полный градиент магнитного поля dT

Рисунок 2.18 – Аномальное магнитное поле dT приведенное к полюсу (a) и поле полного градиента магнитного поля dT (б)

Предложена технология оценки статистических атрибутов магнитного и гравитационного полей в адаптивных скользящих окнах, аномалииобразующих позволяющая уточнять границы геологических объектов линейной, кольцевой произвольной формы. U

3 ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ЦЕЛЬЮ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗНОГЛУБИННЫХ АНОМАЛИЕОБРАЗУЮЩИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

С помощью методов линейной оптимальной фильтрации геофизических полей решается широчайший спектр интерпретационных задач разведочной геофизики. Широкое распространение алгоритмы линейной фильтрации получили сначала в сейсморазведке, где с их помощью решаются задачи частотного анализа волнового поля, исключения помех и выделения разночастотных составляющих с использованием фильтров низких и высоких частот, а также полосовой фильтрации.

В классическом понимании под фильтрацией понимается любое преобразование наблюдений посредством оператора свертки с целью получения информации о структуре данных – полезных сигналах и помехах. При этом под сигналом понимается форма проявления поля, в которую облечена полезная информация. Под помехой подразумевается любое возмущение поля, мешающее выделению полезной информации. В гравиразведке И магниторазведке используется понятие аномалия, в сейсморазведке - полезный сигнал, в электроразведке используются и то и другое.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили линейные оптимальные фильтры, построение которых осуществляется обычно в рамках аддитивной модели поля, т.е. когда результаты наблюдений представлены в виде суммы полезных сигналов и помех $f_i = a_i + n_i$ (здесь f_i – наблюденное поле, a_i – аномальные, полезные составляющие поля n_i – помехи различной природы).

Следует отметить, что понятия сигнала и помехи в разведочной геофизике носят не абсолютный, а относительный характер. Так, при выделении локальной

гравиразведке помехами являются региональная аномалия аномалии В И погрешности наблюдений, а при выделении региональной аномалии в качестве помех выступают уже локальные аномалии наблюденного поля. Сигнал (аномалия) может быть представлен либо детерминированной, т.е. аналитически заданной функцией, либо случайным процессом. Помеха чаще всего описывается случайным стационарным процессом с известными неизвестными или корреляционными (спектральными) свойствами. Помехи быть могут геологического (влияние фундамента, верхней части разреза, рельефа местности и т.д.) и негеологического (временные вариации полей, блуждающие токи, погрешности измерений и т.д.) происхождения.

3.1 Методы линейной оптимальной фильтрации в геофизике

В теории линейной фильтрации Колмогорова-Винера преобразование В некоторую функцию путем экспериментальных данных фильтрации производится путем применения оператора фильтра $L: y(t_i) = L[f(t_i)]$, где f(t) – вход фильтра, $y(t_i)$ – выход фильтра. Линейным оператором или линейным фильтром называется оператор, удовлетворяющий двум условиям: $L[af(f_i)] =$ $L[f_1(f_i) + f_2(f_i)] = L[f_1(f_i)] + L[f_2(f_i)],$ $aL[f(f_i)]$ И линейности то есть преобразования [4, 7].

Воздействие линейного фильтра на входной сигнал f(t) определяется выражением $y(t) = \int_0^T h(\tau)f(t-\tau)d\tau$, где $h(\tau)$ – весовая функция фильтра, которое называется интегралом свертки. Дискретным аналогом свертки является ее представление в виде $y_i = \sum_{i=0}^M h_i f_{j-1}$, где h_i – дискретные значения весовой функции фильтра (весовые коэффициенты) $i = 0.1, \ldots, M, f_j$ – входные (исходные) значения, y_i – выходные значения, т.е. результаты фильтрации $j = 0, 1, \ldots, n$.

На рисунке 3.1 иллюстрируется дискретная свертка сигнала с весовыми коэффициентами фильтра при осреднении значений поля вдоль профиля в скользящем окне, как пример простейшего линейного фильтра.



Рисунок 3.1 – Иллюстрация дискретной свертки сигнала с весовыми коэффициентами вдоль профиля наблюдений

Двумерный аналог свертки, определяющий двумерную фильтрацию входных данных (j = 0, 1, ..., n, n - число пикетов, p = 0, 1, ..., N; N - числопрофилей) имеет вид: $y_{p,j} = \sum_k \sum_i h_{ki} f_{p-k,j-i}$, где h_{ki} – матрица весовых коэффициентов, индекс k = 0, 1, ..., K изменяется по профилям: индекс i – по пикетам I = 0, ..., M.

Таким образом реализация того, или иного линейного фильтра сводится к выбору его размеров, то есть числа весовых коэффициентов и непосредственно значений весовых коэффициентов фильтра h_i . Значения весовых коэффициентов определяются характером задач, решаемых с помощью того или иного фильтра.

Сегодня в интерпретационной обработке данных гравиразведке и магниторазведки широко используются три фильтра: фильтр Колмогорова-Винера, энергетический фильтр и согласованный или фильтр обнаружения.

При этом критерием оптимальности фильтра Колмогорова-Винера является минимизация среднеквадратического отклонения профильтрованного сигнала от желаемого, энергетического фильтра - максимизации энергетического отношения сигнал/помеха $\rho = \frac{\sum_{i=1}^{m} a_i^2}{\sigma_{пом.}^2}$ на выходе фильтра и согласованного фильтра –

максимизации пикового отношения сигнал/помеха.

В первой главе диссертации подробно рассматриваются алгоритмические решения оценки статистических характеристик геофизических полей в скользящих окнах и приводится существо алгоритмов оценки статистических характеристик в адаптивных скользящих окнах и окнах *«живой»* формы, для корректной обработки нестационарных геофизических наблюдений.

С учетом того, что процедура оценки статистических характеристик геофизических полей в скользящих окнах очень близки (в смысле программной реализации и функциональной нагрузки) с дискретной сверткой в скользящем окне при фильтрации, в компьютерной технологии *«КОСКАД 3D»* реализованы адаптивные фильтры и фильтры в окне «живой» формы, как одномерные, так и двумерные (площадные) [10, 18, 19, 28, 72]. Это позволяет корректно использовать оптимальные одномерные и двумерные фильтры при анализе нестационарных геофизических наблюдений, которыми являются практически все потенциальные, тепловые и радиометрические поля, включая сейсмические данные.

Из критериев оптимальности для разных фильтров следует, что для решения задачи выделения наиболее энергоемких аномалий (протяженных и большой амплитуды) является энергетический фильтр. Это свойство данного фильтра является определяющим при создании технологии разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие компоненты.

С целью выделения трендовой, наиболее энергоемкой составляющей гравитационного или магнитного полей предлагается выполнение следующей процедуры:

– По всей площади наблюдений рассчитывается двумерная автокорреляционная функция **ДАКФ** (*m*, *p*), где *m*- величина смещения по пикетам, *p* - величина смещения между профилями;

– Анализируется ДАКФ (*m*, *p*) и по значениям радиуса корреляции между пикетами и профилями выбирается соответственно ширина (число пикетов) и высота (количество профилей) базового окна фильтрации для модуля фильтрация в окне «живой» формы компьютерной технологии «КОСКАД 3D» (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Выбор текущих параметров окна фильтрации по ДАКФ (т, р)

В результате работы модуля фильтрации в окне *«живой»* формы получаем оценку трендовой, наиболее энергоемкой, компоненты исходного поля. Вычитая из наблюденного поля, значения трендовой компоненты оцениваем параметры локальной компоненты поля первого порядка, которая, в свою очередь, может содержать составляющие различной протяженности и энергии.

3.2 Разложение гравитационного и магнитного полей на составляющие

Если оценить двумерную автокорреляционную функцию для локальной составляющей первого порядка, то она будет характеризовать корреляционные свойства наиболее составляющей энергоемкой для этой компоненты наблюденного поля. Энергетическая фильтрация в окне «живой» формы локальной составляющей первого порядка с соответствующими размерами базового окна, выбранными по соответствующей двумерной автокорреляционной, позволит оценить локальную компоненту второго порядка, как разность локальной компонентой первого порядка и оценкой ее наиболее низкочастотной составляющей.

Фильтрация локальной компоненты второго порядка с использованием энергетического фильтра в окне *«живой»* формы позволяет перейти к оценке локальной компоненты третьего порядка и т. д.

Такую итерационную процедуру можно делать до тех пор, пока двумерная автокорреляционная функция очередной локальной составляющей не будет соответствовать абсолютно некоррелированному сигналу, то есть *«белому»* шуму.

Таким образом последовательная адаптивная энергетическая фильтрация в окне *«живой»* формы все более высокочастотных локальных составляющих наблюденного поля, с оценкой их формы позволяет разложить исходное поле на составляющие, причем их число будет в каждом конкретном случае разным и определяться реальной геологической ситуацией.

Учитывая тот факт, что глубина положения центра масс аномалииобразующего объекта в гравиразведке и магниторазведке определяется шириной, соответствующей ему аномалии, то есть частотой, то в результате разложения наблюденного поля на частотные компоненты с использованием предложенной технологии можно делать оценки глубины расположения геологических объектов их индуцирующих.

Таким образом, наличие каждой компоненты гравитационного или магнитного поля, свидетельствует о наличии аномалииобразующего объекта, расположенного на определенной глубине, что может быть использовано при решении задач геологического районирования, структурного и геологического картирования. Особенно это актуально в отсутствии наземных геологических съемок, картирования недоступных для исследования территорий, картировочного бурения, когда однозначного решения задачи о геометрических границах геологических объектов затруднительно.

Необходимо отметить, что для каждой составляющей магнитного поля возможна оценка главной магнитоактивной поверхности с использованием широко распространенных алгоритмов [10, 21, 25, 72]. К сожалению, эти исследования в диссертационный работе не проводились в силу временных издержек, но планируются в дальнейшем. Результатом таких исследований может

быть построена трехмерная модель, в которой отображено положение этих поверхностей, соответствующих каждой из выделенных компонент магнитного или гравитационного поля.

Рассмотрим несколько практических примеров использования предложенной технологии разложения потенциальных полей на составляющие.

На рисунке 3.3 изображено наблюденное магнитное поле *dT* размером приблизительно 300 × 1500 *км* на территории Австралии (слева, зеленокаменный пояс) и соответственно трендовая компонента магнитного поля, локальная компонента первого, второго, третьего и четвертого порядка.



Рисунок 3.3 – Результат разложения магнитного поля dT (слева) на составляющие. Австралия, зеленокаменный пояс

На рисунке 3.4 представлены результаты разложения на составляющие компоненты аэромагнитной съемки восточной части Сибири с использованием предложенной в диссертационной работе технологии. Вверху на рисунке изображено непосредственно наблюденное магнитное поле, далее слева направо, трендовая компонента поля, локальная компонента 1-го порядка, локальная компонента 2-го порядка и локальна компонента 3-го порядка. В этом примере интерес представляет самая высокочастотная компонента магнитного поля, в

которой отчетливо отображается схема маршрутов, по которым осуществлялась аэромагнитная съемка. В ней отчетливо отображается схема полета самолета, что свидетельствует о недостатках первичной обработки аэромагнитных наблюдений и ввода соответствующих поправок. Также необходимо отметить, что разброс значений в третьей высокочастотной локальной компоненте магнитного поля лежит в диапазоне от -0.02 до +0.02 nT, что соизмеримо с точность аэромагнитной съемки.





Рисунок 3.4 – Результат разложения магнитного поля (вверху) на составляющие

На рисунке 3.5 представлены результаты разложения наблюденного гравитационного поля в редукции Буге центральной части Вьетнама на составляющие. Трендовая компонента гравитационного поля имеет четко выраженную тенденцию к уменьшению в северо-восточном направлении, что отчасти связано с рельефом местности, положением кристаллического фундамента и положением поверхности Мохоровичича.

По имеющейся в распоряжении автора информации на северо-западе исследуемой территории отмечается общее погружение поверхности Мохоровичича. Глубина положения кристаллического фундамента имеет тенденцию увеличиваться в северо-восточном направлении, коррелируется с рельефом местности и постепенно понижается к юго-востоку.

Диапазон значений трендовой компоненты гравитационного поля лежит в интервале от -70 до 20 *mG* и составляет около 100 *mG*. Характер трендовой компоненты гравитационного поля отражает особенности глубинного строения земной коры.

Локальная компонента гравитационного поля первого порядка включает большое количество аномалий различной формы (линейных и кольцевых), размером $10\div30$ км, что соответствует аномалииобразующим объектам, расположенным на глубинах от 2 до 7 км. Диапазон значений локальной составляющей гравитационного поля первого порядка лежит в интервале от -15 до 15 mG.

представлена Локальная второго порядка компонента мозаикой знакопеременных аномалий, размер которых колеблется в интервале от 1 до 2 аномалииобразующим соответствует объектам, KM. что приуроченным приблизительно к глубинам от 300 м до 700 м. Диапазон значений локальной составляющей гравитационного поля второго порядка лежит в интервале от -4 до 4 *mG*.

Локальные компоненты 3-го и 4-го порядка представлены практически некоррелированной помехой с диапазоном изменения от -0.8 до 0.8 *mG* и от -0.25 до 0.25 *mG* соответственно.



Разложение аномального гравитационного поля dG на составляющие

Аномальное гравитационное поле dG Трендовая компонента гравитационного поля

Рисунок 3.5 – Результат разложения гравитационного поля dG в центральной части Вьетнама на составляющие

Результаты разложения наблюденного гравитационного поля в редукции Буге на составляющие, представляет интерпретатору информацию о наличии аномалииобразующих и геологических объектов на разных глубинах.

Трендовая компонента гравитационного поля (Рисунок 3.5 б) отражает положение поверхности Мохоровичича. Наибольшее погружение отмечается на северо-западе территории и имеет тенденцию к постепенному уменьшению в северо-восточном направлении. Положение границы Мохоровичича устойчиво на востоке исследуемой территории, граничащей с океанической корой.

В юго-западных и южных областях сложный подъем и падение фундамента Мохоровичича показывает, что в этой области может иметь место тектоническая активность, где создается канал, по которому раствор магмы в мантии перемещается вверх и накапливается в земной коре.

В локальной компоненте гравитационного поля 1-го порядка (Рисунок 3.5 в) отражается, расположение объектов разной плотности на глубинах от 3 до 10 *км*. Отмечаются неоднородные по плотности крупные объекты в северной, югозападной, юго-восточной и центральной частях центрального Вьетнама.

В локальной компоненте 2-го порядка (Рисунок 3.5 г) находят отражение неоднородные плотностные блоки, расположенные на глубинах от 300 до 700 *м*, которые представляют интерес для поисковых задач в общем и поиска эндогенных месторождений полезных ископаемых.

Анализ полученных результатов свидетельствует о большом количестве положительных аномалий гравитационного поля, сосредоточенных на севере, юго-западе, юго-востоке и в центральной части – что может быть перспективным на наличие рудных месторождений металлов – золота, железа, меди, свинца, олова и вольфрама (Рисунок 4.6 а).

На рисунке 3.6 представлены результаты разложения магнитного поля центральной части Вьетнама на составляющие с использованием рассмотренной выше технологии последовательной адаптивной энергетической фильтрации в окне «*живой*» формы. Вверху на рисунке изображено исходное магнитное поле *dT* приведенное к полюсу в *nT*. Далее слева - направо, сверху - вниз
1-го, 2-го и 3-го порядка.



Автоматическое разложение магнитного поля dT на составляющие

Трендовая компонента магнитного поля dT Локальная компонента 1-го порядка



Рисунок 3.6 – Результат разложения магнитного поля dT в центральной части Вьетнама на составляющие

В трендовой компоненте магнитного поля в западной части выделяется крупный блок, характеризующийся положительными аномальными значениями. Источником такой аномалии может быть крупное геологическое образование, расположенное на больших глубинах от 3 до 10 км.

Для центральной части трендовой компоненты магнитного поля характерны низкие значения поля и ряд положительных кольцевых аномалий меньшего размера (до 3÷5 км). Это может быть связано с распространением немагнитных пород осадочного чехла.

Восточная часть низкочастотной составляющей магнитного поля содержит, как положительные, так и отрицательные аномалии, кольцевой и линейной формы в основном меридионального простирания.

В юго-восточной части трендовой компоненты отмечается крупная кольцевая аномалия, диаметром около 5÷7 *км*. Диапазон изменения значений трендовой компоненты лежит в интервале от -250 до 400 *nT*.

Характер поля первой локальной компоненты магнитного поля позволяет качественно разделить исследуемую площадь на две части - восточную и западную. Для западной характерно наличие положительных и отрицательных магнитных аномалий различного простирания и большой, по сравнению с восточной частью, амплитуды (от -150 до 150 *nT*). Восточная часть исследуемой территории также представлена аномалиями разного знака, но меньшей интенсивности.

Так же, как и результат разложения гравитационного поля на составляющие, результаты выделения компонент магнитного поля (Рисунок 3.6) предоставляет интерес для оценки аномалииобразующих объектов, находящихся на разной глубине.

В трендовой компоненте магнитного поля (Рисунок 3.6 б) выделяются три отдельные области. В западной части выделятся крупная положительная магнитная аномалия, которая скорее всего индуцируется породами кристаллического фундамента и связана с уменьшением мощности осадочного чехла.

Центральная часть характеризуется низкими значениями амплитуды магнитных аномалий и сильно дифференцирована, что скорее всего связано с развитием метаморфизма и наличием базальтовых глыб, приуроченных к глубинам от 1 до 2 *км*.

Восточная часть представляет собой чередование положительных и отрицательных магнитных аномалий, меридионального направления, которые можно объяснить чередованием вытянутых в меридиональном направлении базальтов, перемежающихся с осадочными и метаморфическими породами.

Юго-восточный регион характеризуется наличием кольцевых положительных аномалий диаметром 3 до 5 *км*, которые, скорее всего связаны с крупными дайковыми гранитными образованиями.

Локальная компонента 1-го порядка (Рисунок 3.6 в), в западной и центральной областях содержит много локальных положительных аномалий, что может свидетельствовать о наличии скрытых рудных месторождений полезных ископаемых, содержащих магнитные минералы и расположенных на глубинах от 300 до 1000 *м*.

Характер магнитного поля локальных компонент 2-го и 3-го порядков в целом похожи и отражают относительное распределение магнитных масс, расположенных в верхней части геологического разреза. Набольшее различие между ними наблюдается между западной и восточной частями исследуемой территории.

3.3 Оценка и анализ высокочастотной «шумовой» компоненты магнитного поля

Локальная компонента четвертого порядка магнитного поля представлена на рисунке 3.7.

Размах значений поля локальной составляющей магнитного поля 4-го порядка лежит в диапазоне от -5 до 5 *nT*, то есть соизмерим с точностью самой магнитной съемки. Несмотря на это, в этой наиболее высокочастотной «шумовой» компоненте магнитного поля просматриваются контуры структурных элементов, которые после дополнительной обработки с использованием

функционального наполнения компьютерной технологии *«КОСКАД 3D»* могут быть полезны при интерпретационной обработке данных магниторазведки, при решении прогнозных задач и геологического районирования территорий.



Локальная компонента 4-го порядка магнитного поля dT (Шумовая компонента без ураганных значения)

Рисунок 3.7 – Локальная компонента 4-го порядка магнитного поля dT

Однозначно визуально выделить аномалии в высокочастотной «*шумовой*» компоненте магнитного поля достаточно тяжело. Для решения этой задачи автором предложен следующий алгоритм.

Первоначально, из поля высокочастотной «*шумовой*» компоненты исключаются *«ураганные»* положительные и отрицательные значения. После этого поле шумовой компоненты центрируется, то есть приводится к нулевому среднему. Далее все отрицательные значения центрированного поля помехи заменяются на положительные посредством умножения на минус единицу. Результат приведения центрированного магнитного поля шумовой компоненты к положительным значениям приведен на рисунке 3.8 (в). С целью сглаживания оценки шумовой компоненты магнитного поля осуществляется ее адаптивная энергетическая фильтрация в окне *«живой»* формы. Результат фильтрации приведен на рисунке 3.8 (г).



Оценка энергии высокочастотной компоненты магнитного поля *dT* Магнитное поле *dT* приведенное к полюсу Шумовая компонента без ураганных значения

(a) – магнитное поле dT приведенное к полюсу, (б) – высокочастотная (шумовая) компонента магнитное поле dT, (в) – поле абсолютных значений шумовой компоненты магнитное поле dT без ураганных значений, и (г) – результат его энергетической фильтрации в окне «живой» формы в центральной части Вьетнама

Анализ полученных результатов оценки шумовой компоненты магнитного *dT* позволяет сделать следующие выводы:

– Вид шумовой компоненты магнитного поля dT абсолютно не коррелируются с исходным полем и содержит дополнительную, полезную для интерпретатора, информацию о структурных элементах анализируемой площади;

– Не вызывает сомнений наличие тренда в поле энергии шумовой компоненты магнитного поля dT, который характеризуется уменьшением его значений в направлении запад-восток;

– Минимальным значениям энергии шумовой компоненты соответствуют области в восточной части исследуемой территории, которые хорошо коррелируются с современными границами моря и уменьшения мощности осадочного чехла;

– Максимальные значения энергии шумовой компоненты магнитного поля характерны для западной части исследуемой территории, где по имеющейся геологической информации отмечается уменьшение мощности пород осадочного чехла и общее повышение рельефа.

Такой характер распределения энергии шумовой компоненты магнитного поля по площади можно объяснить петрофизическими свойствами пород кристаллического фундамента и осадочного чехла. Породы кристаллического фундамента содержат большое количество магнитных минералов, а осадочные отложения, наоборот, обладают небольшими значениями магнитной восприимчивости.

Таким образом особенности шумовой компоненты магнитного поля можно использовать при решении часто востребованной задачи прикладной геофизики, а именно картировании положения пород кристаллического фундамента и оценки мощности осадочного чехла. Там, где значения шумовой компоненты мощность осадочного чехла минимальна или максимальны, OH совсем отсутствует. И наоборот, низким значениям энергии шумовой компоненты соответствуют области широкого распространения осадочных отложений большой мошности.

Характерные особенности поля энергии шумовой компоненты магнитного поля можно использовать и при решении задач выделения неоднородностей непосредственно в осадочном чехле, с целью картирования слабо проявленных отрицательных *«нефтяных»* аномалий и решения задач структурной геологии.

Предложенная технология оценки шумовой компоненты магнитного поля была протестирована на данных по разным территориям и везде были получены

интересные для геологического истолкования результаты. На рисунке 3.9 представлен результат обработки магнитного поля в алмазоносной провинции Республики Якутия.



Рисунок 3.9 – Пример оценки шумовой компоненты магнитного поля (Мирный, Якутия).

Слева вверху – наблюденное магнитное поле dT (nT), справа вверху - локальная компонента магнитного поля dT 3-го порядка, внизу – оценки шумовой компоненты

На рисунке 3.10 представлены результаты оценки шумовой компоненты на территории Восточной Сибири (Непско-Ботуобинская антиклиза).



Рисунок 3.10 – Восточная Сибирь. Непско-Ботуобинская антиклиза. Исходное магнитное поле dT (вверху). Оценка шумовой компоненты магнитного поля (внизу)

На рисунке 3.12 представлена оценка шумовой компоненты магнитного поля для объекта Кондер, расположенного в восточной Сибири (Рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Положение структуры Кондер

Здесь решалась задача выделения областей для разведочного бурения, с целью выделения магнито-содержащих минералов.



Рисунок 3.12 – Кондер. Магнитное поле dT (слева), оценка шумовой компоненты магнитного поля dT (справа)

На рисунке 3.13 представлены результаты разложения магнитного поля на составляющие и дальнейшей оценки шумовой компоненты магнитного поля для решения задачи выделения областей наиболее вероятного распространения офиолитов, мешающих глубинному бурению на нефть, проводимому компанией РОСНЕФТЬ (Рисунок 3.14). Полученные результаты использовались компанией в дальнейшем при проектировании бурения.



Рисунок 3.13 – Результат разложения магнитного поля на составляющие территория (ОАЭ), Дубаи.



Продолжение рисунка 3.13 – Результат разложения магнитного поля на составляющие территория (ОАЭ), Дубаи.



Рисунок 3.14 – Оценка шумовой компоненты магнитного поля. ОАЭ, Дубаи

83

Результаты, поученные в третьей главе диссертационной работы, позволяют сформулировать второе защищаемое положение.

Разработана технология разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие и оценки «шумовой» компоненты магнитного поля посредством последовательной адаптивной энергетической фильтрации, позволяющая выделять разноглубинные геологические объекты и уточнять положение кристаллического фундамента.

4 ТЕХНОЛОГИЯ РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ОДНОРОДНЫЕ ПО МАГНИТНОМУ И ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЯМ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕР АНАЛИЗА

Одной из востребованных задач прикладной геологии и геофизики является процедура районирования исследуемых территорий определенным ПО геологическим параметрам, геофизическим полям и их атрибутам. В прикладной геофизике широко используются результаты геологического, И геологии тектонического, гидрогеологического, сейсмического, нефтегазогеологического и многих других районирований территорий. По сути, построение геологической карты также можно считать решением задач районирования территории. Во всех случаях задача районирования сводится к разбиению исследуемой площади на области, однородные по одному или нескольким геолого-геофизическим параметрам и их атрибутам.

До появления современных компьютеров и соответствующих программных комплексов задача районирования территорий являлась достаточно трудоемкой, а в некоторых случаях просто не выполнимой. Так, например, районирование территории по двум атрибутам, например, магнитному и гравитационному полям было без Ho можно выполнить компьютера. реализовать процедуру районировании территории по трем и более геологическим или геофизическим атрибутам было практически невозможно. Также, необходимо отметить, что задача геологического районирования является некорректной, то есть допускает много правомерных решений, часто базирующихся только на логике и интуиции интерпретатора.

С другой стороны, в современной математике существует раздел, получившей название кластер анализа, в котором рассматривается широчайший спектр алгоритмов, предназначенных для решения подобного рода задач – разбиения многопризнаковых наблюдений на однородные, по совокупности

признаков множества (кластеры).

Несмотря на широкое распространение методов кластер анализа при обработке экспериментальных данных в различных прикладных областях, в разведочной геофизике и прикладной геологии, этот метаматематический аппарат представлен достаточной скудно. Большой вклад в разработку и программную реализацию классификационных алгоритмов был сделан *Петровым А.В.* в 80-е годы прошлого столетия [18].

Среди классификационных алгоритмов выделяют эвристические, корреляционные и статистические. Эвристические базируются на чисто технологических приемах и сводятся к поинтервальному разбиению значений различных геофизических признаков И дальнейшему группированию многопризнаковых наблюдений, на основе такого разбиения. При такой классификации не учитываются связи между различными геофизическими атрибутами. Несмотря полями и ИХ на это, эвристические алгоритмы классификации на сегодня являются широко распространенными в силу простоты их программной реализации.

Корреляционные классификационные методы, наоборот базируются исключительно на анализе связей между различными геофизическими признаками и их атрибутами, но являются эмпирическими и не требуют использования серьезного математического аппарата.

Статистические классификационные алгоритмы, базируются на методах многомерного статистического анализа, многомерного регрессионного, дисперсионного и дискриминантного анализа.

По существу, под классификацией понимается разделение многопризнаковых наблюдений в различных точках в однородные по комплексу параметров группы. Классификация тесно связана с такими понятиями, как группировка, типологизация, систематизация, дискриминация, кластеризация, которые широко распространены в прикладной и научной деятельности в разных областях знаний.

Под многопризнаковыми наблюдениями понимаются данные, которые включают для каждой точки наблюдения набор (вектор) геолого-геофизических атрибутов (статистических, градиентных, спектрально-корреляционных и т. д.).

В общей постановке задачи проблема классификации объектов заключается в том, чтобы всю анализируемую совокупность наблюдений многопризнаковых, данных, разбить на небольшое число однородных, по комплексу признаков, классов.

С математической точки зрения, однородность объектов определяется расстоянием $d(X_i, X_j)$ между объектами X_i и X_j из анализируемой выборки многопризнаковых наблюдений. Близкие в этой метрики объекты считаются принадлежащими к одному классу.

В программной реализации для практического использования методов кластер анализа в процессе интерпретационной обработки геолого-геофизической информации существенным, для повышения качества конечной классификации, является:

1. Выбор процедуры нормировки отдельных атрибутов в процессе классификации и как показала практика эта проблема успешно решается при использовании расстояния Мохаланобиса, как оценки близости отдельных элементов многопризнаковой выборки;

2. Непосредственно процедура выбора эталонов, которая строится на наличии априорной информации о свойствах отдельных классов;

3. Выбор конечного числа классов. Разбиение геолого-геофизической информации на большое число классов (более 20) сложна для интерпретации. Тесты показали, что оптимальное число конечных классов в геологии и геофизике лежит в интервале от 5 до 11;

4. Порог сходства, также является важнейшим фактором качества классификации и естественно влияет на конечный результат применения того или иного классификационного алгоритма.

Особое внимание при решении задачи разбиения на однородные области следует уделять вопросам особенностей геолого-геофизической информации,

87

выбору оптимальной совокупности признаков для проведения районирования территорий и оценке корреляционных связей между разными признаками.

Классификационные алгоритмы, реализованные В компьютерной технологии статистического и сектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» обладают еще одним свойством, которое заключается в непротиворечивости результатов, получаемых С использованием разных классификационных алгоритмов [6, 16, 17, 31, 72]. То есть, результаты разбиения территории на однородные по комплексу геофизических методов области, с использованием разных алгоритмов компьютерной технологии «КОСКАД 3D», не противоречат друг другу, а лишь добавляют определенные тонкости при решении этой задачи. Ниже коротко рассматривается существо, реализованных В технологии алгоритмов.

4.1 Классификационные алгоритмы

Метод общего расстояния. Алгоритм базируется на использовании теории иерархической классификации с использованием деревьев и не требует дополнительной информации о конечном числе классов. Максимальное число конечных классов определяется автоматически и это заложено в алгоритме. Метод относится к числу эвристических и направлен на решение задачи многопризнаковых наблюдениях близких выделения В В многомерном пространстве множеств точек наблюдения. Относится к методам автоматической эвристической классификации в условиях отсутствии информации о свойствах эталонных объектов [10, 72].

Алгоритм классификации методом общего расстояния является типичным примером эвристического алгоритма, основная идея которого заключается в том, что совокупность объектов, находящихся на одинаковом расстоянии от каждого из k эталонов, образует компактную группу.

Метод динамических сгущений (k-средних или ближайших соседей). Реализованный в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» алгоритм представляет собой оригинальный вариант достаточно известного и эффективного метода классификации многопризнаковых наблюдений на заранее известное число k классов в условиях минимума информации о начальных центрах классов, известный под названием k-средних, k-ближайших соседей или метода динамических сгущений. В основе метода лежит итерационный процесс, позволяющий объединять в один класс точки, которые ближе всего, в заданной метрике, к одному из заранее заданных k-эталонов [10, 30, 72].

Блок схема алгоритма заключается в следующем:

• Случайным образом выбирается k, p - мерных точек из анализируемой совокупности данных (начальных центров классов) $\vec{C}_j = \{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}\}, j = 1, \dots, k$. Если имеется априорная информация о начальных центрах классов можно их задавать качестве начальных, а не выбирать их случайным образом.

• Осуществляется разбиение многопризнаковых наблюдений исходной сети на классы, при этом значение $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_p\}$ относится к классу m, если расстояние от центра этого класса до анализируемой точки является минимальным $r_m = MIN\{r_1, \dots, r_k\}$.

• По результатам первой итерации образуются k- классов и в них рассчитываются новые центры классов, $\vec{C}^n = \{c_{1j}^n, \dots, c_{pj}^n\}, j = 1, \dots k.$

• В выбранной метрике в пространстве признаков рассчитывается расстояние между старыми и новыми центрами классов $\vec{R}_j(\vec{C}\vec{C}^n), j = 1,..k$.

• Если это расстояние больше порогового значения $\vec{R}_j > \varepsilon$, то старым центрам классов присваиваются значения новых $\vec{C}_j = \vec{C}^n{}_j, j = 1..k$ и процедура повторяется с шага, на котором осуществляется классификации наблюдений.

• В противном случае результаты последней классификации можно считать окончательными.

Рассмотренный итерационный алгоритм обладает довольно быстрой сходимостью. Основным его недостатком является недостаточный учет корреляционных связей признакового пространства. Последнее отчасти компенсируется использованием в качестве расстояния в пространстве признаков, расстояния Махолонобиса.

Классификация по Петрову А.В. (разделения многомерных нормальных смесей).

Рассматриваемый способ классификации многопризнаковых геофизических наблюдений относится к числу статистических и базируется, на теории многомерного статистического анализа. Алгоритм позволяет разбивать множество многопризнаковых наблюдений на отдельные множества, однородные по комплексу геофизических методов и их атрибутов. Конечное число классов определяется автоматически в процессе работы алгоритма, но имеется режим с заданием конечного числа классов [10, 27, 30, 72].

Считается, что исходные наблюдения есть выборка из множества иногомерных норально распределенных величин с разными значениями вектора среднего $\vec{m}_1 \neq \vec{m}_2 \neq ... \neq \vec{m}_j$, но одинаковой ковариационной матрицей.

Алгоритм базируется на проверке двух статистических гипотез. Первая заключается в проверке гипотезы об однородности векторов среднего двух множеств $\vec{m}_m = \vec{m}_l$, содержащих определенное число точек наблюдений.

Выбранная статистика критерия для такой гипотезы имеет вид:

$$F = \frac{(n-1)n_l n_m (\bar{m}_m - \bar{m}_l)^2}{(n-J)(n_l + n_m)\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{n_j} (f_{kj} - \bar{m}_j)^2}$$

 n_m – число многопризнаковых точек наблюдения в первом множестве; n_l – число многопризнаковых точек наблюдения во втором множестве; n_i – общее число точек наблюдения;

 \overline{m}_{i} – вектор среднего для первого множества;

 \overline{m}_i – вектор среднего для второго множества;

n – общее число точек наблюдения;

J – общее число однородных множеств.

С учетом ковариационной матрицы она приводится к статистике следа ковариационной матрицы:

$$F = \frac{n-J-p+1}{p(n-J)} \frac{n_m n_l}{n_m + n_l} Sp(HG^{-1}) = \frac{n-J-p+1}{p(n-J)} \frac{n_m n_l}{n_m + n_l} (\vec{m}_m - \vec{m}_l) S^{-1} (\vec{m}_m - \vec{m}_l)^{\frac{n}{2}}$$

Гипотеза H_l , о равенстве векторов средних во множествах l и m считается справедливой на уровне значимости a, если выполняется неравенство:

$$F < F_{g_1,g_2,\alpha}$$

где $F_{g_1,g_2,\alpha}$ – критическое значение F – распределения со степенями свободы:

$$g_1 = p, g_2 = n - J - p + 1$$

 $g_1 = p, g_2 = n - J - p + 1$

Выбор алгоритмов, проводился с учетом особенностей исходной, координатно-привязанной геолого-геофизической информации и необходимости учета корреляционных связей между отдельными элементами признакового пространства. Так, в алгоритме *k*-средних, в качестве расстояния между отдельными элементами используется расстояние Махаланобиса, учитывающее корреляционные связи в признаковом пространстве. В методе разделения многомерных нормальных смесей в качестве расстояния используется статистика следа ковариационной матрицы, также учитывающее корреляционные связи

В качестве иллюстрации использования классификационных алгоритмов для решения задачи районирования исследуемой территории были взяты магнитное аномальное поле dT и гравитационное поле dG в редукции Буге в районе положения глубинного сейсмического профиля 1-СБ (Восточный, Байкало – Патомский участок) протяженностью 500 *км*.

На рисунке 4.1 приведены гравитационное и магнитное поля с положением глубинного сейсмического профиля 1-СБ. На рисунке 4.2 изображены результаты районирования территории по магнитному и гравитационному полям с использованием методов *k-средних* и разделения многомерных нормальных смесей по *Петрову А.В.* [6].



Рисунок 4.1 – Аномальное гравитационное поле dG в редукции Буге (a) и аномальное магнитное поле dT (б)

Районирование по магнитному dT и

Районирование по магнитному dT и гравитационному полю dG (k - средних)



Рисунок 4.2 – Результат районирования территории с использованием метода kсредних (б) и разделения многомерных нормальных смесей по Петрову A. B. (а)

В результате районирования с использованием классификационных алгоритмов исследуемая территория, в обоих случаях, была разбита на девять однородных по магнитному и гравитационному полю областей. На рисунках каждая из таких областей окрашена определенным цветом.

Хотелось бы отметить, что несмотря на разный математический аппарат, используемый в двух алгоритмах для решения задачи районирования по комплексу геофизических признаков, в конечных результатах не наблюдается критических противоречий, что подтверждает надежность получаемых решений.

Анализ полученных результатов позволяет разделить исследуемую площадь на три крупных блока – северную, центральную и южную. Внутри каждого из блоков, в результатах обеих классификаций, выделяются более мелкие структуры меньших размеров.

Полученные результаты районирования исследуемой территории по данным гравиразведки и магниторазведки, содержат неоценимую, достоверную информацию о распределении магнитных и плотностных масс в земной коре, что повышает надежность принятия конечных решений при решении широкого спектра задач прикладной геологии и геофизики.

4.2 Геологическое районирование центральной части Вьетнама по данным магниторазведки

Районирование исследуемой территории с использованием классификационных алгоритмов осуществлялась по трендовой компоненте магнитного поля *dT* (Рисунок 4.3), ее полному градиенту (Рисунок 4.4 а) и оценки дисперсии (энергии) магнитного поля в скользящем окне *«живой»* формы (Рисунок 4.4 б).

93



Рисунок 4.3 – Карта трендовой компоненты магнитного поля dT в центральной части Вьетнама масштаба 1: 50 000

На рисунке 4.3 видно, что диапазон изменения трендовой компоненты магнитного поля *dT* меняется от -250 до 400 *nT*.

В трендовой компоненте магнитного поля в западной части выделяется крупный блок, характеризующийся положительными аномальными значениями с амплитудой более 100 nT. Для центральной части трендовой компоненты магнитного поля характерны низкие значения поля с амплитудой меньшей -50 nT и ряд положительных кольцевых аномалий меньшего размера с амплитудой от 50 до 120 nT.

Восточная часть низкочастотной составляющей магнитного поля содержит, как положительные, так и отрицательные аномалии, кольцевой и линейной формы в основном меридионального простирания.

В юго-восточной части трендовой компоненты отмечается крупная кольцевая аномалия с амплитудой более 150 *nT*.

Как было показано во второй главе, максимумы значений полного градиента оконтуривают границы аномалий магнитного поля, которые, скорее всего, контролируют границы крупных неоднородных блоков и системы разломов. Поле полного градиента магнитного полей, позволяет выделить границы геологических неоднородностей, проявляющихся в трендовых и локальных компонентах, индуцируемых геологическими образованиями, приуроченными к разным глубинам.

Результаты оценки полного градиента и поле дисперсии (энергии) трендовой компоненты магнитного поля *dT* приведены на рисунках 4.4 (а) и 4.4 (б) соответственно.





Рисунок 4.4 – Результаты оценки полного градиента (а) и поле дисперсии (энергии) (б) трендовой компоненты магнитного поля dT в центральной части Вьетнама

На рисунке 4.4 (а) приведены значения полного градиента магнитного поля амплитудой от 0 до 0.09 *nT/m*. В центральной части отмечаются аномалии, связанные со скрытыми магматическим образованиями амплитудой более 0.06 *nT/m*. Аномальные зоны отражают геометрию интрузивные блоков.

Для западной части исследуемой территории характерны линейные аномалии юго-западного простирания, амплитудой более 0.03 *nT/m* (Рисунок 4.4 а), которые отражают строение и состав кристаллических пород фундамента и контролируют системы разломов, к которым приурочены магматические образования.

В юго-восточной части территории выделяются несколько кольцевых аномалий. В восточной части амплитуда градиента менее 0.03 *nT/m*, для которой характерны экстремальные полосы градиента, простирающиеся линейно в основном меридионального простирания на относительно стабильном градиентном фоне.

В градиенте магнитного поля на рисунке, отмечается много слабо амплитудных аномалий в западной части, отражающих локальные неоднородности, расположенные на глубинах у поверхности, которые исчезают в восточном направлении в поле градиента магнитного поля.

Максимальные значения поля дисперсии (энергии) на рисунке 4.4 (б) как и максимумы поля полного градиента на рисунке 4.4 (а) контролируют границы магнитных аномалий разного простирания и размера. Характер поля дисперсии для разных компонент магнитного поля коррелируется с изменчивостью поля полного градиента. Это объясняется схожестью проявлений этих атрибутов геофизических полей, оконтуривающих аномальные образования.

В работе использовались два классификационных алгоритма: разделения многомерных нормальных смесей по *Петрову А.В.* и метод динамических сгущений *k-средних* [10, 27, 30, 72]. На рисунке 4.5 представлены результаты этих классификаций на 9 однородных областей магнитному полю и его атрибутам. Полученные результаты позволяют уточнить границы расположения известных геологических объектов и повысить достоверность конечных результатов о геологическом строении района исследований.



Рисунок 4.5– Результаты районирования территории по трендовой компоненте магнитного поля dT (puc.4.3), ее полному градиенту (puc.4.4a) и ее энергии (puc.4.4б) с использованием метода k-средних (б) и разделения многомерных нормальных смесей по Петрову А. В. (а) в центральной части Вьетнама

96

Значения признаков в каждом классе, по которым осуществлялись классификации приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

N⁰	Поле, dT	Полный	Энергия магнитного	Кор	реляцио	нная
		градиент, d1/m	поля, а1-	Mat	рица кла	
				l	0.61	0.56
1	-122.18	0.0180	472.73	0.61	1	0.67
				0.56	0.67	1
				1	-0.05	0.17
2	-76.845	0.0602	937.72	-0.05	1	0.51
				0.17	0.51	1
				1	0.092	0.072
3	-72.056	0.0350	1768.6	0.092	1	0.76
				0.072	0.76	1
				1	-0.11	-0.098
4	-44.348	0.0105	268.60	-0.11	1	0.76
				-0.098	0.76	1
	75.789	0.0464		1	0.34	0.31
5			3545.7	0.34	1	0.57
				0.31	0.57	1
				1	0.025	-0.015
6	169.80	0.0327	1736.2	0.025	1	0.45
				-0.015	0.45	1
				1	-0.014	0.011
7	80.067	0.0111	304.32	-0.014	1	0.8
				0.011	0.8	1
				1	0.312	0.016
8	-94.348	0.0716	4670.0	0.312	1	0.31
			,	0.016	0.31	1
			527.60	1	-0.22	-0.2
9	272.36	0.0157		-0.22	1	0.84
	2,2.30			-0.2	0.84	1

Таблица 4.1 – Результаты классификации по Петрову А.В.

Таблица 4.2 – Результаты классификации методом k-средних

No	Поле,	Полный	Энергия магнитного	Корреляционная		
JN⊇	dT	градиент, dT/m	поля, dT ²	мат	матрица класса	
				1	0.13	0.14
1	-177.62	0.011	400.09	0.13	1	0.86
				0.14	0.86	1
	-27.833	0.01	302.81	1	-0.024	0.008
2				-0.024	1	0.85
				0.008	0.85	1
				1	0.13	0.27
3	-83.776	0.07	1061.4	0.13	1	0.61
				0.27	0.61	1

Окончание таблицы 4.2

Nº	Поле, dT	Полный градиент, dT/m	Энергия магнитного поля, dT ²	Корреляционна: матрица класса		нная асса
				1	0.076	0.25
4	-3.3984	0.045	4081.3	0.61	1	0.71
				0.25	0.71	1
				1	0.013	0.09
5	-65.853	0.02	616.61	0.013	1	0.77
				0.09	0.77	1
				1	0.18	0.32
6	49.122	0.034	2122.3	0.18	1	0.76
				0.32	0.76	1
		0.075	4535.2	1	0.11	0.15
7	-5.4573			0.11	1	0.63
				0.15	0.63	1
				1	0.23	0.3
8	183.20	0.017	642.50	0.23	1	0.89
				0.3	0.89	1
9		0.048		1	0.15	0.26
	-44.735		1025.0	0.15	1	0.86
				0.26	0.86	1

Результаты районирования исследуемой территории на 9 однородных областей по трендовой компоненте магнитного поля и его атрибутам, хорошо коррелируется с геологической картой, представленной на рисунке 4.6 (а), и картой интенсивности гамма поля на рисунке 4.6 (б) [41, 42]. Результаты такого разделения области показывают на однородные высокую надежность И эффективность классификации алгоритмов В задачах геологического районирования.

Сводная карта результатов классификации, имеющаяся геологическая карта и поле интенсивности радиоактивного гамма-излучения представлены на рисунках 4.6 (а) и (б) соответственно.

На рисунке 4.5, видно, что геологическое строение района осложнено системой тектонических разломов, которые в основном развивались в югозападном, юго-восточном и меридиональном направлениях. Регион характеризуется четырьмя, по радиационным свойствам, основными комплексами пород большой площади, простирающимися на юго-восток, северо-запад и меридианном направлении.

Ко второму комплексу (зелёный цвет) относятся территории с интенсивностью радиоактивности 5÷15 мР/ч, которая характерна для осадочных пород. Третий комплекс (синий цвет) с интенсивностью радиоактивности 15÷25 *мР/ч*, приурочен к областям распространения метаморфических пород. Пятый (темно-коричневый цвет) с интенсивностью радиоактивности 25÷30 мР/ч связан с базальтовыми породами. Восьмой (красный цвет), с высокой интенсивностью радиоактивности 30÷60 *мР/ч*, с характерен для гранитовых пород кристаллического фундамента. Комплексы 5, 6, 7, 8, 9 контролируют интрузивные магматические образования и высокотемпературные метаморфические блоки.



(а)- геологическая карта и (б)- карта интенсивности гамма поля в центральной части

Вьетнама

Результаты разбиения исследуемой территории на однородные по плотностным атрибутам области с использованием метода *k-средних* и разделения многомерных нормальных смесей *по Петрову А. В.* приведены на рисунках 4.5 (а) (б) соответственно.

В качестве атрибутов были выбраны трендовая компонента магнитного поля (Рисунок 4.3), его полный градиент (Рисунок 4.4 а), поле дисперсии (энергии) магнитного поля (Рисунок 4.4 б). В результате были выделены 9 однородных по этим атрибутам областей. Результаты районирования на рисунке 4.5 показали, что, существенно повышает достоверность конечных геологических построений. Выделены скрытые магматические образования с высокой магнитной восприимчивостью и плотностью на юго-западе и юге исследуемой области. в центральной области оконтурена область распространения магматических пород, и на западе выделяется зона интрузивных гранитовых образований, которая имеет югозападное простирание и выходит на поверхность. Полученные результаты, позволили уточнить структурно-тектоническую схему района исследований, выделить области проявления магматизма, приуроченного к зонам тектонических дислокаций, как скрытого, так и интрузивных образований, выходящих на поверхность, и с учетом того, что месторождения рудных полезных ископаемых приурочены как раз к зонам проявления тектонических дислокаций возможно решение прогнозных задач.

4.3 Районирование центральной части Вьетнама по данным гравиразведки

Районирование исследуемой территории с использованием классификационных алгоритмов осуществлялась по исходному гравитационного поля dG (Рисунок 4.7), ее полному градиенту (Рисунок 4.8 а) и ее дисперсии (энергии) (Рисунок 4.8 б).

Визуальный анализ аномального гравитационного поля позволяет выделить трендовую компоненту широтного простирания, с увеличением значений гравитационного поля от -80 mG на северо-западе, до 7 mG на юговостоке (Рисунок 4.7). Северо-западный участок характеризуется самыми низкими значениями аномального гравитационного поля со значениями от -80 до -60 mG. На востоке и юго-востоке значения аномального поля изменяются от -20 до 10 mG и поле имеет меридиональное простирание.

В региональном плане в исходном поле выделятся несколько гетерогенных блоков со значениями поля, изменяющимися от -10 до 7 mG, сконцентрированных в северной, центральной и южной областях исследуемой площади. В юговосточной части отмечаются положительные аномальные зоны амплитудой от -25 до -10 mG.

100



Рисунок 4.7 – Карта аномального гравитационного поля dG в редукции Буге в центральной части Вьетнама масштаба 1:100 000

Результаты оценки полного градиента и поле дисперсии (энергии) гравитационного поля *dG* приведены на рисунке 4.8 (а) и (б) соответственно.



Рисунок 4.8 – Результаты оценки полного градиента (а) и поле дисперсии (энергии) (б) гравитационного поля dG в центральной части Вьетнама

101

Как было показано во второй главе, максимумы значений полного градиента оконтуривают границы аномалий гравитационного поля, которые, скорее всего, контролируют границы крупных неоднородных блоков и системы разломов.

Таким образом, поля полного градиента магнитного и гравитационного полей, их составляющих, позволяют выделить границы геологических неоднородностей, проявляющихся в трендовых и локальных компонентах, индуцируемых геологическими образованиями, приуроченными к разным глубинам.

На рисунке 4.8 (а), значения полного градиента амплитудой от 0 до 0.0045 *mG/m*, характеризуется широким спектром максимумов градиента 0.0025 *mG/m*, разного простирания, что свидетельствует о сложности геологического строения площади исследования. В частности, в центре отмечаются значения полного градиента, что может быть связано с крупяным магматическим образованием.

На северо-западе полосы максимумов поля полного градиентных максимумов непрерывно расширяются полосами или блоками с амплитудой более 0.0031 *mG/m*, что может быть связано с системой разломов или присутствия локальных неоднородных блоковых геологических образований.

Максимальные значения поля дисперсии (энергии) на рисунке 4.8 (б) как и максимумы поля полного градиента на рисунке 4.8 (а) контролируют границы гравитационных и магнитных аномалий разного простирания и размера. Характер поля дисперсии для разных компонент гравитационного поля коррелируется с изменчивостью поля полного градиента. Это объясняется схожестью проявлений этих атрибутов геофизических полей, оконтуривающих аномальные образования.

Отметим, что полученные оценки полного градиента и поля дисперсии на разных компонентных полях хорошо согласуются и дополняют друг друга.

Результаты разбиения исследуемой территории на однородные по плотностным атрибутам области с использованием метода *k-средних* (Рисунок 4.9 б) и разделения многомерных нормальных смесей по *Петрову А. В.* (Рисунок 4.9 а) приведены на рисунка 4.9 (б) и (а) соответственно.

В качестве атрибутов были выбраны исходное гравитационное поле (Рисунок 4.7), его полный градиент (Рисунок 4.8 а), поле дисперсии (энергии) гравитационного поля (Рисунок 4.8 б). В результате были выделены 8 однородных по этим атрибутам областей.



Районирование по гравитационному полю dG и его атрибутам (**k-средних**)



Рисунок 4.9 – Результаты районирования территории по гравитационному полю dG (Рисунок 4.7), ее полному градиенту (Рисунок 4.8 а) и ее энергии (Рисунок 4.8 б) с использованием метода k-средних (б) и разделения многомерных нормальных смесей по Петрову А. В. (а) в центральной части Вьетнама

Значения признаков, в каждом классе по которым осуществлялись классификации приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

No	Поле, dG	Полный	Энергия гравитационного	Корреляционная			
JNG		градиент, dG/m	поля, dG ²	мат	матрица класса		
	-68.657	0.92884E-03		1.00	0.184	0.189	
1			2.0383	0.184	1.00	0.881	
				0.189	0.881	1.00	
	-38.069	0.85787E-03	1.4136	1.00	-0.21	-0.093	
2				-0.21	1.00	0.77	
				-0.093	0.77	1.00	
				1.00	0.144	0.223	
3	-31.012	0.21878E-02	8.0858	0.144	1.00	0.69	
				0.223	0.69	1.00	

Таблица 4.3 – Результаты классификации по Петрову А.В.

Окончание таблицы 4.3

No	Поле, dG	Полный	Энергия гравитационного	Корреляционная		
110		градиент, dG/m	поля, dG ²	матрица класса		acca
		0.32215E-02		1.00	0.391	-0.235
4	-43.753		6.9956	0.391	1.00	0.068
				-0.235	0.068	1.00
	-26.237	0.18981E-02	3.0999	1.00	0.326	-0.016
5				0.326	1.00	0.082
				-0.016	0.082	1.00
	-5.4364	0.19305E-02	5.0510	1.00	-0.509	-0.26
6				-0.509	1.00	0.58
				-0.260	0.58	1.00
				1.00	0.072	0.085
7	-2.0372	0.62666E-03	1.0060	0.072	1.00	0.829
				0.085	0.829	1.00
		0.37830E-02	17.377	1.00	-0.036	0.013
8	-27.870			-0.036	1.00	0.367
				0.013	0.367	1.00

Таблица 4.4 – Результаты классификации методом k-средних

NG	П 1С	Полный	Энергия гравитационного	Кор	реляцио	нная
JNO	Поле, dG	градиент, dG/m	поля, dG ²	мат	грица кла	acca
				1.00	-0.033	0.062
1	-66.569	0.76587E-03	1.4745	-0.033	1.00	0.901
				0.0621	0.901	1.00
2	-38.540	0.88038E-03	1.5123	1.00	-0.077	0.018
				-0.077	1.00	0.863
				0.018	0.863	1.00
3	-5.2996	0.78046E-03	1.3255	1.00	0.018	-0.077
				0.018	1.00	0.863
				-0.077	0.863	1.00
4	-49.444	0.20023E-02	7.2430	1.00	-0.024	0.007
				-0.024	1.00	0.749
				0.007	0.749	1.00
5	-34.517	0.26295E-02	4.2835	1.00	0.062	0.013
				0.062	1.00	0.789
				0.013	0.789	1.00
6	-25.545	0.26361E-02	14.850	1.00	-0.041	-0.081
				-0.041	1.00	0.808
				-0.081	0.808	1.00
7	-27.864	0.41175E-02	16.162	1.00	-0.074	-0.039
				-0.074	1.00	0.734
				-0.039	0.734	1.00

Окончание таблицы 4.4

N⁰	Поле, dG	Полный градиент, dG/m	Энергия гравитационного поля, dG ²	Кор мат	Корреляционная матрица класса	
				1.00	0.171	0.229
8	-11.799	0.18977E-02	6.5900	0.171	1.00	0.742
				0.229	0.742	1.00

Результаты районирования на рисунке 4.9 (а) и (б) показали, что на территории имеется множество вытянутых изометрических блоков юго-западного и юго-восточного простирания с высокими значениями плотности, приуроченными северной, северо-западной и юго-восточной части.

Положение отдельных классов (4, 5) хорошо коррелируется с имеющейся информацией о проявлении на поверхности руд (Рисунок 4.6 а) (золота, железа, меди, свинца, олова и вольфрама).

Результаты районирования также показали, что в восточной части есть однородные области вытянутые непрерывно с севера на юг (класс 5, 8). Возможно, что это гранитные или магматические интрузии прорывают осадочные образования.

В юго-западной части на региональном плане, представленным в основном вторым классом, разбросаны локальные области небольших размеров с высокой остаточной плотностью (класс 4, 5), которые могут быть неглубокие интрузивные магматические блоки.

4.4 Районирование центральной части Вьетнама по данным гравиразведки и магниторазведки

Анализируя оценки коэффициента корреляции между значениями одного класса в корреляционной матрице класса с использованием метода *k-средних* (Таблицы 4.2, 4.4) и разделения многомерных нормальных смесей по *Петрову А. В.* (Таблицы 4.1, 4.3) видно, что коэффициент корреляции между значениями полного градиента дисперсии (энергии) очень хорошо коррелируются. Поэтому при районировании по данным магниторазведки dT (Рисунок 4.3) и гравиразведки dG (Рисунок 4.7), дополнительно использует только поле дисперсии (энергии) магнитного поля (Рисунок 4.4 б) и поле дисперсии (энергии) гравитационного поля (Рисунок 4.8 б).

Результаты разбиения исследуемой территории на 7 однородных по плотностным атрибутам области с использованием метода *k-средних* (Рисунок 4.10 б) и разделения многомерных нормальных смесей по *Петрову А. В.* (Рисунок 4.10 а) приведены на рисунках 4.10 (б) и (а) соответственно.

Районирование по магнитному полю dT

и гравитационному полю dG (k - средних)

Районирование по магнитному полю dT и гравитационному полю dG (по Петрову A.B.)



Рисунок 4.10 – Результаты районирования территории по трендовой компоненте магнитного поля dT (рис.4.3), ее энергии (рис.4.4б) и по гравитационному полю dG (рис.4.7), ее энергии (рис.4.8б) с использованием метода k-средних (б) и разделения многомерных нормальных смесей по Петрову A. B. (а) в центральной части Вьетнама

Значения признаков, в каждом из классов, по которым осуществлялись классификации приведены в таблицах 4.5 и 4.6.

N⁰	Поле, dT	Энергия магнитного поля, dT ²	Поле, dG	Энергия гравитацион- ного поля, dG ²	Корреляционная матрица класса			
1 -83.93		446.76	-42.292	292 1.9308	1.00	0.198	0.133	-0.049
	-83.959				0.198	1.00	-0.143	-0.024
					0.133	-0.143	1.00	0.036
					-0.049	-0.024	0.036	1.00
					1.00	0.005	0.521	0.039
2	52 592	555 20	21 5 9 5	8 7671	0.005	1.00	-0.226	0.071
	-55.582	52 555.39	-31.385	8.7624	0.521	-0.226	1.00	-0.123
					0.039	0.071	-0.123	1.00

Таблица 4.5 – Результаты классификации по Петрову А.В.

Окончание таблицы 4.5.

N⁰	Поле, dT	Энергия магнитного поля, dT ²	Поле, dG	Энергия гравитацион- ного поля, dG ²	Корреляционная матрица класса			
					1.00	0.312	-0.156	0.057
2	76 092	2481.2	27.086	2 0227	0.312	1.00	-0.036	0.146
5	/0.082	2401.2	-57.980	2.0557	-0.156	-0.036	1.00	0.154
					0.057	0.146	0.154	1.00
			-30.642	3.3432	1.00	-0.101	0.398	0.173
1	16 631	4373.2			-0.101	1.00	0.07	0.043
4	-40.034				0.398	0.07	1.00	0.201
					0.173	0.043	0.201	1.00
		285.12	-4.6236	1.9352	1.00	0.131	0.286	-0.08
5	16 106				0.131	1.00	-0.165	0.035
5	10.190				0.286	-0.165	1.00	-0.139
					-0.08	0.035	-0.139	1.00
					1.00	0.283	0.071	-0.043
6	24 885	617.05	22 252	16 451	0.283	1.00	-0.445	0.003
0	-24.005	017.05	-23.232	10.431	0.071	-0.445	1.00	-0.063
					-0.043	0.003	-0.063	1.00
					1.00	-0.162	0.151	0.078
7	244.05	44.05 733.23	-51.797	2.2757	-0.162	1.00	-0.064	0.105
/	244.05				0.151	-0.064	1.00	0.111
					0.078	0.105	0.111	1.00

Таблица 4.6 – Результаты классификации методом k-средних

N⁰	Поле, dT	Энергия магнитного поля, dT ²	Поле, dG	Энергия гравитацион- ного поля, dG ²	Корреляционная матрица класса			[
					1.00	0.37	-0.125	-0.058
1	14.007	512 22	16 225	<u> </u>	0.37	1.00	-0.126	0.043
1	14.097	515.55	-10.255	8.0080	-0.125	-0.126	1.00	0.047
					-0.058	0.043	0.047	1.00
				16.596	1.00	0.213	-0.038	-0.043
2	28 055	741.57	-29.547		0.213	1.00	-0.259	0.037
2	-20.933				-0.038	-0.259	1.00	0.163
					-0.043	0.037	0.163	1.00
		336.27	-3.4099	0 1.5599	1.00	0.119	0.109	0.041
2	16 122				0.119	1.00	-0.132	-0.044
5	10.452				0.109	-0.132	1.00	0.075
					0.041	-0.044	0.075	1.00
					1.00	0.142	0.444	0.21
1	00 107	125 24	21 186	1 7087	0.142	1.00	-0.065	-0.039
4	-90.197	433.24	-34.460	1./08/	0.444	-0.065	1.00	0.335
					0.21	-0.039	0.335	1.00
					1.00	0.076	0.089	0.093
5	0 1122	3 3678.3	-33.462	2.5610	0.076	1.00	0.023	0.192
5	9.1123				0.089	0.023	1.00	0.143
					0.093	0.192	0.143	1.00

Окончание таблицы 4.6

N⁰	Поле, dT	Энергия магнитного поля, dT ²	Поле, dG	Энергия гравитацион- ного поля, dG ²	Корреляционная матрица класса			
6		838.23		847 1.6524	1.00	0.149	0.443	0.184
	120.81		-56.847		0.149	1.00	0.083	-0.038
					0.443	0.083	1.00	0.212
					0.184	-0.038	0.212	1.00
			-55.201		1.00	0.396	0.296	0.393
7	156 70	576 10		5 8251	0.396	1.00	0.103	0.183
/	-130.79	576.10		5.8534	0.296	0.103	1.00	0.275
					0.393	0.183	0.275	1.00

Результаты районирования приведены на Рисунок 4.10 (а) и (б) по трендовой компоненте магнитного поля *dT* (Рисунок 4.3), ее энергии (Рисунок 4.4 б) и по гравитационному полю (Рисунок 4.7), ее энергии (Рисунок 4.8 б).

Результаты районирования показали, что полученное районирование территории по данным гравиразведки и магниторазведки очень хорошо коррелируют с геологическими данными (Рисунок 4.6 а) и интенсивности радиоактивности данными (Рисунок 4.6 б).

Результаты районирования на Рисунок 4.10 (а) позволили выделить три основные области, которые можно проинтерпретировать следующим образом:

 В западной части выделяются области меридионального простирания (класс 3, 7), которые, скорее всего, связаны с распространением гранитных пород кристаллического фундамента;

– В центральной части (класс 1), вероятнее всего, приурочен к областям развития метаморфических процессов и наличием базальтовых глыб;

В восточной части (класс 5) характеризует распространение осадочных пород.

В то же время имеется множество вытянутых изометрических блоков югозападного и юго-восточного простирания (класс 2), которые могут представлять собой гранитные или базальтовые интрузивы, проникающие через регионального толщи осадочных (класс 5) и метаморфических пород (класс 1).

Ряд локальных областей (класс 6), присутствующих в северной и восточной частях исследуемой территории, на фоне осадочных пород (класс 5) и
метаморфических пород (класс 1), хорошо коррелируются с имеющейся геологической информацией о поверхностных рудопроявлениях (Рисунок 4.6 а) (золота, железа, меди, свинца, олова и вольфрама).

В юго-восточных и южных части отмечаются кольцеобразные области (класс 3, 4), которые могут быть связаны с крупными гранитными массивами, прорывающими пласты осадочных пород (класс 5).

Результаты, поученные в четвертой главе диссертационной работы, позволяют сформулировать третье защищаемое положение.

Предложена технология районирования территорий на однородные по плотностным и магнитным характеристикам области на основе методов кластер анализа, позволяющая повысить достоверность и точность результатов геологического районирования и выделения областей потенциального проявления рудной минерализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенных научных исследований, позволили сделать следующие выводы:

– Экстремальные значения полного градиента, а также оценки статистических атрибутов магнитного и гравитационного полей в адаптивных скользящих окнах, позволяют надежно выделять линейные геологические образования (области тектонических дислокаций) и положение тел произвольной формы, как выходящих на поверхность, так и перекрытых породами осадочного чехла;

 Результаты разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие посредством последовательной адаптивной энергетической фильтрации, позволяют оценить положение разноглубинных геологических объектов в земной коре;

 Оценка энергии шумовой компоненты магнитного поля позволяет уточнить структурно тектоническую карту исследуемой территории и подтвердить уменьшение мощности пород осадочного чехла в западном направлении;

 Результат районирования исследуемой территории по магнитному и гравитационному полям и их атрибутам на однородные области существенно повышает достоверность конечных геологических построений;

 На западе площади исследований выделена зона интрузивных гранитовых образований, имеющая юго-западное простирание и частично выходящая на поверхность;

 В центральной, юго-западной и юго-восточной частях выявлены скрытые магматические образования высокой плотности и повышенных значений магнитной восприимчивости;

– Полученные результаты позволили уточнить структурно-тектоническую схему района исследований, выделить области проявления магматизма,

приуроченного к зонам тектонических дислокаций как скрытого, так и интрузивных образований, выходящих на поверхность;

– С учетом того, что месторождения рудных полезных ископаемых приурочены как раз к зонам проявления тектонических дислокаций возможно решение прогнозных задач с использованием предложенных в работе технологий;

интерпретационной – B целом результаты обработки данных магниторазведки с использованием компьютерной технологии статистического спектрально-корреляционного «КОСКАД 3**D**» И анализа данных свидетельствуют о высокой эффективности функционального наполнения компьютерной технологии и надежности получаемых с ee помощью результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Литература на русском языке

1. Гольцман Ф.М. Статистическая интерпретация магнитных и гравитационных аномалий / Гольцман Ф.М., Калинина Т.Б. – Москва: Недра, 1982. – 248 с.

2. До М.Ф. Минералого-геохимические характеристики Cu-U-Auпроявлений в районе Кон Ра провинции Контум, Вьетнам / М.Ф. До, П.А. Игнатов, Т.Х. Фан, З.Х. Нгуен Д. Чан. // Известия высших учебных заведений Геология и разведка. – 2020. – 63(2). – С. 73-85.

3. До М.Ф. Структуры, Контролирующие Си-U-Au минерализацию в районе Кон Ра пропровинции Контум центрального Вьетнама / М.Ф. До, П. А. Игнатов, Т. Х. Фан, З. Х. Нгуен, В.Т. Тиен // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 6. – С. 28-34.

4. Керимов И. А. Применение программного комплекса «КОСКАД 3D» для анализа потенциальных полей Терско-Каспийского прогиба / И.А. Керимов, А.В. Петров, Э.А. Абубакарова // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Серия Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12. – № 3. – С. 88-96.

5. Кузнецов О.Л. Геоинформационные системы / О.Л. Кузнецов, А.А. Никитин, Е.Н. Черемисина. – Москва, ВНИИгеосистем, 2005 г. – 453 с.

6. Муфазалова Р.И. Алгоритмы классификации многомерных наблюдений в задачах районирования территории по данным гравиразведки и магниторазведки / Р.И. Муфазалова, А.В. Петров, Т.Х. Фан // В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. Москва, 2021. – С. 316-319.

7. Муфазалова Р.И. Методика оценки энергии шумовой компоненты магнитного поля с использованием компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» / Р.И. Муфазалова, А.В. Петров, **Т.Х. Фан** // В сборнике: Разведочная геофизика и геоинформатика.

Материалы 2-ой всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2021. – С. 67-72.

8. Никитин А.А. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД 3D / А.А. Никитин, А.В. Петров, С.В. Зиновкин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2007. – № 6. – С. 68-74.

9. Никитин А. А. Комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических полей / А. А. Никитин, А. А. Булычев. – Москва: ВНИИГеосистем, 2015. –88 с.

10. Никитин А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации / А. А. Никитин, А. В. Петров. – Москва: ВНИИГеосистем,2017. – 118 с.

11. Никитин А.А. Адаптивные приемы выделения неоднородных геологических объектов в геофизических полях / А.А. Никитин, С.В. Зиновкин, А.В. Петров, П.В. Пискун // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2006. – № 3. – С. 50-56.

12. Никитин А.А. Использование статистической теории обнаружения сигналов для выделения слабых геофизических аномалий / А.А. Никитин // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1977. – № 6. – С 77-87.

13. Никитин А.А. Комплексирование геофизических методов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевский. – Москва: ВНИИгеосистем, г. 212. – 346 с.

14. Никитин А.А. Основные процедуры обработки и интерпретации нестационарных геофизических полей / А.А. Никитин, А.В. Петров // Геофизика. – 2007. – № 3. – С. 63-70.

15. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации / А.А. Никитин. – Москва: Недра, 1986. – 342с.

16. Никитин Д.А. Анализ и численное моделирование потенциальных полей на северо-востоке Баренцева моря / Д.А. Никитин, П.П. Горских, М.Д. Хуторской, Д.А. Иванов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 1 (30). – С. 6-15.

17. Никитин Д.С. Комплексное структурно-тектоническое районирование

северо-восточной части Баренцевоморского шельфа / Д.С. Никитин, Д.А. Иванов // Георесурсы. – 2018. – № 20(4). – Ч.2. – С. 206-215.

18. Петров А.В. Адаптивная фильтрация геополей / А.В. Петров. – Москва: Геоинформатика, 1996. – 118 с.

19. Петров А.В. Адаптивные процедуры интерпретационной обработки нестационарных геополей в компьютерной технологии "КОСКАД 3D" / А.В. Петров // В сборнике: Стратегия развития геологического исследования недр: Настоящее и будущее (К 100-летию МГРИ-РГГРУ). Материалы Международной научно-практической конференции: в 7 томах. – 2018. – С. 25-27.

20. Петров А.В. Возможности компьютерной технологии "Коскад 3Dt" при обработке и интерпретации данных глубинной сейсморазведки / Петров А.В., Зиновкин С.В., Пискун П.В. // V международной конференции "Крым 2003", Крым, Гурзуф. – 2003. – С 8-13.

21. Петров А.В. Компьютерная технология статистического и спектральнокорреляционного анализа трехмерной геоинформации - КОСКАД 3D / A.B. Петров, А.А. Трусов // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.

22. Петров А.В. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии "КОСКАД 3D" / А.В. Петров, Д.Б. Юдин, С. Хоу // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2010. – № 2 (16). – С. 126-132.

23. Петров А.В. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД-3Д. / А.В. Петров, С.В. Зиновкин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 35-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, г. Ухта УГТУ, 2008г. – с. 241-242.

24. Петров А.В. Статистическое зондирование геополей в скользящих окнах / А.В. Петров, А.Н. Лебедев // Материалы Международной школы-семинара им. Д.Г. Успенского, Ухта. – 2001. – стр.208-214.

25. Петров А.В. Технология анализа геополей в скользящих окнах «живой» формы / А.В. Петров, Е.В. Солоха // Материалы 33-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», Екатеринбург. – 2006. – С 271-275.

26. Серкеров С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке / С.А. Серкеров. – Москва: Недра. – 1986. – 247 с.

27. Фан Т. Х. Обработка и интерпретация аномалий гравитационных данных в центральной области Вьетнама с использованием компьютерной технологии «Коскад 3D» / Т.Х. Фан, А.В. Петров, М.Ф. До // В сборнике: Молодые – Наукам о Земле. Материалы IX Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах. Редколлегия: В.А. Косьянов, В.Ю. Керимов, В.В. Куликов. – 2020. – С. 295-298.

28. Фан Т. Х. Применение алгоритма двумерной фильтрации в скользящем окне «живой» формы на примере центрального Вьетнама / Т. Х. Фан, Петров А. В., До М.Ф. // XV Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле", МГРИ-РГГРУ. – 2021. – том 4. – С 339-343.

29. Фан Т. Х. Районирование перспектив скрытых блоков магмы в центральной области Вьетнама по анализу данных магнитных аномалий / Т. Х. Фан, А. В. Петров, М.Ф. До / Сборник тезисов докладов II Молодежной научнообразовательной конференции «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». – Москва: ФГБУ ЦНИГРИ, 2021. – т 4. – С. 123-127.

30. Фан Т.Х. Геологическое районирование центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных магниторазведки с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / Т.Х. Фан, А.В. Петров, М.Ф. До // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 11. – С. 27-33.

31. Фан Т.Х. Геологическое районирование центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных магниторазведки с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / Т.Х. Фан, А.В.

Петров, М.Ф. До // Разведка и охрана недр. 2021. № 11. С. 27-33.

32. Фан Т.Х. Особенности геологического строения центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных гравиразведки в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / Т.Х. Фан, А.В. Петров, М.Ф. До, М.З. Лай, Ч.Л. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – № 5. – С. 77-90.

33. Черемисина Е.Н. ГИС INTEGRO – импортозамещающий программнотехнологический комплекс для решения геолого-геофизических задач / Е.Н. Черемисина, М.Я. Финкельштейн, А.В. Любимова // Геоинформатика. – 2008. – № 3. – С. 8-17.

Литература на вьетнамском языке

34. Assessment of mineral potential in the Central Central region – Ngành Tài nguyên & Môi trường. – 2019. URL: https://baotainguyenmoitruong.vn/danh-gia-tiem-nang-khoang-san-vung-trung-trung-bo-292381.html

35. Le Duy Bach, Encyclopedia of Geology North and Central Vietnam, Hanoi National University, 2018. – P. 769-775

36. **Phan H.T.** Determination of the depth to the conrat basement in the northern of red river basin and adjacent areas from the analysis of gravity field data / **H.T. Phan**, T.N. Nguyen, N.V. Bui //Journal of mining and earth sciences. $-2016. - N_{\odot} 57(12). - 1-13.$

37. Phan T.H. Deep crustal structure of Hanoi and adjacent areas on the basic of gravity anomaly analysis / H.T. Phan, N.N. Trung, V.B. Nam, P.M. Do // Journal of mining and earth sciences. -2017. $-N_{2}$ 58(5). -325-334.

38. **Phan T.H.** Determination of density value in central region of Vietnam from Petrov's 3D inverse interpretation of gravity anomaly data / **H.T. Phan**, A.V. Petrov, P.M. Do, G.M/ Lai // Journal of Mining and Earth Sciences. – 2022. № 62. pp 44 – 53.

39. **Phan T.H.** Geological region by multi-signal method of gravity anomaly data in central Vietnam area / **H.T. Phan**, A.V. Petrov, P.M. Do, L.T. Nguyen // Journal of Mining and Earth Sciences. -2021. $-N_{2}$ 62 (5). -43-54.

40. Министерство природных ресурсов и экологии. Циркуляр № 05/2011 /

ТТ-ВТNМТ от 29 января 2011 года. В кн.: Создание технического регламента для метода гравитации на земле. Ханой, 2011. – 150 с.

41. Нгуен Х. С Проект проекции измерения магнитно-гамма-спектра в масштабе 1: 50000 и измерения силы тяжести в масштабе 1:100 000 в районе Кон-Тум / Нгуен Х. С и др. // Федерация геофизики, Главное управление геологии и минералов Вьетнама, 2000. – 150 с.

42. 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 / Нгуен Ч. Л. и др. // Федерация физики и геологи, Главное управление геологии и минералов Вьетнама, 2000. – 250 с.

43. Три Т. В. Карта геологического строения центрального региона Вьетнама в масштабе 1:500 000 / Т.В. Три, Н.С. Бао // Информационный центр, геологический архив, Ханой, 2008. – 175с.

Литература на английском языке

44. Burns C. Exploration And GIS: Closing the Productivity Gap / C. Burns; V. Heffernan // Earth Explorer. Retrieved. – 2012. – pp. 4-27.

45. Data Management. Geosoft, Golder team up with DAP technology // Mining Journal. – 2009. URL: https://www.canadianminingjournal.com/news/data-management-geosoft-golder-team-up-with-dap-technology/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

46. Larsen B.T. The Permo-Carboniferous Oslo Rift through six stages and 65 million years / B.T. Larsen, S. Olaussen, B. Sundvoll, M. Heeremans. – 2008. – Episodes 31(1). – p. 52–58

47. Luis J.F. A Julia wrapper for the Generic Mapping Tools / J. F. Luis, P. Wessel // American Geophysical Union, Fall Meeting 2018. – abstract #NS53A-0563.

48. ModelVision. Magnetic & Gravity Interpretation System URL: https://www.geovista.se/wp-

content/uploads/ModelVision%20Technical%20Sheet%208pg-A4%2025-02-2015-GeoVista.pdf (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

49. Nguyen N.T. Moho depth of the northern Vietnam and Gulf of Tonkin from

3D inverse interpretation of gravity anomaly data / N.T. Nguyen, T.H. Phan, V.N. Bui, T.T.H. Nguyen, T.L. Tran // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – № 15. – pp. 1651–1662.

50. Nguyen Q.M. Cambrian intra-oceanic arc trondhjemite and tonalite in the Tam Ky-Phuoc Son Suture Zone, central Vietnam: Implications for the early Paleozoic assembly of the Indochina Block / Q.M. Nguyen, Q. Feng, J.-W. Zi, T. Zhao, H.T. Tran, T.X. Ngo, D.M. Tran, H.Q. Nguyen, // Gondwanna Research 70. – 2019. – pp 151-170.

51. Oasis montaj 7.0 ViewerThe core software platform for working with large volume spatial data. Ouick startTM tutoria. 2008. _ _ 107p. URL: https://pages.mtu.edu/~jdiehl/Homework4550/ViewerTutorial.pdf (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

52. Oasis montaj. - MINING.com. - Video. - 2010. Retrieved 2012-04-27.

53. Sandwell D.T. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate / D.T. Sandwell and W.H.F. Smith // Journal of geophysical research. $-2009. - N_{2} 1.114. - pp 35-47.$

54. Sergio. How to extend Oasis Montaj using C# / Sergio // Evil Robot Blog. 10 May 2011. URL: http://blog.crazyrobot.net/2011/05/10/how-to-extend-oasis-montajusing-c/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

55. Tran H.T. The Tam Ky-Phuoc Son Shear Zone in central Vietnam: Tectonic and metallogenic implications / H.T. Tran, K. Zaw, A. Halpin, T. Manaka, S. Meffre, C.-K. Lai, Y. Lee, H.V. Le, S. Dinh // Gondwana Research 26. – 2014. – pp 144-164.

56. UXO Lands Restoration and Release: Mitigating Residual Risk. Graham Chandler Earth Explorer Web site, Summer 2009. URL: www.earthexplorer.com/2009-07/UXO_Lands_Restoration_and_Release.asp (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

57. Wessel P. Generic Mapping Tools: Improved Version Released / P. Wessel, W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, F. Wobbe// EOS Trans. AGU. – 2013. – 94(45). – p. 409–410.

58. Wessel P. New version of the generic mapping tools released. Eos / P. Wessel, W. H. F. Smith // EOS: Transactions of the American Geophysical Union. –

1995. – 76(33). – 329pp.

59. Wessel P. The Generic Mapping Tools GMT Version 4.5.18 technical reference and cookbook / P. Wessel and W.H.F. Smith // University of Hawaii at Nawoa. – 2009. – 254p.

60. Wessel P. The GMT/MATLAB toolbox / P. Wessel, J. F. Luis // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2017. – V.18. – pp 811–823.

61. Wessel P. The Generic Mapping Tools Version 6 / P. Wessel, J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W. H. F. Smith, D. Tian // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2020. – pp 5556-5565.

Электронные ресурсы

62. EXTRACT XYZ GRID - ТОРОGRАРНУ OR GRAVITY URL: https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get data.cgi (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

63. Geosoft 9.9 – Discover the latest enhancements to Oasis montaj, Target and VOXI URL: https://www.seequent.com/geosoft-9-9-discover-the-latest-enhancements-to-oasis-montaj-target-and-voxi/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

64. Geosoft Target. software. informer. URL: https://geosofttarget.software.informer.com/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

65. Interpretation of Airborne Geophysical Data. SGL. URL: http://www.sgl.com/Interpretation.html (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

66. MapInfo Discover. Exploration GISDatamine is a world leading provider of the technology and the services required to seamlessly plan and manage mining operations. URL: https://www.dataminesoftware.com/solutions/discover-exploration-gis/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

67. National Centers for Environmental Information URL: https://www.ncdc.noaa.gov (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

68. Target for ArcGIS. Oil and Gas Online. URL: https://www.oilandgasonline.com/doc/target-for-arcgis-0002 (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

69. The Generic Mapping Tools (GMT) URL: https://www.generic-mapping-tools.org/download/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

70. The Geosoft Story URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Geosoft (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

71. Геоинформационные технологии для природопользования ГИС INTEGRO. URL: http://www.gis-integro.ru/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

72. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных "Коскад 3D". URL: http://www.coscad3d.ru (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

73. Пакет программ СИГМАЗD®. URL: https://sigma3d.com/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

74. Программное обеспечение и продукты Geosoft URL: https://www.seequent.com/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)

75. Система ПАНГЕЯ. URL: http://www.pangea.ru/ru/ (Крайняя дата обращения 01.03.2022 г.)