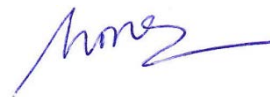


Российский Государственный Геологоразведочный Университет
имени Серго Орджоникидзе
(МГРИ)

На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

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

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре геофизика в ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) Министерства образования и науки Российской Федерации.

- Научный руководитель:** **Петров Алексей Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры геофизики ФГБОУ ВО «Российский
государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе»
(МГРИ)
- Официальные оппоненты:** **Приезжев Иван Иванович**
доктор технических наук, профессор кафедры
разведочной геофизики и компьютерных систем
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина»
- Черкасов Сергей Владимирович**
доктор технических наук, директор ФГБУН
ГГМ РАН.
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский Университет Дружбы
Народов» (РУДН)

Защита диссертации состоится «**23**» **июня 2022 г.** в **17:30** на заседании диссертационного совета **24.2.364.02** (Д 212.121.04) при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, зал заседаний диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МГРИ и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, <https://mgri.ru/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.364.02 (Д 212.121.04)
доктор геолого-минералогических наук

 Ганова С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Двусторонние отношения между Вьетнамом и Российской Федерацией успешно продолжают уже более 50 лет и в 2022 году будут преобразованы во всеобъемлющее стратегическое сотрудничество. Планируется развитие дальнейших взаимосвязей и в области наук о земле между Министерством образования РФ и Вьетнама, включающих совместные научные исследования, обмен студентами и аспирантами. Представленная 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 развития минерально-сырьевой базы страны, включающей создание геологических и структурно-тектонических карт, является очень востребованной и актуальной. Решение этой задачи встречает много 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 Вьетнамских компаний с иностранными фирмами и экспертами достаточно ограничено в силу отсутствия интереса решения ими общегеологических задач, не связанных с получением прямых экономических прибылей от разработки открытых ранее месторождений. Поэтому основной задачей диссертационной работы является изучение возможностей российской и зарубежной научных школ в области интерпретационной обработки потенциальных геополей, 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, масштаба 1:50 000, и наземной гравиметрической съемок масштаба 1:100 000, проведенных главным управлением геологии и полезных ископаемых Вьетнама, при участии российских экспертов в рамках договора о передаче технологий между российской компанией «Гравиметрические технологии» и генеральным департаментом геологии и полезных ископаемых Вьетнама 1998 года.

Площадь исследуемого района составляет 24240 км² и он расположен в центральной части Вьетнама (от 13°40' широты до 15°20', от 107°30' долготы до 109°20'). Район исследований считается 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.

По результатам проведенных поисковых геологических исследований было отмечено много проявлений рудных полезных ископаемых, но их детальные исследования не проводились.

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

Проведение поисковых работ одновременно с геологическим картированием и

использование материалов предшествующих геолого-съёмочных работ предполагает включение 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 задачей прикладной геологии.

Эффективное включения результатов геофизических исследований для достижения этой цели стало возможным благодаря появлению новых интерпретационных и обрабатывающих компьютерных технологий, возможностям современных средств визуализации и разработке программного обеспечения, ориентированного на решение задач интерпретационной обработки 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 актуальным решение этой задачи в условиях сложных высокогетерогенных геологических сред с сильной дифференциацией свойств горных пород в пространстве.

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 позволяют существенно снизить, имеющуюся неоднозначность при решении задач структурно-тектонического картирования и прогноза месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, интерпретационная 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 положения кристаллического фундамента, геологического районирования и картирования территории центрального Вьетнама.

Задачи исследования.

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

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

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

4. Использование методов кластерного анализа в интерпретационной обработке данных гравиразведки и магниторазведки для решения задач структурно-геологического картирования и районирования.

Научная новизна исследований определяется:

- Разработкой оригинальных графов обработки данных гравиразведки и магниторазведки с целью решения задач геологического районирования и картирования на основе функционального наполнения компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных *«КОСКАД 3D»*;
- Использованием результатов оценки статистических атрибутов, полного градиента гравитационного и магнитного полей с целью уточнения границ геологических аномалиеобразующих объектов линейной и произвольной формы;
- Оценкой положения разноглубинных геологических объектов и кристаллического фундамента на основе результатов автоматического разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие с помощью методов линейной адаптивной фильтрации;
- Включением в процесс структурно-геологического картирования и районирования результатов автоматической классификации исследуемых территорий на однородные по гравитационному и магнитному полям и их атрибутам области.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы стоит в создании компьютерных технологий интерпретационной обработки данных грави- и магниторазведки в задачах плотностного и магнитного моделирования и внедрения предложенного программно-алгоритмического обеспечения в научно-исследовательские и производственные геологические организации 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 результаты, полученные в диссертационной работе, получены автором или при его непосредственном участии. Автором проведены исследования по оценке возможности использования отдельных атрибутов магнитного и гравитационного полей в процессе интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки. Предложен сценарий разложения на составляющие потенциальных геополей и оценки «шумовой» компоненты магнитного поля. Выполнены исследования по выбору оптимального комплекса атрибутов гравитационного и магнитного полей с целью решения задач структурно-геологического картирования и районирования. Проведены исследования по выбору алгоритмов классификации и их параметров для решения задачи разбиения исследуемой территории на однородные по гравитационному и магнитному полям области.

Проведена практическая апробация предложенных технологий интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки методами вероятностно-статистического 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 7 научных докладах на следующих конференциях: IX Международная научная конференция молодых ученых "Молодые – Научкам о Земле", МГРИ-РГГРУ, 2020г; XV Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле", МГРИ, 2021 г; II Молодежная научно – образовательная конференция, Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче, ЦНИГРИ, Москва 2021г; III Молодежная научно – образовательная конференция, Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче, ЦНИГРИ, Москва 2022г; 2-ая Всероссийская научно-практическая конференция, Разведочная геофизика и геоинформатика. МГРИ, марта 2021г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 120 страниц, в том числе 57 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 75 наименований.

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 за моральную поддержку.

Автор выражает благодарность проф. *Игнатову Петру Алексеевичу*, давшему ценные советы в области геологии при написании диссертационной работы.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 проведенных научных исследований.

В **первой главе** представлен сравнительный анализ наиболее распространенных и широко используемых в производственных и научных геологических организациях России и за рубежом компьютерных технологий по интерпретационной обработке данных гравиразведки и магниторазведки, таких как «*GEOSOFT*», «*GMT*», «*ModelVision*», «*ПАНГЕЯ*», «*ГИС INTEGRO*», «*СИГМА 3D*» и «*КОСКАД 3D*».

С целью оценки достоинств и недостатков функционального наполнения разных компьютерных систем автором проведено тестирование алгоритмов на модельных данных.

Результаты тестирования показали, что лишь технологии «*ModelVision*» и «*GEOSOFT*» включают фильтрационные процедуры потенциальных геофизических полей. При этом, в алгоритмах, не учитывается естественная нестационарность потенциальных полей, а процедура фильтрации реализована лишь в скользящих окнах фиксированного размера. Эти недостатки приводят к неправильному сглаживанию исходных данных, искажению формы геофизических аномалий и, соответственно, к некачественным конечным

результатам интерпретации.

Кроме этого, в рассматриваемых технологиях, отсутствуют алгоритмы районирования исследуемых территорий на области, однородные по одному или нескольким геолого-геофизическим полям и их атрибутам на основе классификационных алгоритмов.

Функциональное наполнение технология «**GMT**» включает лишь простейшие процедуры анализа потенциальных геополей, а полученные с их помощью результаты являются качественными и эффективны при региональных исследованиях. Для решения более детальных задач, требуется использование компьютерных продуктов MATLAB, VISUAL BASIC, C++ и дальнейшей разработке необходимых интерпретационных процедур.

Технология «**СИГМА 3D**» в основном ориентирована на анализ результатов аэромагнитной съемки, а задачи кластер анализа решаются эмпирическим путем и ограничены размерностью признакового пространства.

Программные комплексы «**ПАНГЕЯ**» и «**ГИС INTEGRO**» включают широкий спектр обрабатывающих процедур, включая классификационные алгоритмы, но в них не представлены методы, учитывающие статистическую нестационарность геофизических полей.

Компьютерная технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «**КОСКАД 3D**» в основном предназначена для интерпретационной обработки исходных данных с помощью методов вероятностно-статистического подхода. Функциональное наполнение технологии позволяет провести полный статистический, спектрально-корреляционный и градиентный анализ геофизических наблюдений. В технологии широко представлены линейные оптимальные фильтры и оригинальные алгоритмы адаптивной линейной фильтрации, позволяющие корректно обрабатывать нестационарные, по спектрально-корреляционным характеристикам, геофизические наблюдения. Программные реализации методов межпрофильной корреляции, самонастраивающейся фильтрации, обратных вероятностей и их многомерных аналогов позволяет успешно решать задачу обнаружения слабых сигналов на фоне соизмеримых по амплитуде помех. Алгоритмы комплексного анализа включают методы распознавания и классификации.

Результаты проведенного сравнительного анализа перечисленных технологий на основе обработки модельных показали преимущества компьютерной технологии «**КОСКАД 3D**» за счет наличия процедур, учитывающих нестационарность исходных данных в алгоритмах адаптивной линейной фильтрации и реализации широкого спектра классификационных алгоритмов.

Таким образом, можно утверждать, что компьютерная технология «**КОСКАД 3D**» позволяет наиболее эффективно и адекватно решать задачи интерпретационной обработки данных гравirazведки и магниторазведки, используя методы вероятностно-статистического подхода при решении задач геологического картирования, прогноза и поиска скрытых месторождений полезных ископаемых в центральной части Вьетнама.

Помимо сравнительного анализа компьютерных технологий первая глава включает описание исследуемой территории и исходной геофизической информации, на которой базируются проведенные исследования.

Центральная часть Вьетнама – территория развития и пересечения крупных геологических образований, таких как зона Тамки-Фуоксон, структура Поко, антиклиналь Контумская, ограниченных разломами широтного и юго-западного направлений (Рисунок 1а). На территории широкое распространение получили древние метаморфические породы, прорванные и трансформированные магматическими образованиями кислотного и основного состава, выходящими на поверхность.

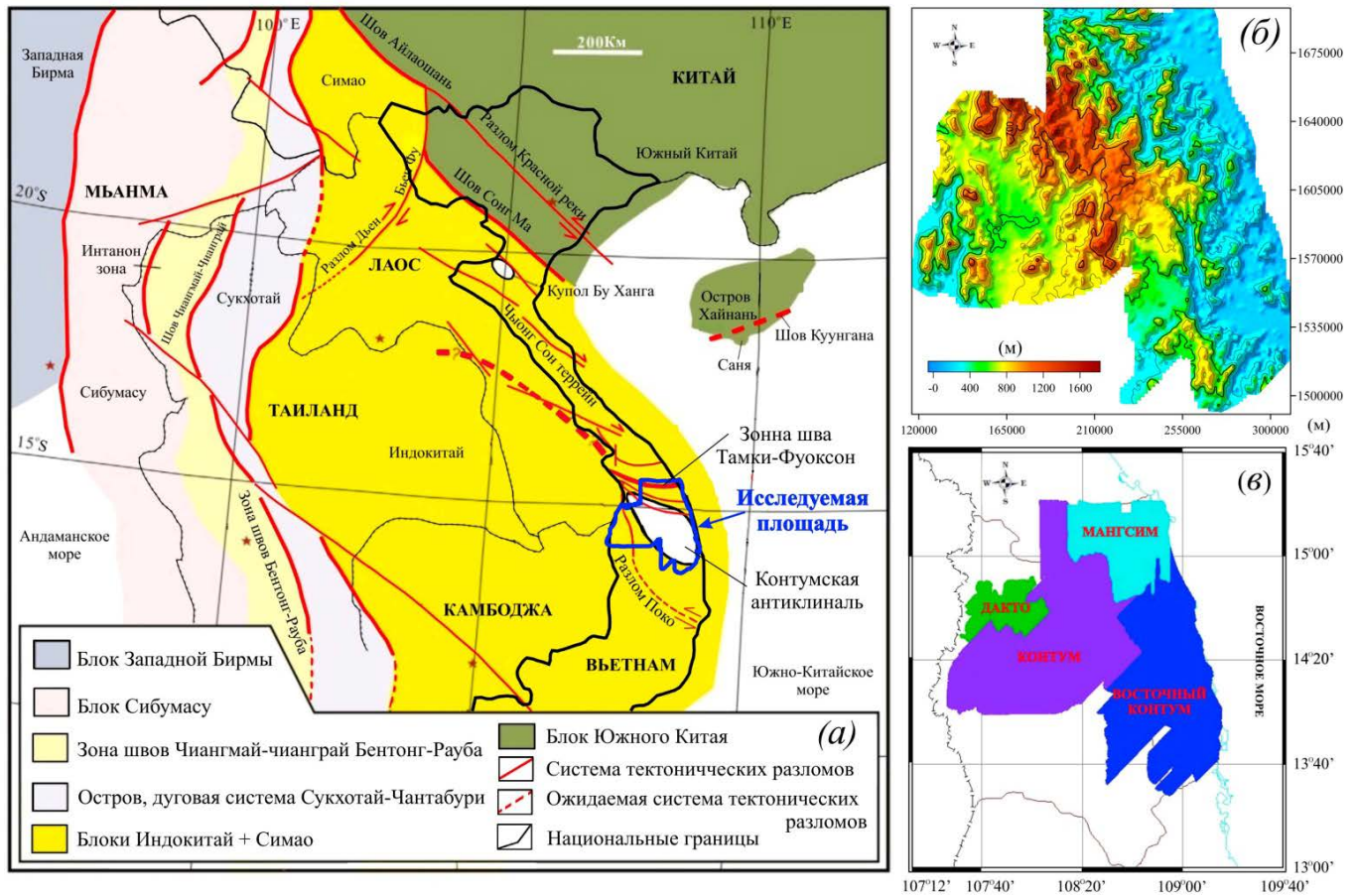


Рисунок 1 – Упрощенная, структурно-тектоническая карта Юго-Восточной Азии (а); карта рельефа исследуемого района в масштабе 1:200 000 (б), и схема аэромагнитных и наземных гравитационных съемок исследуемого района (в) в центральной части Вьетнама

Исходные магнитное поле dT , приведенное к полюсу и гравитационное поле dG в редукции Буге представлены на рисунке 2(а) и 2(б) соответственно.

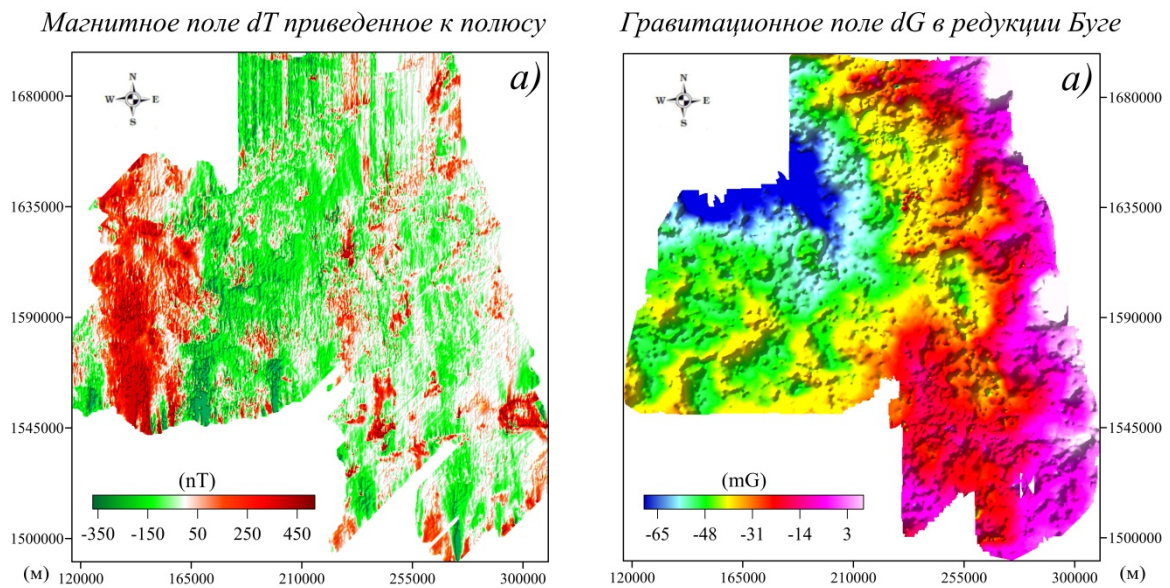


Рисунок 2 – Карта аномального магнитного поля dT приведенного к полюсу масштаба 1: 50 000 (а), и карта аномального гравитационного поля dG в редукции Буге масштаба 1:100 000 (б) в центральной части Вьетнама

Магнитное поле сильно дифференцировано и содержит много локальных аномалий, особенно в центральной части с амплитудой более 350 nT (Рисунок 2 а).

Визуальный анализ гравитационного поля dG позволяет выделить тренд северо-западного простирания с увеличением значений поля от -70 mG на северо-западе, до 10 mG на юго-востоке (Рисунок 2 б). В гравитационном поле выделяются 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 .

Во второй главе диссертационной работы рассматриваются алгоритмы оценки статистических и градиентных характеристик геофизических полей. Особое внимание уделяется существованию алгоритмов корректной обработки нестационарных геофизических наблюдений и вопросам интерпретации атрибутов гравитационного и магнитного полей.

Технология динамических скользящих окон заключается в изменении параметров скользящего окна в соответствии с изменением спектрально-корреляционных характеристик поля по площади непосредственно в процессе оценки статистических характеристик.

Алгоритм адаптивного скользящего окна. Предлагаемый алгоритм оценки статистических атрибутов в адаптивных окнах позволяет оптимальным образом оценить параметры окна и его наклон непосредственно в процессе оценки атрибута. Суть алгоритма заключается в автоматическом настраивании параметров скользящего окна. 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.

Алгоритм скользящего окна «живой» формы. Технология скользящего окна «живой» формы для оценки статистических характеристик геополей заключается в двумерном случае в следующем.

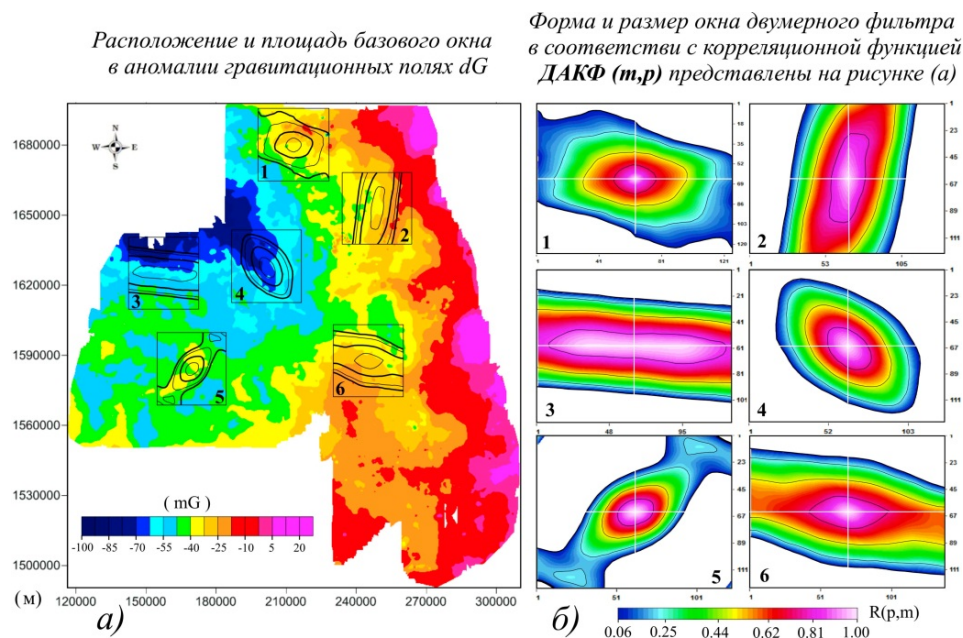


Рисунок 3 – Форма ДАКФ(m, p) гравитационного поля dG при различных положениях базового окна для центральной части Вьетнама

Так, если для адаптивного скользящего окна в каждой точке поля двумерной сети наблюдения выбирают параметры двумерного скользящего окна (высоту, ширину, наклон), то в алгоритме 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 $ДАКФ(t, p)$.

На рисунке 3 иллюстрируется технология скользящего окна «живой» формы, на примере гравитационного поля центрального Вьетнама, выполненная автором. Здесь видно, как изменяется двумерная автокорреляционная функция при разном расположении базового окна $ДАКФ(t, p)$ и форма окна «живой» формы, ограниченная изолинией 0.2.

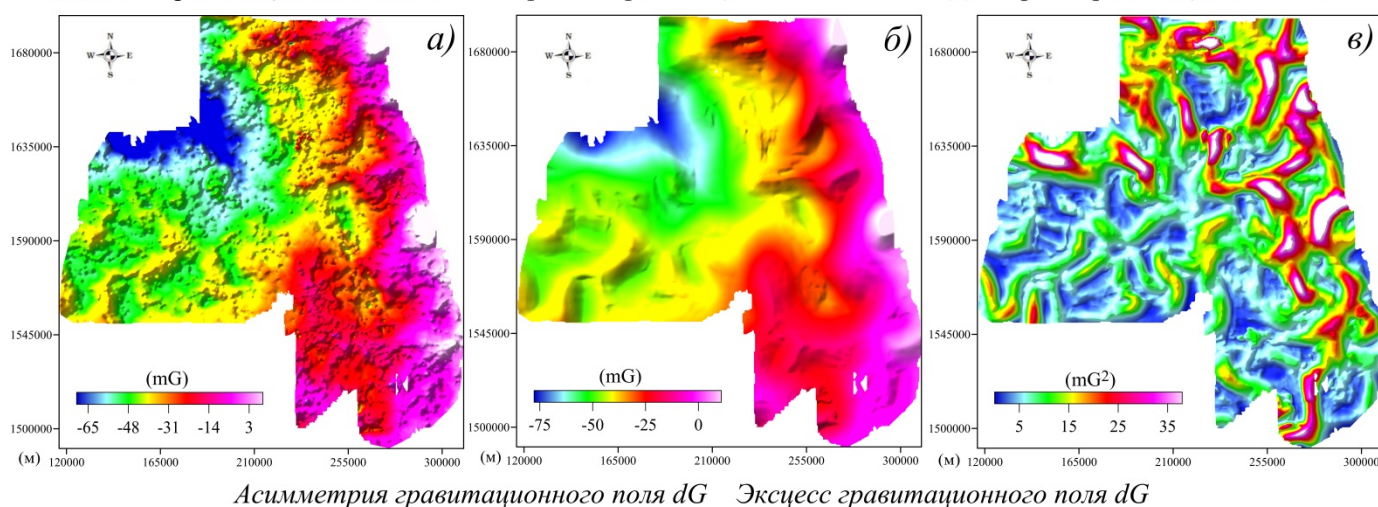
Результаты оценки статистических атрибутов гравитационного и магнитного полей центрального Вьетнама в скользящем окне «живой» формы представлены на рисунках 4, 5 и 6 соответственно.

В исходных картах гравитационного поля dG в редукции Буге (Рисунок 4 а), магнитного поля dT , приведенное к полюсу (Рисунок 5 а), а также в поле локальной компоненты гравитационного поля (Рисунок 6 а) однозначно трудно выделить границы аномалий различной амплитуды и системы разломов различного простираения. В полях оценок статистических атрибутов гравитационного и магнитного полей содержится широкий спектр аномальных объектов, положительные значения которых контролируют границы аномалий и соответственно неоднородных геологических образований их индуцирующих.

В полях статистических атрибутов наблюдаемого гравитационного поля dG (Рисунок 4) находят отражение особенности геологических образований, расположенных на больших глубинах, от $3 \div 5$ км и до границы Мохоровичича, включая особенности положения кристаллического фундамента.

Статистические характеристики в скользящем окне гравитационного поля dG

Аномальное гравитационное поле dG Среднее гравитационного поля dG Дисперсия гравитационного поля dG



Асимметрия гравитационного поля dG Эссес гравитационного поля dG

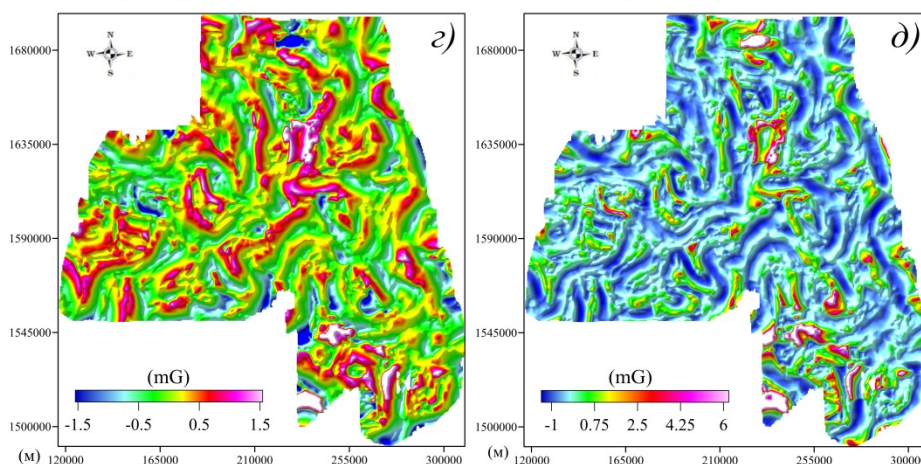


Рисунок 4 – Оценка статистических характеристик гравитационного поля dG в редукции Буге (а) в скользящем окне «живой» формы в центральной части Вьетнама

В полях статистических атрибутов магнитного поля экстремумами контролируются границы разно амплитудных магнитных аномалий (Рисунок 5), индуцированных геологическими образованиями, расположенными на глубинах до 10÷15 км.

Основной вклад в наблюдаемое магнитное поля вносят особенности положения и состав пород кристаллического фундамента. На западе поля статистических атрибутов магнитного поля 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.

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

Статистические характеристики в скользящем окне магнитного поля dT

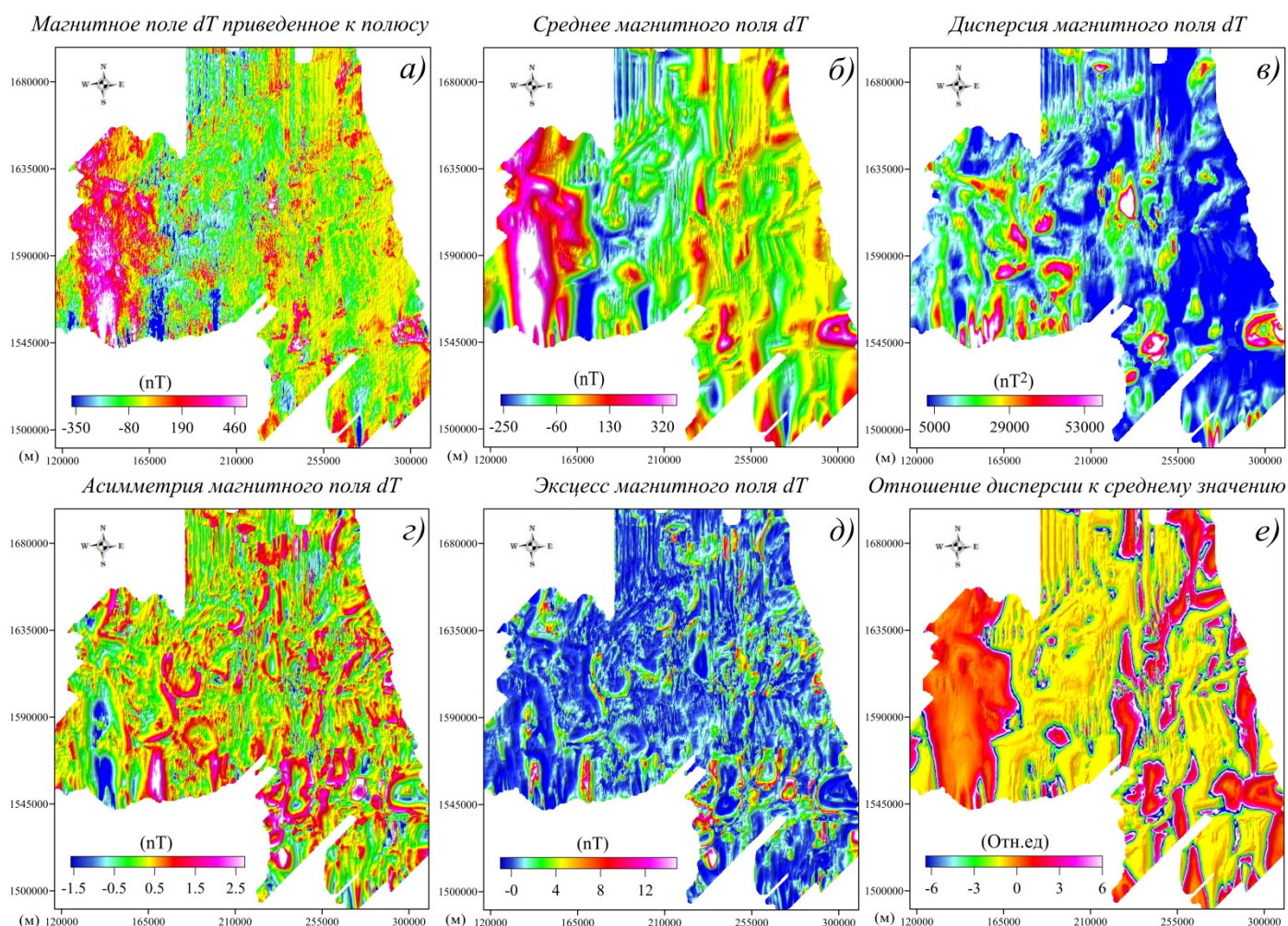


Рисунок 5 – Оценка статистических характеристик магнитного поля dT приведенное к полюсу (а) в скользящем окне «живой» формы в центральной части Вьетнама

В полях статистических атрибутов локального гравитационного поля (Рисунок 6) отражены особенности распределения аномалиеобразующих объектов в верхней части разреза на глубинах до 3÷5 км. Здесь положительные экстремальные значения в полях статистических атрибутов вытянуты в трех основных направлениях: в юго-западном, юго-восточном и субширотном. На северо-востоке, юго-западе и юго-востоке анализируемой

территории поля атрибутов сильно дифференцированы, что свидетельствует о сложном геологическом строении и возможной, разновозрастной, тектонической активности этих областей. Выделяется большое количество аномальных зон различного простирания и формы, кольцевых и линейных структур.

Характер полей статистических атрибутов (Рисунок 6) позволяет выделить границы аномальных блоков по положительным экстремумам 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 зрения наличия залежей полезных ископаемых, перекрытых осадочными образованиями.

Статистические характеристики в скользящем окне локального гравитационного поля dG

Локальная компонента гравитационного поля Среднее локального гравитационного поля Дисперсия локального гравитационного поля

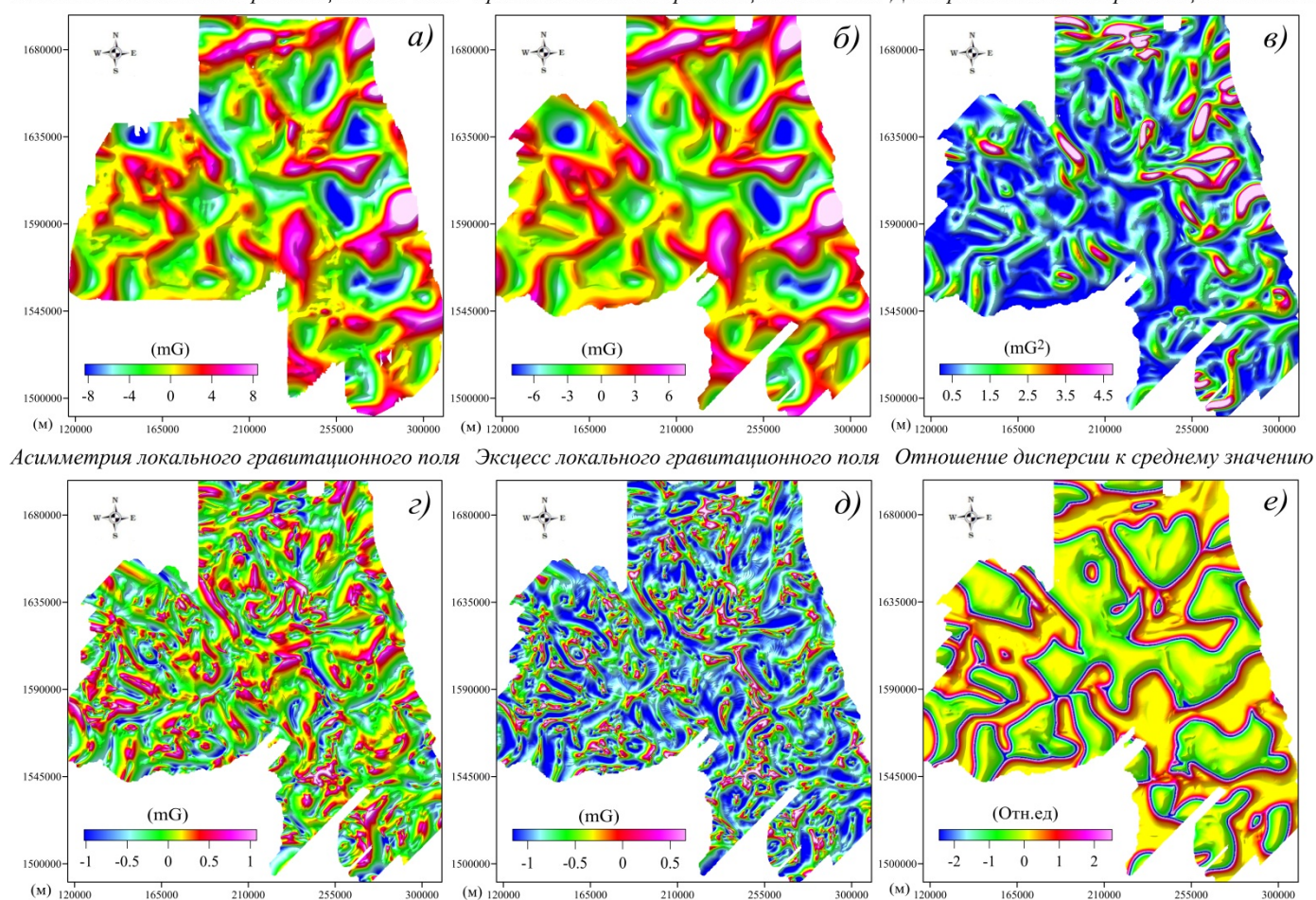


Рисунок 6 – Оценка статистических характеристик локальной компоненты гравитационного поля dG в скользящем окне «живой» формы в центральной части Вьетнама

Градиентные характеристики геополей. Оценок градиентных характеристик геофизических полей также позволяет детализировать их особенности и подчеркнуть границы аномальных объектов. В поле полного градиента:

- 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.

Результаты оценки градиентных характеристик гравитационного и магнитного полей центральной части Вьетнама. В исходных гравитационном и магнитном поле (Рисунок 7 а, 8 а) однозначно трудно выделить границы аномалий различной амплитуды и системы разломов различного простирания.

В поле градиента гравитационного поля (Рисунок 7 б) четко отражаются границы аномалиеобразующих объектов, приуроченных к глубинам до 3÷5 км. Эти геологические структуры трассируются максимальными значениями полного градиента гравитационного поля и имеют северо-восточное простирание.

Линейные положительные максимумы 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 выделяется 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.

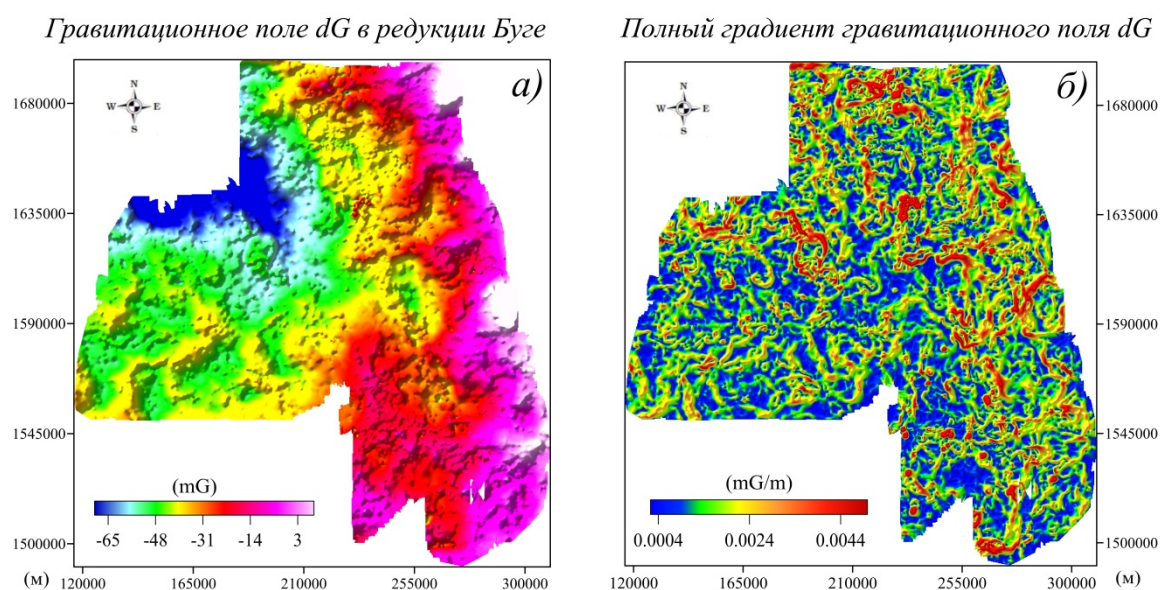


Рисунок 7– Аномальное гравитационное поле dG в редукции Буге (а) и поле полного градиента гравитационного поля dG (б) в центральной части Вьетнама

В поле полного градиента магнитного поля (Рисунок 8 б) в большей степени отражены особенности кристаллического фундамента, которые связаны с экстремумами градиента магнитного поля.

На карте полного градиента поля отмечаются граница большого количества 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. В восточной части поля полного градиента отмечается уменьшение его дифференциации, что связано с увеличением мощности осадочных отложений и близости океанической коры.

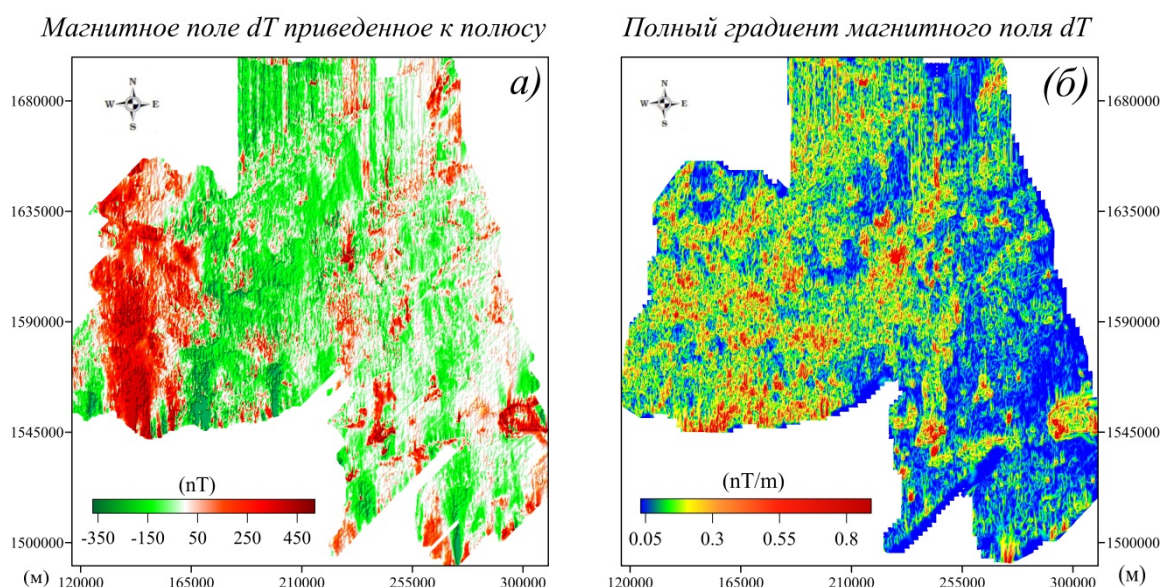


Рисунок 8 – Аномальное магнитное поле dT приведенное к полюсу (а) и поле полного градиента магнитного поля dT (б) в центральной части Вьетнама

Содержание второй главы диссертационной работы позволяет сформулировать первое защищаемое положение, приведенное выше.

В **третьей главе** диссертационной работы начинается с описания методов линейной оптимальной фильтрации геофизических полей в рамках аддитивной модели поля, когда результаты наблюдений представлены в виде суммы полезных сигналов и помех $f_i = a_i + n_i$ (здесь f_i – наблюдаемое поле, a_i – аномальные, полезные составляющие поля n_i – помехи различной природы). Рассматривается суть энергетического фильтра, как наиболее эффективного для решения задачи выделения наиболее энергоемких аномалий (протяженных и большой амплитуды). Это свойство фильтра лежит в основе предлагаемой технологии разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие компоненты и оценки энергии «шумовой» компоненты магнитного поля.

В основе предложенной в работе технологии лежит последовательная фильтрация поля и выделение локальных компонент разного порядка, вплоть до «белого» шума.

На рисунках 9 и 10 представлены результаты разложения магнитного и гравитационного полей на составляющие с использованием последовательной адаптивной энергетической фильтрации в окне «живой» формы.

Результаты разложения гравитационного и магнитного полей на составляющие, содержат информацию о наличии аномалиеобразующих и геологических объектов на разных глубинах.

В трендовой компоненте гравитационного поля (Рисунок 9 б) находят отражение особенности глубоко расположенных геологических структур и 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.

Локальная компонента гравитационного поля 1-го порядка (Рисунок 9 в), включает большое количество аномалий различной формы (линейных и кольцевых), размером $10 \div 30$ км, что соответствует аномалиеобразующим объектам, расположенным на глубинах от 2 до 7 км. Отмечаются неоднородные по плотности крупные объекты в северной, юго-западной, юго-восточной и центральной частях.

Локальная составляющая гравитационного поля 2-го порядка (Рисунок 9г),

представлена мозаикой знакопеременных аномалий, размер которых колеблется в интервале от 1 до 2 км индуцированных телами, расположенными на глубинах от 300 до 700 м, которые представляют интерес для поисковых задач в общем и поиска эндогенных месторождений полезных ископаемых.

Локальные компоненты гравитационного поля 3-го и 4-го порядка (Рисунок 9 д, 9 е) 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

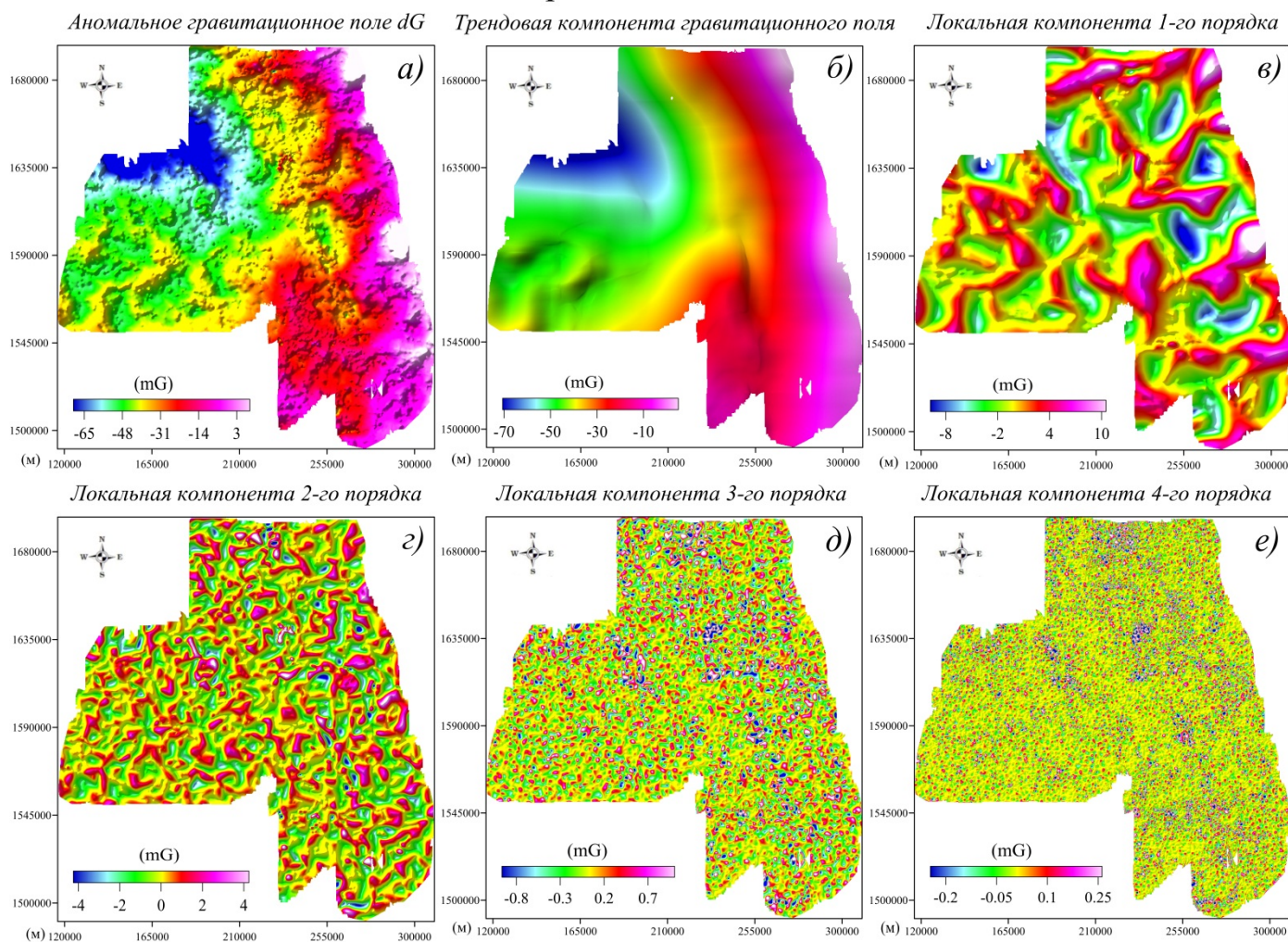


Рисунок 9 – Результат разложения гравитационного поля dG в редукции Буге (а) в центральной части Вьетнама на составляющие

В трендовой компоненте магнитного поля (Рисунок 10 б) выделяются три отдельные области:

В западной части выделяется крупный блок, характеризующийся положительными аномальными значениями. Источником такой аномалии может быть крупное геологическое образование, расположенное на глубинах от 3 до 10 км, которая скорее всего индуцируется породами кристаллического фундамента и связана с уменьшением мощности осадочного чехла.

Для центральной части трендовой компоненты характерны низкие значения поля и ряд положительных кольцевых аномалий меньшего размера (до 3÷5 км), что скорее всего связано с развитием метаморфизма и наличием базальтовых глыб.

Восточная часть трендовой составляющей магнитного поля содержит, как положительные, так и отрицательные аномалии, кольцевой и линейной формы в основном меридионального простирания, которые можно объяснить чередованием вытянутых в

меридиональном направлении базальтов, перемежающихся с осадочными и метаморфическими породами.

В юго-восточной части трендовой компоненты имеет диапазон изменения значений лежит в интервале от 100 до 400 nT , отмечается крупная кольцевая аномалия, диаметром около $5 \div 7$ км, которая, скорее всего, связаны с крупными дайковыми гранитными образованиями.

Характер поля первой локальной компоненты магнитного поля (Рисунок 10 в) позволяет 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 также представлена аномалиями разного знака, но меньшей интенсивности.

Локальная компонента 1-го порядка, 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 (Рисунок 10 г, 10 д) в целом похожи и отражают относительное распределение магнитных масс, расположенных в верхней части геологического разреза. Наибольшее различие между ними наблюдается между западной и восточной частями исследуемой территории.

Разложение аномального магнитного поля dT на составляющие

Магнитное поле dT приведенное к полюсу Трендовая компонента магнитного поля Локальная компонента 1-го порядка

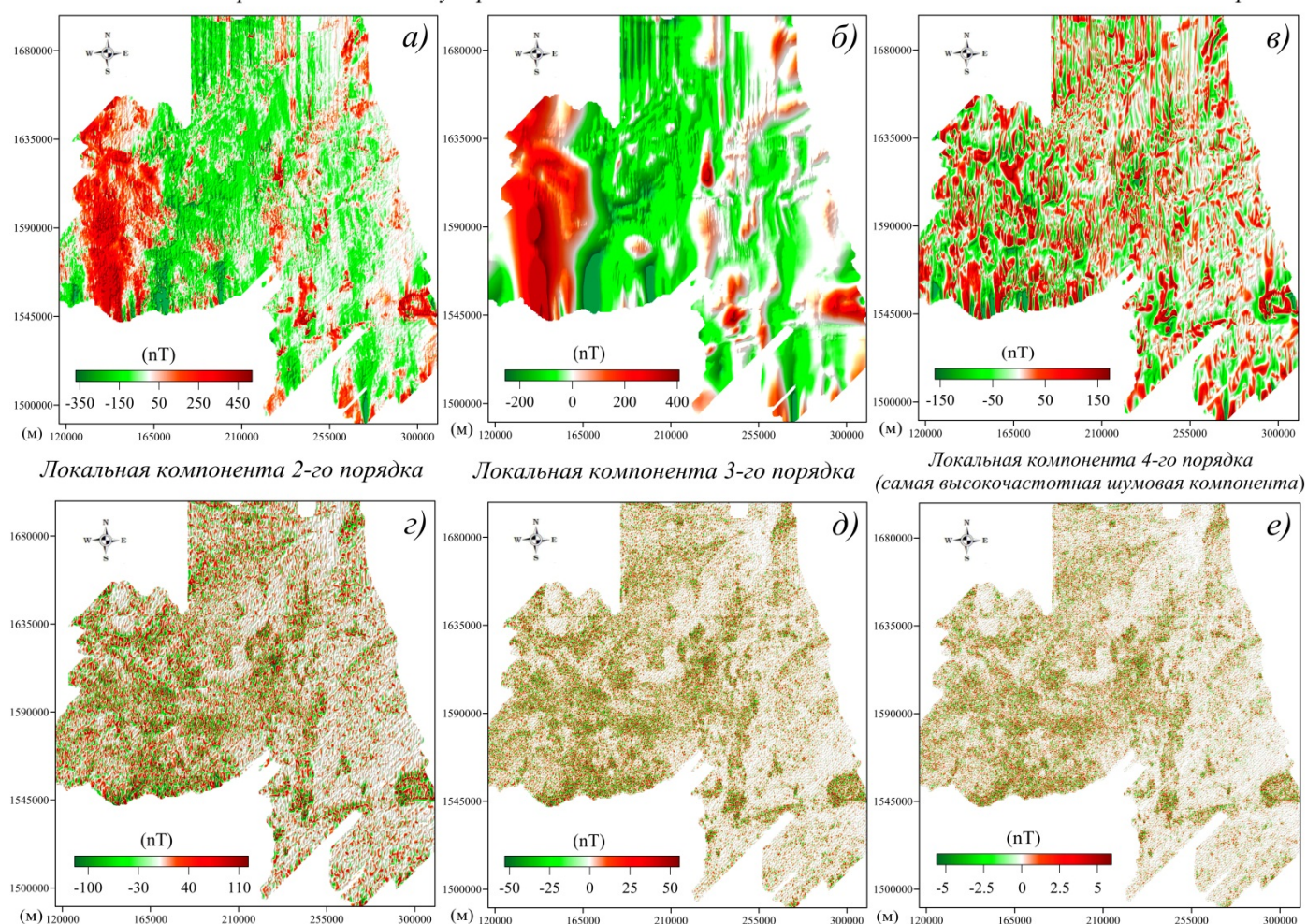


Рисунок 10 – Результат разложения магнитного поля dT приведенное к полюсу (а) в центральной части Вьетнама на составляющие

Оценка и анализ высокочастотной «шумовой» компоненты магнитного поля.

Размах значений локальной составляющей магнитного поля 4-го порядка (Рисунок 10е или 11 б) 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 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.

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

Оценка энергии высокочастотной компоненты магнитного поля dT

Магнитное поле dT приведенное к полюсу Шумовая компонента без ураганных значения

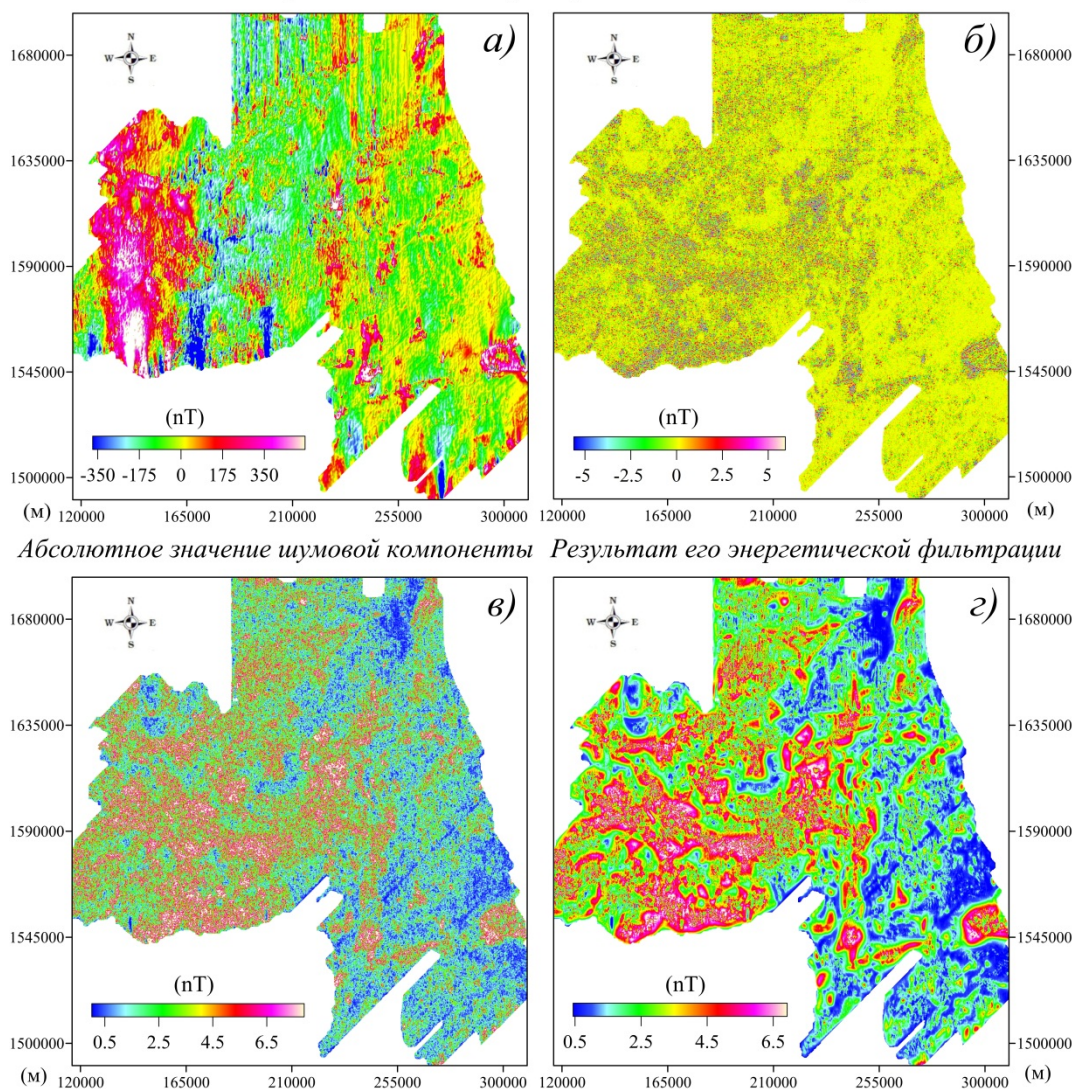


Рисунок 11 – Магнитное поле dT приведенное к полюсу (а), локальная компонента 4-го порядка – самая высокочастотная шумовая компонента (б), поле абсолютных значений шумовой компоненты без ураганных значений(в), и результат его энергетической фильтрации в окне «живой» формы (г) в центральной части Вьетнама

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 (Рисунок 11 в). С целью сглаживания оценки шумовой компоненты магнитного поля осуществляется ее адаптивная энергетическая фильтрация в окне «живой» формы. Результат фильтрации приведен на рисунке 11(г).

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 увеличения 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 максимальны, мощность осадочного чехла минимальна или он совсем отсутствует. И наоборот, низким значениям энергии шумовой компоненты соответствуют области широкого распространения осадочных отложений большой мощности.

Содержание третьей главы диссертационной работы лежит в основе второго защищаемого положения.

В четвертой главе посвящена возможностям использования данных гравиразведки и магниторазведки в задачах геологического и структурного районирования исследуемых территорий.

Одной из востребованных задач прикладной геологии и геофизики является районирование исследуемых территорий по определенным геологическим параметрам, геофизическим полям и их атрибутам. В прикладной геологии и геофизике широко

используются результаты геологического, тектонического, гидрогеологического, сейсмического, нефтегазогеологического и многих других районирований территорий. Во всех случаях задача районирования сводится к разбиению исследуемой площади на области, однородные по одному или нескольким геолого-геофизическим параметрам и их атрибутам.

Особое внимание при решении задачи разбиения на однородные области следует уделять вопросам особенностей геолого-геофизической информации, выбору оптимальной совокупности признаков для проведения районирования территорий и оценке корреляционных связей между разными признаками.

Классификационные алгоритмы, реализованные в компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных **«КОСКАД 3D»** обладают свойством, которое заключается в непротиворечивости результатов, получаемых с использованием разных классификационных алгоритмов. 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.

Выбор алгоритмов, проводился с учетом особенностей исходной, координатно-привязанной геолого-геофизической информации и необходимости учета корреляционных связей между отдельными элементами признакового пространства.

Районирование центральной части Вьетнама по данным магниторазведки.

Районирование осуществлялось по трендовой компоненте магнитного поля dT (Рисунок 12а), ее полному градиенту (Рисунок 12 б) и оценке дисперсии (энергии) магнитного поля в скользящем окне *«живой»* формы (Рисунок 12 в).

Результаты разбиения исследуемой территории на 9 однородных областей методом ***к-средних*** и ***разделения многомерных нормальных смесей по Петрову А. В.*** (Рисунок 12 д, 12 г) позволило уточнить границы расположения известных геологических объектов и повысить достоверность конечных выводов о геологическом строении района исследований в целом.

Интересна корреляционная связь результатов районирования (Рисунок 12 д, 12 г), с имеющейся геологической картой (Рисунок 13 а) и картой интенсивности гамма поля (Рисунок 13 б). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что второй класс (зелёный цвет) скорее всего связан с областью распространения пород осадочного чехла, с небольшой интенсивностью радиоактивности от 5 $mP/ч$ до 15 $mP/ч$. Третий класс (синий цвет), с интенсивностью радиоактивности от 15 $mP/ч$ до 25 $mP/ч$, скорее всего приурочен к областям распространения метаморфических пород. Пятый класс (темно-коричневый цвет), с интенсивностью радиоактивности от 25 $mP/ч$ до 30 $mP/ч$, связан с базальтовыми породами. Восьмой класс (красный цвет), с высокой интенсивностью радиоактивности от 30 $mP/ч$ до 60 $mP/ч$, обычно характерен для областей распространения гранитных пород кристаллического фундамента. С высокой степенью вероятности классы 6, 7, 8, 9 могут контролировать интрузивные магматические образования и высокотемпературные метаморфические блоки.

В конечном итоге результаты районирования на рисунках 12(г) и 12(д) позволили существенно повысить достоверность конечных геологических построений и выделить скрытые магматические образования с высокими значениями магнитной восприимчивости и плотности на юго-западе и юге исследуемой области.

Районирование территории по трендовой компоненте магнитного поля dT и его атрибутам

Трендовая компонента магнитного поля dT Полный градиент трендового компонента dT Поле дисперсии трендового компонента dT

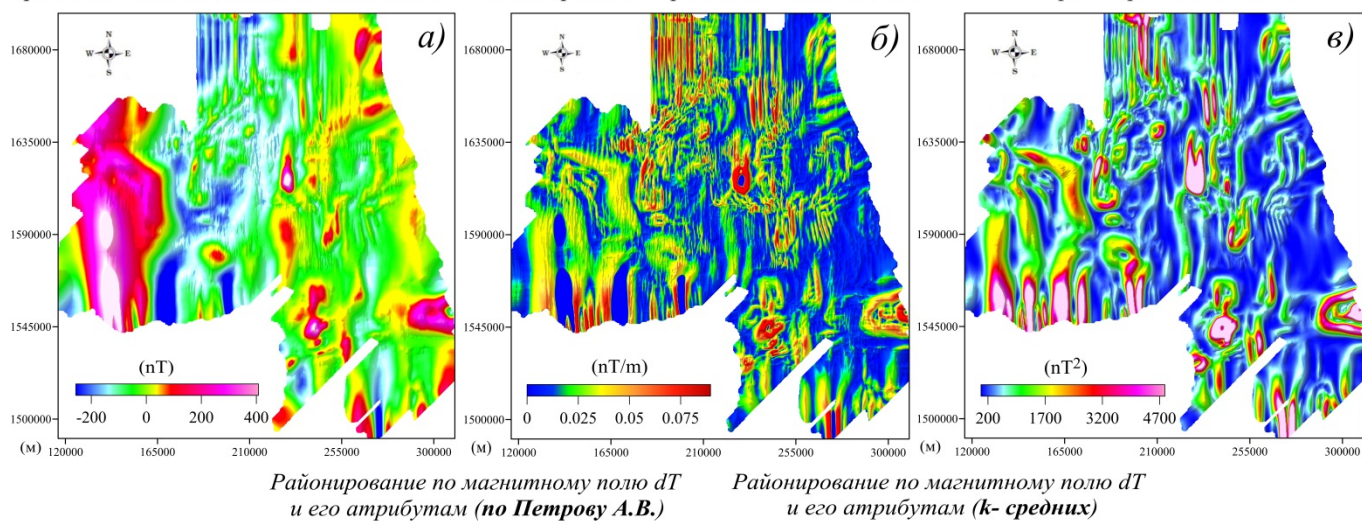
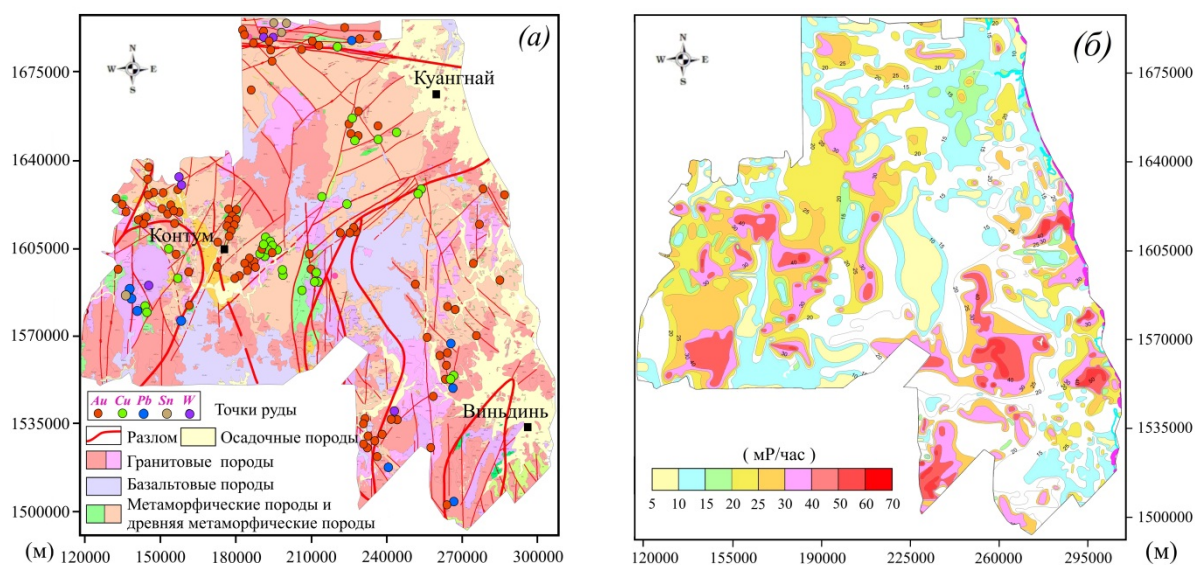


Рисунок 12 – Результаты районирования территории по трендовой компоненте магнитного поля dT (а), ее полному градиенту (б) и ее энергии (в) с использованием метода k -средних (д) и по Петрову А. В. (г) в центральной части Вьетнама



Кроме этого, были выделены области проявления магматизма, приуроченного к зонам тектонических дислокаций и интрузивных образований, как скрытых, так и выходящих на поверхность.

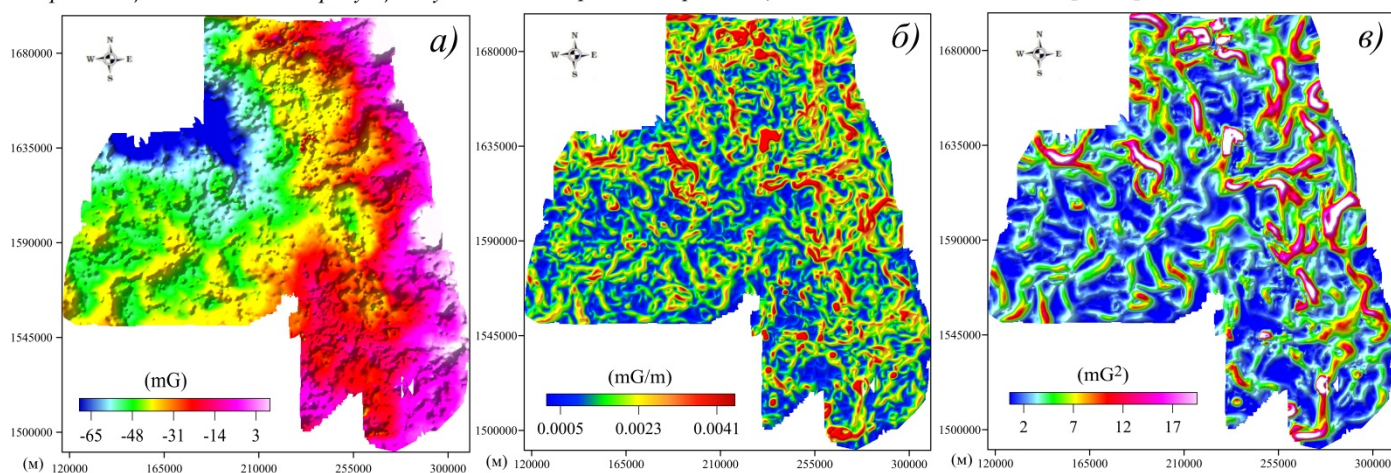
С учетом того, что месторождения рудных полезных ископаемых приурочены как раз к зонам проявления тектонических дислокаций возможно использовать результаты районирования в решении прогнозных задач.

Районирование центральной части Вьетнама по данным гравиразведки. Районирование исследуемой площади осуществлялась по исходному гравитационному полю dG в редукции Буге (Рисунок 14 а), его полному градиенту (Рисунок 14 б) и полю оценки дисперсии (энергии) гравитационного поля (Рисунок 14 в).

Результаты разбиения исследуемой территории на 8 однородных по плотностным атрибутам областей с использованием метода *к-средних* и *разделения многомерных нормальных смесей по Петрову А. В.* приведены на рисунках 14(д) и 14(г) соответственно.

Районирование территории по гравитационному полю dG и его атрибутам

Гравитационное поле dG в редукции Буге Полный градиент гравитационного поля dG Поле дисперсии гравитационного поля dG



*Районирование по гравитационному полю dG и его атрибутам (по Петрову А.В.) Районирование по гравитационному полю dG и его атрибутам (*к-средних*)*

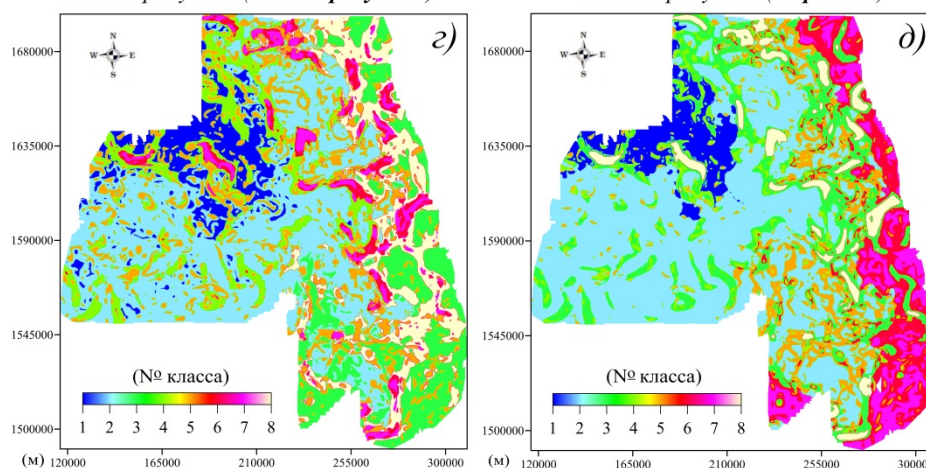


Рисунок 14 – Результаты районирования территории по гравитационному полю dG в редукции Буге (а), ее полному градиенту (б) и ее энергии (в) с использованием метода *к-средних* (д) и по Петрову А. В. (г) в центральной части Вьетнама

Анализ результатов районирования (Рисунок 14 г, 14 д) позволил сделать вывод о том, что на исследуемой территории имеется множество вытянутых изометрических блоков юго-западного и юго-восточного простирания с высокими значениями плотности в северной, северо-западной и юго-восточной областях.

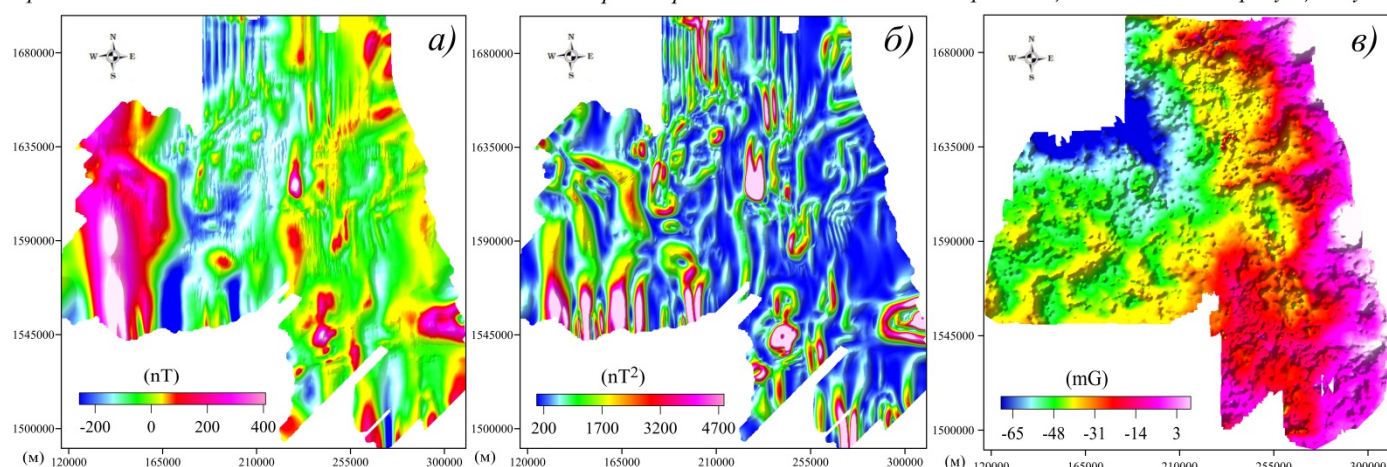
На рисунке 14(г) положение отдельных классов (4, 5) хорошо коррелируется с имеющейся информацией о проявлении на поверхности руд (Рисунок 13 а) (золота, железа, меди, свинца, олова, вольфрама и другие металлы).

Результаты районирования также показали, что в восточной части имеются области, вытянутые непрерывно с севера на юг (класс 5, 8), которые хорошо коррелируются с имеющейся информацией о распространении магматических интрузивных образований, прорывающих осадочные отложения.

В юго-западной части на региональном плане, представленном в основном вторым классом, разбросаны локальные области небольших размеров с высокой остаточной плотностью (класс 4, 5), которые могут быть связаны с неглубоко залегающими интрузивными магматическими образованиями.

Районирование центральной части Вьетнама по данным гравиразведки и магниторазведки. Результаты разбиения исследуемой территории на 7 однородных областей по данным магниторазведки dT (Рисунок 15 а), гавиразведки dG (Рисунок 15 в), энергии магнитного (Рисунок 15 б) и энергии гравитационного полей (Рисунок 15 г) с использованием методов *к-средних* и *разделения многомерных нормальных смесей Петрову А. В.* представлены на рисунках 15(е) и 15(д) соответственно.

Районирование территории по трендовой компоненте магнитного поля dT и по гравитационному полю dG
 Трендовая компонента магнитного поля dT Поле дисперсии трендового компонента dT Гравитационное поле dG в редукции Буге



Поле дисперсии гравитационного поля dG Районирование по магнитному полю dT и гравитационному полю dG (по Петрову А.В.) Районирование по магнитному полю dT и гравитационному полю dG (*к-средних*)

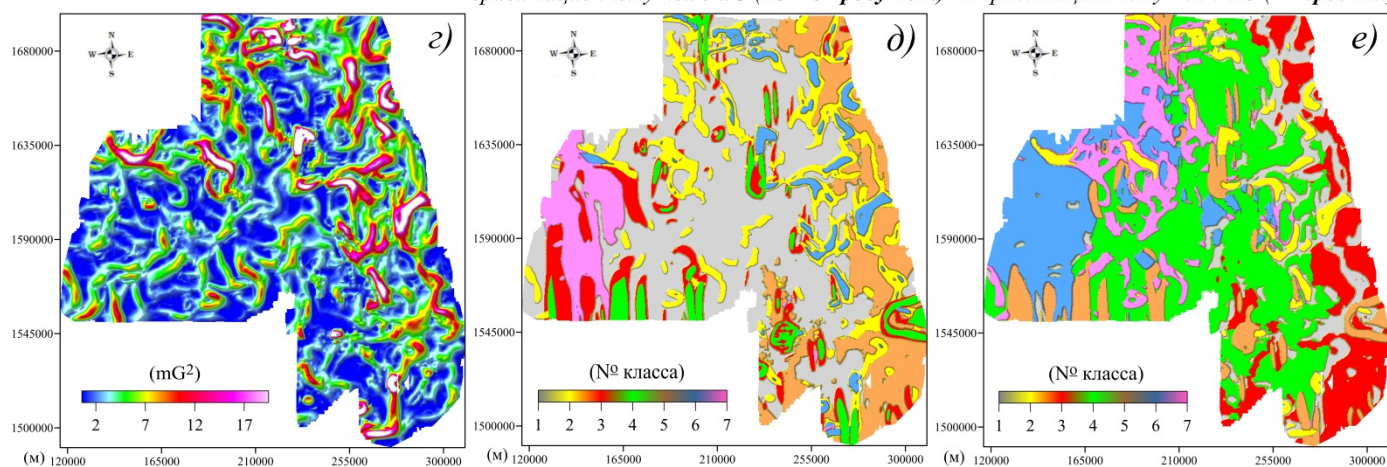


Рисунок 15 – Результаты районирования территории по трендовой компоненте магнитного поля dT (а), ее энергии (б) и по гравитационному полю dG (в), ее энергии (г) с использованием метода *к-средних* (е) и по Петрову А. В. (д) центральной части Вьетнама

Анализ полученных результатов районирования (Рисунок 15 д) можно проинтерпретировать следующим образом:

- В западной части исследуемой территории выделяются области меридионального простирания (класс 3, 7), которые, скорее всего, связаны с распространением гранитных пород кристаллического фундамента;
- В центральной части (класс 1), приурочен к областям развития метаморфических процессов и наличием базальтовых глыб;
- В восточной части (класс 5) хорошо коррелируется с имеющейся информацией о распространении осадочных пород.
- Вытянутые изометрические однородные области юго-западного и юго-восточного простирания (класс 2) могут быть связаны с гранитными или базальтовыми интрузивами, прорывающими 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 (класс 5) и метаморфических пород (класс 1), хорошо коррелируются с имеющейся геологической информацией о поверхностных рудопроявлениях (Рисунок 13 а) (*золота, железа, меди, свинца, олова, вольфрама и другие металлы*).

На юго-востоке и юге отмечаются кольцеобразные области (класс 3, 4), которые могут быть связаны с крупными гранитными массивами, прорывающими пласты осадочных пород (класс 5).

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенных научных исследований, позволили сделать следующие выводы:

- Экстремальные значения поля полного градиента и 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 скрытых, 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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, в системах SCOPUS:

1. **Фан Т.Х.**, Петров А.В., До М.Ф., Лай М.З., Нгуен Ч.Л. Особенности геологического строения центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных гравиразведки в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Геология и разведка, 2020, № 5 (63), Стр. 77-90.

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

3. М.Ф. До, **Т.Х. Фан**, П.А. Игнатов. Закономерности локализации золото-медной и урановой минерализации в районе Кон Ра, центральный Вьетнам// Разведка и охрана недр, 2022, № 1, стр.3-10.

4. М.Ф. До, П.А. Игнатов, **Т.Х. Фан**, З.Х. Нгуен, В.Т. Чан. Структуры, Контролирующие Cu-U-Au минерализацию в районе Кон Ра провинции Контум центрального Вьетнама // Разведка и охрана недр, 2021, № 6, Стр. 28-34.

5. М.Ф. До, П.А. Игнатов, **Т.Х. Фан**, З.Х. Нгуен, Д. Чан. Минералого-геохимические характеристики Cu-U-Au проявлений в районе Кон Ра провинции Контум, Вьетнам // Геология и разведка, 2020, № 2 (63), Стр. 73-85.

6. Nguyen Nhu Trung, **Phan Thi Hong**, Bui Van Nam, Nguyen Thi Thu Huong and Tran Trong Lap. Moho depth of the northern Vietnam and Gulf of Tonkin from 3D inverse interpretation of gravity anomaly data // Journal of Geophysics and Engineering, 2018, № 15, 1651–1662 (12pp).

Статьи, опубликованные в журналах во Вьетнаме.

7. **Phan Thi Hong**, Petrov Aleksey Vladimirovich, Do Minh Phuong, Nguyen Truong Luu. Geological region by multi-signal method of gravity anomaly data in central Vietnam area. Journal of Mining and Earth Sciences, 2021, volume 62, issue 5-2021, 43-55.

8. **Thi Hong Phan**, Nhu Trung Nguyen, Van Nam Bui, Minh Phuong Do. Deep crustal structure of Hanoi and adjacent areas on the basic of gravity anomaly analysis // Journal of mining and earth sciences, 2017, № 58(5), 325-334.

9. **Hong Thi Phan**, Trung Nhu Nguyen, Nam Van Bui. 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 // Journal of mining and earth sciences, 2016, № 57, 1-13.

Тезисы докладов, опубликованные на конференциях и семинарах.

10. **Фан Т. Х.**, Петров А. В., До М.Ф. Оценка статистических характеристик аномального магнитного поля в центральной части Вьетнама // "III Молодежная научно-образовательная конференция", ЦНИГРИ, Москва 2022г., Стр. 201-204.

11. **Фан Т. Х.**, Петров А. В., До М.Ф. Применение алгоритма двумерной фильтрации в скользящем окне «живой» формы на примере центрального Вьетнама // "Новые идеи в науках о Земле", МГРИ, апреля 2021 г., том 4, стр. 339-343.

12. **Фан Т. Х.**, Петров А. В., До М.Ф. Районирование перспектив скрытых блоков магмы в центральной области Вьетнама по анализу данных магнитных аномалий // "II Молодежная научно- образовательная конференция", ЦНИГРИ, Москва 2021г., Стр. 123-127.

13. **Фан Т. Х.**, Петров А. В., До М.Ф. Обработка и интерпретация аномалий гравитационных данных в центральной области Вьетнама с использованием компьютерной технологии "КОСКАД 3D" // "Молодые – Научам о Земле", том 4, МГРИ-РГГРУ, 2020, стр. 293-297.

14. До М.Ф., Игнатов П. А., **Фан Т. Х.** Эпискарновая Cu-U-Au минерализация района Конра в центральном Вьетнаме // "II Молодежная научно", ЦНИГРИ, 2021 г., Стр. 37-41.

15. Муфазалова Р. И., Петров А.В., **Фан Т. Х.** Методика оценки энергии шумовой компоненты магнитного поля с использованием компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» // "2-ая Всероссийская научно-практическая конференция", МГРИ, 2021г., Стр. 67-72.

16. Муфазалова Р. И., Петров А. В., **Фан Т. Х.** Алгоритмы классификации многомерных наблюдений в задачах районирования территории по данным гравirazведки и магниторазведки //"Новые идеи в науках о Земле", МГРИ, 2021 г., стр. 316-320.