

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

Думанов Кадыржан Думанулы

Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

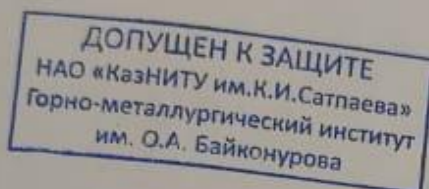
Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

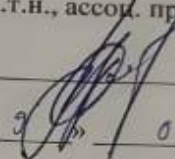
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и
геодезия»
к.т.н., ассоц. профессор

 Г.Мейрамбек
« 3 » 06 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным
гравиметрической разведки»

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

Выполнил

Думанов К.Д.

Рецензент

к.т.н., ассоц. профессор
кафедры "Геодезия и картография,
кадастр" МОК



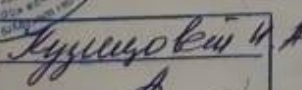
 Кузнецова И. А.

« 6 » 2025 г.

Научный руководитель
PhD, ассоц. профессор

 Кенесбаева А.

« 9 » 06 2025 г.

Подпись 
заверяю
HR департамент
« 20 » 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и геодезия»,
к.т.н., ас.б. профессор
Г. Мейрамбек

« 30 » 06 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающийся Думанов Кадыржан Думанулы

Тема : «Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической
разведки»

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26-П/Ө от 29.01.2025 г.

Срок сдачи законченной работы «30» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Материал, накопленный во время
производственной практики, и данные лекций

Краткое содержание дипломной работы: дипломная работа была посвящена анализу
методов изучения глубинного строения недр на основе гравиметрической разведки.
Применены методы трансформации гравиметрических данных, включая преобразование
Фурье, тренд-анализ и вычисление производных различных порядков. Практическая часть
работы выполнена на примере горной области Средней Азии. Для обработки данных
применялась среда MATLAB, с помощью которой были построены карты аномалий и
трансформация гравитационных полей.

Перечень графического материала: представлены 21 слайдов презентации работы
Исходные данные дипломной работы: гравиметрические данные в аномалиях Буге,
координатная сетка точек, программное обеспечение MATLAB.

Рекомендуемая основная литература:

1. «Методика интерпретации гравиметрических данных при построении геологической
модели земной коры прикаспийского региона» Исагалиева А.К., Исаев В.И., Истекова С.А.
2. «Глубинное строение Улан-баторской впадины по гравиметрическим данным» Н.
Арвисбаатар, Е.Х. Турутанов, Б. Буянтогтох, Д. Цэндсүрэн

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Глубинное изучение недр	27.02.2025	замечаний нет
Методы трансформации гравитационного поля	19.03.2025	замечаний нет
Анализ методов изучения глубинного строения недр на примере горной области средней Азии	09.04.2025	замечаний нет

Подписи
консультантов и нормо контролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Глубинное изучение недр	Кенесбаева А. PhD, ассоц.профессор	27.02.25	
Методы трансформации гравитационного поля	Кенесбаева А.К доктор PhD, ассоц.проф	23.03.25	
Анализ методов изучения глубинного строения недр на примере горной области средней Азии	Кенесбаева А.К доктор PhD, ассоц.проф	10.04.25	
Норм. контролер	Кенесбаева А.К доктор PhD, ассоц.проф	02.06.25.	

Научный руководитель

Кенесбаева А.

Задание принял к исполнению обучающийся

Думанов К.Д.

Дата

«05» 06 2025г

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс гравиметриялық түсіру мәліметтерін пайдалана отырып, жер қойнауының терең құрылымын зерттеу әдістерін талдауға арналған.

Диссертацияның мақсаты - қазіргі заманғы модельдер мен алгоритмдерді қолдана отырып, гравитациялық өрісті өңдеудің теориялық және практикалық аспектілерін зерттеу.

Дипломдық жұмыстың міндеті-гравиметриялық деректерді түрлендіру әдістерін салыстыру және ауытқуларды геологиялық түсіндіру.

Дипломдық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен және қорытындыдан тұрады.

Бірінші бөлімде гравиметрияның теориялық негіздері және геологиялық құрылымды зерттеу әдістері қарастырылған.

Екінші бөлімде гравитациялық өрісті өңдеу әдістері сипатталған-Фурье түрлендіруі, тренд-талдау және туындылар.

Үшінші, практикалық бөлімде MATLAB ортасындағы Орталық Азия өңірінің мысалында гравиметрия деректеріне талдау жүргізілді.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена изучению методов анализа глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки.

Целью дипломной работы является исследование теоретических и практических аспектов обработки гравитационного поля с использованием современных моделей и алгоритмов.

Задачей дипломной работы является сравнение методов трансформации гравиметрических данных и геологическая интерпретация аномалий.

Дипломная работа состоит из введения, трёх разделов и заключения.

В первой части рассмотрены теоретические основы гравиметрии и методы изучения геологического строения.

Во второй части описаны методы обработки гравитационного поля — преобразование Фурье, тренд-анализ и производные.

В третьей, практической части проведён анализ данных гравиметрии на примере региона Центральной Азии в среде MATLAB.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the study of methods for analyzing the deep structure of the subsurface according to gravimetric exploration data.

The purpose of the thesis is to study the theoretical and practical aspects of gravity field processing using modern models and algorithms.

The objective of the thesis is to compare the methods of transformation of gravimetric data and the geological interpretation of anomalies.

The thesis consists of an introduction, three sections and a conclusion.

The first part discusses the theoretical foundations of gravimetry and methods for studying the geological structure.

The second part describes the methods of processing the gravitational field — Fourier transform, trend analysis and derivatives.

In the third, practical part, gravimetry data is analyzed using the example of the Central Asian region in the MATLAB environment.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Глубинное изучение недр	8
1.1 Региональные и локальные составляющие геологических структур	8
1.2 Методы исследования геологической структуры региона	10
1.3 Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в геологии.	12
2 Методы трансформации гравитационного поля	14
2.1 Преобразование Фурье	14
2.2 Тренд-анализ	15
2.3 Вычисление производных разного порядка	17
3 Анализ методов изучения глубинного строения недр на примере горной области средней Азии	19
3.1 Подготовка гравиметрических данных	19
3.2 Аналитическое продолжение гравитационного поля в верхнее и нижнее полупространства	23
3.3 Вычисление тренд-анализа с помощью полиномов различных степеней.	26
3.4 Трансформация гравитационного поля с помощью производных	30
Заключение	33
Список используемой литературы	34
Приложение А	35
Приложение Б	36

ВВЕДЕНИЕ

Гравиметрическая разведка (гравиразведка) является одним из ключевых методов геофизического исследования, применяемым для изучения глубинного строения недр. Этот метод основан на измерении малых вариаций силы тяжести, которые обусловлены различиями в плотности горных пород.

Гравиразведка широко используется в геологии, геодезии и инженерных изысканиях. Она позволяет выявлять рудные и нефтегазовые месторождения, определять тектонические разломы, исследовать строение земной коры и решать различные научно-практические задачи. Однако полученные гравиметрические данные требуют сложной математической обработки, так как на гравитационное поле воздействуют не только глубинные геологические структуры, но и рельеф местности, атмосфера, литосферные процессы и другие факторы.

Актуальность исследования. Изучение глубинного строения недр имеет важное значение для геологии и геофизики, так как позволяет выявлять полезные ископаемые, анализировать тектонические структуры и оценивать геодинамические процессы. Современные методы обработки гравиметрических данных, такие как преобразование Фурье, тренд-анализ и вычисление производных, позволяют уточнять границы геологических структур и получать более достоверные результаты. Таким образом, совершенствование и адаптация методов обработки гравиметрических данных являются актуальной задачей, направленной на повышение точности интерпретации глубинного строения недр.

Цель исследования – анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки и их применение на примере Карагандинской области.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть основные методы исследования геологической структуры региона, включая гравиразведку, магнитометрию, сейсморазведку и другие подходы;
- изучить методы трансформации гравитационного поля, такие как преобразование Фурье, тренд-анализ и вычисление производных разного порядка;

Методы исследования включают теоретический анализ литературы, численные методы обработки гравитационного поля, а также применение специализированного программного обеспечения для анализа гравиметрических данных.

Настоящая работа представляет собой исследование, направленное на улучшение методики интерпретации гравиметрических данных, и может быть полезной для геофизиков, геологов и специалистов в области геодезии.

1 Глубинное изучение недр

1.1. Региональные и локальные составляющие геологических структур

Глубинное строение земной коры представляет собой сложный комплекс геологических образований, сформировавшихся в результате длительных процессов тектонической активности и магматизма [1.1]. В зависимости от масштаба, происхождения и геологической значимости, данные структуры классифицируются на региональные и локальные.

Региональные геологические структуры. К региональным относят геологические образования, охватывающие обширные участки земной поверхности и отражающие структурное устройство и развитие крупных тектонических единиц, таких как плиты и провинции. К числу таких структур можно отнести [1.2]:

- платформы (например, Русская, Сибирская, Западно-Сибирская и др.);
- зоны складчатости (в том числе Урало-Монгольский, Альпийско-Гималайский пояса);
- щиты и антеклизы, представляющие собой участки с выходами фундамента или его поднятиями;
- прогибы, как межгорные, так и окраинные, характеризующиеся мощными накоплениями осадочных пород.

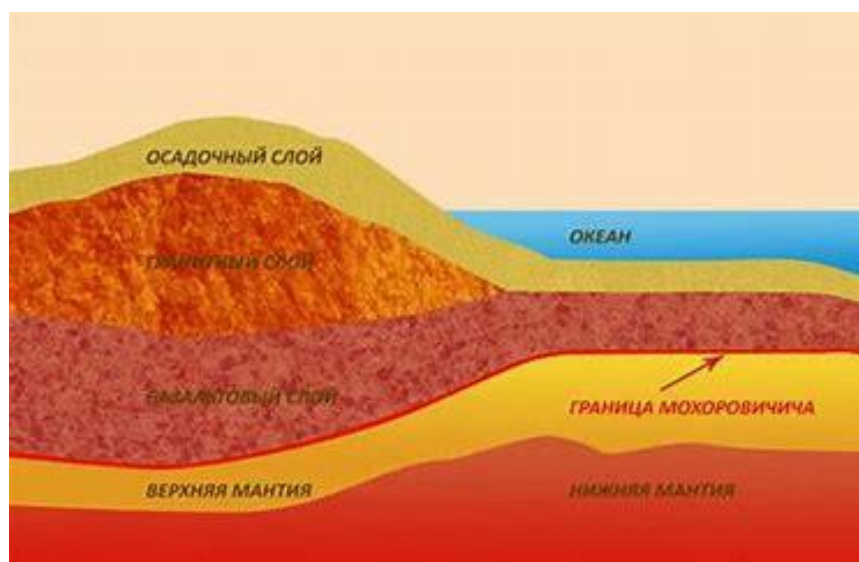


Рисунок 1.1 – Строение земной коры

Региональные структуры оказывают влияние на формирование фоновых геофизических полей, в пределах которых наблюдаются локальные гравитационные аномалии. В контексте гравиметрии они соответствуют региональному компоненту поля, обусловленному крупномасштабными плотностными неоднородностями в литосфере.



Рисунок 1.2 – Региональная геологическая структура.

На территории Казахстана Тянь-Шаньский складчатый пояс и Сарыаркинская антиклиналь являются важными региональными элементами, определяющими геодинамику и минеральный потенциал Центрального Казахстана.

Локальные геологические структуры. Локальные структуры — это более мелкие по масштабу геологические образования, залегающие в пределах региональных единиц. К ним относятся:

- Разломы и разрывные нарушения (в том числе древние и активные);
- Интрузивные тела (гранитоиды, габбро-диориты, кимберлитовые дайки);
- Соляные купола и диапиры;
- Осадочные ловушки нефти и газа;
- Месторождения полезных ископаемых (рудные тела, линзы, залежи).

Именно локальные структуры чаще всего становятся объектами детальной геологоразведки, поскольку они непосредственно связаны с размещением полезных ископаемых. В гравиметрическом поле они формируют локальные гравитационные аномалии, которые можно выделить после удаления регионального фона.

Значение разграничения структур. Разделение геологических структур на региональные и локальные имеет ключевое значение при интерпретации гравиметрических данных. Региональные структуры влияют на фоновые компоненты гравитационного поля, а локальные — на детальные аномалии, указывающие на конкретные геологические объекты.

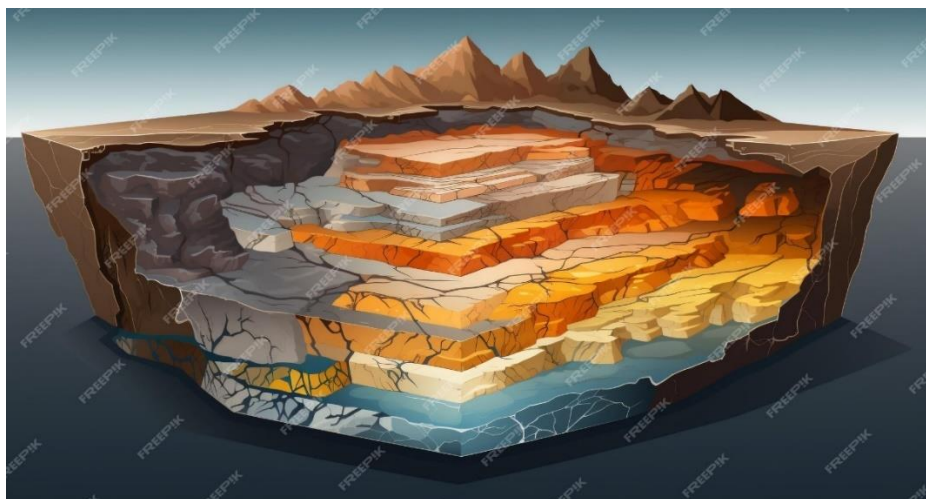


Рисунок 1.3 – Локальные геологические структуры

При математической обработке гравитационного поля используются методы разделения на региональные и остаточные составляющие — тренд-анализ, фильтрация в частотной области, аналитическое продолжение, которые позволяют выделять сигналы различного масштаба. Понимание и учёт различий между региональными и локальными геологическими структурами является основой для корректной интерпретации гравиметрических данных. Оно позволяет: более точно локализовать геофизические аномалии; оценивать потенциальные глубинные источники плотностных контрастов; эффективно планировать бурение и другие изыскания; строить комплексные геолого-геофизические модели.

Таким образом, разграничение региональных и локальных компонентов является важнейшим этапом при изучении глубинного строения недр и залогом успешного применения гравиметрической разведки в практике.

1.2 Методы исследования геологической структуры региона

Геологическая структура региона изучается различными методами, которые позволяют определить состав, плотность, намагниченность и другие физические характеристики горных пород. Эти методы широко применяются в поисках полезных ископаемых, строительстве, гидрогеологии, нефтегазовой промышленности и фундаментальных геофизических исследованиях.

Гравиметрическая разведка эффективно используется для:

- выявления различий в плотности пород;
- обнаружения локальных аномалий, скрытых под мощной толщей осадков;
- картирования границ тектонических блоков;
- подтверждения или уточнения структур, полученных другими методами.

Магнитометрия. Принцип метода основан на измерении интенсивности и градиента магнитного поля Земли. Разные породы содержат магнитные минералы, такие как магнетит, гематит и пирротин, которые вызывают локальные аномалии магнитного поля.

Методы магнитной разведки:

1. Аэромагнитная съемка – проводится с самолетов и дронов, охватывает большие территории.
2. Наземная магнитная съемка – детальные измерения на поверхности земли.
3. Магнитная разведка в скважинах – измерения магнитных свойств пород в буровых скважинах.

Применение: поиск железных руд и других магнитных полезных ископаемых; картирование вулканических образований и магматических пород; изучение глубинного строения земной коры; поиск затонувших объектов и археологических артефактов. Достоинства: Быстрота исследований; Охват больших территорий при аэромагнитной съемке. Недостатки: Ограниченная точность при работе с немагнитными породами; Влияние помех от инженерных объектов и солнечной активности.

Теллуromетрия. Принцип метода основана на измерении вариаций естественного электромагнитного поля Земли, создаваемого ионосферными токами и грозowymi разрядами. Разные горные породы обладают разной электропроводностью, что позволяет картировать геологические структуры.

Основные виды измерений:

- Теллурические токи – фиксируются с помощью электродов, вбитых в землю.

- Магнитотеллурические исследования – используют изменения магнитного поля для анализа проводимости недр.

Применение. Поиск рудных месторождений и подземных вод; Определение глубинных разломов и границ геологических слоев; Изучение структуры земной коры на больших глубинах (до 50-100 км). Достоинства: позволяет изучать глубинные структуры без бурения; Дешевле по сравнению с сейсморазведкой. Недостатки: чувствительность к техногенным электромагнитным помехам; сложность интерпретации данных.

Сейсморазведка. Принцип метода основан на том, что метод использует искусственно созданные или естественные сейсмические волны, которые распространяются в земной коре и отражаются или преломляются на границах геологических слоев. Методы сейсморазведки. Метод отражённых волн (МОВ) – используется в нефтегазовой разведке, позволяет картировать осадочные породы и ловушки нефти и газа. Метод преломлённых волн (МПВ) – применяется для изучения крупных структур, разломов и литосферных границ. Сейсмоакустические исследования – проводятся в морских и озерных районах для изучения дна и подводных структур. Применение: поиск нефти, газа, подземных вод; оценка сейсмической активности и опасных разломов; инженерные исследования перед строительством крупных объектов. Достоинства: высокая точность данных; возможность изучения глубинных структур. Недостатки: высокая стоимость и сложность проведения; требуется сложная компьютерная обработка данных.

Гравиразведка. Принцип метода основан на измерении изменений силы тяжести, которые вызваны различной плотностью горных пород. Чем плотнее

порода, тем сильнее притяжение, что фиксируется гравиметрами. Применение: определение структурных ловушек нефти и газа; поиск рудных месторождений; изучение складчатых областей и глубинного строения литосферы. Достоинства: позволяет быстро исследовать большие площади; не требует бурения. Недостатки: ограниченная разрешающая способность; чувствительность к внешним возмущениям.

Другие методы

- Электроразведка. Изучает электропроводность горных пород. Используется для поиска подземных вод, рудных месторождений и в инженерной геологии.
- Радиометрия. Фиксирует радиоактивность пород (уран, торий, калий). Применяется в ядерной геологии и для поиска радиоактивных минералов.
- Геотермические методы. Основаны на изучении распределения температуры в недрах. Используются при поиске геотермальных источников и изучении тепловых потоков Земли.
- Космическая геология. Использует спутниковые данные (радарные и спектральные снимки) для изучения структуры земной коры, тектонических процессов и прогноза землетрясений.

Каждый метод имеет свои особенности и ограничения. В реальной практике исследования обычно проводят комплексно, используя несколько методов для повышения точности данных. В нефтегазовой разведке обычно применяют сейсморазведку, гравиразведку и магнитометрию. Для поиска подземных вод используют электроразведку, гравиразведку и геотермические методы. В рудной геологии применяют магнитометрию, гравиразведку, теллуromетрию и радиометрию. Комбинированное использование этих методов позволяет получать максимально точные и достоверные данные о геологической структуре региона.

1.3 Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в геологии

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является важным инструментом в геологических исследованиях, позволяя анализировать строение земной поверхности, выявлять тектонические структуры, прогнозировать месторождения полезных ископаемых и отслеживать геодинамические процессы. Основное преимущество ДЗЗ заключается в способности получать данные о труднодоступных районах без необходимости проведения масштабных полевых работ.

Современные методы ДЗЗ включают:

1. Мультиспектральную и гиперспектральную съемку – позволяет анализировать спектральные характеристики горных пород и минералов, что особенно полезно при картировании геологических формаций и поиске полезных ископаемых.

2. Радиолокационное зондирование – используется для изучения рельефа и структуры земной поверхности, особенно в условиях облачного покрова или густой растительности. Радиолокационные снимки позволяют выявлять разломы, складчатые зоны и другие тектонические элементы.

3. Гравиметрические и магнитометрические спутниковые измерения – применяются для изучения изменений гравитационного и магнитного полей Земли, что помогает выявлять глубокозалегающие геологические структуры.

4. Лазерное сканирование (LiDAR) – дает возможность получать детализированные цифровые модели рельефа, используемые при геологическом картировании, исследовании разломов и оценке опасностей оползней.

Применение данных ДЗЗ в геологии охватывает несколько ключевых направлений: - геологическое картирование – спутниковые снимки используются для составления геологических карт, анализа складчатых структур и изучения тектонических разломов.

- разведка полезных ископаемых – спектральные характеристики различных минералов позволяют определять перспективные области для добычи полезных ископаемых, таких как нефть, газ, уголь и металлы.

- мониторинг природных катастроф – спутниковые данные помогают отслеживать вулканическую активность, землетрясения, оползни и процессы эрозии, что имеет важное значение для предупреждения геологических рисков.

- изучение изменений климата и окружающей среды – данные дистанционного зондирования используются для анализа процессов выветривания горных пород, деградации почв и динамики ледников.

Комбинированное использование данных ДЗЗ и традиционных геофизических методов позволяет значительно повысить точность исследований и улучшить прогнозирование геологических процессов.

2 Методы трансформации гравитационного поля

2.1 Преобразование Фурье

Преобразование Фурье представляет собой один из важнейших математических инструментов, используемых для анализа сигналов и функций. В гравиметрической разведке оно применяется для обработки и интерпретации гравиметрических данных, что позволяет выделять аномалии, устранять шумы и проводить фильтрацию сигналов.

Основная идея преобразования Фурье заключается в разложении сложного сигнала на сумму гармонических функций (синусоид и косинусоид) различной частоты. Это дает возможность анализировать частотный состав сигналов и выделять интересующие компоненты.

Непрерывное одномерное преобразование Фурье функции определяется как:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i k x} dx \quad (1)$$

где: $F(k)$ — спектральное представление функции в частотной области,
 x — пространственная координата,
 k — волновое число,
 $e^{-2\pi i k x}$ — базисная экспоненциальная функция.

Обратное преобразование Фурье позволяет восстановить исходную функцию из её частотного представления:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{2\pi i k x} dk \quad (2)$$

В случае дискретных данных, используемых в цифровой обработке, применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) или его быстрая версия (БПФ), что значительно ускоряет вычисления:

$$F_m = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-2\pi i m n / N} \quad (3)$$

где N — число отсчетов, а m и n — индексы в дискретном массиве данных.

В гравиметрии преобразование Фурье используется для обработки гравитационных данных, поскольку многие геофизические сигналы содержат компоненты разной частоты, связанные с различными геологическими структурами. Основные задачи, в которых применяется этот метод:

- Фильтрация гравиметрических данных. С его помощью можно разделять сигналы различного масштаба (например, отделять региональные гравитационные аномалии от локальных).

- Выделение границ геологических структур. Анализ частотного состава данных позволяет определить глубинное строение недр.

- Спектральный анализ. дает возможность исследовать спектральные характеристики гравитационных аномалий и прогнозировать геологические особенности участка.

Допустим, у нас есть гравиметрические данные, содержащие высокочастотные шумы и низкочастотные региональные аномалии. С помощью преобразования Фурье можно выделить эти компоненты и построить фильтр, который удалит нежелательные шумы, сохраняя важные геофизические особенности. После выполнения обратного преобразования Фурье полученные данные станут более интерпретируемыми и информативными.

Преобразование Фурье является мощным инструментом в обработке гравиметрических данных. Оно позволяет анализировать спектральные характеристики гравитационного поля, фильтровать шумы и выделять интересные геофизические структуры. Использование этого метода значительно повышает точность интерпретации данных и эффективность геологоразведочных работ.

2.2 Тренд-анализ

Тренд-анализ — это метод математической обработки гравиметрических данных, применяемый для выделения региональной составляющей гравитационного поля и удаления её с целью изучения остаточных (локальных) аномалий. Под трендом понимается устойчивое изменение значений гравиметрических величин (чаще всего — аномалий Бугера) в определённом направлении, обусловленное крупномасштабной плотностной неоднородностью земной коры.

Тренд-анализ широко используется в интерпретации гравиметрических и других геофизических данных, где присутствует необходимость разделения региональных и локальных эффектов. Задачи и цели тренд-анализа: выделение регионального тренда — фона гравитационного поля, обусловленного крупными структурами; получение остаточного поля аномалий — связанных с локальными геологическими телами; устранение наклонов и общих уклонов на картах аномалий; облегчение дальнейшей интерпретации геофизических данных; построение математических моделей гравитационного поля. Таким образом, тренд-анализ выполняет функцию фильтра низких частот в гравиметрических данных.

Математическая основа метода. На практике тренд-анализ осуществляется путём аппроксимации исходных гравиметрических данных многочленами определённой степени. Чаще всего используется двумерный полиномиальный тренд, то есть трендовая поверхность строится по значениям аномалий в узлах координатной сетки.

Общая формула тренд-поверхности 2-й степени:

$$Z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (4)$$

где: $Z(x, y)$ – значение аномалии в точке с координатами x, y ;
 a_0 – свободный член, средний уровень значений по области;
 a_1x – линейный тренд в направлении оси x ;
 a_2y – линейный тренд в направлении оси y ;
 a_3x^2 – квадратичное изменение вдоль x ;
 a_4xy – перекрестное влияние направлений x и y ;
 a_5y^2 – квадратичное изменение вдоль y .

При необходимости могут использоваться тренды более высоких порядков (3-й, 4-й степени и выше), что позволяет точнее аппроксимировать сложные региональные поля, но повышает риск переобучения модели.

Форма для тренда 1-й степени:

$$Z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (5)$$

Подходит для участков с однородным наклоном поля.

Процесс построения трендовой поверхности

- Сбор данных — значения аномалий Бугера или свободного воздуха в сетке точек.
- Аппроксимация — подбор коэффициентов по методу наименьших квадратов.
- Вычитание тренда — из исходных значений вычитается трендовая поверхность.
- Получение остаточного поля — результатом является карта остаточных аномалий.

Пример практического применения. Допустим, на участке площадью 50×50 км по результатам гравиметрической съёмки получена карта аномалий Буге. Наблюдается общий наклон поля с юго-запада на северо-восток, связанный с глубинным прогибом. Применив тренд 2-й степени, удаётся устранить региональный наклон и выделить локальные гравитационные минимумы, связанные с осадочными структурами и зонами разломов.

Преимущества метода: простота реализации — не требует сложных вычислений или специализированных программ; универсальность — применяется для любых сеток наблюдений; удобство визуализации — легко интерпретируется и сравнивается; возможность адаптации — тренд может быть линейным, квадратичным, кубическим.

Недостатки и ограничения

-Грубое приближение. Региональное поле аппроксимируется простой функцией, которая может не учитывать реальную структуру плотностного распределения.

-Переобучение (overfitting). При использовании высоких степеней полинома тренд начинает "подстраиваться" под локальные аномалии, искажая результат.

-Чувствительность к выбросам. Одиночные экстремальные значения могут существенно влиять на вид тренда.

-Отсутствие физического смысла. Математический тренд не всегда соответствует геологически осмысленной структуре.

Тренд-анализ является важным этапом в предварительной обработке гравиметрических данных. Его применение позволяет выделить локальные аномалии, поддающиеся физико-геологической интерпретации. Однако, как и любой математический метод, он требует осмысленного использования с учётом особенностей района, плотности данных и целей исследования.

2.3 Вычисление производных разного порядка

Методы расчёта производных разного порядка широко применяются в гравиметрической разведке с целью повышения чувствительности к локальным изменениям плотности и выделения границ геологических тел. Производные позволяют анализировать скорость изменения гравитационного поля в пространстве, что важно при интерпретации как региональных, так и локальных аномалий. Использование производных различных порядков особенно актуально в зонах сложного тектонического строения, где первичное поле содержит наложенные эффекты разной природы и глубины.

Сущность метода. Производные гравитационного поля — это частные производные аномалий гравитации по пространственным координатам (x, y, z), которые позволяют получить дополнительные характеристики поля, отражающие геологическое строение объекта. Различают:

- Горизонтальные производные (первые производные по x и y) — выявляют границы тел;
- Вертикальные производные (по z) — усиливают высокочастотные аномалии, подавляя глубинные компоненты;
- Вторые и более высокие производные — применяются для локализации точек экстремумов, углов наклона и центра масс.

Первые производные

Пусть $\Delta g(x, y)$ — значение гравитационной аномалии в данной точке. Тогда:

- Частная производная по X :

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial x} \approx \frac{\Delta g(x + h, y) - \Delta g(x - h, y)}{2h} \quad (6)$$

- Частная производная по Y :

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial y} \approx \frac{\Delta g(x, y + h) - \Delta g(x, y - h)}{2h} \quad (7)$$

где h — шаг дискретизации по соответствующей координате.

Интерпретация. Высокие значения производных соответствуют резким градиентам плотности — разломам, контактам, границам тел.

Градиент вектор

Составляется из первых производных:

$$\nabla \Delta g = \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}, \frac{\partial \Delta g}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Его модуль (7):

$$|\nabla \Delta g| = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y} \right)^2} \quad (9)$$

Позволяет строить карту горизонтального градиента, которая хорошо выявляет линейные структуры.

Вторые производные (вторая производная по x, y, z)

- Вторая производная по X :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta g(x+h, y) - 2\Delta g(x, y) + \Delta g(x-h, y)}{h^2} \quad (10)$$

- Аналогично по Y и Z .

Производные второго порядка усиливают локальные аномалии и позволяют: точно определить границы тел; найти центры масс геологических объектов; выделить локальные линзы, дайки, интрузии.

Практическое применение.

Выделение границ геологических тел. Производные первого порядка позволяют определить участки резкого изменения плотности, соответствующие разломам, контактам, границам осадочных бассейнов и т.д.

Разделение глубинных и поверхностных источников. Вертикальные производные усиливают сигналы от ближних источников и подавляют вклад глубоких структур. Это особенно полезно для: поисков рудных тел; изучения ловушек нефти и газа; инженерной геологии.

Преимущества метода: повышает разрешающую способность данных; прост в реализации (можно использовать численные схемы); дает дополнительные параметры для интерпретации; эффективен для детальных исследований.

Ограничения и недостатки: производные чувствительны к шумам и выбросам в данных, особенно при численном дифференцировании; требуется равномерная и плотная сеть измерений; усиление высокочастотных компонентов может привести к "ложным" аномалиям при недостаточной фильтрации; не всегда легко интерпретируемы без контекста (геологических и сейсмических данных).

Вычисление производных разного порядка является одним из базовых и в то же время мощных инструментов в интерпретации гравиметрических данных. Метод позволяет преобразовать "сырые" данные в более информативные формы, акцентируя внимание на участках с резкими изменениями плотности. Однако, для получения достоверных результатов требуется тщательная подготовка данных, в том числе сглаживание, фильтрация и учёт ошибок измерений.

3 Анализ методов изучения глубинного строения недр на примере горной области средней Азии

3.1 Подготовка гравиметрических данных

Для выполнения поставленной задачи по анализу методов изучения глубинного строения недр горной области средней Азии, нужно подготовить исходные данные. В качестве исходных данных используются данные силы тяжести в аномалии Буге в моделях геоида EGM2008 и XGM2019. Эти данные загружаются с платформы ICGEM. *ICGEM (International Centre for Global Earth Models)* - это платформа для работы с гравитационными моделями Земли [3.1].



Рисунок 3.1 – Логотип платформы ICGEM

На сайте ICGEM (International Centre for Global Earth Models) представлены различные глобальные модели гравитационного поля Земли, основанные на спутниковых данных, наземных измерениях и их комбинации. Эти модели описывают гравитационное поле Земли с использованием сферических гармоник и регулярно обновляются. Основные категории моделей на сайте:

EGM2008 — это глобальная модель геопотенциала Земли, разработанная Национальным геопространственным агентством США (NGA) [3.2]. Она представляет собой одну из наиболее точных моделей геоида своего времени, основанную на сочетании спутниковых данных, наземных гравиметрических измерений и альтиметрической информации.

XGM2019e — это комбинированная глобальная модель гравитационного поля Земли, разработанная Немецким исследовательским центром геонаук (GFZ) в сотрудничестве с Университетом Техаса (CSR). Модель была создана на основе спутниковых гравиметрических миссий (GOCE, GRACE), альтиметрических данных и плотной наземной гравиметрической информации.

EIGEN-6C4 — это комбинированная модель спутников GRACE, GOCE и наземных данных. Разрешение данных составляет до 2190 степени и порядка. Используется в геодезии, геофизике и океанографии.

Основные задачи в геодезии, которые решаются с помощью данных этого сайта: построение модели геоида; определение точной формы Земли, необходимой для преобразования между эллипсоидальными и физическими высотами, а также расчет аномалий силы тяжести. Гравиметрические данные с

этого сайта также могут использоваться при интерпретации подповерхностных структур и плотностей недр.

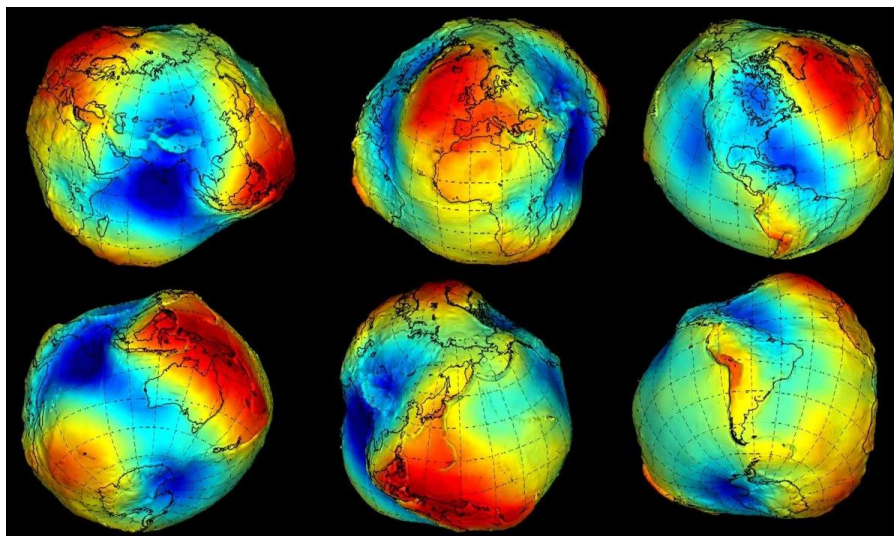


Рисунок 3.2 – Модель геоида земли

В этой работе в качестве области интереса [3.3] взят регион лежащий в широте от 36 до 44 и долготы от 66 до 80. Область интереса включает в себя следующие структуры:

- Тянь-Шань – крупнейшую горную систему Центральной Азии, образованную в результате коллизии Индийской и Евразийской плит.
- Ферганская впадина – крупную межгорный прогиб между хребтами Тянь-Шаня, заполненный мощными осадочными отложениями.
- Туркестанский хребет – южная граница Тянь-Шаня, состоящая из метаморфических пород и гранитов.



Рисунок 3.3 – Область интереса

Загрузка и подготовка исходных данных для выполнения анализа глубинного строения недр начиналась с подготовки координатной сетки. Это можно сделать в таблице эксель. Это нужно для указания координат точек, для получения данных силы тяжести на этих точках.

Для выполнения анализа сделана координатная сетка по 10 минут. В общей сложности количество точек составило 4165 единиц. Данную таблицу нужно сохранить в текстовом формате (разделитель табуляция) [3.5]. Сохранение координатной сетки в данном формате обусловлено тем, что онлайн платформа MATLAB принимает именно такой формат данных. При загрузке этих данных рабочее будет выглядеть следующим образом [3.4].

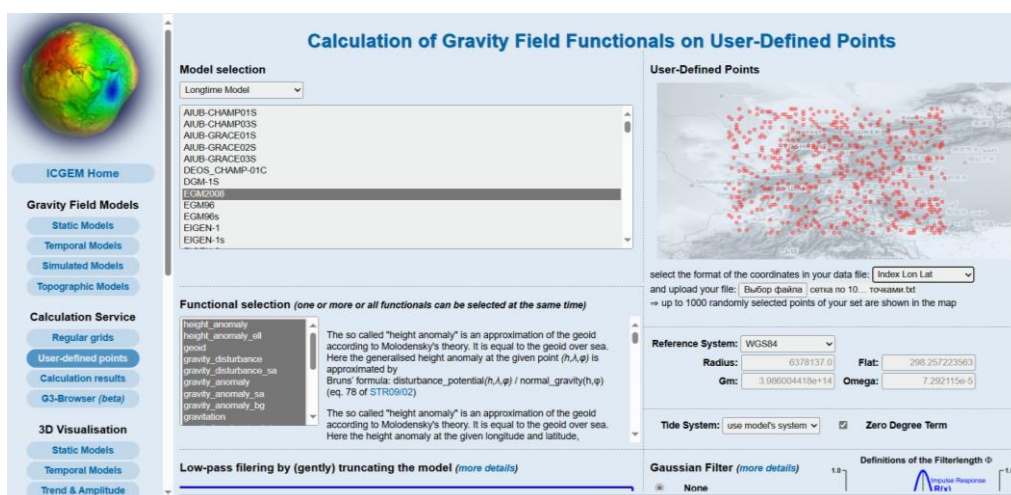


Рисунок 3.4 – Получение данных силы тяжести на сайте ICGEM.

	A	B	C		A	B	C		A	B	C		A	B	C
1	№	Долгота	Широта	78	77	78,66667	36	579	578	77,16667	37	648	647	74,5	37,16667
2	1	66	36	79	78	78,83333	36	649	648	74,66667	37,16667	649	648	74,66667	37,16667
3	2	66,16667	36	80	79	79	36	580	579	77,33333	37	650	649	74,83333	37,16667
4	3	66,33333	36	81	80	79,16667	36	581	580	77,5	37	651	650	75	37,16667
5	4	66,5	36	82	81	79,33333	36	582	581	77,66667	37	652	651	75,16667	37,16667
6	5	66,66667	36	83	82	79,5	36	583	582	77,83333	37	653	652	75,33333	37,16667
7	6	66,83333	36	84	83	79,66667	36	584	583	78	37	654	653	75,5	37,16667
8	7	67	36	85	84	79,83333	36	585	584	78,16667	37	655	654	75,66667	37,16667
9	8	67,16667	36	86	85	80	36	586	585	78,33333	37	656	655	75,83333	37,16667
10	9	67,33333	36	87	86	66	36,16667	587	586	78,5	37	657	656	76	37,16667
11	10	67,5	36	88	87	66,16667	36,16667	588	587	78,66667	37	658	657	76,16667	37,16667
12	11	67,66667	36	89	88	66,33333	36,16667	589	588	78,83333	37	659	658	76,33333	37,16667
13	12	67,83333	36	90	89	66,5	36,16667	590	589	79	37	660	659	76,5	37,16667
14	13	68	36	91	90	66,66667	36,16667	591	590	79,16667	37	661	660	76,66667	37,16667
15	14	68,16667	36	92	91	66,83333	36,16667	592	591	79,33333	37	662	661	76,83333	37,16667
16	15	68,33333	36	93	92	67	36,16667	593	592	79,5	37	663	662	77	37,16667
17	16	68,5	36	94	93	67,16667	36,16667	594	593	79,66667	37	664	663	77,16667	37,16667
18	17	68,66667	36	95	94	67,33333	36,16667	595	594	79,83333	37	665	664	77,33333	37,16667
19	18	68,83333	36	96	95	67,5	36,16667	596	595	80	37	666	665	77,5	37,16667
20	19	69	36	97	96	67,66667	36,16667	597	596	66	37,16667	667	666	77,66667	37,16667
21	20	69,16667	36	98	97	67,83333	36,16667	598	597	66,16667	37,16667	668	667	77,83333	37,16667
22	21	69,33333	36	99	98	68	36,16667	599	598	66,33333	37,16667	669	668	78	37,16667
23	22	69,5	36	100	99	68,16667	36,16667	600	599	66,5	37,16667	670	669	78,16667	37,16667
24	23	69,66667	36	101	100	68,33333	36,16667	601	600	66,66667	37,16667	671	670	78,33333	37,16667
25	24	69,83333	36	102	101	68,5	36,16667	602	601	66,83333	37,16667	672	671	78,5	37,16667
26	25	70	36	103	102	68,66667	36,16667	603	602	67	37,16667	673	672	78,66667	37,16667
27	26	70,16667	36	104	103	68,83333	36,16667	604	603	67,16667	37,16667	674	673	78,83333	37,16667
28	27	70,33333	36	105	104	69	36,16667	605	604	67,33333	37,16667	675	674	79	37,16667
								606	605	67,5	37,16667				

Рисунок 3.5 – Исходная сетка координат в таблице эксель.

Данные силы тяжести в аномалии Буге в моделях геоида ЕГМ2008 и ХГМ2019 можно скачать в формате эксель. В загруженных таблица первый

столбец имеет данные долготы , второй столбец имеет данные широты , а третий столбец имеет данные силы тяжести в аномалии Буге в моделях геоида ЕГМ2008 [3.6] и ХГМ2019 [3.7].

1	66.00000000	36.00000000	-1.489380372605E+02	4063	77.16666667	43.83333333	-1.007863935473E+02
2	66.16666667	36.00000000	-1.683003839031E+02	4064	77.33333333	43.83333333	-1.006680505457E+02
3	66.33333333	36.00000000	-1.747606272870E+02	4065	77.50000000	43.83333333	-1.094153978885E+02
4	66.50000000	36.00000000	-1.562102697961E+02	4066	77.66666667	43.83333333	-1.249034099170E+02
5	66.66666667	36.00000000	-1.634455503227E+02	4067	77.83333333	43.83333333	-1.370674772841E+02
6	66.83333333	36.00000000	-1.691065357179E+02	4068	78.00000000	43.83333333	-1.384604544770E+02
7	67.00000000	36.00000000	-1.588015724677E+02	4069	78.16666667	43.83333333	-1.467335972714E+02
8	67.16666667	36.00000000	-1.699441097510E+02	4070	78.33333333	43.83333333	-1.559447537121E+02
9	67.33333333	36.00000000	-1.618608904735E+02	4071	78.50000000	43.83333333	-1.617566540746E+02
10	67.50000000	36.00000000	-1.533078082996E+02	4072	78.66666667	43.83333333	-1.598214792090E+02
11	67.66666667	36.00000000	-1.797876824747E+02	4073	78.83333333	43.83333333	-1.657287066526E+02
12	67.83333333	36.00000000	-1.488912657735E+02	4074	79.00000000	43.83333333	-1.712723701634E+02
13	68.00000000	36.00000000	-1.929070233748E+02	4075	79.16666667	43.83333333	-1.709450143696E+02
14	68.16666667	36.00000000	-1.543426225140E+02	4076	79.33333333	43.83333333	-1.791681157113E+02
15	68.33333333	36.00000000	-1.740737521002E+02	4077	79.50000000	43.83333333	-1.781611420613E+02
16	68.50000000	36.00000000	-2.030126383860E+02	4078	79.66666667	43.83333333	-1.807885169546E+02
17	68.66666667	36.00000000	-2.617738640851E+02	4079	79.83333333	43.83333333	-1.766552883232E+02
18	68.83333333	36.00000000	-2.160561773923E+02	4080	80.00000000	43.83333333	-1.808178347569E+02
19	69.00000000	36.00000000	-2.432777221116E+02	4081	66.00000000	44.00000000	-4.118437444832E+01
20	69.16666667	36.00000000	-2.142783404287E+02	4082	66.16666667	44.00000000	-4.418349449399E+01
21	69.33333333	36.00000000	-2.329600980373E+02	4083	66.33333333	44.00000000	-4.043543865878E+01
22	69.50000000	36.00000000	-3.157535787933E+02	4084	66.50000000	44.00000000	-5.062969560680E+01
23	69.66666667	36.00000000	-2.989802691412E+02	4085	66.66666667	44.00000000	-5.271398744141E+01
24	69.83333333	36.00000000	-3.192827924611E+02	4086	66.83333333	44.00000000	-4.587462657951E+01
25	70.00000000	36.00000000	-4.023133973817E+02	4087	67.00000000	44.00000000	-3.848931115501E+01
26	70.16666667	36.00000000	-2.026648124278E+02	4088	67.16666667	44.00000000	-3.153061102315E+01

Рисунок 3.6 – Таблицав эксель с данными силы тяжести в аномалии Буге в модели геоида ЕГМ2008

1	66.00000000	36.00000000	-1.355538328822E+02	4070	78.33333333	43.83333333	-1.551706053069E+02
2	66.16666667	36.00000000	-1.606587341459E+02	4071	78.50000000	43.83333333	-1.638443187182E+02
3	66.33333333	36.00000000	-1.713282281412E+02	4072	78.66666667	43.83333333	-1.595094306740E+02
4	66.50000000	36.00000000	-1.377169580020E+02	4073	78.83333333	43.83333333	-1.635153427300E+02
5	66.66666667	36.00000000	-1.529410995649E+02	4074	79.00000000	43.83333333	-1.682714477092E+02
6	66.83333333	36.00000000	-1.657149972992E+02	4075	79.16666667	43.83333333	-1.670914573228E+02
7	67.00000000	36.00000000	-1.657409898479E+02	4076	79.33333333	43.83333333	-1.796497648976E+02
8	67.16666667	36.00000000	-1.660103085384E+02	4077	79.50000000	43.83333333	-1.812253618988E+02
9	67.33333333	36.00000000	-1.456632731885E+02	4078	79.66666667	43.83333333	-1.860551231441E+02
10	67.50000000	36.00000000	-1.496932963366E+02	4079	79.83333333	43.83333333	-1.818601905124E+02
11	67.66666667	36.00000000	-1.921333268501E+02	4080	80.00000000	43.83333333	-1.830771195964E+02
12	67.83333333	36.00000000	-1.499654858325E+02	4081	66.00000000	44.00000000	-3.585211045361E+01
13	68.00000000	36.00000000	-1.860626486242E+02	4082	66.16666667	44.00000000	-4.585758245688E+01
14	68.16666667	36.00000000	-1.788655196383E+02	4083	66.33333333	44.00000000	-3.899050696575E+01
15	68.33333333	36.00000000	-1.218494209958E+02	4084	66.50000000	44.00000000	-4.835902419288E+01
16	68.50000000	36.00000000	-2.149704999350E+02	4085	66.66666667	44.00000000	-4.829587247441E+01
17	68.66666667	36.00000000	-2.282506509046E+02	4086	66.83333333	44.00000000	-4.166170428864E+01
18	68.83333333	36.00000000	-2.205072987806E+02	4087	67.00000000	44.00000000	-3.819299214701E+01
19	69.00000000	36.00000000	-2.600381043055E+02	4088	67.16666667	44.00000000	-3.498647064859E+01
20	69.16666667	36.00000000	-2.556993681408E+02	4089	67.33333333	44.00000000	-3.371252543018E+01
21	69.33333333	36.00000000	-2.531012505874E+02	4090	67.50000000	44.00000000	-3.058417070483E+01
22	69.50000000	36.00000000	-3.214466485614E+02	4091	67.66666667	44.00000000	-3.289796614455E+01
23	69.66666667	36.00000000	-2.779295402827E+02	4092	67.83333333	44.00000000	-2.379530532646E+01
24	69.83333333	36.00000000	-3.132702329191E+02	4093	68.00000000	44.00000000	-1.903573899604E+01
25	70.00000000	36.00000000	-3.719854407387E+02	4094	68.16666667	44.00000000	-2.386456529000E+01
26	70.16666667	36.00000000	-1.525891657373E+02	4095	68.33333333	44.00000000	-2.344676837552E+01

Рисунок 3.7 – Таблица с данными силы тяжести в аномалии Буге в модели геоида ХГМ2019

3.2 Аналитическое продолжение гравитационного поля в верхнее и нижнее полупространства

Анализ строения недр выбранной области проводился с использованием платформы для программирования MATLAB [3.8]. Платформа *MATLAB (Matrix Laboratory)* — это мощная среда для численных вычислений, анализа данных и визуализации, широко используемая в науке и инженерии. Она поддерживает работу с матрицами, статистический анализ, обработку сигналов и геопространственное моделирование.

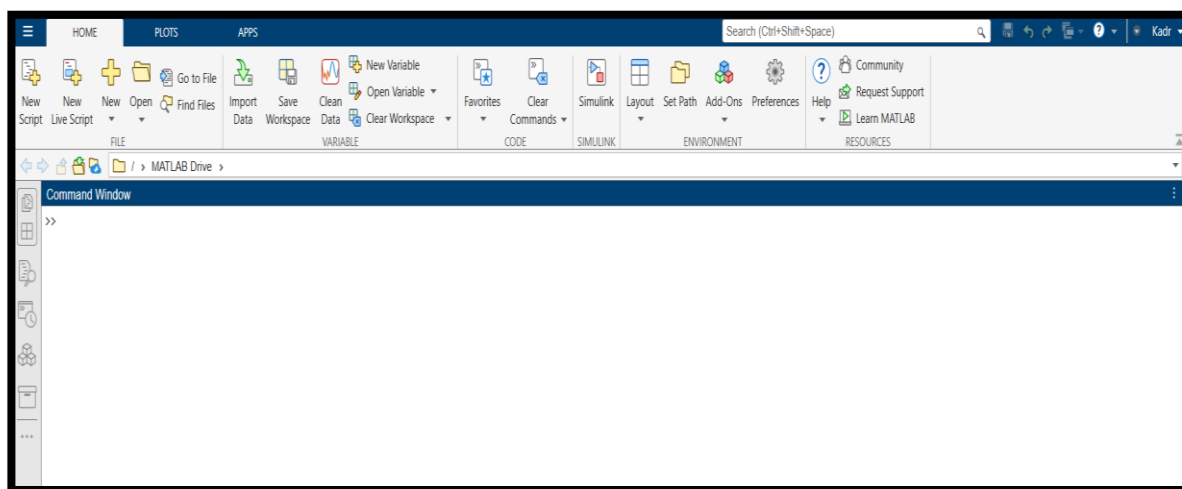


Рисунок 3.8 – Рабочее окно MATLAB

Для начала анализа были загружены таблицы с данными силы тяжести в аномалии Буге в двух моделях геоида, ЕГМ2008 и ХГМ2019. По ним были созданы двухмерные матрицы [3.9 , 3.10 , 3.11]. Для этого был написан код на языке программирования MATLAB.

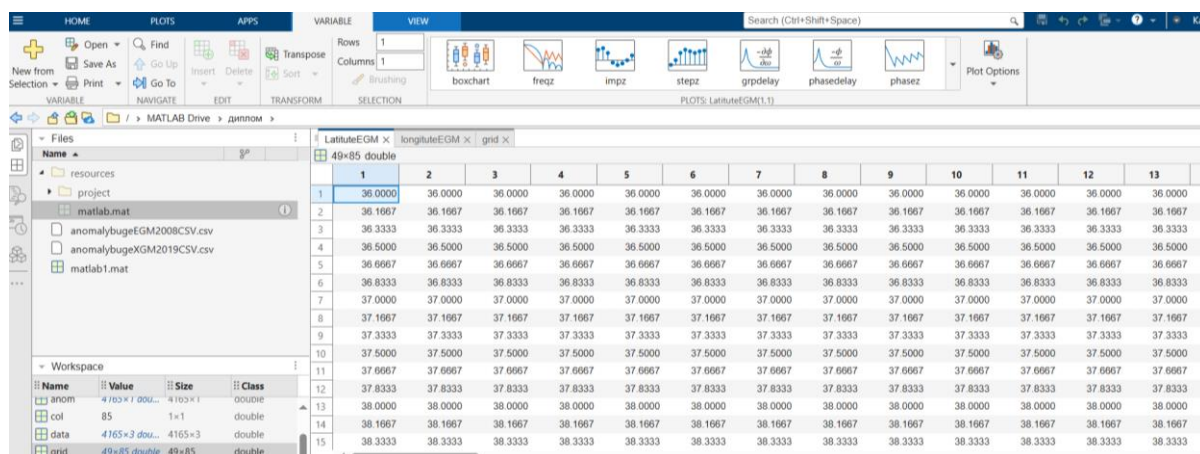


Рисунок 3.9 – Двухмерная матрица широты в MATLAB

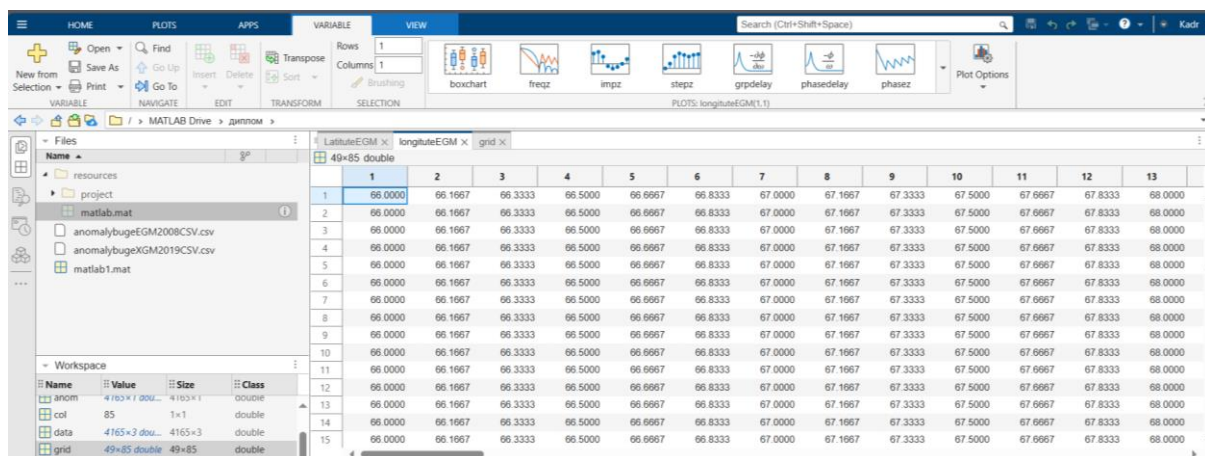


Рисунок 3.10 – Двухмерная матрица долготы в MATLAB

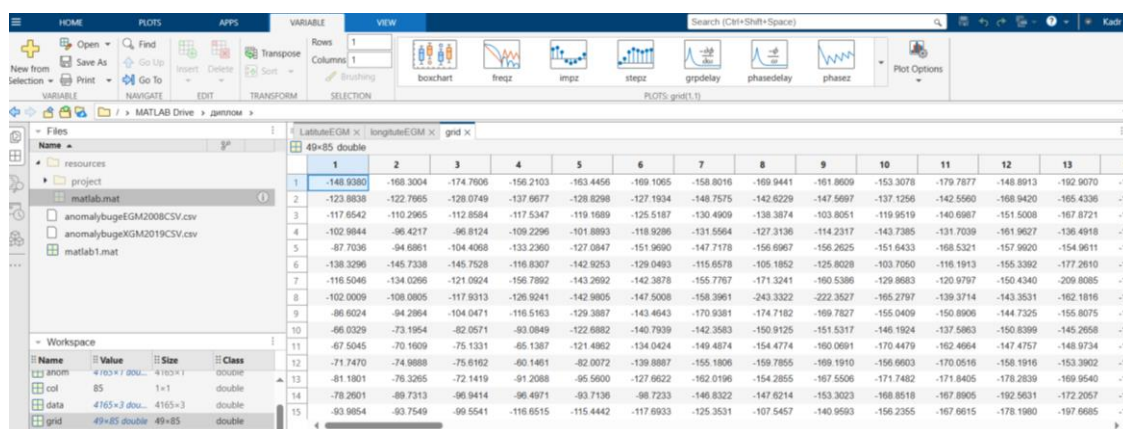


Рисунок 3.11 – Двухмерная матрица данных силы тяжести в аномалии Буге в модели геоида EGM2008

Двухмерные матрицы построены таким образом чтобы при пересечении клеток данные долготы, широты и силы тяжести не совпадали. Также с командой `plot` можно создать карту, иллюстрирующую эти данные. В MATLAB сделанная карта покажется в отдельном окне в качестве новой Figure [3.12]. В написании кода нужно помнить то, что при создании карты MATLAB расставляет широту сверху вниз. Для исправление этой ошибки нужно использовать команду `set(gca, 'YDir', 'normal')`. По умолчанию `imagesc` отображает ось Y (широту) сверху вниз. `'YDir' = 'reverse'` - эта команда меняет направление на привычное географическое направление, где широта увеличивается снизу вверх (от юга к северу).

Кроме того, при построении карты важно учитывать точность и шаг сетки координат. Более плотная сетка позволяет повысить детализацию карты и точнее отразить особенности распределения гравитационного поля. Однако увеличение плотности точек требует дополнительных вычислительных ресурсов и может замедлить обработку в MATLAB. Поэтому при выборе размера сетки необходимо соблюдать баланс между точностью и производительностью. В данном исследовании использовался шаг 10 минут по широте и долготе, что обеспечило приемлемую разрешающую способность для регионального анализа

и позволило корректно отобразить основные аномалии гравитационного поля в исследуемой области.

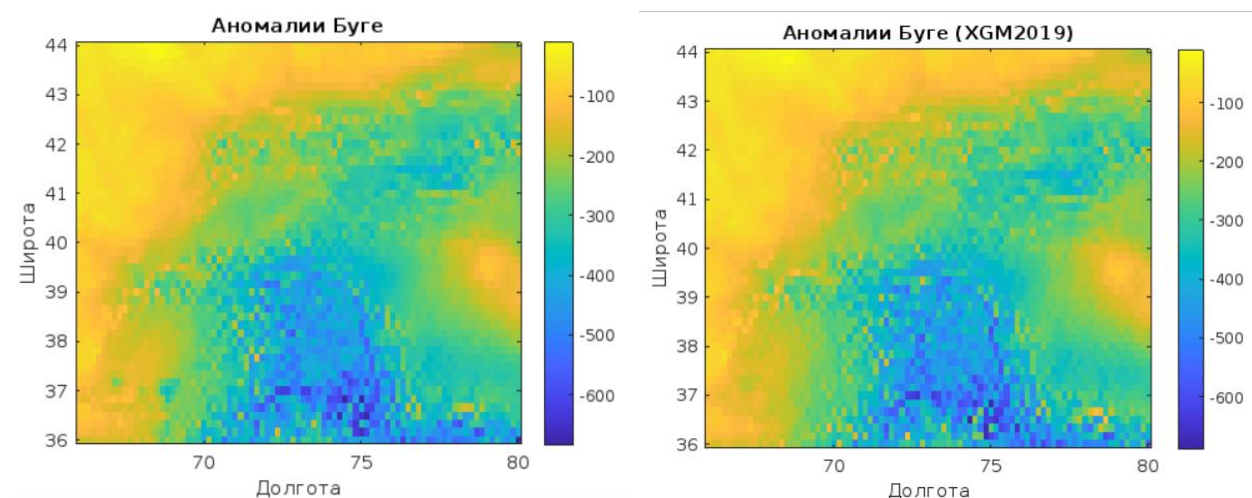


Рисунок 3.12 – Карта аномалии Буге в моделях геоида ЕГМ2008 и ХГМ2019

Первым анализом, использованным в данной работе, является аналитическое продолжение вверх и вниз. Главной сутью аналитического продолжения вверх и вниз является поднятие и опускание вычислительной поверхности на определенное расстояние. Коды на аналитическое продолжение вверх на 10, 20 [3.13], 30, 40 [3.14] метров дали следующий результат.

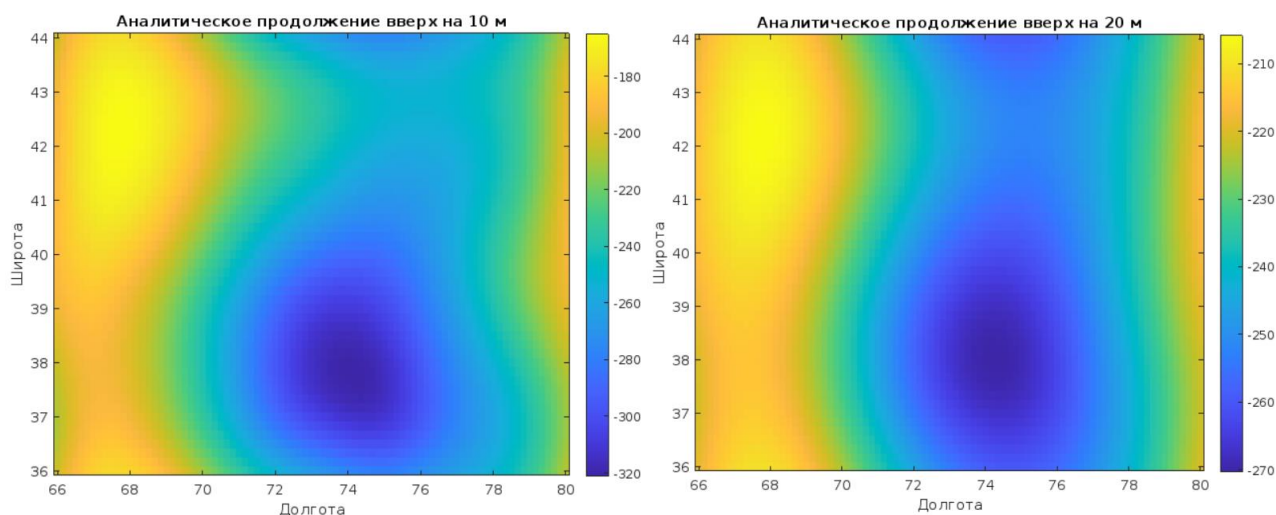


Рисунок 3.13 – Аналитическое продолжение вверх на 10 и 20 метров

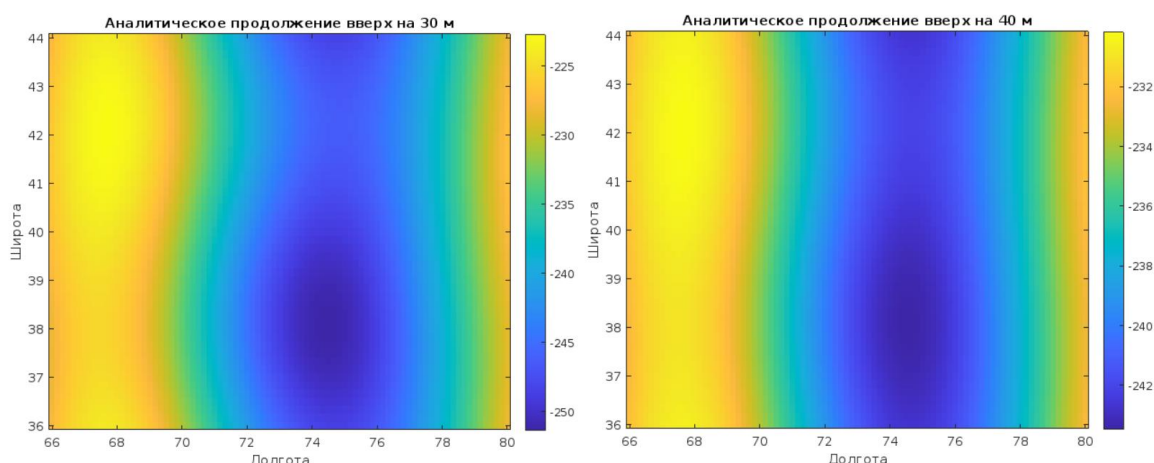


Рисунок 3.14 – Аналитическое продолжение вверх на 30 и 40 метров

3.3 Вычисление тренд-анализа с помощью полиномов различных степеней

Для выделения регионального и локального компонентов гравитационного поля исследуемой территории я выполнил тренд-анализ с использованием аппроксимации полиномами различных степеней. Данный метод позволяет разделить гравиметрические данные на фоновые (региональные) составляющие и локальные аномалии, отражающие особенности глубинного строения недр.

Обработку данных также проводил на онлайн-платформе MATLAB Online, там была реализована процедура построения трендовых поверхностей по исходным значениям гравитационного поля.

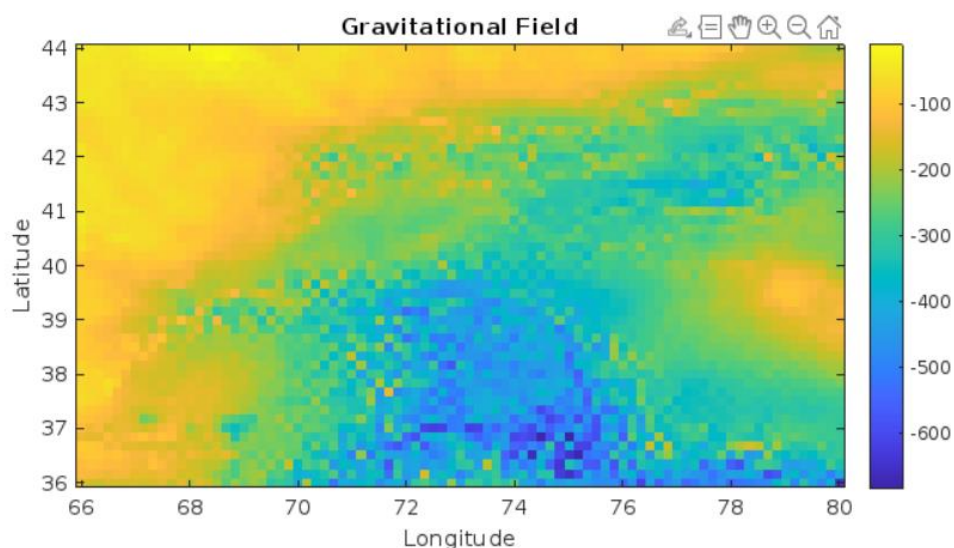


Рисунок 3.15 – Исходная карта гравитационного поля

Исходная карта гравитационного поля отражает распределение силы тяжести в пределах исследуемого участка [3.15]. Визуально в структуре поля можно выделить общую тенденцию снижения значений на определённых участках, что указывает на возможные области пониженной плотности пород.

Использование полинома третьей степени позволило наиболее точно восстановить фоновое распределение, связанное с крупными тектоническими структурами.

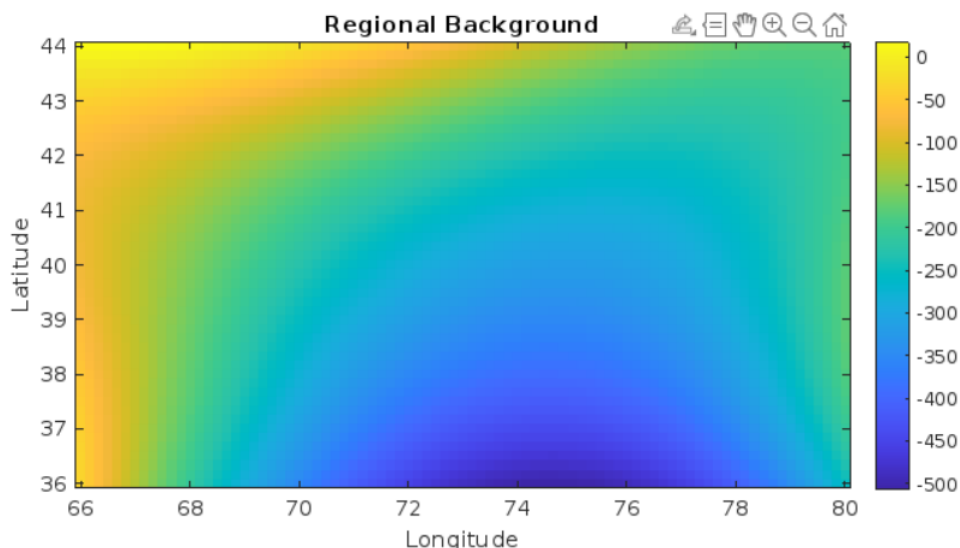


Рисунок 3.16 – Региональный тренд

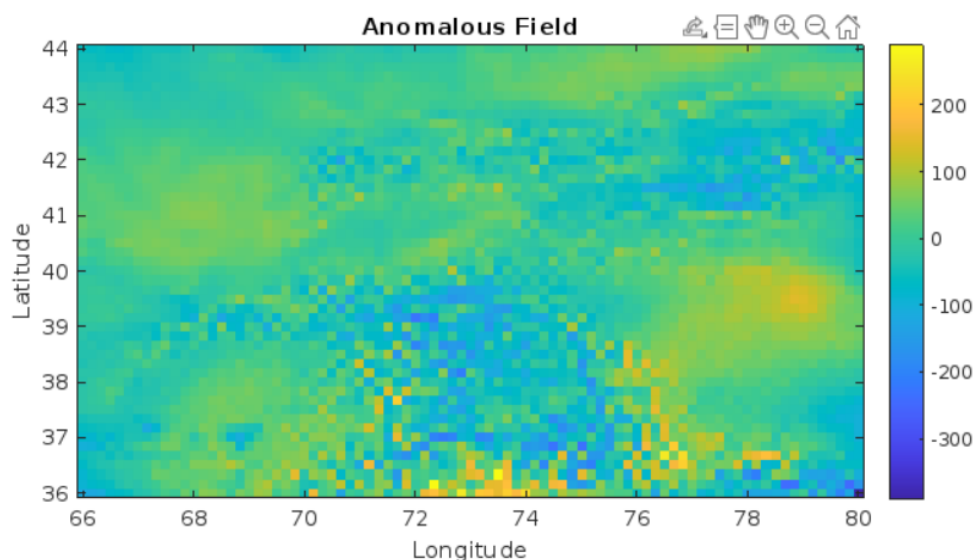


Рисунок 3.17 – Карта аномалий.

В результате выполнения тренд-анализа с использованием полинома третьей степени была получена региональная составляющая гравитационного поля [3.16], отражающая общую тенденцию изменения значений по площади.

После её вычитания из исходного поля была построена карта аномалий, на которой отчётливо выделяются локальные отклонения.

После удаления тренда было построено аномальное поле [3.17]. На полученной карте аномалий чётко проявляются локальные участки положительных и отрицательных отклонений, которые могут быть связаны с разломами, интрузивными телами, осадочными впадинами или зонами разуплотнения в коре и верхней мантии.

Особый интерес представляет выделение Центрально-Казахстанского гравитационного минимума (ЦКГМ), который совпадает с известной областью пониженной плотности в пределах Казахского щита. Эта область подтверждается не только гравитационными данными, но и сейсмическими моделями, а также особенностями теплового потока и электропроводности.

Для уточнения структуры локальных аномалий были рассчитаны производные первого и второго порядка.

Первая производная отражает горизонтальный градиент гравитационного поля и позволяет выявить зоны резкого изменения плотности [3.18], [3.19]. На карте наблюдаются линейные участки с высокими градиентами, что может свидетельствовать о наличии разломов и границ геологических блоков.

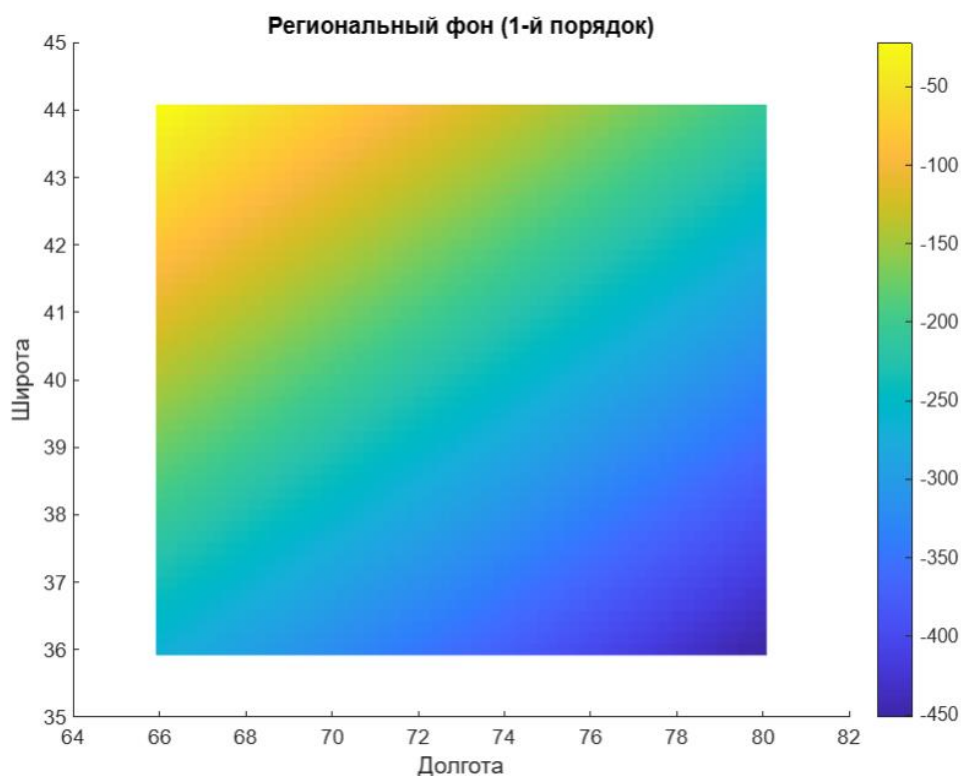


Рисунок 3.18 – Региональный фон первой степени

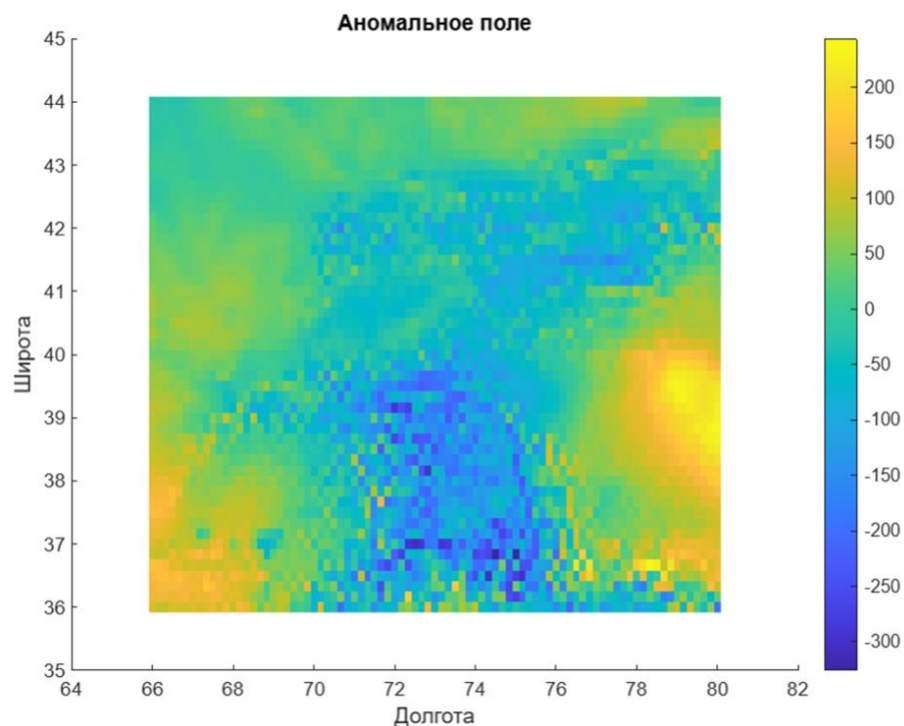


Рисунок 3.19 – Карта аномального поля первой степени

- Вторая производная усиливает локальные особенности и помогает более чётко выделить центр аномалий [3.20], [3.21]. Такие участки часто соответствуют геологическим телам с контрастной плотностью: интрузиям, плотным ядрам антиклиналей, или наоборот — рыхлым зонам осадочного чехла.

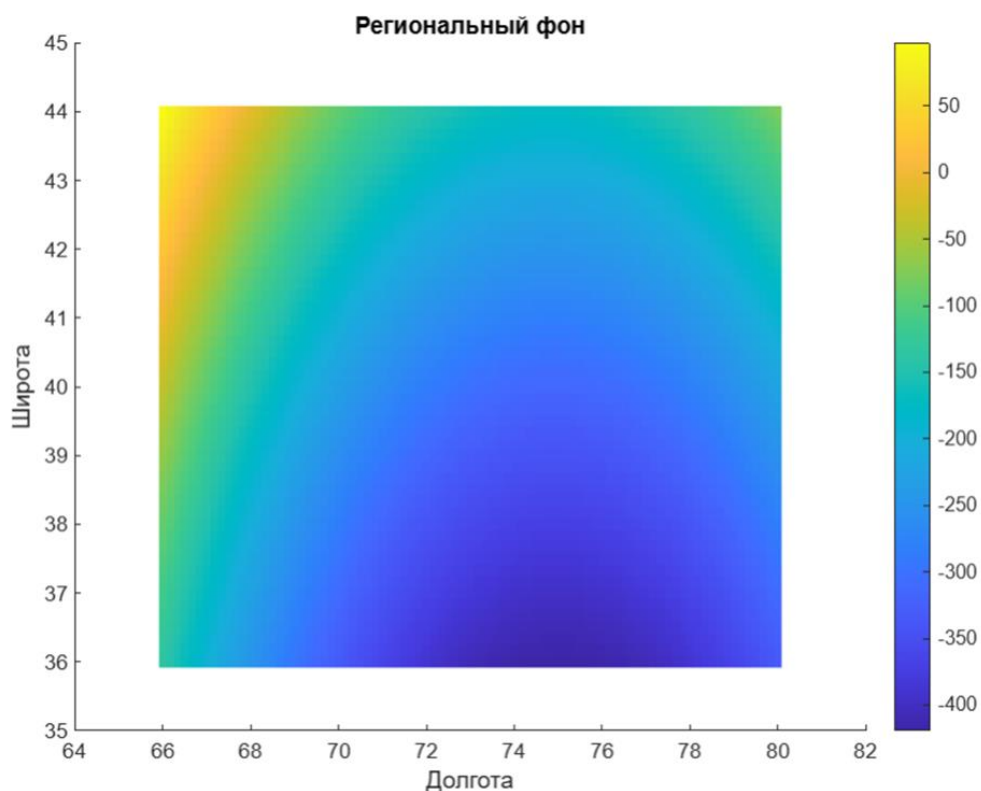


Рисунок 3.20 – Региональный фон второй степени

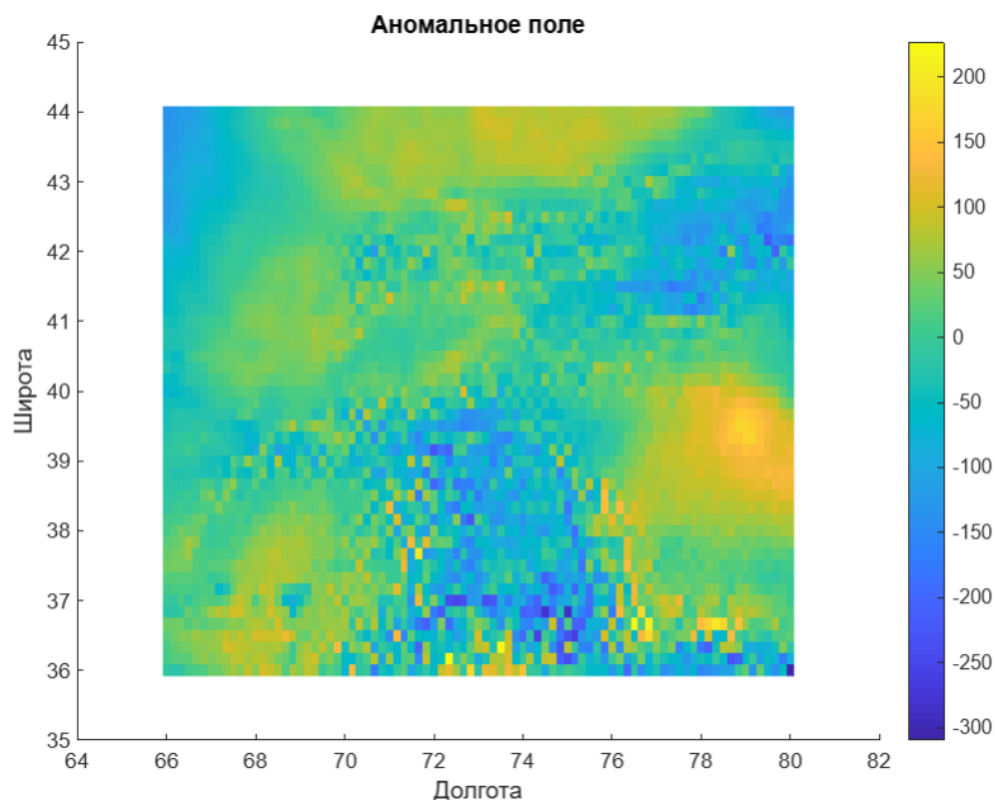


Рисунок 3.21 – Карта аномального поля второй степени

3.4 Трансформация гравитационного поля с помощью производных по x и y

Для уточнения геологических границ и выявления линейных структур были рассчитаны первые производные гравитационного поля по горизонтальным координатам — долготе (X) и широте (Y). Эти производные отражают изменения гравитационного поля в пространстве и позволяют определить направления и интенсивность изменения плотности в земной коре.

Карта производной по X показывает, как изменяется поле в направлении восток–запад [3.21]. На данной карте можно выделить зоны с резким градиентом, которые, вероятно, соответствуют продольно ориентированным разломам, контактам между блоками различного плотностного состава или другим протяжённым структурам.

Карта производной по Y отображает изменение гравитационного поля в направлении север–юг [3.22]. Здесь также наблюдаются линейные элементы, которые могут быть связаны с поперечными или диагональными разломами, а также границами между тектоническими зонами. Использование производных по X и Y особенно эффективно для выявления скрытых структур, слабо проявляющихся на исходной карте гравитационного поля. Они позволяют более точно определить направление и протяжённость геофизических аномалий, что

важно для дальнейшей геологической интерпретации и построения моделей глубинного строения региона.

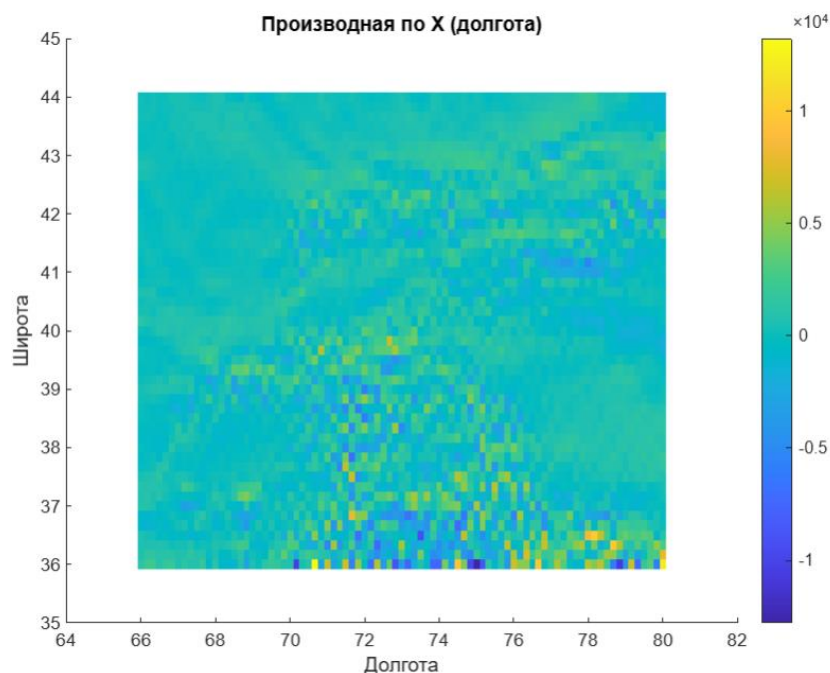


Рисунок 3.22 – Карта производной по X (долгота)

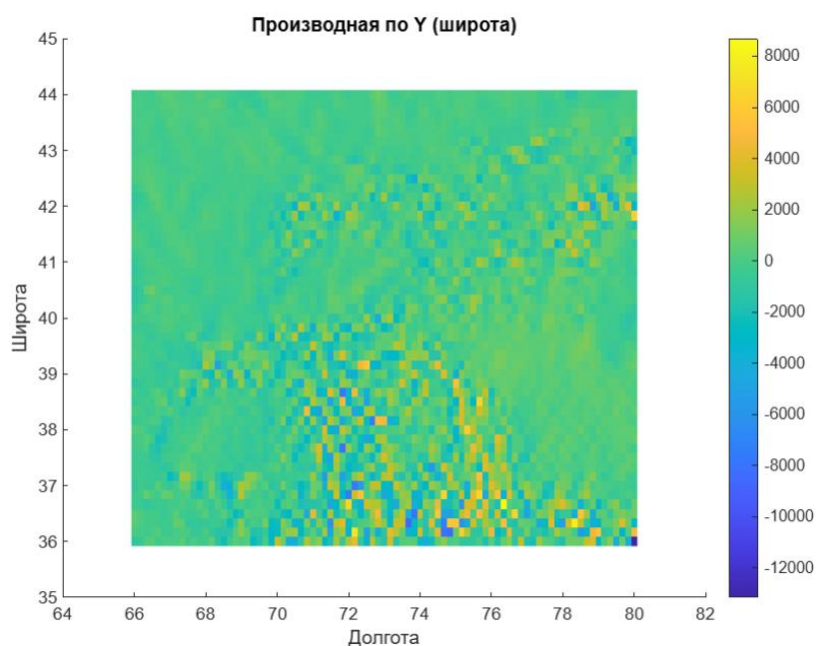


Рисунок 3.23 – Карта производной по Y (широта).

В центральной части Евразийского континента выделяются две гигантские региональные отрицательные гравитационные аномалии. Это Центрально-Казахстанский гравитационный минимум (ЦКГМ) и Центрально-Азиатский гравитационный минимум (ЦАГМ) - в области Высокой Азии, куда входят горные системы Тянь- Шаня, Тибета, Гималаев и Памира.

Области Высокой Азии, куда входит Северный Тянь-Шань, также соответствует обширный региональный минимум силы тяжести. Для характеристики плотностных неоднородностей региона была использована карта остаточных аномалий силы тяжести, полученная путем вычитания из исходных значений гравитационного поля [3.23]. Результат влияния рыхлых осадков межгорных впадин и эффекта земной коры.

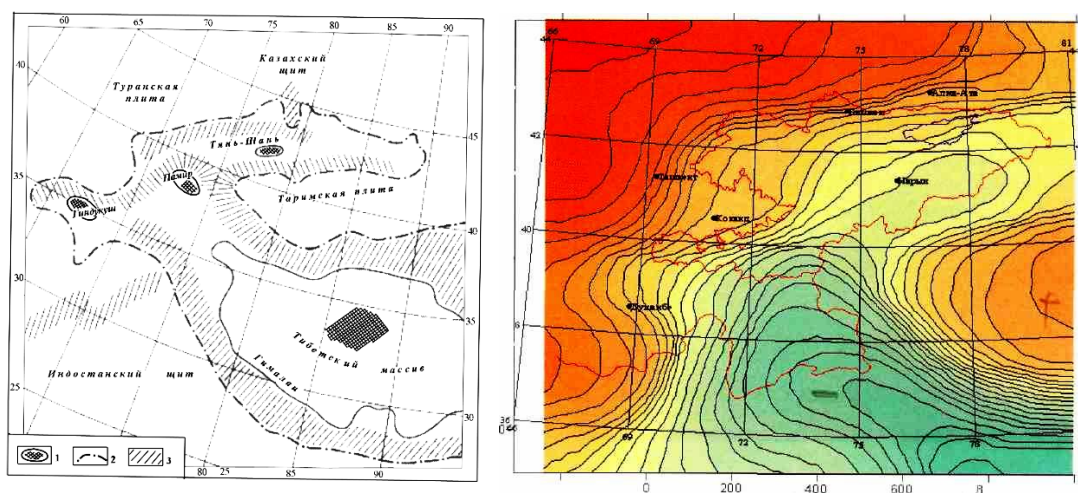


Рисунок 3.23 – Схема локальных аномалий Δg_4 - аномалии Δg (слева). Карта осредненных аномалий Буге ЦАГМ (справа). Аномалии Δg : пониженные (зеленый), повышенные (красный), нулевые (желтый)

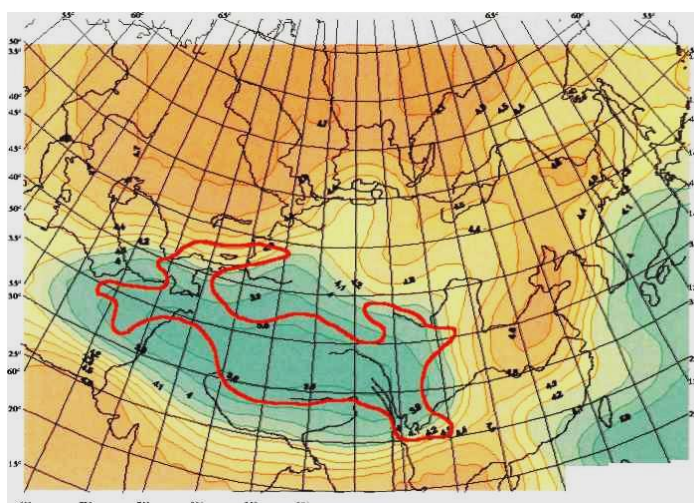


Рисунок 3.24 – положение Центрально-Азиатского гравитационного минимума

Центрально-Азиатский гравитационный минимум (ЦАГМ) имеет сложную в плане форму. Наибольшей ширины (1300 км) он достигает в районе Тибета и Гималаев и, сужаясь, простирается в направлении Памира. От Памира расходятся две ветви этого минимума. Юго-западная охватывает Гиндукуш, а северо-восточная-Тянь-Шань. ЦАГМ ограничивается зонами высоких градиентов гравитационного поля, совпадающими на Тянь-Шане с краевыми Северо- и Южно-Тянь-Шаньским разломами, ограничивающими Тянь-Шаньский блок [3.24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе был проведён анализ методов изучения глубинного строения недр на основе гравиметрической разведки с применением современных математических и программных средств обработки данных. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности интерпретации гравитационного поля Земли, особенно в условиях сложного геологического строения, характерного для Центральной Азии.

В ходе работы были рассмотрены основные методы трансформации гравиметрических данных, включая преобразование Фурье, тренд-анализ и вычисление производных различных порядков. Каждый из методов обладает своими особенностями, позволяя решать определённые задачи интерпретации: от выделения регионального фона до идентификации локальных аномалий, связанных с разломами, интрузивными телами и осадочными впадинами.

Практическая часть исследования была реализована на примере горной области Средней Азии, включающей такие структуры, как Тянь-Шань, Ферганская впадина и Туркестанский хребет. Использование моделей геоида EGM2008 и XGM2019 позволило провести сравнительный анализ аномалий Буге. Для обработки данных применялась среда MATLAB, с помощью которой были построены карты аномалий, проведено аналитическое продолжение, выполнено разделение на региональные и остаточные компоненты, а также рассчитаны производные по координатам.

Результаты работы подтвердили, что эффективное применение различных методов обработки гравиметрических данных существенно повышает точность интерпретации геологических структур. Выявленные аномалии и градиенты гравитационного поля хорошо коррелируют с известной геологической структурой региона, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

Таким образом, предложенный подход может быть успешно использован при геологоразведочных работах, а также при построении трёхмерных моделей земной коры. Дальнейшее развитие темы возможно в направлении интеграции гравиметрических данных с другими геофизическими методами и расширения географического охвата исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Методика интерпретации гравиметрических данных при построении геологической модели земной коры прикаспийского региона» Исагалиева А.К., Исаев В.И., Истекова С.А.
2. «Аналитическое продолжение потенциальных полей на основе f-аппроксимации» 2015 И. А. Керимов
3. «Глубинное строение Улан-баторской впадины по гравиметрическим данным» Н. Арвисбаатар, Е.Х. Турутанов, Б. Буянтогтох, Д. Цэндсүрэн
4. ICGEM – International Centre for Global Earth Models. URL: <https://icgem.gfz-potsdam.de/>
5. MATLAB Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
6. «Геофизические исследования: Оценка глубины залегания с использованием гравиметрических данных и метода Эйлера (Джелалабадский железный рудник, провинция Керман, ИРАН)» Адель Ширази, Ареф Ширази, Хамид Назерян, Кейван Хайер, Ардешир Хезархани
7. «Профильная геофизическая практика (гравиразведка)» А. В. Горожанцев, И. В. Огородова, А. В. Пугин
8. «Гравиметрия и магнитометрия: трансформации геопотенциальных полей»
9. Исагалиева А.К., Исаев В.И., Истекова С.А. Методика интерпретации гравиметрических данных при построении геологической модели земной коры Прикаспийского региона. — Алматы: КазНИГРИ, 2019. — 82 с.
10. Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б., Цэндсүрэн Д. Глубинное строение Улан-Баторской впадины по гравиметрическим данным // Геофизика. — 2021. — № 4. — С. 25–33.
11. Герасимов И.П. Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 2014. — 376 с.
12. Агеев Б.Г., Буров В.Н. Гравиметрия: основы и применение. — Санкт-Петербург: ГИОС, 2016. — 212 с.

Приложение А

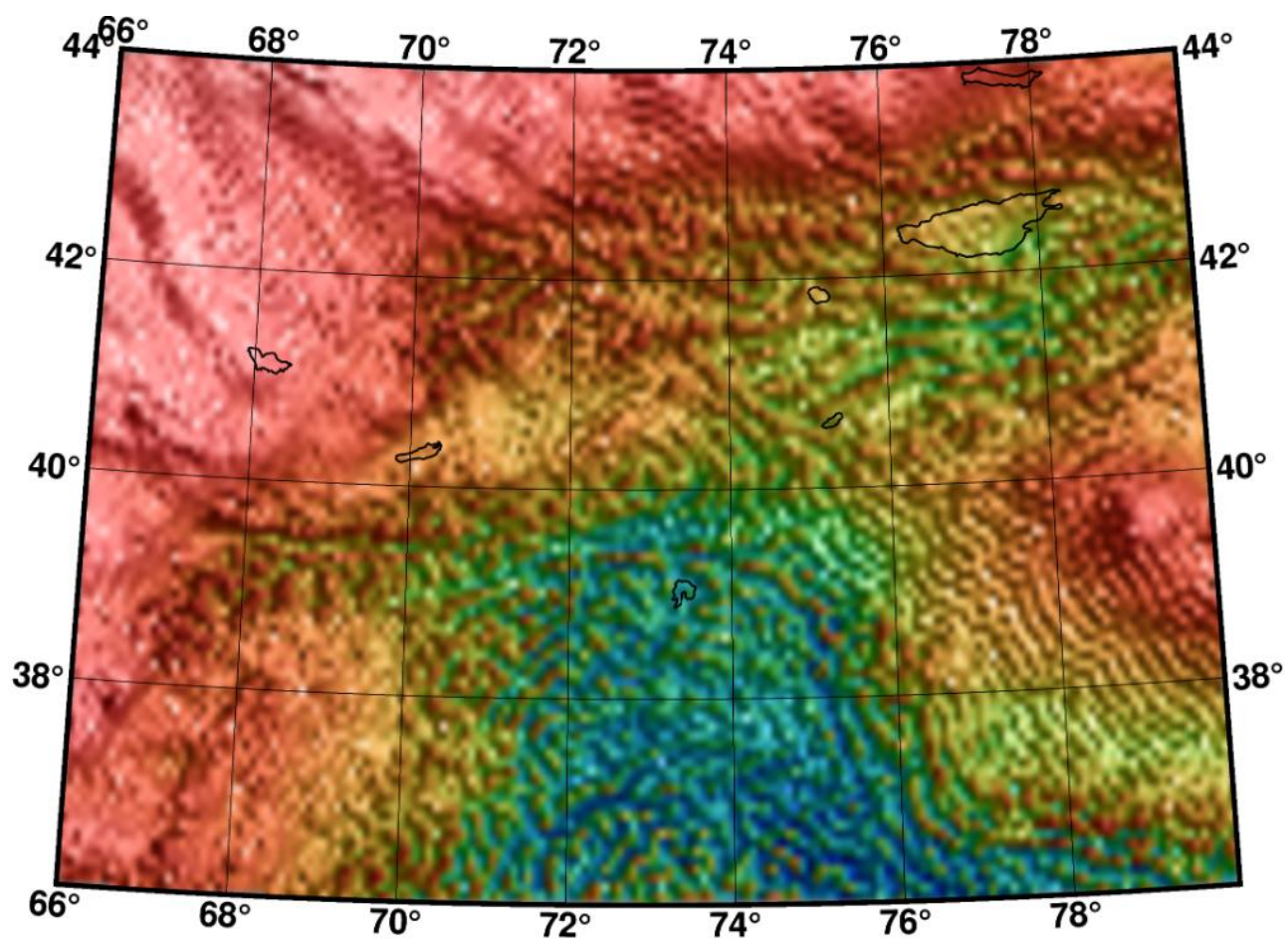


Рисунок А.1 – Карта аномалии Буге в модели геоида XGM2019

Приложение Б

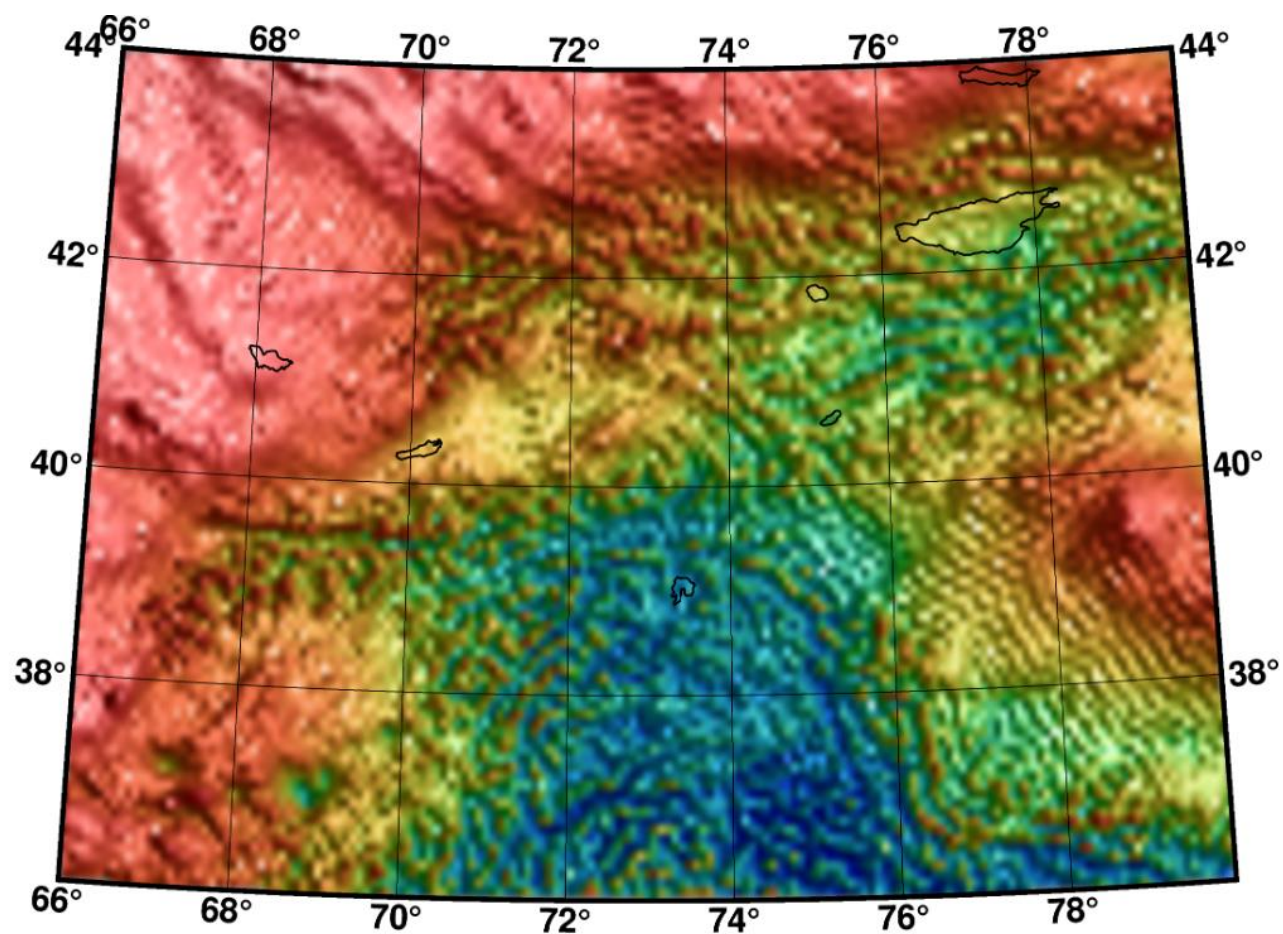


Рисунок Б.1 – Карта аномалии Буге в модели геоида EGM2008

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Думанова Кадыржана Думанулы

6B07303 Геопространственная цифровая инженерия

На тему: Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Структура дипломной работы включает в себя: введение, трех разделов, заключение, список используемых источников литературы и 2 приложений.

Дипломная работа Думанова Кадыржана Думанулы посвящена актуальной проблеме современной геофизики — анализу методов изучения глубинного строения недр на основе данных гравиметрической разведки. Данная тема имеет важное значение для геологического картирования, оценки ресурсов недр и мониторинга геодинамических процессов, что делает исследование востребованным в научной и практической сферах.

В работе подробно рассмотрены теоретические и практические аспекты обработки гравитационного поля. Автор успешно выполнил поставленную цель — исследование современных моделей и алгоритмов обработки гравиметрических данных. Среди ключевых задач выделено сравнение методов трансформации данных и геологическая интерпретация аномалий, что отражено в структуре работы, состоящей из введения, трёх разделов и заключения.

В первой части представлен обзор теоретических основ гравиметрии и методов изучения геологического строения недр, что демонстрирует глубокое понимание студентом основ дисциплины. Во второй части описаны методы обработки гравитационного поля, включая преобразование Фурье, тренд-анализ и вычисление производных, что свидетельствует о владении современными аналитическими подходами. Третья часть, имеющая практический характер, посвящена анализу данных гравиметрии на примере региона Центральной Азии с использованием среды MATLAB, что подчёркивает прикладную значимость исследования.

Особо следует отметить качественную реализацию практической части, где автор применил программное обеспечение MATLAB для обработки данных, что указывает на высокий уровень технической подготовки. Выполненный анализ аномалий и интерпретация результатов демонстрируют способность студента к самостоятельной исследовательской работе.

Работа логично структурирована, содержит обоснованные выводы и демонстрирует готовность автора к решению профессиональных задач в области геофизики и геодезии.

Оценка работы

Дипломная работа Думановой Кадыржаны Думанулы выполнена на высоком профессиональном уровне, отражает глубокое освоение теоретического материала и практических навыков. Работа заслуживает оценки 95 и рекомендуется к защите, а студент — присвоению академической степени бакалавра.

Рецензент

К.т.н., ассоц. профессор-исследователь,
зав. кафедрой "Геодезия и картография, кадастр",
КазГАСА

Подпись Кузнецовой И.А.
заведующая
HR-департамент
« 20 »
Кузнецова И. А.
06. 2025 г

ОТЗЫВ

на дипломную работу

Думанова Кадыржана Думанулы на тему:
«Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки»

Дипломная работа посвящена актуальной задаче геофизики и прикладной геодезии — использованию гравиметрических данных для изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии. Исследование направлено на выявление скрытых геологических структур и оценку плотностных неоднородностей в тектонически активных районах, таких как Центральный Казахстан и Тянь-Шань.

В теоретической части рассмотрены основные подходы к интерпретации гравитационного поля, включая тренд-анализ и применение производных различных порядков. Описаны методы выделения региональных и локальных аномалий, а также их геологическая интерпретация. Работа опирается на данные глобальных моделей гравитационного поля EGM2008 и XGM2019, что делает анализ достоверным и современным.

Практическая часть выполнена на основе реальных гравиметрических данных с использованием программной среды MATLAB. Автор реализовал расчёт и визуализацию трендовых и остаточных полей, а также производных по координатам, что позволило выделить потенциальные границы блоков, зоны разломов и участки с контрастной плотностью.

Работа структурирована грамотно, сопровождается иллюстрациями и картами, полностью соответствует требованиям к выпускным квалификационным работам. Следует отметить уверенное владение методами цифровой обработки данных и понимание геофизической сути проводимых расчётов.

Дипломная работа Думанова К.Д. выполнена на хорошем профессиональном уровне, заслуживает оценки 93 и рекомендуется к защите, а студент — к присвоению академической степени бакалавра.

Научный руководитель
PhD, ассоц. профессор кафедры МДиГ,
КазННТУ им. К. Сатпаева

 Кенесбаева А.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Думанов Кадыржан Думанулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки

Научный руководитель: Айгуль Кенесбаева

Коэффициент Подобия 1: 1.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 8

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 05.06.25₂



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Думанов Кадыржан Думанулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Анализ методов изучения глубинного строения недр по данным гравиметрической разведки

Научный руководитель: Айгуль Кенесбаева

Коэффициент Подобия 1: 1.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 8

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 05.06.2022



Байгүл Кенесбаева О.
проверяющий эксперт