

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра «Геофизика и сейсмология»

Абишев Эльдар Александрович
Ермилов Кирилл Павлович

Комплексирование геофизических методов при выделении участков полиметаллических
оруденений в Шынгыс-Саурской зоне

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6В07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра «Геофизика и сейсмология»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**
Заведующий кафедрой
Геофизики и сейсмологии
доктор технических наук,
профессор
 Ратов Б. Т.
«10» 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

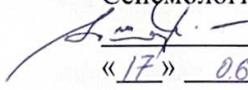
На тему: «Комплексирование геофизических методов при выделении участков
полиметаллических оруденений в Шынгыс-Саурской зоне»

6B07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика

Выполнили

**Рецензент**
Ассоциированный профессор
Caspian University
 Артындинова М. Т.
«06» 2025 г.

Абишев Э. А.
Ермилов К. П.

Научный руководитель
Ассоциированный профессор
Кафедры Геофизики и
Сейсмологии
 Шарапатов А.
«17» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Геофизика и сейсмология

Специальность 6В07201 – Нефтегазовая и рудная геофизика



Ратов Б. Т.
2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающимся Абишеву Э. А., Ермилову К. П.

Тема: “Комплексирование геофизических методов при выделении участков полиметаллических оруденений в Шынгыс-Саурской зоне”

Утверждена приказом 26-П/Ө № от «29» 01 2025 г.

Срок сдачи законченной работы «19» 06 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: были отобраны во время прохождения преддипломной практики.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Общие и геолого-геофизические сведения и изученность Шынгысского складчатого района;
- б) Физико-геологические условия выбора и применения геофизических методов на участке Бесшоқы;
- в) Методика и техника проведения геофизических исследований на участке Бесшоқы;
- г) Камеральные работы и геологические результаты.

Перечень графического материала: представлены 29 слайдов презентации работы.

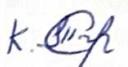
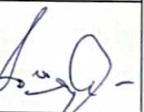
Рекомендуемая основная литература: из 8 наименований _____

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Общие и геолого-геофизическое сведения и изученность Шынгысского складчатого района	01.03.2025	
Физико-геологические условия выбора и применения геофизических методов на участке Бесшоки	25.03.2025	
Методика и техника проведения геофизических исследований на участке Бесшоки	17.04.2025	
Камеральные работы и геологические результаты.	15.05.2025	

Подписи

консультантов и норм контролёра на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И. О. Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Общие и геолого-геофизическое сведения и изученность Шынгысского складчатого района	Куаныш Серикханович Тогизов, доктор Ph.D., профессор	13.06.25	
Физико-геологические условия выбора и применения геофизических методов на участке Бесшоки	Абиш Шарапатов, канд. геол.-минерал наук, ассоц. профессор	13.06.25	
Методика и техника проведения геофизических исследований на участке Бесшоки	Мадияр Манарбекулы Алиакбар, доктор Ph.D., ассоц. профессор	13.06.25	
Камеральные работы и геологические результаты.	Абиш Шарапатов, канд. геол.-минерал наук, ассоц. профессор	14.06.25	
Норм контролёр	Зухра Нигметжановна Аблесенова, магистр технических наук, ст. преподаватель	16.06.25	

Научный руководитель

 Шарапатов А. Ш.

Задание приняли к исполнению обучающиеся

 Абишев Э. А.
 Ермилов К. П.

Дата

« 17 » 06 2025 г.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа выполнена в 4 разделах. В ней рассматриваются геолого-геофизические условия участка Бесшоки (Центральный Казахстан). Цель работы – комплексное геофизическое изучение территории и выявление перспективных рудных объектов. Основными задачами стали сбор и анализ геолого-геофизических данных, проведение полевых исследований, обработка полученных материалов и интегрированная интерпретация результатов. В ходе исследований применены методы магниторазведки, электроразведки методом вызванной поляризации (ВП-ЭП) и автогамма-спектрометрии. Обработка и интерпретация данных осуществлялись с помощью специализированных программных продуктов Geosoft Oasis Montaj (Канада) и модуля VOXI для двух- и трёхмерного моделирования геофизических данных. По результатам работы выделены перспективные геофизические аномалии, представляющие интерес для дальнейших геологоразведочных мероприятий. Полученные материалы и выводы имеют практическое значение для планирования и постановки последующих поисково-оценочных работ.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс төрт бөлімнен тұрады. Жұмыста Бесшоқы аумағының (Орталық Қазақстан) геологиялық-геофизикалық жағдайлары қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – аумақты кешенді геофизикалық зерттеу. Негізгі міндеттерге геологиялық және геофизикалық деректерді жина мен талдау, далалық зерттеулер жүргізу, алынған материалдарды өңдеу және нәтижелерді кешенді интерпретациялау жатады. Зерттеу барысында магниттік барлау, электрлік барлау, сондай-ақ автогамма-спектрометрия әдістері қолданылды. Деректерді өңдеу және интерпретациялау Geosoft Oasis Montaj (Канада) бағдарламалық өнімі мен геофизикалық деректерді екі және үш өлшемде модельдеуге арналған VOXI модулі арқылы жүргізілді. Жұмыстың нәтижесінде болашақ геологиялық барлау жұмыстарына қызығушылық тудыратын геофизикалық аномалиялар анықталды. Алынған материалдар мен тұжырымдар іздеу-бағалау жұмыстарын жоспарлау және ұйымдастыру үшін практикалық маңызға ие.

ANNOTATION

The diploma work is executed in 4 sections. It deals with geological and geophysical conditions of the Besshoky area (Central Kazakhstan). The purpose of the work is a comprehensive geophysical study of the territory and identification of promising ore objects. The main tasks were collection and analysis of geological and geophysical data, conducting field studies, processing of the obtained materials and integrated interpretation of the results. Magnetic prospecting, electric prospecting by the method of induced polarization (IP-EP) and autogamma spectrometry methods were applied during the research. Data processing and interpretation were carried out using specialized software Geosoft Oasis Montaj (Canada) and VOXI module for two- and three-dimensional modeling of geophysical data. Based on the results of the work, promising geophysical anomalies of interest for further exploration activities were identified. The obtained materials and conclusions are of practical importance for planning and setting up further prospecting and appraisal works.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Общие и геолого-геофизические сведения и изученность Шынгысскогоскладчатого района	9
1.1 История геолого-геофизической изученности района и прилегающей территории	10
1.2 Геологическая характеристика района работ: структурно-тектоническая позиция, стратиграфия, тектоника, магматизм	13
2 Физико-геологические условия выбора и применения геофизических методов на участке Бесшоки	20
2.1 Магнитные свойства горных пород и руд	21
2.2 Радиоактивность горных пород и руд	24
2.3 Электрические свойства горных пород и руд	25
3 Методика и техника проведения геофизических исследований на участке Бесшоки	27
3.1 Методика проведения полевых геофизических наблюдений.	27
3.1.1 Магниторазведка. Аппаратура магнитной съемки	29
3.1.2 Автогамма-спектрометрия. Аппаратура автогамма-спектрометрической съемки	32
3.1.3 Электроразведка. Аппаратура электроразведочной съемки	34
3.2 Контрольные наблюдения и оценка качества выполненных исследований	38
4 Камеральные работы и геологические результаты.	43
4.1 Обработка и интерпретация данных магниторазведки.	43
4.2 Обработка и интерпретация данных автогамма-спектрометрии.	51
4.3 Обработка и интерпретация данных электроразведки.	60
Заключение	69
Список используемой литературы	71

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Современный этап развития минерально-сырьевой базы Казахстана характеризуется потребностью в выявлении новых источников цветных и благородных металлов, в том числе меди и золота. Повышение мировых цен на данные ресурсы, вкупе с необходимостью пополнения золотовалютных резервов страны, обуславливает необходимость поисково-оценочных работ в ранее слабоизученных районах. Одним из таких перспективных направлений является локализация скрытого рудоносного оруденения в пределах Центрального Казахстана.

Участок Бесшоки выделен по результатам анализа геолого-геофизических данных ранее проведенных исследований района – в пределах Шынгысской антиклинальной зоны Шынгысского складчатого района. Он представляет особый интерес с точки зрения прогноза золото-медной минерализации, связанной с вулканогенно-интрузивными образованиями верхнего палеозоя. Здесь реализуется необходимость интеграции различных геофизических методов: магнитной, электроразведочной и автогамма-спектрометрической съёмки, для повышения достоверности интерпретации геологического строения и прогноза рудоносных зон.

Научно-методическая новизна исследования заключается в уточнении геофизических характеристик исследуемой территории и площадей оруденений, формализации структурно-литологических признаков возможных рудных тел и построении комплексной петрофизической модели участка на основе совмещённого анализа магниторазведки, электроразведки методом вызванной поляризации (ВП-ЭП), и автогамма-спектрометрии. В результате полевых и камеральных работ удалось выделить локальные геофизические аномалии, сопоставимые с тектоническими и литологическими неоднородностями, потенциально контролирующими рудную минерализацию данного района.

Практическая значимость работы заключается в формировании цифровых и графических массивов геофизических данных, пригодных для дальнейшего моделирования, интерпретации и постановки детальных поисковых работ. Методические подходы, использованные при обработке и комплексировании разнородных данных, могут быть использованы при изучении схожих по геологическим условиям территорий.

Цель дипломной работы – комплексное геофизическое изучение участка Бесшоки для выявления прогностически значимых зон возможной медно-золотой минерализации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) систематизация геолого-геофизических данных, полученных в ходе полевых работ на участке;
- 2) проведение обработки и интерпретации данных магниторазведки, включая построение карт аномального поля и выделение локальных аномалий;

3) анализ материалов электроразведки методом вызванной поляризации (ВП-ЭП) с целью выявления зон изменённой электропроводности, потенциально приуроченных к рудоносным телам;

4) использование данных автогамма-спектрометрии для оценки распределения радиоактивных элементов (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U) и сопоставления их с зонами гидротермального изменения пород;

5) построение сводной геофизической модели участка на основе сопоставления всех доступных данных;

6) обоснование прогностических признаков рудоносных зон и формирование рекомендаций для последующих поисково-оценочных работ.

Объект исследования – геофизические поля и аномалии, обнаруженные в пределах участка Бешоки (Карагандинская область, Центральный Казахстан).

Предмет исследования – закономерности пространственного распределения параметров магнитного, электрического и автогамма-спектрометрического полей и их связь с геологическим строением, тектоникой и потенциальной рудоносностью.

Методы исследования. В работе использованы методы наземной магниторазведки, электроразведки (метод ВП-ЭП), полевой автогамма-спектрометрии, а также методы математической обработки и интерпретации геофизических данных, включая картографирование, профильный анализ, выделение и классификация аномалий, сопоставление с геологическими разрезами и стратиграфическими колонками. Использовались данные из отчёта «Бешоки-2014», геологические карты масштаба 1:200 000, а также стратиграфические и тектонические материалы из фондов ВИМС, ВИГГео, VSEGEI.

Объем и структура дипломной работы. Объем работы 71 страниц машинописного текста, работа содержит 28 рисунков, 5 таблиц и список использованной литературы, включающий 8 наименований.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников.

1 Общие и геолого-геофизическое сведения и изученность Шынгысского складчатого района

Географическое положение территории исследования. Участок Бешоки расположен в северо-восточной части Карагандинской области Казахстана, в полупустынной степной зоне Казахского мелкосопочника (Сарыарки). Участок удален примерно на 75 км к юго-западу от города Курчатов (Восточно-Казахстанская область) и находится недалеко от стыка границ трех областей - Карагандинской, Павлодарской и Восточно-Казахстанской. Ближайший населенный пункт - город Курчатов, ближайшая железнодорожная станция Дегелен (около 110 км северо-восточнее участка) (Рисунок 1).

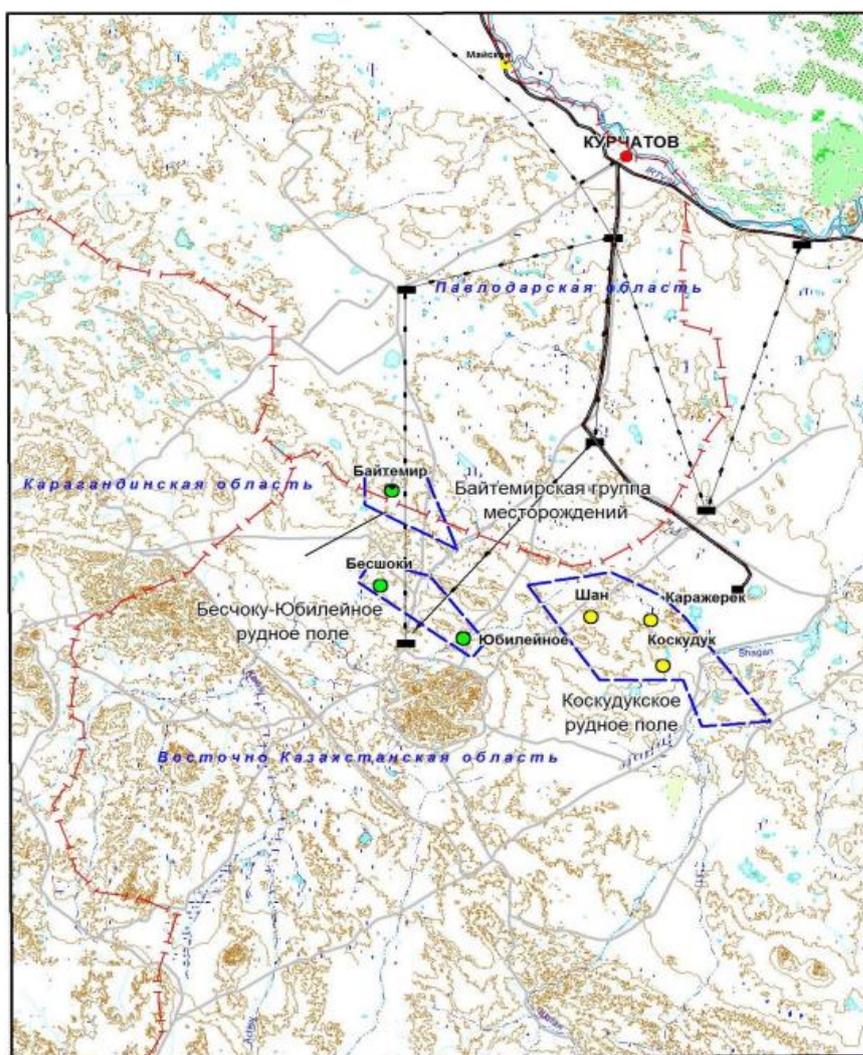


Рисунок 1 - Обзорная карта территории района исследования (масштаб 1:100 000) [8]

Район исследований труднодоступен: постоянных дорог почти нет, ближайшие грунтовые пути соединяются с опорными пунктами через степь. Рельеф местности равнинно-холмистый, характерный для мелкосопочника, с

абсолютными отметками 200-300 м над уровнем моря. Климат резко континентальный, засушливый: жаркое сухое лето и морозная малоснежная зима ограничивают сезон полевых работ. Поверхностные водотоки развиты слабо - ближайшая крупная река Иртыш протекает северо-восточнее, возле г. Курчатов; на самом участке постоянные водотоки отсутствуют. Воду для технических нужд при геофизических работах доставляли автотранспортом с ближайших озер и рек. Отсутствие населенных пунктов и инфраструктуры поблизости потребовало доставки оборудования и персонала в лагерь на участке внедорожным транспортом (типа УАЗ, ГАЗ-66).

1.1 История геолого-геофизической изученности района и прилегающей территории

Советский период исследования (до 1991 г.). Район исследования располагается в пределах Северо-Восточного Казахстана, где первые сведения о минерализации относятся еще к дореволюционному времени. В конце XIX века здесь были выявлены и частично отработаны меднорудные проявления (оксидные руды меди), суммарной добычей 1000 тонн руды. Данные ранние разработки свидетельствовали о присутствии минерализации и послужили отправной точкой для последующих исследований. В советский период геологического картирования территория была охвачена государственными съемками среднего масштаба. В середине XX века (1950-е годы) государственные геологические организации (Министерство геологии КазССР) провели первые целенаправленные поисковые работы на участке. Эти работы включали маршрутное геологическое обследование, опробование и мелкомасштабное разведочное бурение.

Основные методы советского этапа:

- 1) геологическая съемка (предварительные карты масштаба 1:200 000 и более детальные схематические карты);
- 2) горно-геологическое маршрутное обследование и отбор проб;
- 3) первые разведочные скважины на аномальных участках.

Одним из важных результатов советских исследований стало обнаружение золотого оруденения в недрах данного района. В частности, в 1950-х годах при проходке одной из первых разведочных скважин был перехвачен золотоносный интервал, что зафиксировало наличие золотого минерализованного тела. Эта находка значительно повысила интерес к данному району, указывая на его перспективность не только по меди, но и по золоту. По итогам советских работ были составлены отчеты и карты, переданные в Государственный геологический фонд: они зафиксировали геологическое строение района и наличие рудопроявлений, заложив основу для дальнейшей оценки месторождения.

Переходный период (1990-е годы). Распад СССР и экономические трудности 1990-х привели к спаду геологоразведочных работ. Государственные геологические организации Казахстана в этот период сосредоточились на

переоценке имевшихся данных и поддержании архивов; новых полевых работ велось немного. Общая изученность района продолжала постепенно расти за счет научных исследований и отдельных инициатив. По оценкам казахстанских геологов, Семипалатинский рудный район рассматривался как перспективный по медно-золотому оруденению, учитывая данные советской геологии. В конце 1990-х годов началось сотрудничество с иностранными специалистами: например, американско-казахстанская программа ESSI провела дистанционное зондирование и анализ геологических особенностей данного региона (Отчет по дистанционному зондированию и оценке минерагенического потенциала Северо-Восточного Казахстана. Программа ESSI, 1998 г.). Эти исследования помогли актуализировать сведения о геологическом строении и минерагеническом потенциале территории, подготовив базу для возобновления активной разведки в последующем десятилетии. Отчетных материалов по 1990-м годам накопилось относительно мало, однако к концу десятилетия в распоряжении геологов имелся комплекс ранее полученных данных (карты, результаты бурения советского периода, новые аэрогеофизические и спутниковые данные). Это позволило сформировать обновленное представление о рудном поле исследуемого района и наметить приоритетные объекты для детальной разведки.

Новые исследования в 2000-е годы. С начала 2000-х годов геологоразведочные работы на участке активно возобновились усилиями частных компаний. Ключевую роль сыграла компания Frontier Mining Ltd., действовавшая через свое казахстанское подразделение ТОО «ФМЛ Казахстан» – недропользователя участка. Получив лицензионные права, компания инициировала комплексную оценку месторождения с применением современных методов (Кушакова Л.Б. Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Исследования по переработке окисленных медных руд месторождения Юбилейное и Бесчоку методом кучного выщелачивания» / Л.Б. Кушакова – Фонды МД «Востказнедра»: 2005- 237 с.).

В рамках этапа 2000-х годов были проведены следующие работы:

1) геологическое доизучение и картирование: геологи уточнили геологическую карту участка, выполняли детальную геологическую съемку и структурный анализ. Это помогло локализовать зоны возможного оруденения, намеченные еще советскими данными.

2) геохимические поиски: были осуществлены систематические геохимические съемки (обработка грунтовых проб) с целью выявления ореолов золота и сопутствующих элементов. Аномальные геохимические поля подтвердили ранее известные рудопроявления и указали новые точки для проверки.

3) геофизические исследования: применен комплекс методов - магниторазведка, электроразведка (метод вызванной поляризации (ВП-ЭП) и др. По аналогии с соседним участком Байтемир, в 2005 г. выполнялись площадные ВП-измерения и съемка по сетке, что позволило выделить зоны повышенной поляризуемости пород, коррелирующие с сульфидной минерализацией.

4) бурение и проходка канав: на наиболее перспективных аномалиях проведено разведочное бурение алмазными скважинами малой глубины, а также горно-проходческие работы (траншеи, шурфы) для вскрытия рудных зон. Первые 5 скважин суммарным метражом 434 м подтвердили наличие богатой золотомедной минерализации, связанной с гидротермальной брекчией на участке. В 2006 г. последовала расширенная программа бурения (не менее 15 скважин) и вскрыши, нацеленная на прослеживание рудного тела в простирании и на глубину [2].

Результатом работ 2000-х годов стало открытие и детальное оконтуривание нового месторождения. Выявлена зона высокоградного золотомедного оруденения в брекчиевой трубке Бесшоки (по данным опробования, содержание достигало примерно 19,5 г/т Au и 8 процентов Cu в богатых участках). Одновременно в смежной зоне Котансор был обнаружен крупный по масштабам участок вкрапленной медной минерализации в массиве гранодиоритов. По предварительной оценке, категорий C2+P1, ресурсы Котансора составляли порядка 14,2 млн тон руды со средним содержанием примерно 0,22 процента Cu. Эти открытия подтвердили значимость района, он стал рассматриваться как часть единого рудного поля, включающего богатые локальные тела золота с медью и крупные низкосортные медные запасы. Все результаты были оформлены в отчётах по этапу поисково-оценочных работ, а также послужили основой для подачи документов на утверждение запасов.

Разведочные работы 2010-х годов и оценка запасов. На этапе 2010-х годов усилия были направлены на переход от поисково-оценочных работ к детальной разведке и подтверждению запасов месторождения. ТОО «ФМЛ Казахстан» продолжило исследования, сотрудничая с государственными органами для экспертизы результатов. Были проведены доразведочные работы центральной части месторождения со сгущением сетки бурения, целью которой стало перевести ресурсы в категории балансовых запасов. Кроме того, осуществлялась опытно-промышленная отработка: разведка открытым способом (вскрышные работы и небольшие карьерные выемки) позволила извлечь крупные технологические пробы руды. Эти пробы использовались для металлургических испытаний - подтверждено, что окисленные медные руды пригодны для извлечения меди методом кучного выщелачивания с высокими извлечениями. Параллельно проводились лабораторно-аналитические исследования золотосульфидных руд, необходимые для подсчета запасов и проектирования разработки. Кульминацией данного этапа стало официальное утверждение запасов месторождения. В 2011 году Государственная комиссия по запасам (ГКЗ РК) рассмотрела материалы геологического отчета и утвердила балансовые запасы золотосульфидных руд Бесшоки категорий A+B+C1 в объеме 411,18 тыс. тонн руды со средним содержанием Au 1,98 г/т (а также прогнозные запасы по категории C2 - 452,09 тыс. тон с содержанием 1,84 г/т). Утверждение запасов (протокол №1291 ЦК МКЗ, 2011 г.) закрепило статус месторождения как подготовленного к освоению. Достоверное количество золота и сопутствующей меди было внесено в Государственный баланс запасов, что являлось

необходимым условием для перехода к стадии опытно-промышленной разработки и инвестирования в проект. После утверждения запасов основной акцент сместился на уточнение геофизической модели рудного тела и поиски дополнительных рудных зон вокруг него. С этой целью в 2014 году был выполнен отдельный комплекс геофизических работ по контракту между ТОО «ФМЛ Казахстан» (недропользователем) и специализированным подрядчиком. В период июнь-июль 2014 г. на участке Бесшоки проведены профильные электроразведочные зондирования методом вызванной поляризации/сопротивления (с установкой «поль-диполь»), наземная магнитная съёмка, а также автогамма-спектрометрическая съёмка по профилям. Эти методы позволили «просветить» недра и выявить аномалии, соответствующие рудным зонам: например, были зафиксированы повышенные значения поляризуемости, согласующиеся с положением золотосульфидной брекчии, а магнитные данные указали на структуры, контролирующие оруденение. По итогам геофизической съёмки 2014 года был составлен отдельный отчет, в котором представлены карты аномалий, разрезы по профилям и результаты 2D-инверсии геофизических полей. Данный материал использован геологами для уточнения геологической модели месторождения: были скорректированы контуры рудных тел в глубину, выявлены потенциальные новые объекты на флангах, рекомендованные для проверочного бурения. Каждый этап 2010-х годов - от буровых работ до геофизических исследований - сопровождался выпуском подробных отчетов и закладкой информационной базы для проектирования разработки месторождения (Отчет о геофизических работах на участке Бесчоку-Котансор, 2014 г. / ТОО «ФМЛ Казахстан»).

1.2 Геологическая характеристика района работ: структурно-тектоническая позиция, стратиграфия, тектоника, магматизм

Структурно-тектоническая позиция. Участок Бесшоки лежит в пределах Восточно-Казахстанской тектонической провинции и входит в Шынгыско-Тарбагатайскую складчатую систему Центрально-Азиатского подвижного пояса (Рисунок 2) [5]. В более узком масштабе он приурочен к Бозшаколь-Шынгысской складчатой области, формирующей северо-восточную часть древнего Казахстанского палеоконтинента. В структуре этой области ключевую роль играют крупные сводовые поднятия (Шынгысский антиклинорий) и взаимно пересекающиеся зоны разломов.

В частности, через район проходят региональные сбросы северо-западного простирания - так называемый Западно-Шынгысский разлом - которые перекрываются более широкими латитюдными (широко ориентированными) нарушениями. Преимущественными тектоническими направлениями здесь являются северо-западное (NW-SE) и широтное (E-W), что соответствует ориентации магматических и осадочных тел.

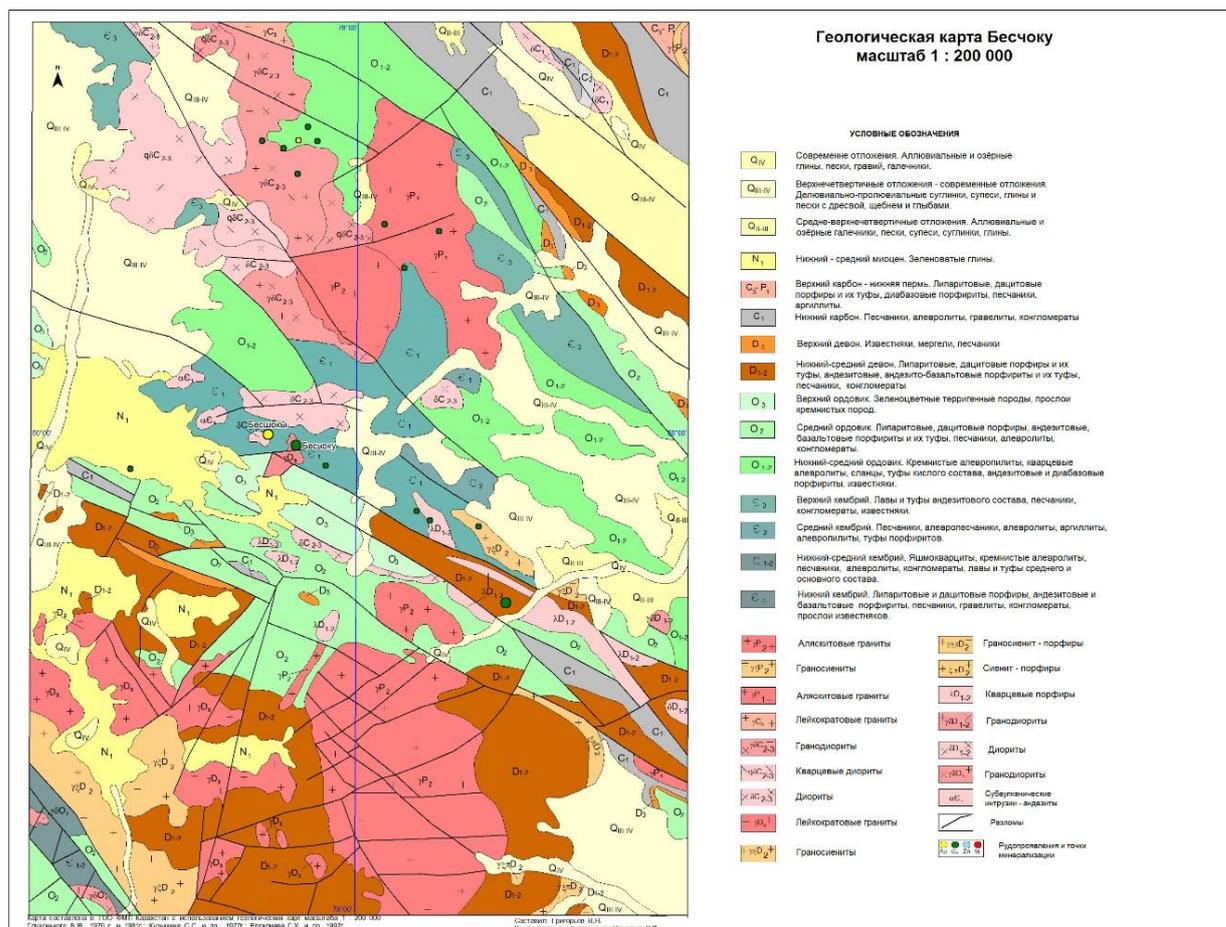


Рисунок 2 – Геологическая карта участка Бесчюкы масштаба 1:200 000, отображающая стратиграфические комплексы и разломы (карта составлена в ТОО ФМ Казахстан, Глухонького В.Я., и др. 1976 г.)

Геофизические данные подтверждают указанную тектонику. Магнитометрические съёмки выявили линейные магнитные аномалии, чётко ориентированные вдоль этих структур: положительные и отрицательные магнитные линеаменты повторяют направления разломов. Вдоль трасс крупных разломов наблюдаются зоны пониженной намагниченности (магнитные минимумы), что характерно для разломно-законтрастированных участков. Наземные профили показывают, что линейные аномалии NW-SE и E-W стыкуются в узлах пересечения разломов. Исследования по методам ВП-ЭП выделили области пониженной поляризуемости, также совпадающие с крупными тектоническими нарушениями. Примером служит ослабленная поляризуемость вдоль разломов указывает на разрушенность и выветрелость пород в зонах разлома. Автогамма-спектрометрические измерения показывают аномалии калия (^{40}K) над калиевой минерализацией, например, в зонах гранитоидов и аномалии урана (^{238}U) в пиритизированных поясах. В целом, сочетание линейных магнитных аномалий и зон минимальной поляризуемости наглядно маркирует границы тектонических блоков и крупных разломов в пределах участка (по данным комплексных геофизических работ 2014 г.). На

геологической карте (Рисунок 3) разными цветами показаны породы различных возрастов. Серо-зеленые тона соответствуют терригенно-вулканогенным отложениям нижнего и среднего карбона (в том числе углеродисто-терригенной формации), розовые цвета отражают интрузивные гранитоидные тела пермского возраста, желто-коричневые области - континентальные осадочные отложения мезозоя и кайнозоя. Чёрными линиями на карте обозначены разломы различных направлений и рангов. Район исследований приурочено к узлу пересечения крупных разломов северо-западного и субширотного простирания. Вдоль одного из северо-западных разломов сформирована главная рудоносная зона - данный разлом отчетливо выражен как в рельефе, так и в геофизических полях. В пределах участка прослеживается крупная моноклиальная структура, осложненная серией разрывов. Интенсификация трещиноватости и дробления пород в зоне пересечения разломов создала благоприятные пути для проникновения гидротермальных растворов и формирования оруденения. Рудоконтролирующие структуры ориентированы преимущественно в северо-западном направлении с крутым падением на северо-восток, что отражает обстановку регионального сжатия в позднем карбон - перми. Длительная эрозия довела разрез до современного состояния: верхние горизонты представлены корой выветривания и чехлом осадков неоген-четвертичного возраста, перекрывающих палеозойский фундамент.

В пределах описанной структуры выявлено несколько локальных рудных объектов. Золотомедные тела района залегает в зоне интенсивной трещиноватости, связанной с северо-западным разломом, и пространственно приурочено к небольшому интрузиву кислого состава. Минерализованная зона представляет собой брекчиевую трубку, сложенную окварцованными и сульфидизированными обломками вмещающих пород, цементированных кварцем и сульфидами (пирит, халькопирит и др.). Эта трубкообразная зона имеет ограниченные размеры (первые десятки метров) но высокие содержания Au и Cu в ядре. В непосредственной близости, на участке Котансор, вкрапленная медная минерализация (халькопирит, борнит) распространена в объеме гранодиоритового штока пермского возраста. Минерализованный гранодиорит образует слабое оруденение с низким средним содержанием меди (~0,2 процента), отнесенное к категории порфировых проявлений.

Стратиграфия. Стратиграфическое строение района исследований охватывает разновозрастные палеозойские образования, представленные ордовикскими, силурийскими и девонскими отложениями. В основании разреза залегают кислые вулканиты ордовикского возраста (O_{nm}), представленные риолитами, туфами и туфопесчаниками. Эти породы характеризуются флюидалными и порфировыми текстурами, высоким содержанием кварца и полевых шпатов, что указывает на кислый состав магмы и надсубдукционную обстановку формирования. В верхней части вулканитов часто наблюдаются чередования лавовых потоков и пеплово-туфовых пластов, что отражает пульсирующий характер вулканической активности в ордовике.

Подстилающими образованиями являются вулканогенно-осадочные породы - туфопесчаники и алевроиты, включающие кварцево-травертиновые обломки. Они представлены мощной слоистой толщей, что свидетельствует о чередовании периодов активного вулканизма и осадконакопления. Мощность ордовикского комплекса достигает 1 - 1,5 км, что подтверждается картой и стратиграфической колонкой листа М-43-XXIV (Рисунок 3).

Более молодые образования представлены гранитоидными интрузиями (γD_2) позднедевонского возраста. Их внедрение нарушает слоистость вулканитов, и они залегают штокоподобными телами вблизи тектонических нарушений. Эти интрузивы не имеют собственных осадочных оболочек, что указывает на быстрое и энергичное внедрение в уже сформировавшийся ордовикский разрез.

Стратиграфия участка позволяет проследить чёткую последовательность тектоно-магматической эволюции региона: от надсубдукционного вулканизма ордовика до постколлизийного гранитоидного магматизма девона, а разрезы по линии А - Б хорошо отражают реальную стратиграфическую последовательность и тектонические контакты.

Магматизм. Магматизм на участке носит двухфазный характер. Первая фаза - эффузивная, связанная с ордовикским вулканизмом. В этот период происходит формирование кислых риолитовых лав и туфов, характерных для надсубдукционных вулканических дуг. Эти породы не только насыщены кислым силикатным материалом, но и включают редкие элементы, указывающие на возможную метасоматическую переработку или рудогенез.

Вторая фаза - интрузивная, позднедевонская, представлена телами гранитоидов γD_2 . Эти породы относятся к Кызылобинскому комплексу и представлены биотитовыми гранитами, граносиенитами и гранодиоритами. Их внедрение сопровождалось мощным метаморфизмом и формированием гидротермальных зон в приконтактных областях. Наблюдаются следы березитизации, хлоритизации и кварцевания, что подтверждает активную гидротермальную переработку.

Магматизм является не только источник формирования новых горных пород, но и главный фактор, контролирующий рудоносные зоны. Внедрение гранитоидов γD_2 может быть связано с развитием медно-порфировой минерализации – это потенциально полезная геолого-промышленная особенность, особенно в контексте прикладной геофизики.

Магматизм данного участка является частью обширной системы Балхаш-Илийского вулканоплутонического пояса – одного из ключевых структурных элементов Центрального Казахстана, где наблюдается тесная пространственная и генетическая связь между магматизмом и тектоникой.

Тектоника. Тектоническое строение района отличается выраженной разрывной нарушенностью, связанной с многоэтапной деформацией палеозойских пород. Геологическая карта М-43-XXIV и разрез по линии А-Б демонстрируют наличие системы продольных и поперечных разломов, большинство из которых представляют собой сбросы и надвиги (Васюков Ю.А., Погоров Н.И. Отчет Центральной ПСЭ о результатах проведения геологической съемки масштаба 1:50 000 на листах М-43-59-Б, Г; 60. За 1985–1990 гг. / Ю.А. Васюков, Н.И. Погоров – Фонды ТУ «Центрказгеология»: 1991 г. - 431 с.). Эти структуры определяют блоковую архитектуру разреза и обуславливают фрагментацию как эффузивных, так и интрузивных образований.

Контакты между вулканитами O_{nm} и гранитоидами γD_2 преимущественно тектонические, с признаками внедрения интрузий по зонам слабости. Часто наблюдаются смещения мощных тел гранитоидов вдоль разломов, что свидетельствует о постинтрузивной активизации тектонических процессов. Структура вулканитов также нарушена - они залегают складчато, с линзовидными участками и изгибами, отражающими этапы сжатия и растяжения в региональной тектонической системе.

В приконтактных зонах фиксируются зоны метасоматического преобразования, сопровождающие разломы и интрузивные тела. Это березитовые, серицитовые и хлоритовые зоны, часто ассоциированные с рудоносными структурами, что ещё раз подчёркивает генетическую связь тектоники, магматизма и минерализации.

Участок работ входит в активную зону Шынгысского складчатого региона и отражает типичную тектоническую ситуацию для позднепалеозойской постколлизии обстановки. Система разломов выполняет не только тектоническую, но и гидрогеологическую роль, контролируя миграцию флюидов и формирование рудных тел.

Анализ геологического разреза по линии А-Б. Геологический разрез по линии А-Б, приведённый в нижней части карты М-43-XXIV, иллюстрирует тектоно-стратиграфическую структуру района исследований в разрезе и подтверждает сложность строения изучаемого участка. Разрез охватывает более десятка литологических и тектонических блоков, рассечённых множественными разломами, и демонстрирует сочетание вулканогенных, интрузивных и осадочных образований палеозойского возраста.

На разрезе отчётливо выделяются штокоподобные тела гранитоидов γD_2 (позднедевонский возраст), внедряющиеся в более древние вулканогенно-осадочные толщи ордовикского комплекса (O_{nm}). Эти тела представлены в виде куполообразных выступов, прорезающих вмещающие породы и локализуемых вдоль зон глубинных тектонических нарушений. Их форма и

пространственное положение указывают на интрузивный механизм формирования с последующим постинтрузивным деформированием.

Основная толща разреза сложена кислыми вулканитами O_{3nm} , которые представлены риолитами, туфами и туфопесчаниками. На разрезе они отображаются светло-зелёным цветом с обозначением «V» и демонстрируют структурные нарушения, выражающиеся в складчатости и блоковом расчленении. Их положение варьирует от субгоризонтального до наклонного, с локальными изгибами и линзовидными включениями, обусловленными тектоническими движениями.

В основании и по флангам разреза фиксируются сбросовые и надвиговые разломы, пересекающие всю толщу от ордовикских до девонских комплексов. В некоторых участках разреза видны разломные зоны растяжения, проявляющиеся в виде опущенных блоков с резким изменением мощности пород. Это указывает на значительную тектоническую активность в постпалеозойское время. Наиболее крупные разломы ориентированы северо-запад-юго-восток и контролируют внедрение интрузий и морфологию литологических тел.

Интересной особенностью разреза является присутствие перекрывающихся структур: в пределах одного блока одновременно фиксируются следы складчатости, разрывных нарушений и внедрения интрузий. Это свидетельствует о многоэтапной геологической эволюции, включающей как ордовикский субдукционный вулканизм, так и девонский постколлизийный магматизм.

Разрез по линии А-Б демонстрирует сочетание следующих факторов:

- 1) вертикальное и горизонтальное расчленение разреза системой разломов;
- 2) линзовидную и штоковую морфологию гранитоидов γD_2 ;
- 3) чередование риолитов и туфов комплекса O_{3nm} ;
- 4) сложную постмагматическую деформацию интрузивов и вмещающих пород.

Все эти особенности позволяют отнести район Бесшоки к активно деформированной зоне Балхаш-Илийского вулcano-плутонического пояса, где формирование и переработка пород происходили в условиях сильной тектоно-магматической пертурбации в позднем палеозое.

2 Физико-геологические условия выбора и применения геофизических методов на участке Бесшоки

Успешность геофизических исследований на участке во многом зависит от дифференциации физических свойств горных пород, рельефа и гидрогеологических условий. Для района Бесшоки характерны следующие физико-геологические условия, влияющие на выбор и эффективность методов разведки:

Факторы, определяющие магнитные свойства пород. Породы района, особенно вулканогенно-осадочные и метаморфические комплексы палеозоя, могут содержать магнитные минералы (магнетит) или вторичные магнетитовые вкрапленности вследствие метасоматоза. Некоторые сульфиды (пирротин) обладают ферромагнитными свойствами. Золотоносные руды сами по себе не магнитны, ассоциирующие с ними минералы (магнетит, пирротин) и прилегающие интрузивные породы могут придавать локальным участкам повышенную магнитную восприимчивость. Это создает предпосылки для выявления рудных структур методом магнитной съемки. Фоновое поле Земли в районе однородно, и наличие контрастов магнитной восприимчивости пород приведет к появлению локальных магнитных аномалий. В физико-геологических условиях участка важно, что нет сильных техногенных помех: район удален от промышленных объектов, отсутствуют линии электропередач и крупные металлические сооружения, способные исказить измерения магнитного поля. Магнитная обстановка благоприятна для применения наземной магниторазведки - ожидается выявление аномалий, связанных исключительно с геологическими неоднородностями.

Факторы, определяющие электрические свойств пород. Участок расположен в степной зоне с засушливым климатом, поэтому приповерхностные породы и почва, как правило, сухие и обладают высокими электрическими сопротивлениями. Это создает затруднения для методов электроразведки, требующих ввода тока в землю. Полевая практика показала необходимость улучшать контакт электродов с грунтом - при проведении работ применялись большие пластины металлической фольги в качестве токовых электродов, для каждого из которых выкапывалась ямка и проливалась водой. Такая мера позволила снизить сопротивление контакта. При проведении работ использовались неполяризующиеся медно-сульфатные электроды на приемной стороне, что уменьшало влияние электрохимических помех. Эти факты отражают высокий уровень сопротивления сухого грунта и необходимость учитывать данный фактор при интерпретации данных метода вызванной поляризации (ВП-ЭП).

Наличие сульфидной минерализации. Главные объекты поиска золотоносные сульфидные руды содержат вкрапленные сульфидные минералы, такие как пирит, халькопирит, возможно, пирротин и другие. Данные минералы обладают электрической проводимостью и способностью поляризоваться под воздействием электромагнитного поля. Геоэлектрический метод (ВП-ЭП)

должны отчетливо будет реагировать на рудные зоны повышенной поляризуемости. Метод вызванной поляризации эффективен для поиска вкрапленных руд, поскольку в породах с сульфидными минералами возникают заметные вторичные электрические поля при пропускании тока. Физико-геологическое условие в виде присутствия сульфидов работает на пользу электроразведки: ожидается, что рудные тела будут выделяться аномалиями высокой поляризуемости на фоне вмещающих пород.

Факторы, определяющие естественную радиоактивности горных пород. Радиоактивный фон в районе определяется содержанием природных радиоэлементов - калия, урана и тория в породах. Палеозойские интрузивы (гранитоиды) обычно обогащены радиоактивными элементами (особенно калием и торием), тогда как осадочные карбонатные породы имеют более низкий радиоэлементный состав. Для участка Бешоки характерно чередование различных литологий, поэтому можно ожидать заметных вариаций содержания ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U между, например, гранитными диорит-порфириновыми интрузиями и окружающими их осадочными или метаморфическими породами. Физико-геологическое условие, благоприятное для автогамма-съемки, вероятно небольшая мощность покровных отложений. На значительной части площади коренные породы выходят близко к поверхности (известно, что уже в XIX веке на Бешоки обнаруживались медистые обнажения). Отсутствие толстого чехла четвертичных отложений означает, что наземная автогамма-спектрометрия сможет регистрировать гамма-излучение, идущее именно от коренных пород, а не поглощаться в толще грунта. При этом рельеф относительно ровный (степь), что позволило выполнить профильную автогамма-съемку. Радиометрические условия достаточно комфортны: фон умеренный, контраст между породами в содержании ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U ожидается, а данные можно собрать равномерно по сети профилей.

Подводя итог, физико-геологические условия участка Бешоки можно считать подходящими для комплексной геофизической съемки. Сухость пород осложняет электрические измерения, но это компенсируется техническими мерами (увлажнение электродов). Наличие поляризуемых сульфидов способствует эффективности метода (ВП-ЭП), а присутствие магнитных минералов - результативности магниторазведки. Разнообразие литологического разреза создает предпосылки для контрастов в поле естественной радиоактивности, что делает автогамма-спектрометрию полезной для геологического картирования.

2.1 Магнитные свойства горных пород и руд.

Магниторазведка по району исследования традиционно используется для: (1) картирования геологических границ и разломов по изменениям магнитного поля, и (2) выявления скрытых объектов с аномальной магнитной восприимчивостью, потенциально связанных с оруденением.

Применительно к участку Бешоки, можно ожидать следующие проявления магнитного поля. Если в зоне рудных тел присутствуют пирротиновые или магнетитовые минерализации, они создадут положительную магнитную аномалию на фоне менее магнитных вмещающих толщ. Контактные зоны вокруг интрузивных массивов (порфировых даек, связанных с месторождением) могут окружаться ореолами магнитной переотложенности (скарновые образования, вторичный магнетит), что также даст аномальное поле. Магнитная съемка фиксирует суммарный эффект от всех этих факторов. По результатам обработки строятся карты изолиний аномального магнитного поля, по которым можно проследить тенденции: линейные аномалии будут соответствовать тектоническим нарушениям, изометричные локальные - вероятно магматическим телам или рудным зонам.

В контексте исследования Бешоки магниторазведка дала ценные данные о строении недр: например, были выявлены аномальные зоны, согласующиеся с предполагаемыми рудными структурами на основе их магнитных разностей по значениям магнитной восприимчивости (χ) (Таблица 1).

Магнитные свойства пород участка Бешоки характеризуются значительным разнообразием, отражающим сложное геолого-тектоническое и литологическое строение исследуемой территории. Согласно данным магнитометрических исследований и результатам анализа геологической карты, на участке выделяется несколько типовых литолого-стратиграфических комплексов с контрастными значениями магнитной восприимчивости.

Четвертичные делювиально-аллювиальные отложения, представленные преимущественно песчано-глинистыми грунтами, характеризуются минимальной магнитной восприимчивостью в пределах от 0 до $10 \cdot 10^{-5}$ СГС. Такие низкие значения обусловлены практически полным отсутствием ферромагнитных минералов и высокой степенью разуплотнения осадков.

Палеозойские осадочные породы, в частности аргиллиты, алевролиты и песчаники девон-карбонового возраста (индексы D_{1-2} , C_1), обладают умеренной магнитной восприимчивостью, варьирующей от 20 до $50 \cdot 10^{-5}$ СГС. Повышение значений восприимчивости в данных породах связано с присутствием примесей магнетита и пирротина, которые могут формироваться в процессе осадконакопления и последующего диагенеза.

Более высокие магнитные характеристики отмечаются у вулканогенных толщ, представленных андезито-базальтовыми и дацитовыми туфами (индексы C_2 - C_1 и C_1 - C_0). Для этих комплексов характерны значения магнитной восприимчивости от 100 до $600 \cdot 10^{-5}$ СГС. Данные значения обусловлены широким распространением магнетита и других железистых минералов, являющихся типичными компонентами вулканогенных и субвулканических образований.

Кварцевые порфиры (C_1) характеризуются умеренными магнитными параметрами (100 - $330 \cdot 10^{-5}$ СГС). Это объясняется меньшим содержанием магнетита по сравнению с наличием кварцевых жил и включений, снижающих общую магнитную восприимчивость массива.

Особое внимание заслуживают базальтовые и андезито-базальтовые породы (индексы Р-С), а также габбро-диоритовые интрузивы (P_z). Эти горные породы являются наиболее магнитными на участке с восприимчивостью от 500 до 1200·10⁻⁵ СГС и от 600 до 1000·10⁻⁵ СГС соответственно. Такая высокая магнитная восприимчивость вызвана значительным содержанием ферромагнитных минералов, преимущественно магнетита, и обуславливает формирование ярко выраженных положительных магнитных аномалий на геофизических картах.

Зоны гидротермального изменения и разломные области характеризуются резким падением магнитной восприимчивости (0 - 20·10⁻⁵ СГС), что связано с процессами разрушения магнетита и окисления сульфидов до немагнитных оксидов и гидроксидов железа. Это проявляется в виде выраженных магнитных минимумов, коррелирующих с зонами тектонических нарушений.

Золотосульфидные руды участка Бешоки, ассоциирующиеся преимущественно с пирротином и магнетитом, имеют повышенную магнитную восприимчивость от 300 до 700·10⁻⁵ СГС, местами достигая значений до 1000·10⁻⁵ СГС. Это обстоятельство делает магниторазведку чрезвычайно эффективным методом при выявлении и картировании золоторудных зон, приуроченных к магматическим и тектоническим структурам участка.

Таблица 1 – Магнитные и плотностные свойства горных пород Шынгысского складчатого района.

Порода	Возраст	Магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-5}$ (СГС)
Глины, пески, делювиальные отложения	Q	0-10
Аргиллиты, алевролиты, песчаники	Р-С	20-50
Туфы андезитового и базальтового состава	С ₂ -С ₁	100-350
Порфириты, лавобрекчии	С ₂ -С ₁	300-600
Дацитовые туфы и туффиты, песчаники с вулканогенными прослоями	С ₁ -С ₀	150-300
Кварцевые порфиры	С ₁	100-330
Базальты, андезито-базальтовые породы	Р-С	500-1200
Габбро-диориты, интрузивы	P _z	600-1000
Зоны гидротермального изменения, разломы, зона окисления	-	0-20
Золотосульфидные руды (с пирротином)	-	300-700 (до 1000)

2.2 Радиоактивность горных пород и руд.

Радиоактивные характеристики пород и руд участка Бешоки (Таблица 2) отражают геологическое разнообразие и связаны с наличием и распределением естественных радиоактивных элементов - калия (⁴⁰K), тория (²³²Th) и урана (²³⁸U).

Эти параметры позволяют эффективно использовать автогамма-спектрометрию при решении геолого-разведочных задач.

Четвертичные и неогеновые отложения, представленные песчано-глинистыми осадками, характеризуются низким содержанием радиоактивных элементов (^{40}K 0.5 - 1.5 процентов, ^{232}Th 5 - 15 г/т, ^{238}U 1 - 3 г/т). Такие низкие значения связаны с низкой концентрацией минералов, содержащих радиоактивные элементы.

Карбонатные породы - доломиты и известняки - показывают умеренные показатели радиоактивности (^{40}K 0.21 процента, ^{232}Th 1 - 8 г/т, ^{238}U 0.5 - 2 г/т). Это обусловлено низким содержанием глинистых и других примесей, несущих радиоактивные элементы, и чисто карбонатной природой пород.

Осадочные глинистые сланцы и песчаники характеризуются относительно высокой радиоактивностью (^{40}K 1.0 - 2.5 процентов, ^{232}Th 10 - 20 г/т, ^{238}U 2 - 5 г/т), что связано с высоким содержанием глинистых минералов, способных сорбировать и накапливать радиоактивные элементы.

Вулканогенные породы, включая базальты и кварцевые порфиры, также демонстрируют повышенную радиоактивность (^{40}K 0.5 - 4.5 процентов, ^{232}Th 1 - 25 г/т, ^{238}U 0.5 - 5 г/т), обусловленную минералогическими особенностями и химическим составом, типичным для вулканогенных комплексов.

Интрузивные породы, представленные гранитами и диоритами, характеризуются высокой радиоактивностью, особенно по калию и торию (^{40}K 3.0 - 5.0 процентов, ^{232}Th 15 - 30 г/т, ^{238}U 3 - 6 г/т). Это связано с высоким содержанием калиевых полевых шпатов и минералов группы циркона, типичных для кислых и среднекислых интрузий.

Графитизированные сланцы и углистые известняки показывают умеренные уровни радиоактивности (^{40}K 0.3 - 2.5 процентов, ^{232}Th 3 - 20 г/т, ^{238}U 0.5 - 4 г/т), обусловленные присутствием органических соединений и минеральных примесей, несущих радиоактивные элементы.

Скарны характеризуются значительными значениями радиоактивности (^{40}K 1.0 - 3.0 процентов, ^{232}Th 10 - 20 г/т, ^{238}U 2 - 5 г/т), что связано с метасоматическими процессами и включением минералов, богатых радиоактивными элементами.

Руды участка, имеющие повышенные концентрации радиоактивных элементов (^{40}K 0.1 - 1.5 процентов, ^{232}Th 10 - 50 г/т, ^{238}U 2 - 20 г/т), особенно интересны в геологоразведочных работах. Эти повышенные показатели обусловлены наличием минералов, содержащих уран и торий, а также радиогенных продуктов распада, связанных с гидротермальной минерализацией.

Таблица 2 – Радиоактивность горных пород Шынгысского складчатого района.

Типы горных пород	⁴⁰ K, проценты	²³² Th, г/т	²³⁸ U, г/т
Пески, глины, суглинки	0.5 - 1.5	5 - 15	1 - 3
Доломиты	0.3 - 1.0	2 - 8	0.5 - 2
Известняки	0.2 - 1.0	1 - 6	0.5 - 2
Глинистые сланцы, песчаники	1.0 - 2.5	10 - 20	2 - 5
Базальты	0.5 - 1.5	1 - 4	0.5 - 2
Граниты и диориты	3.0 - 5.0	15 - 30	3 - 6
Кварцевые порфиры и туфы	2.5 - 4.5	10 - 25	2 - 5
Графитизированные сланцы	1.0 - 2.5	8 - 20	1.5 - 4
Углистые известняки	0.3 - 1.0	3 - 10	0.5 - 2
Скарны	1.0 - 3.0	10 - 20	2 - 5
Руды	0.1 - 0.5	10 - 50	5 - 20
Окисленные руды	0.3 - 1.5	10 - 25	2 - 8

2.3 Электрические свойства горных пород и руд.

Электрические свойства пород участка Бесшоки (Таблица 3) отличаются широким диапазоном значений, обусловленным разнообразием литологических типов и разной степенью минерализации пород, что чётко отражено в результатах электроразведочных исследований.

Таблица 3 – Электрические свойства пород Шынгысского складчатого района.

Типы горных пород и руд	Поляризуемость, проценты	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Пески, глины, суглинки	0,5 - 1	10 - 1000
Доломиты	0,5 - 2	100 - 1000
Известняки	0,75 - 3	50 - 500
Глинистые сланцы, песчаники	0,6 - 2,3	20 - 200
Базальты	0,7 - 2,2	100 - 300
Граниты и диориты	0,9 - 1,8	500 - 5000
Кварцевые порфиры и их туфы	0,7 - 3,6	300 - 1000
Графитизированные сланцы	1,5 - 5,9	10 - 100
Углистые известняки	1,3 - 12	10 - 200
Скарны	1,9 - 5	30 - 300
Руды	19 - 50	1 - 50
Окисленные руды	0,9	50 - 300

Четвертичные и неогеновые отложения, представленные песками, глинами и суглинками, характеризуются низкой поляризуемостью (0,5-1 процентов) и относительно высоким удельным электрическим сопротивлением (10-100 Ом·м). Низкая поляризуемость обусловлена незначительным содержанием проводящих минералов, а высокое сопротивление связано с хорошей водопроницаемостью и слабой минерализацией поровых вод.

Осадочные породы, такие как доломиты и известняки, демонстрируют умеренную поляризуемость (0,53 процента) и варьируемое удельное сопротивление (50 - 1000 Ом·м). Эти параметры обусловлены наличием в породах различных примесей, карбонатизацией и пористостью, влияющими на проводимость.

Глинистые сланцы и песчаники характеризуются средней поляризуемостью (0,6 - 2,3 процентов) и удельным электрическим сопротивлением от 20 до 200 Ом·м, что объясняется наличием глинистого материала, который способствует увеличению проводимости пород.

Вулканогенные породы, такие как базальты и кварцевые порфиры, имеют поляризуемость от 0,7 до 3,6 процентов и удельное электрическим сопротивлением 100 - 1000 Ом·м. Высокие показатели обусловлены присутствием магнитных и полуметаллических минералов, которые увеличивают проводимость и способность накапливать заряд.

Интрузивные породы, представленные гранитами и диоритами, имеют низкую поляризуемость (0,9 - 1,8 процентов) и очень высокое удельное электрическим сопротивлением (500-5000 Ом·м), обусловленное кристаллической структурой и низким содержанием проводящих минералов.

Наиболее высокие показатели поляризуемости (1,5 - 5,9 процентов) характерны для графитизированных сланцев и углистых известняков (1,3 - 12 процентов), что связано с наличием графита и органического вещества, сильно увеличивающих электрическую ёмкость пород. Соответствующее удельное электрическим сопротивлением этих пород варьирует в широком диапазоне от 10 до 200 Ом·м.

Скарны, являясь продуктами метасоматических изменений, имеют поляризуемость от 1,9 до 5 процентов и удельное электрическое сопротивление 30 - 300 Ом·м, обусловленные наличием сульфидных минералов и частичным замещением карбонатной основы.

Рудные тела участка Бесшоки характеризуются исключительно высокой поляризуемостью (19 - 50 процентов) и низким удельным электрическим сопротивлением (1 - 50 Ом·м). Эти свойства связаны с высокой концентрацией сульфидных минералов, таких как пирит и халькопирит, которые эффективно проводят электрический ток и создают ярко выраженные геофизические аномалии, что позволяет эффективно использовать метод вызванной поляризации при поисках рудных месторождений.

3 Методика и техника проведения геофизических исследований на участке Бесшоки

Геофизические исследования на участке Бесшоки проводились комплексно тремя основными методами: наземной магниторазведкой, электрическим зондированием методом вызванной поляризации (ВП-ЭП) и автогамма-спектрометрической съёмкой [6]. Объемы проведенных геофизических исследований на участке Бесшоки представлены в таблице 4. Целью работ было выявление скрытых геологических структур и рудных зон (золото-сульфидной минерализации) посредством аномалий геофизических полей. Все методы дополняли друг друга: магнитная съемка чувствительна к контрастам магнитных свойств пород и позволяет проследить разломы, интрузии и другие структуры; электрическая съемка (ВП-ЭП) выявляет зоны повышенной поляризуемости, характерные для рассеянных сульфидных минералов автогамма-спектрометрия фиксирует содержание естественных радионуклидов (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) в горных породах, отражая их литологический состав. Ниже подробно описаны примененные методики, используемая аппаратура, организация полевых работ на подготовительном, основном и камеральном этапах, а также увязка полученных данных с геологическим строением района и рекомендации по оптимизации исследований.

Таблица 4 – Объемы проведенных геофизических исследований на участке Бесшоки.

№ ПП	Профиль	Пикет. Начало.	Пикет. Конец.	Длина, м
Электроразведка				
1	5	300	2700	2400
2	8	0	2700	2700
3	7	0	2700	2700
4	8	0	2700	2700
5	8D	0	2700	2700
Магниторазведка				
Общий объем 20 пог. км				
Автогамма-спектрометрия				
Общий объем 110 пог. км				

3.1 Методика проведения полевых геофизических наблюдений

Планирование профилей и сетки наблюдений. Полевые геофизические работы на участке Бесшоки проводились по системе профилей, ориентированных с учетом геологического простирания пород (Рисунок 4).

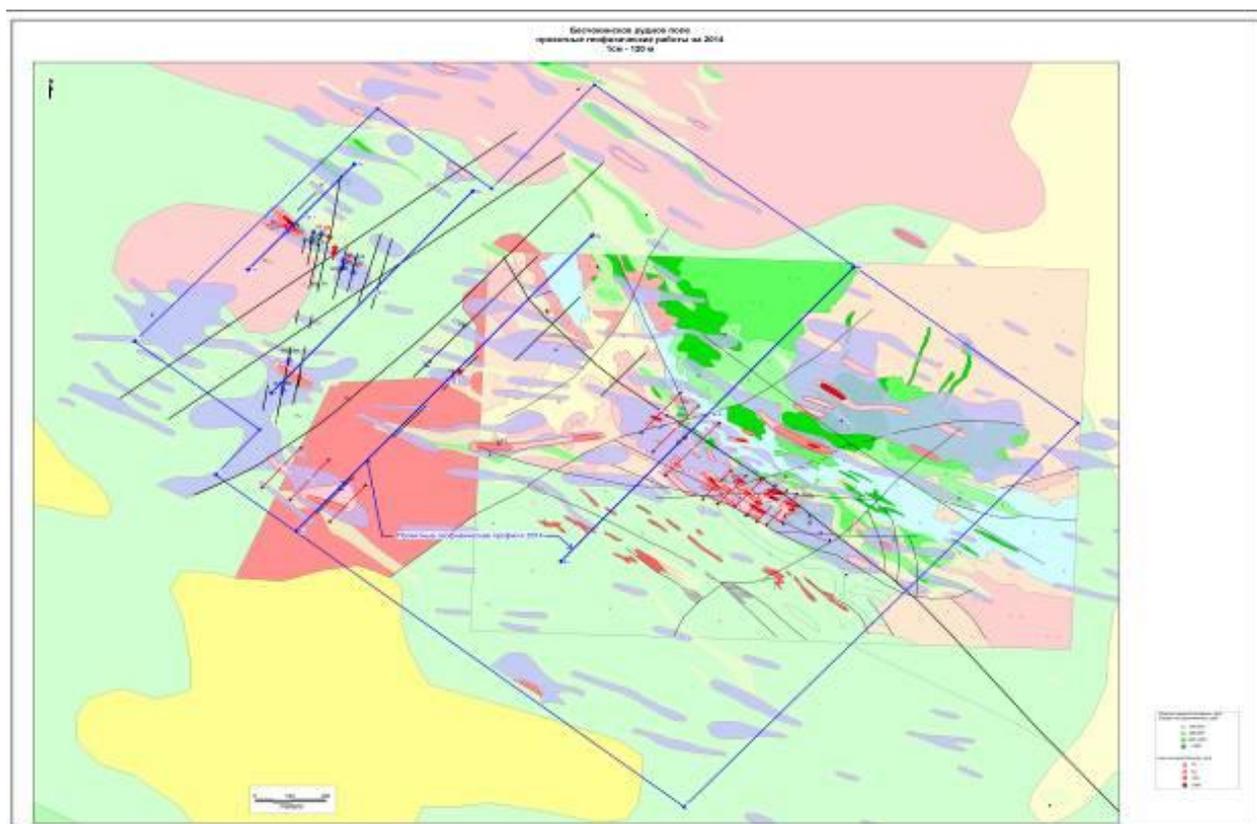


Рисунок 4 – Схема расположения геофизических профилей

Основная сеть профилей для магниторазведки и автогамма-съемки была проложена в северо-восточном направлении (азимут около 37°) - практически поперек простирания основных структур. Расстояние между параллельными профилями составляло 200 м, а длина каждого профиля - порядка 4 - 5 км. Такая детальность обеспечивала покрытие площадью $\sim 24,6$ км² сетью наблюдений общей протяженностью ~ 146 км. Для увязки данных, полученных в разные дни на разных профилях, были также проложены несколько пересекающих (связующих) профилей, ориентированных перпендикулярно основной сети (профили Т_100, Т_2000, Т_3900, Т_4900). Они пересекают все линейные маршруты, позволяя откорректировать возможные разности в уровне между днями наблюдений (Рисунок 5). Если на концах профилей фиксировались выраженные аномалии, линии продлевали до выхода значений на фоновые уровни. В случае выявления локальных аномальных зон внутри сетки выполнялись дополнительные уточняющие профили с промежуточным шагом 100 м - такая детализация применялась при обнаружении интересных радиометрических аномалий. Перед началом работ производилась топографическая разбивка: профили были размечены в поле, на них устанавливались вешки через каждый 100 м (пикеты) с привязкой к координатной системе (UTM zone 43N, WGS-84) с помощью двухчастотного GPS-приемника Trimble.

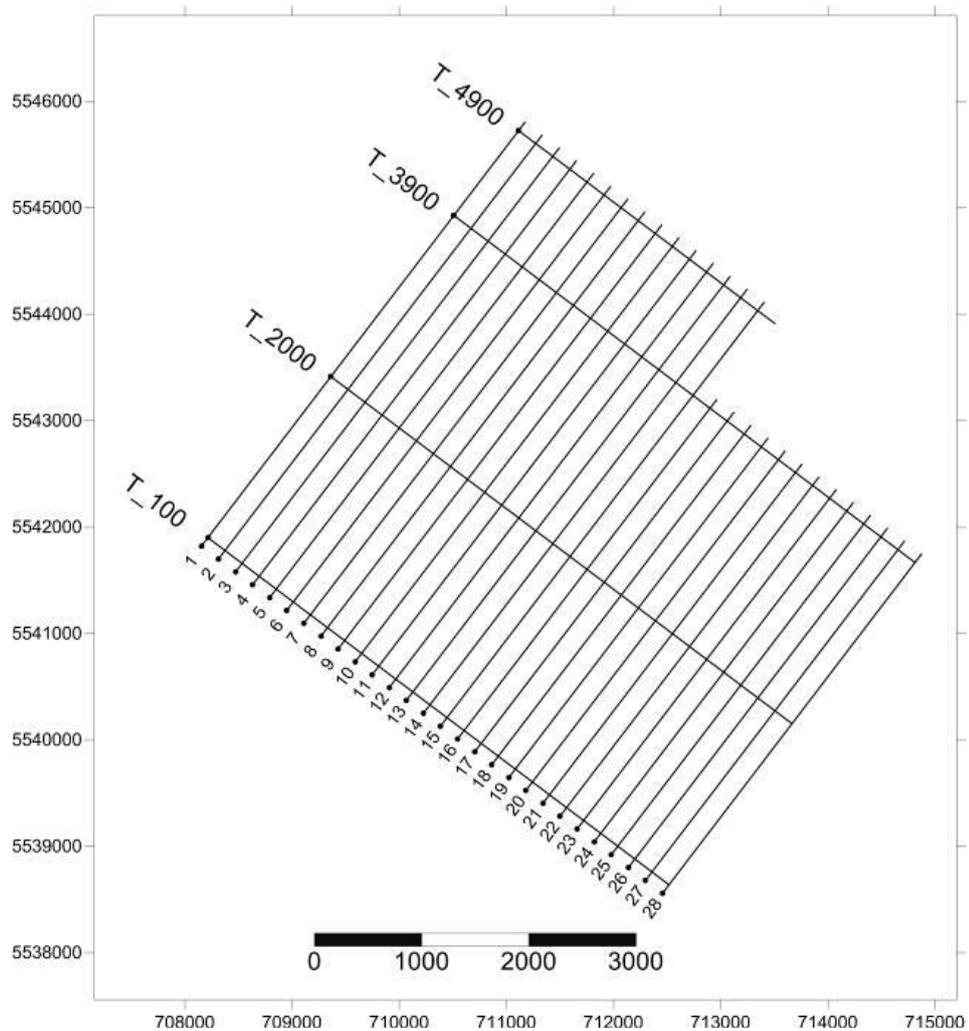


Рисунок 5 – Схема расположения профилей магниторазведки и автогамма-спектрометрии на участке Бешоки

3.1.1 Магниторазведка. Аппаратура магнитной съемки

Аппаратура магнитной съемки. Для проведения наземной магнитной съемки применялись современные квантовые магнитометры высокой точности и база для регистрации вариаций. В районе работ была установлена протонная магнитовариационная станция МВ-07 (Рисунок 6), предназначенная для непрерывной записи изменений магнитного поля.

Данные приборы используют эффект протонного (или электронного) спин-резонанса для точного измерения полного вектора магнитной индукции. Магнитометры оснащены встроенными GPS-приемниками для привязки данных и работают в автоматическом режиме записи. Перед началом работы выполняется градуировка и прогрев прибора, после чего он переключается в режим циклических измерений поля (магнитометр G-859 - каждые 4 секунды). Датчики магнитометров устанавливались на персонале: для G-859 под углом 45° к вертикали, а для Scintrex - ориентированы вдоль профиля, чтобы минимизировать «мертвые зоны» чувствительности при движении. Благодаря этому аппаратура обеспечивала непрерывную запись аномалий магнитного поля с высокой точностью даже в сложных условиях пересеченной местности.

Проведение магнитной съемки. Магнитометрические наблюдения осуществлялись бригадой из двух операторов с переносными магнитометрами и ассистентов-навигаторов [4]. До выезда на профили была развернута база - магнитовариационная станция MB-07, работавшая в автономном режиме 24 часа в сутки на протяжении всего периода магнитной съемки. Ежедневно утром перед началом измерений персонал проверял работу станции, а вечером копировал накопленные базой данные в компьютер для последующей обработки. Для контроля нулевого дрейфа магнитометров вблизи станции (~30 м) оборудовали *контрольный пункт (КП)*, на котором дважды в день (утром и вечером) выполняли серию из 5 измерений магнитного поля на ориентированных направлениях (0° , 90° , 180° , 270° , 360°). Сравнение результатов этих измерений подтверждало стабильность базового прибора и отсутствия значимого собственного дрейфа (погрешность $<0,1$ нТл). После утренней проверки оборудования две группы выходили на профили для выполнения измерений. Оператор магнитометра перед началом съемки на профиле включал прибор и выдерживал ~10 минут для прогрева и стабилизации датчика, при этом GPS-приемник на приборе позволял сразу привязать измерения ко времени и координатам. Далее прибор переводился в режим автоматической регистрации - магнитометр G-859, фиксировал значение поля каждые 4 секунды, а прибор Scintrex - каждые 3 секунды. Оператор с магнитометром плавно перемещался вдоль профиля, следуя вешкам и указаниям штурмана-навигатора, который шел впереди с ручным GPS. Навигатор также нес все потенциально магнитные предметы (радиостанцию, телефон и др.) и контролировал траекторию движения, освобождая оператора от лишнего груза, чтобы минимизировать помехи и утомляемость. Через каждые 100 м (на пикетах) оператор делал специальную отметку (метку) во внутренней памяти магнитометра и сообщал навигатору о прохождении очередной точки. Это позволяло потом сопоставить непрерывную запись с конкретными позициями на профиле. По окончании работы на профиле (обычно к вечеру) магнитометрические данные переносились на ноутбук; одновременно загружались данные базовой станции за соответствующий период. В полевых условиях сразу строились предварительные графики или профили аномалий для визуального контроля. При необходимости участок профиля мог быть переизмерен (если выявлен

одиночный выброс либо помеха). В целом организация магнитной съемки была направлена на получение непрерывных и сопоставимых рядов измерений, избавленных от временных вариаций и привязанных к единой системе координат.

3.1.2 Автогамма-спектрометрия. Аппаратура автогамма-спектрометрической съемки

Аппаратура автогамма-спектрометрической съемки. Автогамма-спектрометрическая аппаратура. Для автогамма-съемки использовался переносной многоканальный гамма-спектрометр RSX-5 (производства Radiation Solutions, Канада), установленный на автомобиле УАЗ-469. RSX-5 представляет собой современный 1024-канальный спектрометр, оснащенный крупными сцинтилляционными детекторами NaI(Tl) суммарным объемом до 32 - 48 литров. Большой объем кристаллов обеспечивает высокую эффективность регистрации гамма-квантов, а энергетическое разрешение приборов порядка 9 процента по линии 0,662 МэВ (^{137}Cs) позволяет достоверно различать излучение естественных радионуклидов калия, урана и тория. Спектрометр оснащен встроенной системой стабилизации энергетической шкалы по естественным фотопикам ^{40}K и ^{208}Tl , что компенсирует дрейф и температурные влияния. Перед началом профилей выполнялся прогрев и калибровка RSX-5 в соответствии с регламентом (по контрольным источникам или природному фону). Данные регистрировались непрерывно с дискретностью 1 сек с помощью программного обеспечения *RadAssist*, сохранялись во внутренней памяти прибора и периодически выгружались через USB-интерфейс. Первичные файлы спектров содержат информацию по каждому детектору и суммарному фону; для последующей обработки они конвертировались в формат Oasis montaj (через *.rsibin и шаблоны. Благодаря высокой чувствительности RSX-5 даже при скорости движения автомобиля до 10 км/ч прибор улавливал статистически значимые изменения концентраций радиоэлементов. Автогамма-спектрометрическая аппаратура обеспечила оперативное получение данных о содержании ^{40}K (проценты), ^{238}U (экв. уран) и ^{232}Th (экв. торий) на каждом пройденном метре профилей.

Навигация осуществлялась по заранее загруженным координатам профиля на GPS. Для контроля дрейфа и суточных изменений радиоактивного фона использовалась следующая схема: разные профили измерялись в разное время дня, но пересекались на связующих линиях (Т-профилях), данные которых потом сравнивались для выравнивания. Профили Т_100, Т_2000 и др., пройденные в конце каждого дня, пересекают все основные профили и позволили откорректировать возможные различия в показаниях, вызванные изменениями влажности или радиационного фона в разные дни. Один из профилей был выбран в качестве *контрольного*: его намеренно повторно измерили дважды в разные дни, чтобы количественно оценить воспроизводимость результатов. В случае

выявления на каком-либо профиле сильной гамма-аномалии (резкого увеличения содержания радиоэлементов на конце профиля) маршрут этого профиля продлевался дальше, пока значения не вернутся к фоновым. Аналогично, если определенная зона вызывала интерес (аномальные значения ^{40}K , ^{238}U или ^{232}Th), на следующий день между основными профилями прокладывали дополнительный промежуточный маршрут (параллельно, на половинном расстоянии 100 м) для уточнения конфигурации этой аномалии. Организация автогамма-спектрометрических наблюдений была гибкой: базовая сетка обеспечивала покрытие всей площади, а при необходимости оперативно добавлялись проверочные и детализационные профили. По завершении каждого профиля спектрометрические данные сохранялись на компьютер; в полевых условиях могли сразу строиться карты по одному-двум элементам для черновой прикидки соответствия геологии. В результате удалось собрать обширный материал по естественному гамма-фону пород района с высоким пространственным разрешением.

Проведение автогамма-спектрометрической съемки. Автомобильная гамма-съемка осуществлялась по той же сетке профилей, что и магнитная съемка, фактически одновременно с ней (в разные дни или смены). Спектрометр RSX-5 (Рисунок 8) был жестко закреплен на кузове внедорожника на фиксированной высоте (~0,5-1 м над поверхностью). Перед началом профиля прибор включался и выполнялась проверка стабилизации спектрометра по контрольному источнику (либо естественному фону).



Рисунок 8 – Спектрометр RSX-5

Измерения производились в непрерывном режиме во время движения: пока машина двигалась по профилю, RSX-5 ежесекундно регистрировал полные гамма-спектры. Средняя скорость движения поддерживалась на уровне ~7-10 км/час (~2-3 м/с), что при развернутых 32-литровых детекторах обеспечивало достаточную статистику счета за 1-секундный интервал. На более детализированных участках скорость снижали до ~5 км/ч для повышения пространственного разрешения. Съемка проводилась исключительно в светлое

время суток и при отсутствии осадков (сухая погода), чтобы исключить влияние влажности грунта на результаты гамма-излучения. В салоне автомобиля оператор следил за показаниями.

3.1.3 Электроразведка. Аппаратура электроразведочной съемки

Аппаратура электроразведочной съемки. Комплекс аппаратуры для метода вызванной поляризации и электрического сопротивления (ВП-ЭП) включал мощные генераторы тока и многоканальные приемники. В полевых работах применялись два типа токовых трансмиттеров: Zonge GTT-30 (США) (Рисунок 9) с генераторной установкой ZMG-30 (Рисунок 10) и Instrumentation GDD 5kW (Канада) (Рисунок 11). Трансмиттер Zonge способен создавать токи большой силы (порядка десятков ампер) при напряжении до нескольких тысяч вольт, что необходимо для зондирования на значительные глубины. Канадский генератор GDD мощностью 5 кВт использовался как резервный или для питания на участках с повышенным сопротивлением грунта.



Рисунок 9 – Трансмиттер Zonge GTT-30 (США)



Рисунок 10 – Генераторная установка ZMG-30



Рисунок 11 – Instrumentation GDD 5kW (Канада)

Прием сигналов осуществлялся с помощью 16-канального цифрового ресивера GDD GRx8-32 (Рисунок 12). Данный прибор позволяет одновременно регистрировать до 16 потенциалов на разных приемных линиях, существенно повышая производительность профилей. Ресивер имеет встроенную память для хранения многоканальных данных и удобный полевой компьютер (контроллер Allegro) для управления измерениями.



Рисунок 12 – 16-канальный цифровой ресивер GDD GRx8-32

Для подключения к земле применялись специальные электроды. В качестве питающих электродов (А, В) использовали пластины из токопроводящей фольги размером $\sim 0,5 \times 0,7$ м, установленные в увлажненные ямы и разнесенные на ~ 5 м поперек профиля. Такая конструкция фактически образует электрод большой площади, уменьшая переходное сопротивление и обеспечивая стабильный ток (обычно десятки А) в грунте. Роль приемных электродов (М, N) выполняли неполяризующиеся медно-сульфатные электроды. Медный электрод погружен в насыщенный раствор CuSO_4 внутри пористой глины, что создает устойчивый электрохимический контакт с грунтом без поляризации на границе. Эти электроды сохраняют постоянный потенциал и не вносят помех при длительном пропускании тока. Аппаратура электрического зондирования позволяла проводить измерения каждые 100 м профиля одновременно по множеству каналов, регистрируя как активное сопротивление, так и индуцированную поляризацию горных пород.

Проведение электроразведочных работ (метод ВП-ЭП). Методом (ВП-ЭП) работала отдельная бригада геофизиков [1]. Перед началом измерений на концах каждого профиля устанавливался удаленный токовый электрод («бесконечность») - он выносился на значительное расстояние (сотни метров) в сторону, достаточное для приближения тока к условно поступающему в бесконечность. Второй токовый электрод (А) и цепочка приемных пар электродов (M_1N_1, M_2N_2, \dots) располагались на самом профиле. Поскольку использовалась схема «поль-диполь» (один токовый электрод удаленный,

второй перемещается вдоль профиля), развертывание приемной линии осуществлялось следующим образом: от точки старта профиля укладывались провода к последовательности из 16 диполей по 100 м каждый (итого 1,6 км приемной линии) (Рисунок 13). На концах каждого диполя в грунт вкапывались неполяризующиеся медные электроды, заполненные раствором CuSO_4 , образуя пары M-N.



Рисунок 13 – трёхэлектродная установка (Pole-Dipole)

Одним положением приемной линии можно было одновременно измерять сигнал на 16 разных расстояниях от токового электрода А (от 100 м до 1600 м), что эквивалентно различным глубинам исследования. Токовый электрод А представлял собой две параллельные пластины из металлической фольги, заложенные в лунки, пролитые соленой водой для улучшения контакта. Такая конструкция существенно снижала переходное сопротивление и позволяла прокачивать большие токи без заметного нагрева контакта. В процессе работ бригада последовательно перемещала токовый электрод А и всю приемную линию вдоль профиля: после того, как измерения на первых 16 точках были завершены, электрод А переставлялся дальше по профилю, а приемные диполи - перекладывались так, чтобы покрыть следующий сегмент из 16 точек. При каждом новом положении перед включением тока проверялось сопротивление заземления каждого электрода; при необходимости контакты повторно увлажнялись или углублялись в грунт. Измерения на станции выполнялись следующим образом: трансмиттер подавал в грунт прямоугольные импульсы тока частотой 0,125 Гц (полупериод 4 с). При протекании тока регистрировались стационарные потенциалы на каждом приемном диполе, пропорциональные кажущемуся сопротивлению среды. Когда ток отключался (на паузу между импульсами), приемник фиксировал медленный спад остаточной поляризационной разности потенциалов. Этот спад (кривая разряда) дискретизировался в 20 временных окон длительностью 2000 мс, начиная через 40 мс после отключения тока. На каждой точке получали значение кажущегося сопротивления и набор значений вызванной поляризуемости (ВП) – интегральных или дифференциальных, в зависимости от обработки. Ресивер GDD позволял записывать все каналы в цифровом виде, сохраняя их во внутренней памяти. Для улучшения отношения сигнал/шум измерения на каждой станции могли повторяться несколько раз с последующим усреднением результатов. Если же позволяли условия, оператор выполнял повторные замеры на той же точке 2 - 3 раза и сразу осреднял данные, что практиковалось как элемент полевого контроля качества. Вечером после выполнения профиля данные выгружались на ноутбук и строились предварительные псевдоразрезы

распределения сопротивлений и поляризуемости по данному профилю (в цветовой интерпретации). Эти экспресс-результаты позволяли уже в поле видеть геофизическую картину и принимать решения – о продлении профиля, сгущении сети в районе аномалии или повторном измерении подозрительных точек. В итоге организация электроразведочных наблюдений обеспечивала высокое качество первичных данных благодаря комбинации мощного источника тока, стабильных неполяризующихся электродов и контроля измерений на месте.

3.2 Контрольные наблюдения и оценка качества выполненных исследований

Контроль качества магнитной съемки. Высокая точность магнитометрических данных достигалась за счет сочетания аппаратных и методических мер. Во-первых, использование базы МВ-07 обеспечило надежную поправку за суточные вариации магнитного поля. Базовая станция непрерывно записывала изменение поля с амплитудой вариаций до ~30-50 нТл за сутки; эти данные впоследствии использовались для коррекции всех полевых измерений. Точность фиксации вариаций была очень высокой (порядка 0,1 нТл), поскольку место установки станции было тщательно выбрано - вдали от техногенных помех и локальных аномалий, с градиентом поля не более 1 нТл/м. Во-вторых, ежедневные наблюдения на контрольном пункте подтвердили стабильность показаний переносных магнитометров. Разница между утренними и вечерними значениями на КП не превышала долей нТл, что говорит об отсутствии значимого дрейфа нуля приборов за день. В-третьих, в ходе съемки применялась практика повторных измерений. Оператор магнитометра, пройдя профиль, мог снова измерить некоторые контрольные участки или пикеты для оценки воспроизводимости. Схема сети профилей включала пересечения - точек, где профили пересекаются между собой. После завершения полевых работ эти пересечения использовали для *сведений по контуру*: программа Oasis montaj интерполировала значения поля к узловым точкам пересечения и вычисляла расхождения (невязки) между независимыми измерениями в одной и той же географической точке. Были исключены лишь случаи с очень большими локальными градиентами аномалий, которые заведомо приводят к отличиям при небольшом рассогласовании местоположения. Статистическая обработка показала, что среднеквадратическая ошибка разовых измерений на профилях не превышает ~2-5 нТл. Для ~200 повторных измерений на профиле №2 получена $\sigma \approx 2,04$ нТл, а по результатам 396 контрольных (независимых пересечений) на профиле №13 – $\sigma \approx 4,75$ нТл. Эти значения соответствуют требуемой по ТЗ точности ± 5 нТл и даже лучше нее. Рассчитанная совокупная точность съемки превосходит нормативные требования инструкций по магниторазведке. Следует отметить, что качество магнитных данных высокое: они согласованы по уровням, очищены от временных дрейфов и случайных выбросов, а

систематическая погрешность в пределах несколько мТл не влияет на геологическую информативность карт.

Меры по повышению качества электроразведочных работ. Методика (ВП-ЭП) изначально включает несколько встроенных приемов контроля. Прежде всего, на надежность данных влияет величина контактного сопротивления электродов. В работе этому уделялось особое внимание: перед каждым новым измерением токовые электроды основательно увлажнялись, а при необходимости – углублялись, пока их сопротивление не снижалось до приемлемых величин (несколько десятков Ом). Высокая мощность генераторов позволяла поддерживать стабильно большой ток даже при существенном общем сопротивлении цепи; однако минимизация переходного сопротивления снижала уровень шумов и индуцированных поляризационных эффектов на контакте. Для приемных (неполяризующихся) электродов основной фактор качества – правильная подготовка медного купороса и отсутствие пузырьков воздуха в пористой корзине. Бригада регулярно проверяла состояние раствора CuSO_4 , добавляла воду по мере необходимости, следила за чистотой контакта. Вторым важным аспектом было повторение измерений. Если полевая обстановка позволяла, на точке делалось 2 - 3 импульса тока, и полученные значения усреднялись при вычислении кажущегося сопротивления и поляризуемости. Ресивер GDD автоматически вычислял среднее и оценивал разброс (сигма) между отдельными реализациями. В случае превышения разброса (порог 5 процентов), оператор мог продолжить подачу импульсов до стабилизации результата. Третьим звеном контроля было предварительное моделирование прямо в поле. После завершения профиля геофизики выполняли быструю инверсию полученных псевдоразрезов – строили предварительные геоэлектрические разрезы, пусть грубые, но отражающие основные аномалии. Сравнение этих инверсий с ожидаемым геологическим разрезом служило проверкой: если какие-то аномальные зоны выглядели подозрительно (одиночный «шип» аномально высокого заряда, не связанный с соседними точками), это могло указывать на ошибку измерения, и тогда по возвращении на базу такой профиль или его участок планировалось произвести повторный замер. Однако в ходе работ в 2014 г. подобных существенных артефактов не выявлено – качество сырьевых данных было достаточным, и все профили были инвертированы успешно с первого раза. На этапе камеральной обработки дополнительно оценивалась сходимость данных по смежным профилям и повторяемость аномалий. Карты изолиний поляризуемости на заданных горизонтах плавно отображают геофизические поля, без «скачков» между профилями, что свидетельствует об отсутствии систематических ошибок при их выполнении. Все вышеперечисленное означает, что электроразведочная съемка проведена с высоким качеством, а полученные аномалии являются достоверными и геологически обусловленными, а не артефактами измерений.

Контроль качества автогамма-спектрометрии. При автогамма-съемке основными источниками погрешностей могут быть дрейф измерительного канала, вариации естественного фона (из-за изменений радонового поля или

космического излучения), а также статистические шумы при малом времени счета. В проведенных работах эти факторы были сведены к минимуму за счет специально предусмотренных процедур. Перед началом съемки прибор RSX-5 прошел полное тестирование и калибровку: 22 июля 2014 г. бригада выезжала на специализированный полигон Айдарлы, где на известных эталонных площадках проверили отклик спектрометра на горные породы с разным содержанием радиоэлементов. Это гарантировало корректность шкалы преобразования счета в концентрации ^{40}K (проценты), ppm ^{238}U , ppm ^{232}Th . Дополнительно 31 июля, по завершении основных наблюдений, была произведена запись фонового спектра на берегу р. Алматинки - в месте, где радиационный фон близок к космическому. Этот «нуль-спектр» использовали для вычитания постоянной составляющей (космического фона) при окончательных расчетах. Во время самой съемки каждый день начинался с проверки спектрометра по внутреннему калибровочному источнику: убеждались, что фото ^{40}K находится в требуемом канале, при необходимости выполняли автоматическую подстройку (стабилизацию) усиления. Сами измерения, благодаря большому объему кристаллов, имели хорошую статистическую точность: при 1-секундной экспозиции относительная погрешность определения содержания ^{40}K составляет порядка 3 процентов, а ^{232}Th ~4 процентов. Уран обычно определяется менее точно из-за меньшего содержания - в наших измерениях средняя относительная погрешность составила до ~7 процентов, что считается вполне удовлетворительным. Повторные измерения на контрольном профиле (пройденном дважды в разные дни) показали практическое совпадение кривых ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th - расхождения не превышали 1-2 σ случайной погрешности, то есть лежали в пределах нескольких процентов. Для выравнивания данных между разными днями использовали результаты связующих профилей: выяснилось, что фоновые значения на утро и на конец дня отличаются незначительно (в рамках суточных вариаций радиоактивного газа радона). При обработке данные разных дней были нормированы, т.е. приведены к единой базе, с опорой на эти пересечения. В итоге по каждому элементу (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) и по интегральной мощности дозы получили согласованные наборы, пригодные для построения сводных карт. Подтверждением высокого качества автогамма-спектрометрических данных служит и оценка ошибок по методике повторных измерений: средняя квадратическая погрешность результатов съёмки составила лишь 3 - 5 процента, что полностью удовлетворяет стандартам МАГАТЭ для гамма-съемки и даже превышает их (для наземной съемки допустимы большие отклонения, но из-за плотной сети и большого детектора ошибок возникало меньше). Данные автогамма-съемки отличаются высокой достоверностью и не требуют введения каких-либо дополнительных поправок кроме стандартных.

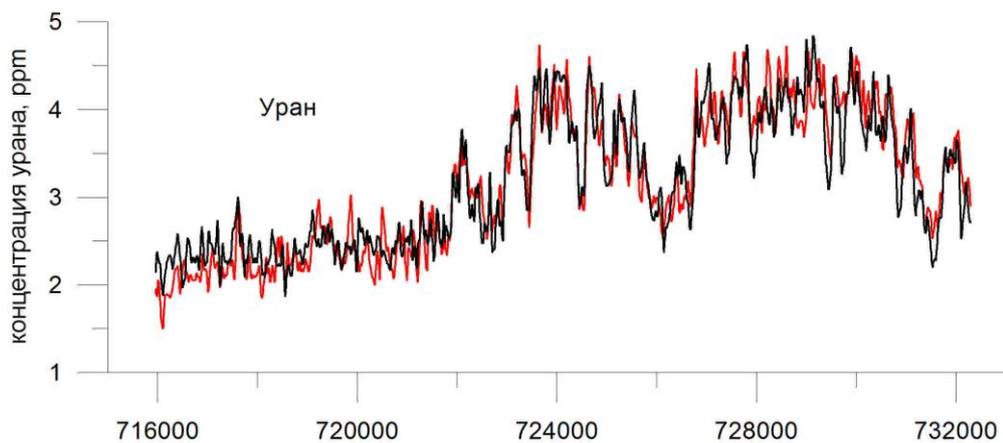
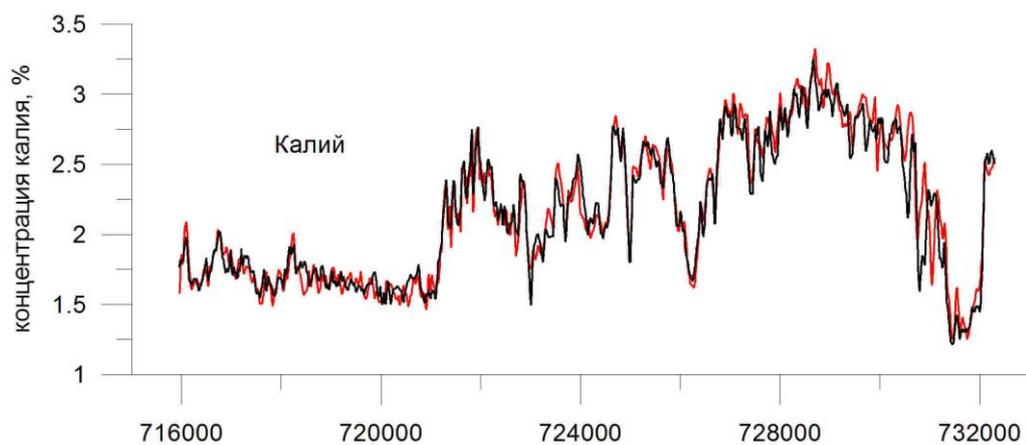
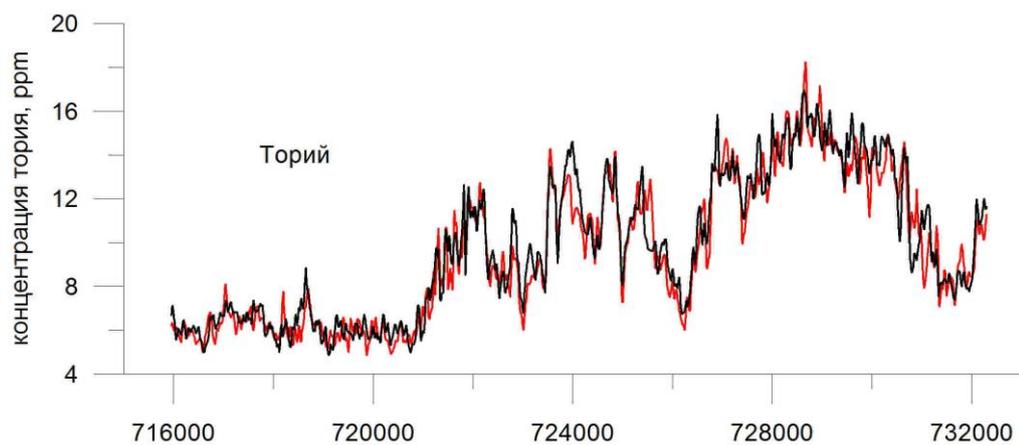
В ходе работ выполнена оценка точности автогамма-спектрометрических измерений. В (Таблица 5) приведены полученные средние значения содержания радиоэлементов и погрешности по одному из тестовых профилей.

Таблица 5 – Оценка точности автогамма-спектрометрических измерений (1 профиль)

Элементы	Средняя концентрация по элементам	Средняя квадратическая погрешность единичных измерений	Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического	Средняя относительная погрешность съемки
⁴⁰ K	2.102 процента	0.087	0.039	0.032
²³⁸ U	2.934 ppm	0.260	0.116	0.069
²³² Th	9.354 ppm	0.531	0.237	0.044
Общий канал	1922.35 nGy/h	77.65	34.72	0.032

Среднеквадратичная ошибка разового измерения составила около $\pm 0,09$ процентов для ⁴⁰K, $\pm 0,26$ ppm для ²³⁸U и $\pm 0,53$ ppm для ²³²Th, что в относительном выражении не превышает 3 - 7 процентов. Средняя относительная погрешность по профилю для ⁴⁰K и суммарного гамма-поля оценивается ~ 3 процента, для ²³²Th ~ 4 процента, для ²³⁸U ~ 7 процента. Такие значения свидетельствуют о высокой воспроизводимости результатов. Повторные съемки на контрольных профилях (профиль №1, выполненный 13 и 14 июля) показали хорошее совпадение кривых распределения ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th при повторных измерениях. Примененная методика обработки (включая регулярный контроль точности и калибровку по фону) обеспечила надежность и воспроизводимость гамма-спектрометрических данных.

Сопоставление результатов повторных гамма-спектрометрических измерений. Графики распределения ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th по контрольному профилю №1 (Рисунок 14), снятому в разные дни (13 и 14 июля 2014 г.), практически совпадают, что указывает на высокую стабильность прибора и воспроизводимость данных.



Сопоставление рядовых и контрольных измерений автомобильной
гамма-спектрометрической съемки

Контрольный профиль №1, измерения 13 и 14 июля 2014 г.

Рисунок 14 – Оценка точности автогамма-спектрометрических измерений на контрольном профиле 1

4 Камеральные работы и геологические результаты

После завершения полевых работ все полученные геофизические данные были систематизированы, обработаны с использованием специализированного программного обеспечения и интерпретированы в совокупности с геологической информацией. Обработка включала: для магнитных данных - коррекцию суточных вариаций, фильтрацию аномалий, построение карты поля; для электроразведки - построение псевдоразрезов и карт изолиний, решение обратных задач (инверсии) для получения распределения физических параметров в пространстве, а также построение совмещенных геолого-геофизических разрезов. Интерпретация проводилась с опорой на геологические данные (бурение, обнажения) и с учетом комплексного анализа всех методов.

4.1 Обработка и интерпретация данных магниторазведки

Обработка полевых магниторазведочных данных. После завершения работ на профиле данные оперативно переносились для обработки. Каждый вечер, по возвращении группы на базу, вся информация с полевых магнитометров переписывалась на ноутбук. Туда же загружались и записи магнитовариационной станции МВ-07 за соответствующий день. Первичная обработка осуществлялась с использованием специализированного программного обеспечения Geosoft Oasis Montaj [7]. Данные измерений импортировались в базу Oasis Montaj, где сначала выполнялось редактирование: из временных рядов удаляли явные выбросы и помехи значительной амплитуды. После очистки от помех в измеренные значения вводились необходимые поправки. Применялась поправка за суточные вариации - путём вычитания соответствующих изменений, зарегистрированных базовой станцией МВ-07. Далее к данным применялась поправка за нормальное геомагнитное поле: из показаний вычиталась величина поля, рассчитанная по модели IGRF-2010 для каждой точки наблюдения. Значения нормального поля определяли с учётом координат и высоты каждой точки над уровнем моря (по данным GPS, относительно эллипсоида WGS-84). В результате этих операций получено аномальное магнитное поле участка (отклонения наблюдаемого поля от гладкого глобального поля, очищенные от временных вариаций). Все этапы обработки сопровождались контролем качества, обеспечивая готовность данных для дальнейшей интерпретации.

Проведены специальные мероприятия для оценки точности и воспроизводимости результатов магнитной съёмки. Согласно требованиям проекта, суммарная погрешность измерений не должна превышать $\pm 3-5$ нТл. Расчёт достигнутой точности выполнен стандартными методами по результатам повторных и контрольных измерений на профилях. На одном из профилей (Т2) было выполнено 200 повторных определений аномального поля: рассчитанное среднеквадратическое отклонение (СКО) между первичными и повторными

значениями составило $\sim 2,042$ нТл. (При этом в статистику включались только пары измерений, выполненные в пределах ~ 3 м друг от друга, чтобы исключить влияние сильных градиентов поля). На другом профиле (Т13) выполнено 396 контрольных измерений (то есть повторное прохождение линии в другое время); полученное СКО между двумя наборами данных составило $\sim 4,752$ нТл. Несколько большее значение в последнем случае обусловлено сложным рельефом аномалий на этом профиле. Помимо классических оценок, использован анализ невязок на пересечениях профилей: система Oasis Montaj вычислила разности значений поля в точках пересечения обычных и секущих линий (с предварительной интерполяцией на узлы пересечений). Всего было проанализировано 115 пересечений профилей (исключены точки с заведомо большими градиентами в их окрестности); среднеквадратическая величина невязки составила $\pm 3,333$ нТл. Данная оценка также укладывается в заданный допуск и свидетельствует, что достигнутая точность съёмки соответствует, а местами превышает проектные требования. При любых способах оценки погрешности - и традиционных, и современных - точность итоговых магнитных аномалий оказалась порядка нескольких нанотесла, что считается отличным результатом. Дополнительное выравнивание (уровенирование) магнитной сети не потребовалось: было сочтено, что в условиях высокой градиентности поля принудительная увязка профилей может исказить картину аномалий в спокойных зонах. Проверка контрольных точек показала отсутствие систематических смещений, и полученные аномальные значения приняты для окончательного построения карты.

Блок-схема обработки магнитометрических данных показана на рисунке 15.

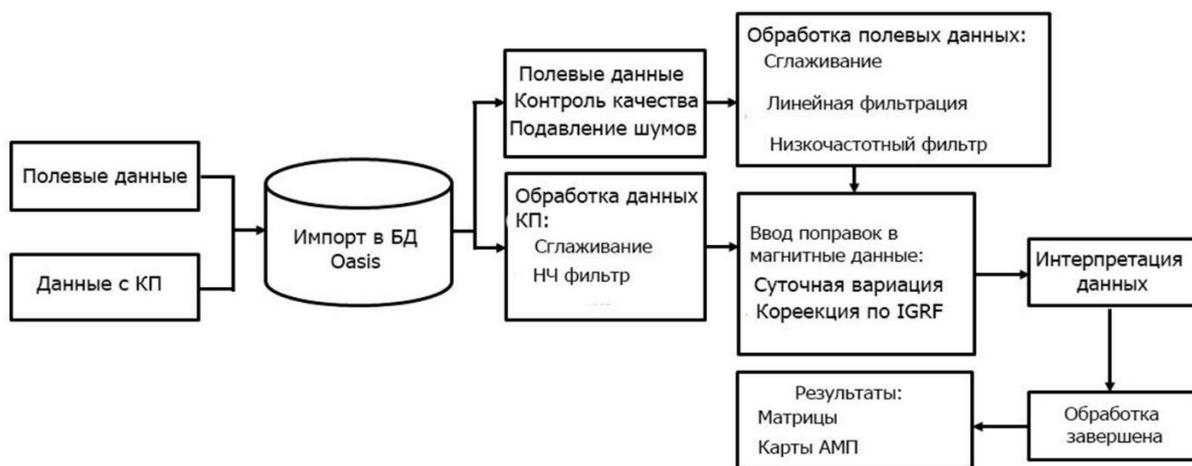


Рисунок 15 - Блок-схема обработки данных магнитометрии

Качественная интерпретация данных магниторазведки. Карта аномального магнитного поля участка Беспокы (Рисунок 16) отражает сложное строение магнитного поля данной территории. Поле характеризуется

значительной неравномерностью и высокой градиентностью - значения магнитной аномалии изменяются на десятки нанотесла на коротких расстояниях.

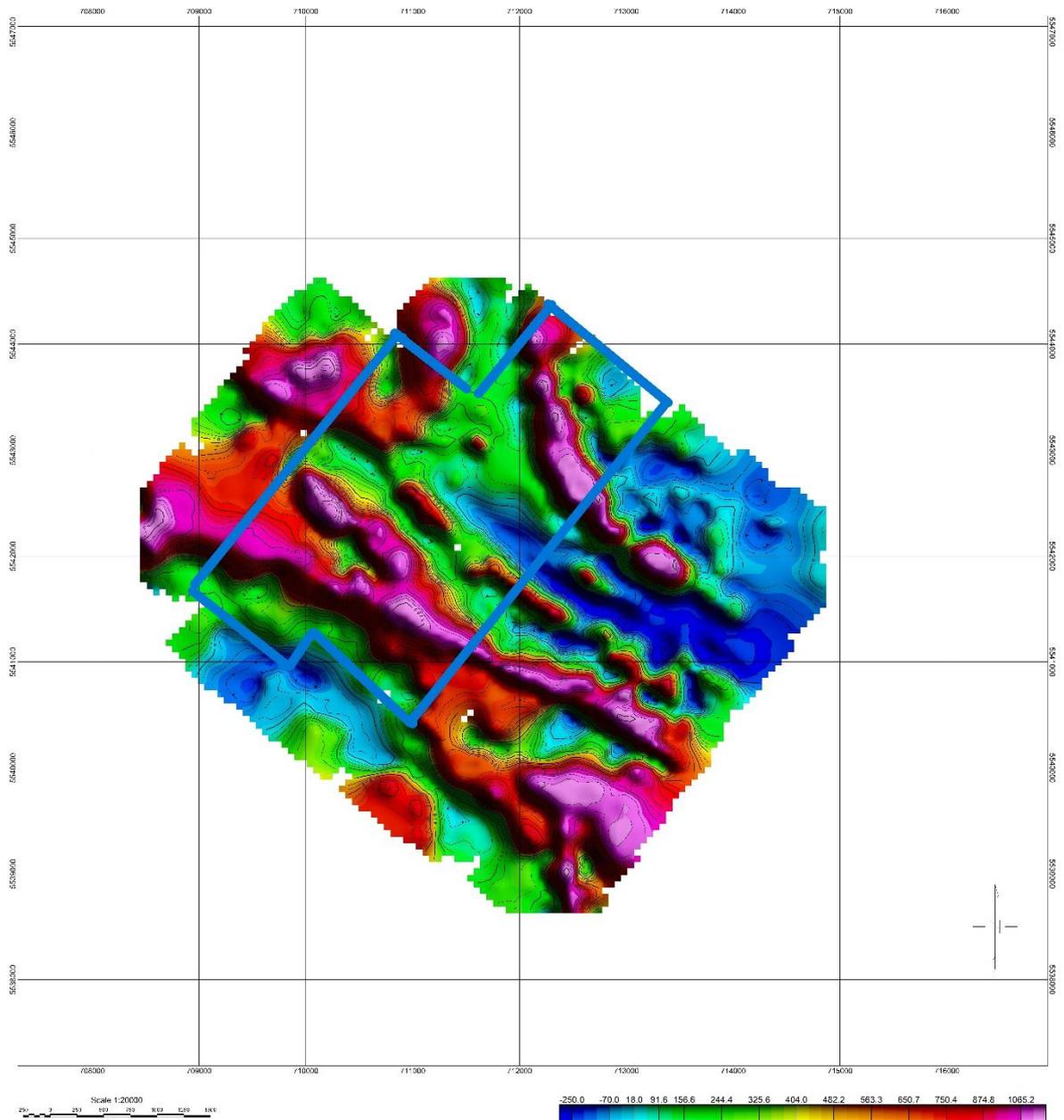


Рисунок 16 - Аномальное магнитное поле участка Бешоки.
(Синими линиями обозначен контур электроразведочной съемки)

На карте заметно чередование зон повышенной и пониженной магнитной аномалии, образующих мозаично-полосчатый рисунок. Прослеживаются преимущественно субпараллельные вытянутые аномальные зоны, ориентированные в общем северо-западном направлении (близком к простиранию местных геологических структур). Отдельные аномальные объекты достигают амплитуды в несколько десятков нанотесла и ограничены

крутыми градиентами, что указывает на наличие резких геологических границ в недрах. Аномальное поле имеет «блоковый» характер - чередуются участки с резко различной намагниченностью, разделённые узкими переходными зонами.

Выявленные магнитные аномалии интерпретированы с позиций их геофизической природы, установлено какими причинами они могут быть обусловлены. Положительные (высокие) магнитные аномалии обычно связаны с повышенным содержанием ферромагнитных минералов в породах магнетита или пирротина. Наличие такого магнитного «материала» в недрах ведёт к тому, что наблюдаемое поле усиливается над соответствующим телом, создавая локальный максимум. Ярко выраженные розово-красные зоны на карте соответствуют участкам, где в породах присутствует значительное количество магнетита/пирротина или других высокомагнитных компонентов. Отрицательные (пониженные) аномалии указывают на участки, где горные породы либо практически не содержат магнитных минералов, либо претерпели разрушение магнитной составляющей в ходе геологических процессов. Крупная область синего цвета на карте может отражать либо массив слабомагнитных пород (гранитоидов), либо зону интенсивной гидротермальной изменённости, в которой магнетит окислен и разрушен. Подобные магнитные минимумы часто ассоциируются с тектоническими разрушенными зонами (разломами), заполняемыми немагнитными минералами (кварцем, глиной и т.д) или вторичными продуктами, в результате чего магнитная восприимчивость там резко падает. В центрально-восточной части участка прослеживается протяжённая полоса пониженных аномалий, ограниченная с обеих сторон зонами повышенного поля; это может свидетельствовать о наличии крупного разлома, либо раздела литологических толщ. Линейные градиентные переходы между контрастными аномалиями, наблюдаемые на карте, вполне могут соответствовать геологическим контактам пород или тектоническим разломам. Как показывают исследования, магнитные дисконтинуитеты (резкие границы аномального поля) зачастую указывают на разломы, литологические границы и дайки, помогая выявить местную структуру района. Вытянутые аномальные зоны субширотного и субмеридионального простирания, чередующиеся на участке, можно сопоставить с чередой тектонических блоков и нарушений. Ряд параллельных локальных максимумов (на юго-западе карты) может отражать систему субпараллельных пластовых или жильных тел, обогащённых магнетитом. А зональный магнитный минимум, разделяющий их, вероятно соответствует широтному разлому, вдоль которого магнитные породы отсутствуют или разрушены. Структура аномального поля даёт ценную информацию о внутренних границах: на основе карты можно очертить предполагаемые позиции разломов и контактов, даже если они не проявлены на поверхности.

Особое внимание при интерпретации уделено возможной связи выявленных аномалий с рудными объектами, в частности - с золотосульфидной минерализацией известного месторождения Бесшоки. Магнитная съёмка часто эффективно дополняет поиски золоторудных объектов. Магнитные аномалии

тесно связаны с геологическими структурами, контролирующими рудоносность, поэтому их анализ помогает локализовать перспективные зоны. В районе Бешоки золотоносные руды пространственно связаны с сульфидной минерализацией; если в составе руды присутствует пирротин (магнитный сульфид FeS), то рудное тело может проявляться на магнитной карте как локальное повышение. Мировой опыт показывает, что аномалии магнитного поля нередко совпадают с зонами пирротинового оруденения, ассоциированного с золотом. Золоторудные тела обычно приурочены к разломам, раздвигам и другим тектоническим нарушениям, которые служат каналами для гидротерм, их положение часто соответствует линейным геофизическим аномалиям. После проведения магниторазведочных работ на участке Бешоки полученная карта аномального значения магнитного поля позволила уточнить конфигурацию рудоконтролирующих структур. Главная зона золотосульфидного оруденения, установленная ранее по данным бурения и геологии, приходится на область сложного магнитного аномального поля - здесь наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии, образующие аномальный градиентный пояс. Данная зона выделяется на карте чередованием небольших по площади высоких и низких аномалий, что соответствует мозаике магнитных включений и разуплотнённых участков. Это согласуется с представлением о разломной природе рудного тела: рудный процесс мог сопровождаться как привнесением магнитных минералов (пирротина) в некоторых участках, так и разрушением исходного магнетита во вмещающих породах. Линия рудного тела проявляется не одной простой аномалией, а комплексом аномалий, но её общее положение совпадает с протяжённой линейной структурой, отображённой магнитным полем. Магнитная съёмка успешно зафиксировала структуру, контролирующую руду, и подтвердила её простирание за пределы известных контуров. Анализ магнитного поля выявил и другие схожие линейные аномалии в пределах участка, ранее не отмеченные геологами. Данные аномалии, структурно параллельного залеганию относительно главному разлому, могут указывать на присутствие дополнительных, пока не обнаруженных рудных зон. Сопоставление карты аномального поля с геологическими данными используется для поиска новых перспективных объектов.

Распределение магнитных аномалий по площади позволяет сделать ряд геологических выводов и уточнений. Во-первых, чётко прослеживается структурная зернистость северо-западного простирания, согласующаяся с региональной тектоникой района. Крупные тектонические нарушения и границы слоев, вероятно, ориентированы именно в этом направлении, и магнитная съёмка их хорошо зафиксировала. Во-вторых, высокая градиентность поля указывает на мелкозалегавший характер источников аномалий: магнитные неоднородности находятся неглубоко и обусловлены либо контрастами между приповерхностными породами, либо небольшой мощностью перекрывающих отложений. Данный факт согласуется с геологическим строением - выходами метаморфических и магматических пород на дневную поверхность. В-третьих, сопоставление с геологической картой (по имеющимся материалам) показывает

в основном хорошую корреляцию: многие линейные аномалии совпадают с нанесёнными на карту разломами и контактными зонами. В местах, где карта аномального значения магнитного поля выявляет новые элементы (которые не отображены геологически), предлагается внести коррективы - вероятно, на участке имеются скрытые разломы, ранее не картированные. Качественная интерпретация аномального магнитного поля существенно уточнила геологическую модель участка. Были детализированы положения границ литологических тел и выявлены дополнительные тектонические нарушения, невидимые по поверхностным данным. Полученные сведения прямо влияют на прогноз рудоносности: раз магнитная съёмка указала, где проходят потенциально рудоконтролирующие структуры, эти зоны становятся приоритетными для дальнейших исследований (геохимических поисков, геофизических профилей или бурения). Результаты интерпретации подтвердили информативность магнитной разведки на данном объекте: комплексный анализ магнитных аномалий и их корреляция с геологическими данными помогли пониманию локальной геологии и выделению перспективных рудных зон. Это демонстрирует эффективность метода при поиске золоторудных месторождений в сложных геологических условиях.

Для уточнения пространственного положения глубинных источников магнитных аномалий на участке Беспоки была построена карта продолжения магнитного поля вниз на 50 метров с применением фильтра Downward Continuation (пересчёта поля в нижнее полупространство) в среде Oasis Montaj (Рисунок 17). Данный метод позволяет усилить вклад глубинных объектов в общее магнитное поле и минимизировать влияние поверхностных неоднородностей и шумов.

На полученной карте наблюдается усиление и локализация высокоамплитудных аномалий, особенно в центральной и северо-западной частях участка. Эти аномалии приобретают более чёткие контуры и высокие градиенты, что свидетельствует о наличии устойчивых глубинных источников, обладающих повышенной магнитной восприимчивостью. Характер подобных аномалий позволяет предположить их связь с интрузивными телами или зонами гидротермально-метасоматических изменений, насыщенными ферромагнитными минералами (например, магнетитом).

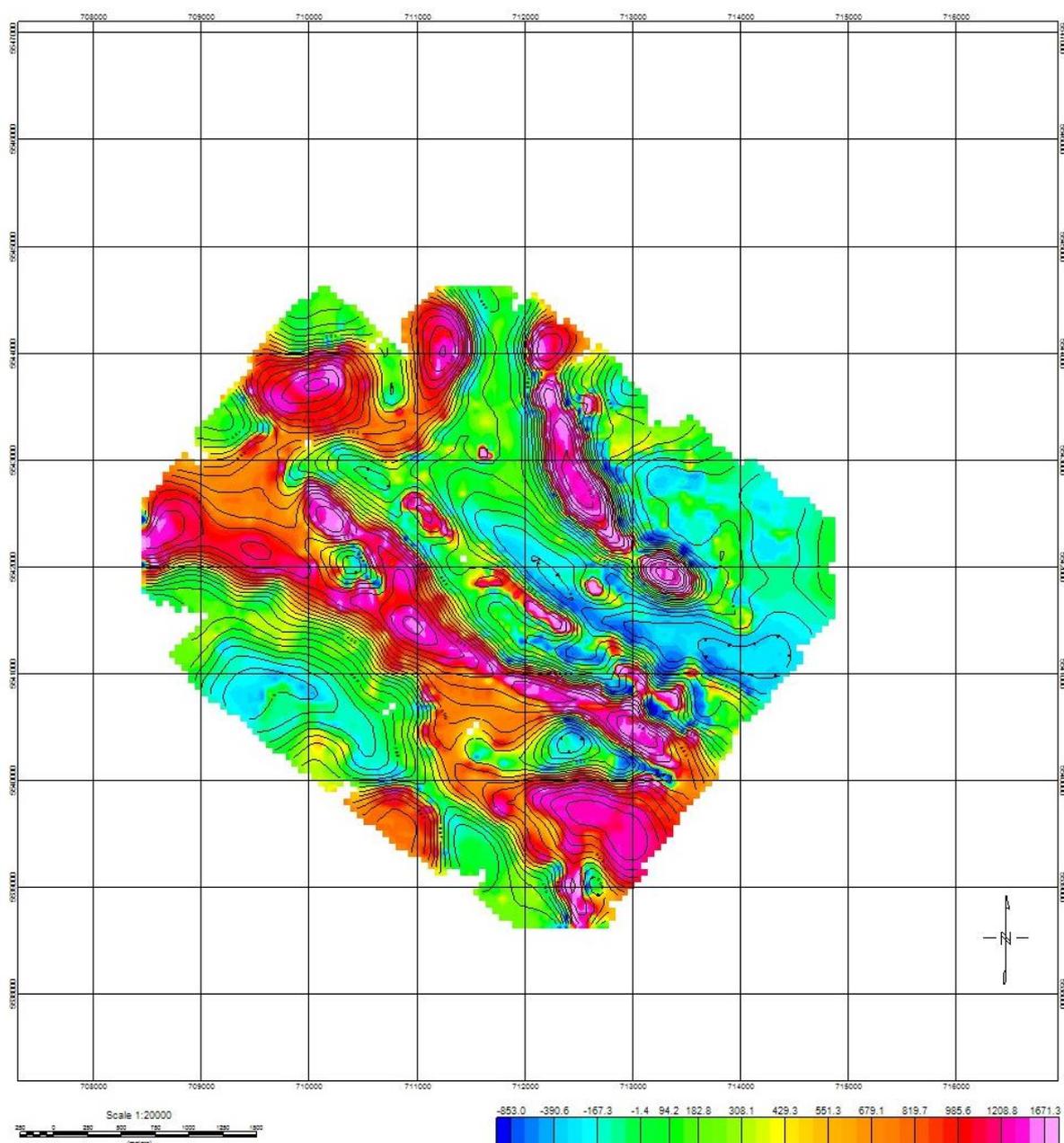


Рисунок 17 – Результаты пересчёта поля в нижнее полупространство – Downward Continuation (50 м.)

Особого внимания заслуживают вытянутые линейные зоны с резким перепадом значений, ориентированные преимущественно в северо-западном и северо-восточном направлениях. Они интерпретируются как возможные тектонические разломы и контактные границы между геологическими блоками. Следует подчеркнуть, что сами разломы, как правило, характеризуются пониженными значениями магнитного поля, но в пределах их влияния могут быть локализованы глубинные аномалии, связанные с внедрением магматических тел или сульфидной минерализацией. Разломы могут структурно

контролировать размещение высокомагнитных тел, играя ключевую роль в формировании рудных объектов.

С целью выявления региональных трендов и устранения локальных высокочастотных возмущений магнитного поля на участке Бешоки была построена карта продолжения вверх на 100 метров с применением фильтра Upward Continuation (пересчёта поля в верхнее полупространство) в программном обеспечении Oasis Montaj (Рисунок 18). Этот метод позволяет как бы «удалиться» от источников поля, что способствует сглаживанию мелкомасштабных аномалий и акцентирует внимание на более глубоких, протяжённых структурах.

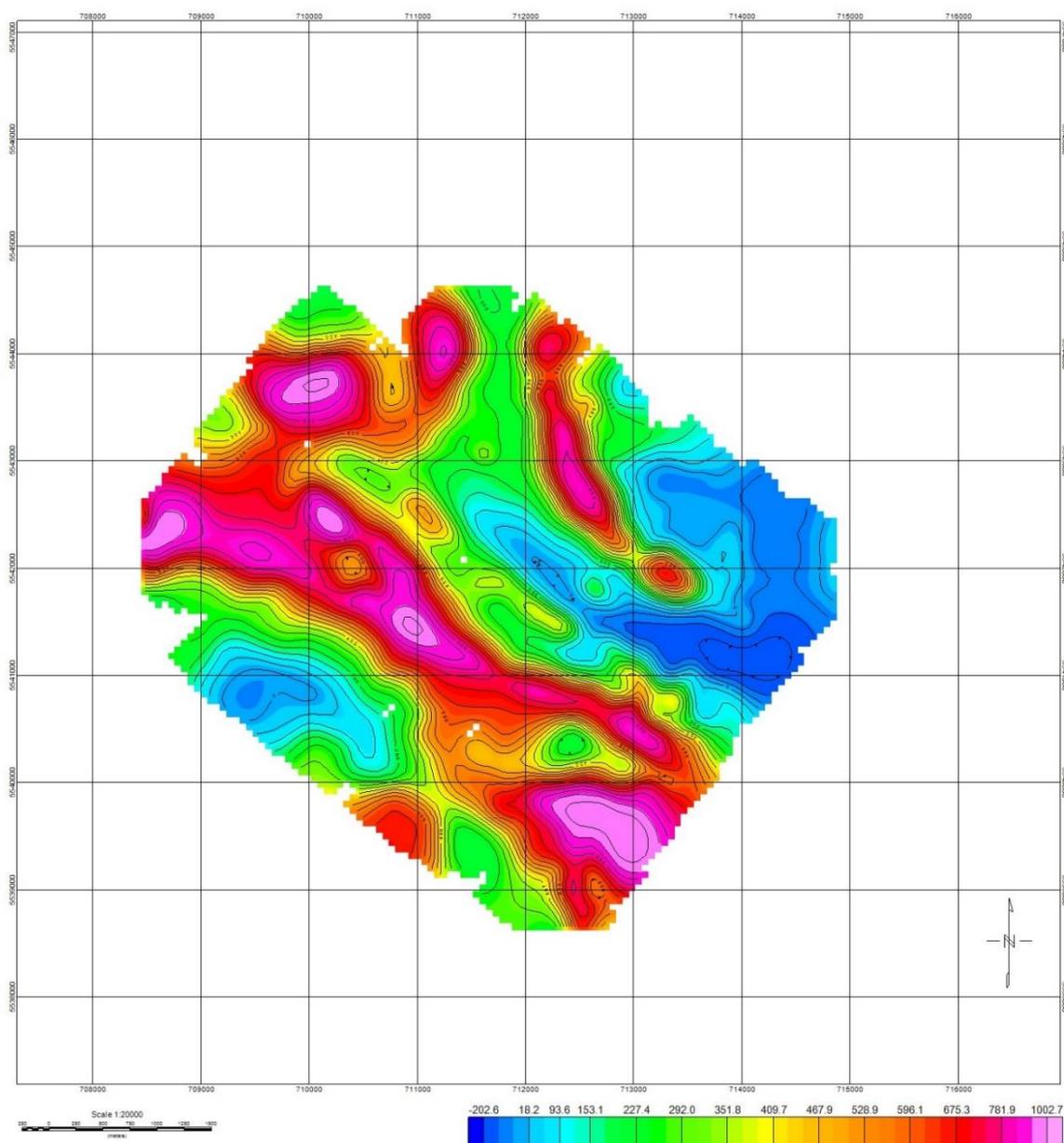


Рисунок 18 – Результаты пересчёта поля в верхнее полупространство – Upward Continuation (100 м.)

На полученной карте магнитное поле характеризуется более сглаженным рисунком по сравнению с первичной картой, а локальные высокочастотные детали существенно приглушены. При этом чётко выделяются широкие аномальные зоны с протяжёнными градиентами, отражающие региональные особенности распределения глубинных источников. Аномалии приобретают более вытянутый и расплывчатый характер, что типично для удалённого проецирования глубинных объектов. Особенно выделяются крупные положительные аномалии в центральной и северо-западных частях участка. Их устойчивость и выраженность даже после сглаживания подтверждает наличие мощных глубинных магнитных источников, вероятно, связанных с крупными интрузивными телами или зонами магматической аккумуляции. Восточная часть участка на данной карте выражена менее контрастно, что может указывать на уменьшение мощности магнитных тел в этом районе либо на наличие более слабомагнитных пород в разрезе. Это подтверждается и гамма-спектрометрическими данными, где в восточной части зафиксированы средние или низкие уровни калия и тория, в отличие от центральной зоны.

Основные аномалии ориентированы в северо-западном и северо-восточном направлениях, что согласуется с направлением региональных разломов. При этом сами разломы, как правило, проявляются на магнитной карте как зоны понижения или резкого изменения поля, но вдоль их простирания возможно размещение глубинных магнитных тел, сформированных в процессе внедрения интрузий или минерализации. Это подтверждает структурно-контролирующую роль тектоники в формировании аномального магнитного фона.

4.2 Обработка и интерпретация данных автогамма-спектрометрии

Обработка данных автогамма-спектрометрии. Базовый уровень излучения (космический фон и собственный шум приборов) определялся по измерениям в эталонном пункте «фон» (вне участка, на р. Большая Алматинка), и затем вычитался при обработке из полевых данных для компенсации дрейфа и постороннего фона. 22 июля 2014 г. спектрометр прошёл тестирование на полигоне Айдарлы (контрольная площадка с известными радиоэлементными аномалиями) для проверки калибровки, после чего 31 июля была записана линия фона. Обеспечивалась надёжная привязка показаний прибора к абсолютным значениям содержания радиоэлементов.

Первичные данные автогамма-съемки сохранялись в цифровом виде в памяти спектрометра и затем переносились на компьютер для камеральной обработки [4]. Для каждого измеренного пункта были получены значения эквивалентного содержания калия (^{40}K , проценты), урана (^{238}U , ppm) и тория (^{232}Th , ppm), а также мощность экспозиционной дозы (нГр/ч) по совокупности всех энергий гамма-спектра. Обработка данных включала фильтрацию сигналов, вычитание базового фона и приведение значений к единицам содержания. Файлы

сырых спектров (.dra, rfl и др.) были сконвертированы в формат, совместимый с ГИС-программами (через ПО RadAssist и пакет Geosoft), после чего на их основе построены картографические изображения распределения радиоэлементов. Для визуализации результатов применялось контурное картирование: значения ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th и гамма-фона интерполировались между профилями и отображались в виде изолиний и цветовых полей.

Интерпретация данных автогамма-спектрометрии. Результаты автогамма-съемки представлены в виде картограмм распределения основных природных радиоэлементов – калия (^{40}K), урана (^{238}U) и тория (^{232}Th), а также карты суммарного гамма-излучения (мощности дозы) по площади участка. Эти данные отражают геохимическую неоднородность приповерхностных пород и позволяют сделать выводы о литологическом строении и зонах изменения (метасоматоза) в пределах обследованной территории.

В (Рисунок 19) показана карта распределения калия (^{40}K , проценты). Хорошо выражена зональность: юго-западная часть участка характеризуется наиболее высокими концентрациями ^{40}K (более 2,5 процента), тогда как к северо-востоку содержание калия понижается до фоновых значений (<1,5 процента). Область повышенного ^{40}K на юго-западе пространственно совпадает с выходами гранитоидных пород и зонами калиевого метасоматоза.

Согласно геологическим данным, в юго-западном секторе залегают позднепалеозойские граниты и гранодиориты, которые обогащены ^{40}K и ^{232}Th . Северо-восточная часть покрыта чехлом четвертичных и верхнекайнозойских осадков (глины, делювий), бедных радиоэлементами - отсюда низкий уровень ^{40}K -излучения в этой зоне. Между этими областями наблюдается переходная полоса со средними значениями ^{40}K (~1,5-2 процента), соответствующая, вероятно, зонам развития метаморфических толщ и эффузивов среднего состава. (Рисунок 20) (графики по ^{40}K) иллюстрирует изменение содержания калия вдоль отдельных профилей - кривые подтверждают, что максимум ^{40}K приурочен именно к юго-западным отрезкам профилей, тогда как на северо-восточных окончаниях профилей значения падают до ~1 процента.

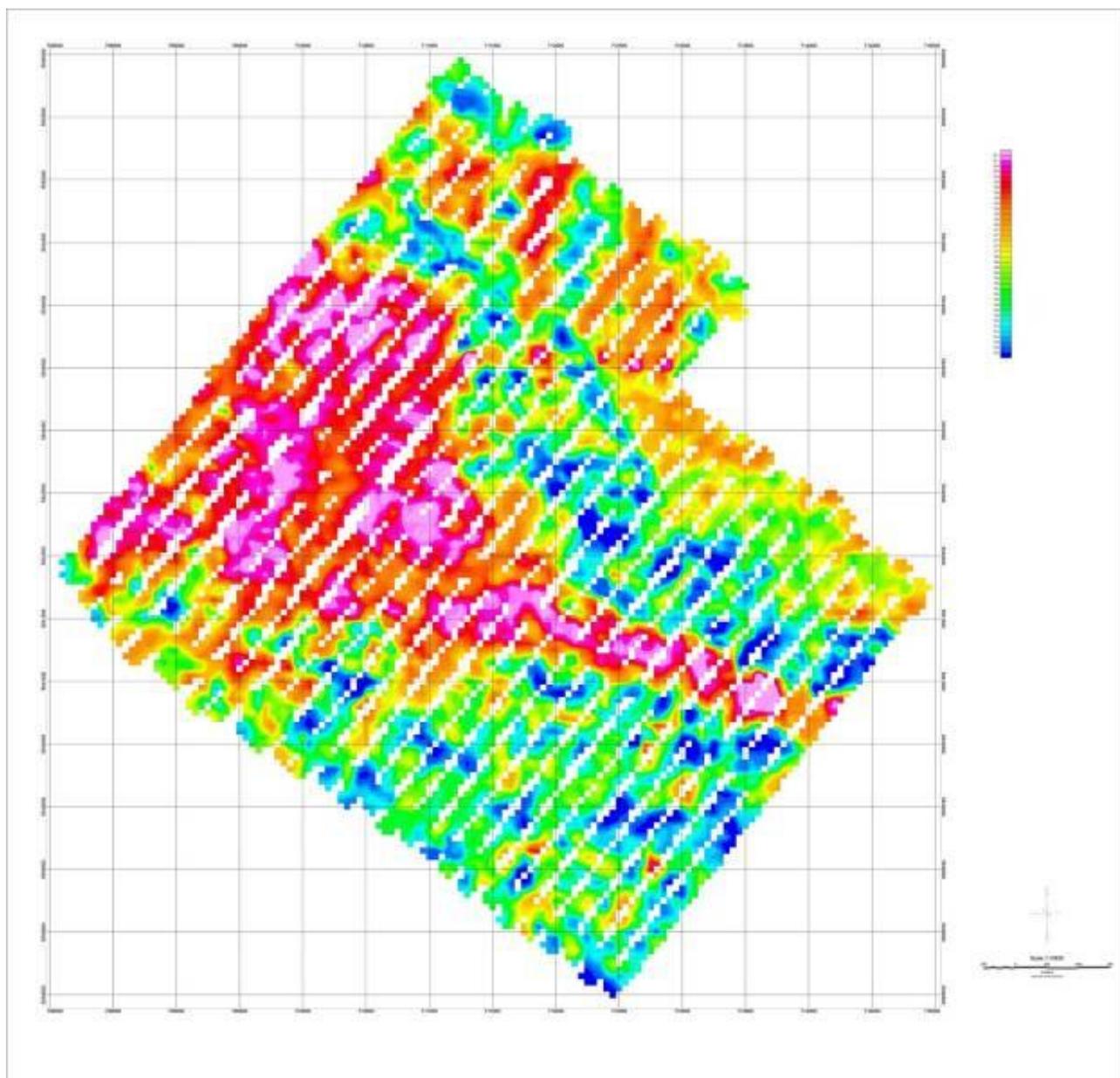


Рисунок 19 - Карта распределения эквивалентного содержания калия (^{40}K , проценты) на участке Бесшоки

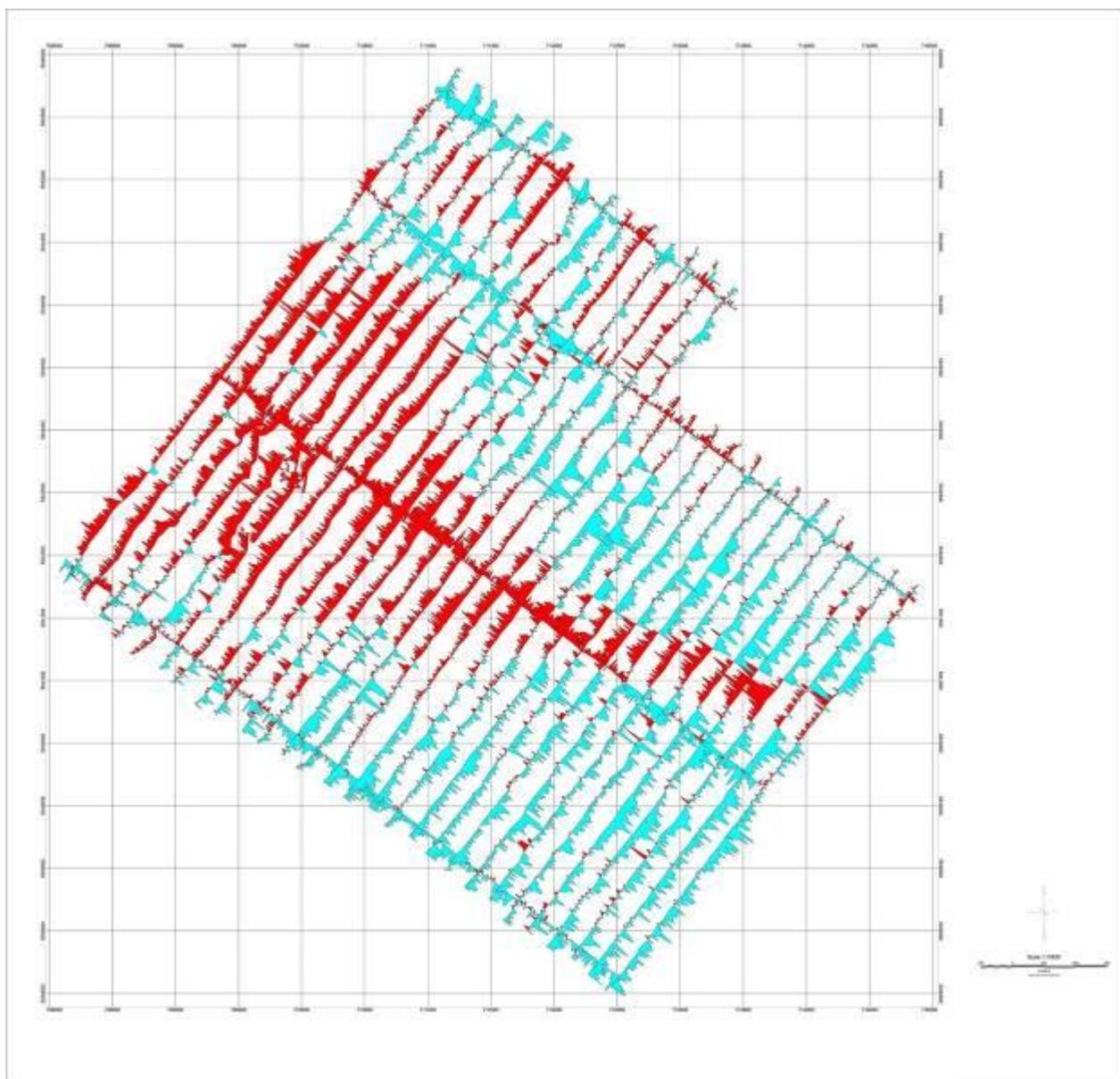


Рисунок 20 - Графики содержания калия-40 вдоль профилей

Такой характер распределения калия указывает на наличие крупной геологической структуры (интрузивного массива) в юго-западной части, граница которого проходит примерно посередине участка в направлении северо-запад-юго-восток.

Карта распределения эквивалентного содержания калия (^{40}K , проценты) на участке Бешоки (Рисунок 19). Отмечается зона повышенного содержания ^{40}K на юго-западе и понижение до фоновых значений на северо-востоке. Аномалия (^{40}K) на юго-западе соответствует области выхода гранитоидов.

Графики содержания калия вдоль профилей (Рисунок 20). Приведены примеры распределения ^{40}K (проценты) по длине нескольких профилей. Максимумы наблюдаются на юго-западных участках, минимумы - на северо-востоке, что согласуется с картой (Рисунок 19).

В (Рисунок 21) показана картограмма содержания урана (^{238}U , в ppm). В целом распределение ^{238}U по площади сходно с калиевым полем, но имеются и отличия. Концентрации ^{238}U колеблются в пределах $\sim 1-4$ ppm. Области, обогащенные ураном, также отмечены в юго-западной части (значения >3 ppm). Максимум урановых аномалий несколько смещен относительно калиевых: на карте видно, что локальные пикеты с повышенным ^{238}U возникают вдоль предполагаемых тектонических зон и в понижениях рельефа.

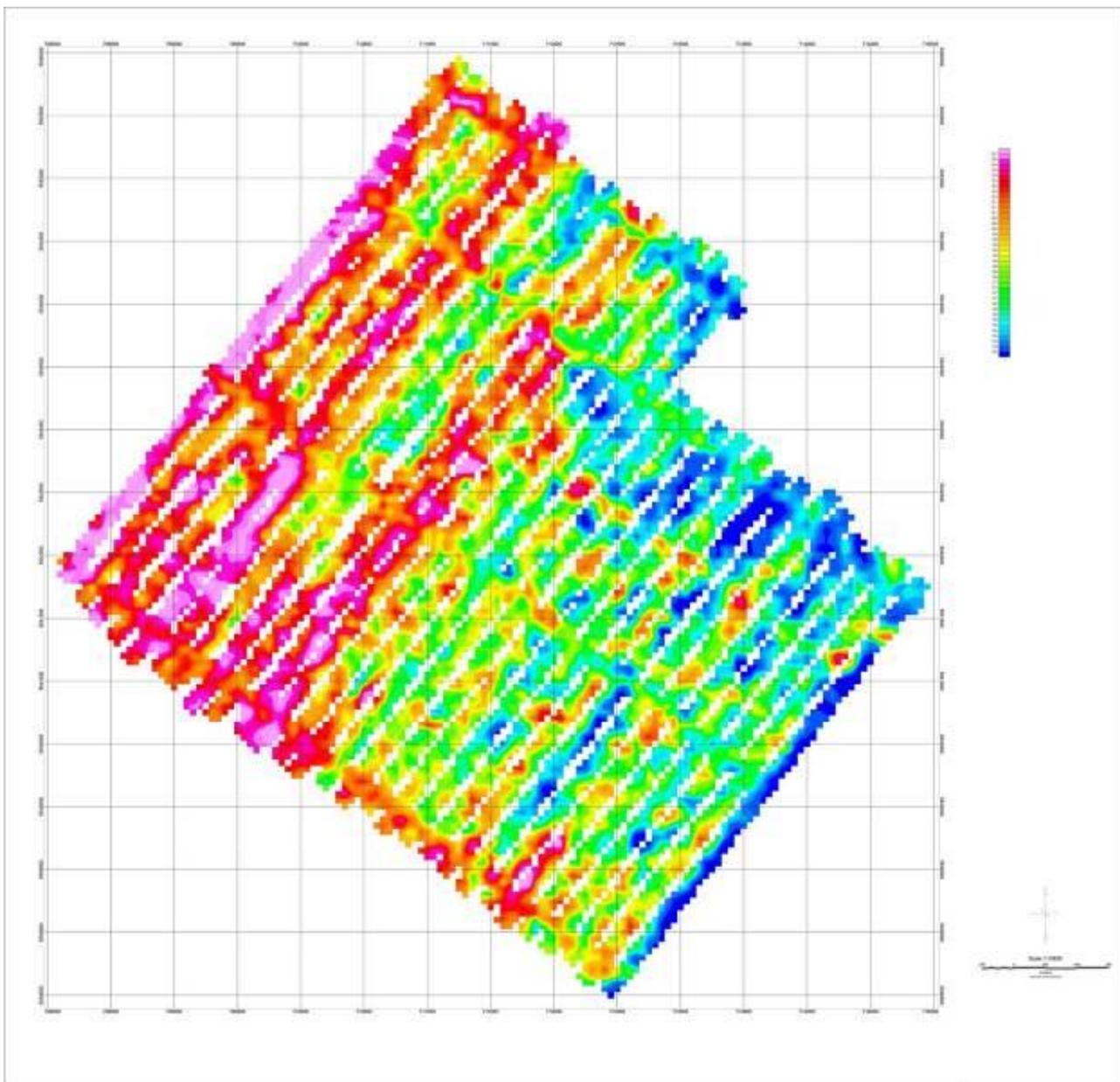


Рисунок 21 - Картограмма содержания урана (^{238}U , в ppm)

Это может отражать вторичную миграцию урана - например, вынос и переотложение урановых соединений грунтовыми водами вдоль разломов. Северо-восточная часть, сложенная осадочными отложениями, характеризуется пониженными содержаниями ^{238}U (<2 ppm). (Рисунок 22) (профили по ^{238}U)

кривые уранового содержания местами имеют резкие пики, не совпадающие с распределением ^{40}K . Такие изолированные аномалии ^{238}U , не сопровождающиеся повышением ^{40}K и ^{232}Th , могут указывать на очаги уранового обогащения в современных осадках (зоны окисления или скопления тяжёлых минералов). Фоновые значения ^{238}U коррелируют с литологией: минимумы соответствуют четвертичным покровам, повышенные значения - коренным породам фундамента.

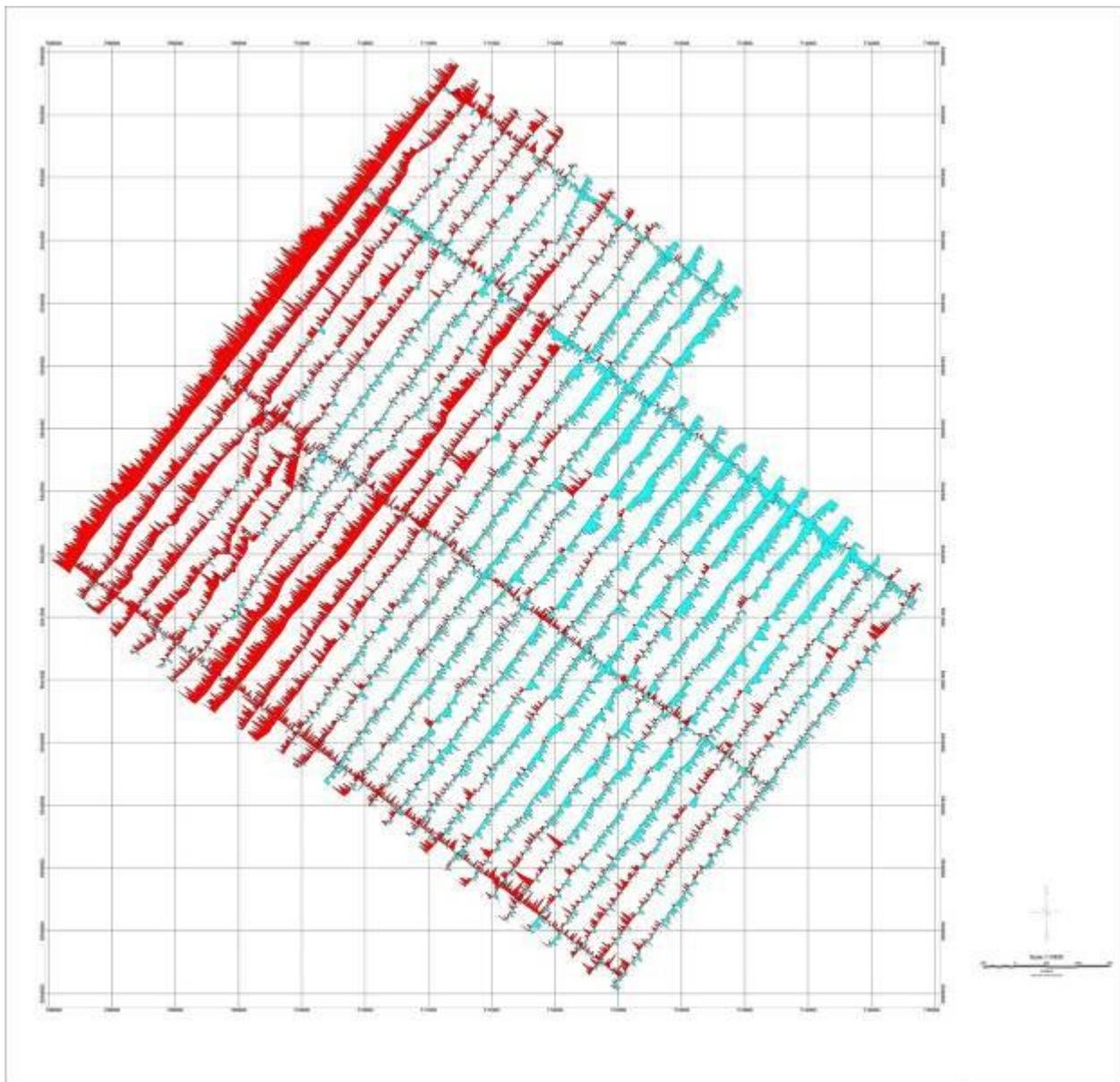


Рисунок 22 - Графики содержания урана-238 вдоль профилей

На рисунке 23 представлена карта распределения тория (^{232}Th , ppm). Поле Th демонстрирует сходство с калиевым: максимальные значения ^{232}Th (>8 ppm) приурочены к юго-западу, к зоне гранитоидов, северо-восток имеет низкий фон (<4 ppm). Тория в кислых интрузивах обычно много, поэтому высокая аномалия

^{232}Th тесно накладывается на область выходов гранитов (совпадает с ^{40}K -аномалией).

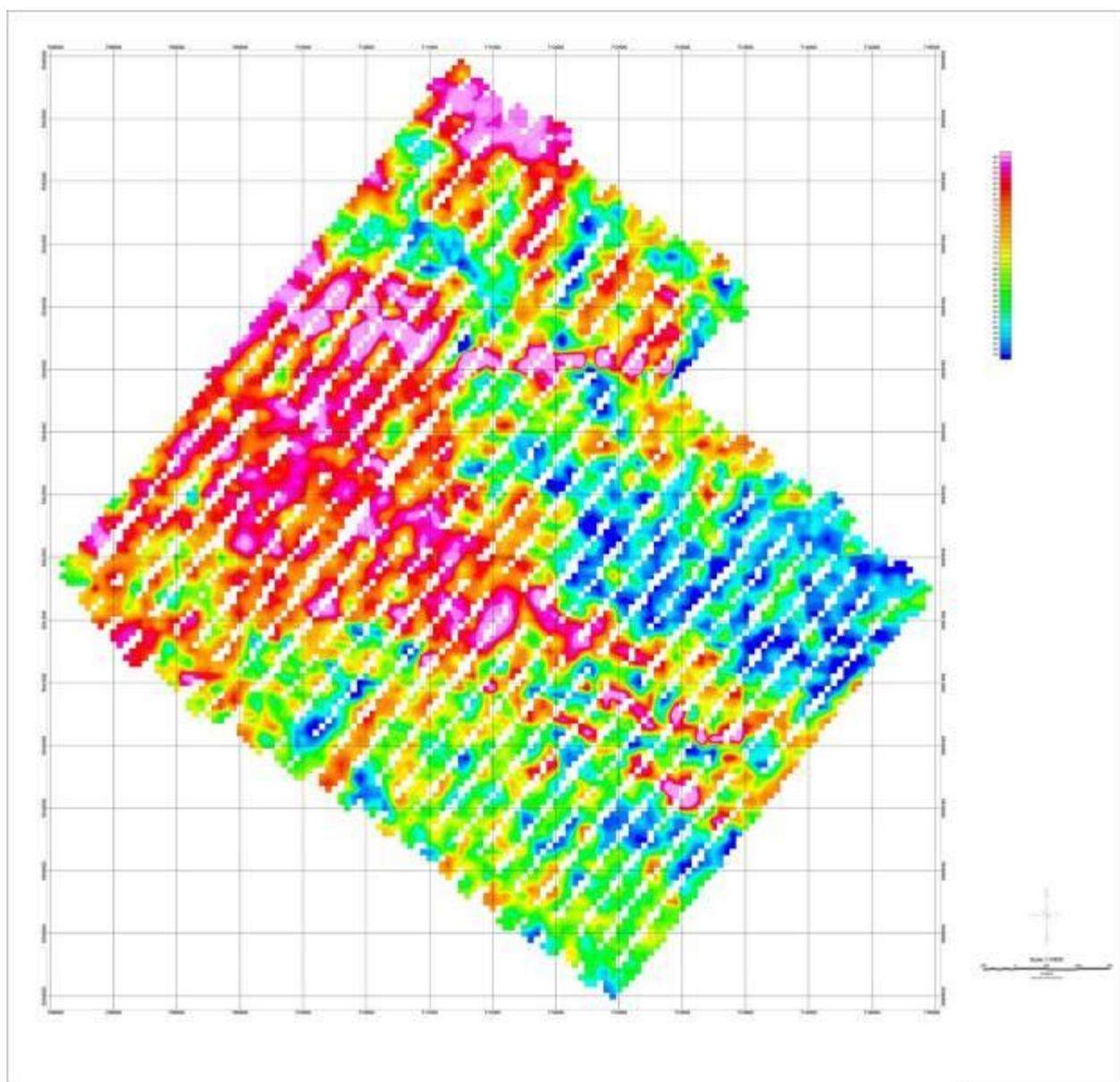


Рисунок 23 - Карта распределения тория (^{232}Th , ppm)

На переходе к центральной части участка наблюдаются средние уровни ^{232}Th (~5-7 ppm), что, вероятно, соответствует смешанным породным ассоциациям - метаморфическим сланцам с прожилками гранитоидов. Отмечается некоторое расхождение между полями ^{232}Th и ^{238}U : в ториевом поле меньше локальных флуктуаций, распределение более сглаженное. Это объясняется тем, что ^{232}Th менее подвижен в супергенных условиях и фиксирован в породе исходного залегания. (Рисунок 24) (графики по ^{232}Th) подтверждает стабильность распределения тория - кривые изменяются плавно, основные тренды повторяют калиевое поле, с повышением на SW и снижением

на NE. Локальных аномалий ^{232}Th , не совпадающих с ^{40}K , практически не наблюдается, что говорит о единой природе источника этих элементов (интрузивные породы фундамента).

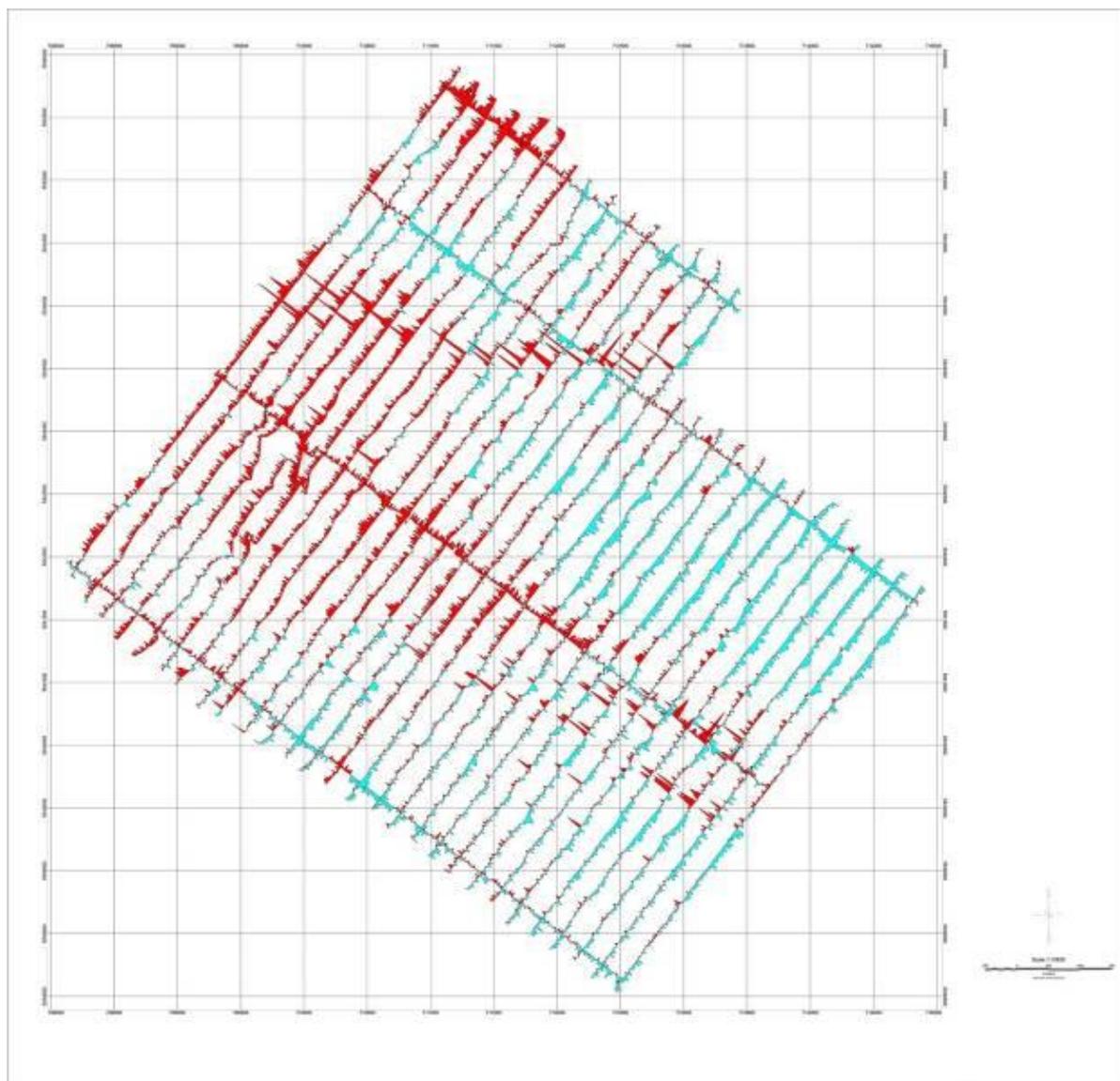


Рисунок 24 - Графики распределения тория-232 вдоль профилей

На рисунке 25 показана суммарная карта гамма-излучения (мощность дозы натурального гамма-фона, нГр/ч). Она интегрирует вклад всех радиоактивных элементов и служит обобщенной радиометрической характеристикой территории. Карта гамма-поля повторяет сочетание полей ^{40}K и ^{232}Th , поскольку именно калий и торий дают основной вклад в общий гамма-фон.

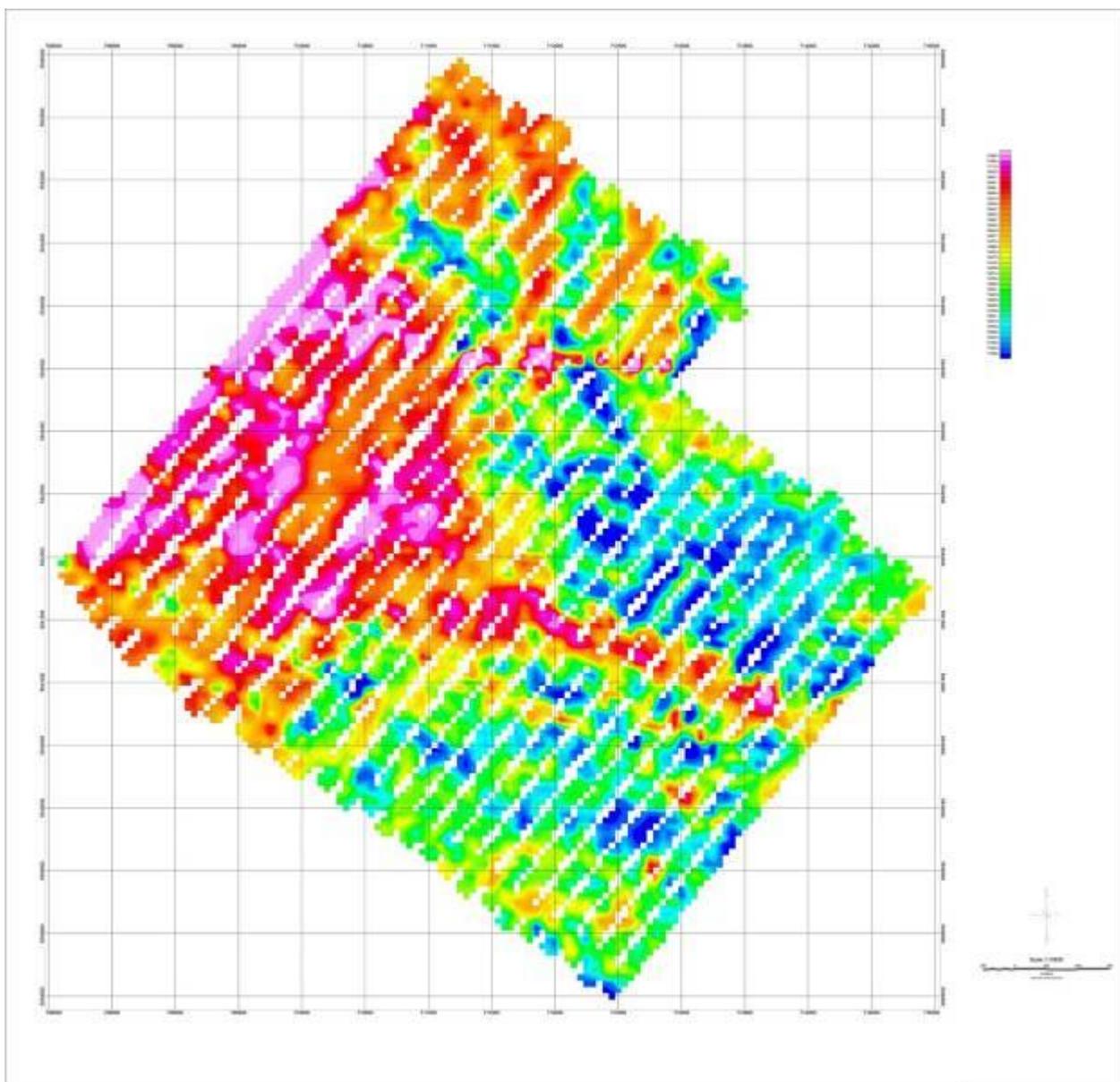


Рисунок 25 - Суммарная карта гамма-излучения (мощность дозы естественного гамма-фона, нГр/ч)

Максимальный уровень гамма-излучения превышает 1800-2000 нГр/ч на юго-западе участка – это радиометрическая аномалия, соответствующая выходу плутонов гранитоидов. Минимумы мощности дозы (~600-800 нГр/ч) отмечены на северо-востоке, где поверхностные отложения обеднены радиоэлементами. Помимо этой региональной тенденции, на карте видны несколько локальных аномалий гамма-фона. Например, в центральной части участка прослеживается вытянутая субширотная зона умеренно повышенного фона (~1200 нГр/ч), которая совпадает с полосой повышенного содержания ^{238}U . Это может указывать на скрытый разлом: по нему в поверхностные слои могли поступать уран-радиоактивные растворы, слегка увеличив суммарный фон. Другие локальные повышения суммарного гамма-излучения, как правило, совпадают с

аномалиями ^{40}K и ^{232}Th , то есть связаны с коренными породами. Специфических радиоактивных аномалий, указывающих на присутствие урановых минерализованных зон, по данным автогамма-съемки не обнаружено - все наблюдаемые вариации объясняются известными литологическими факторами.

Интерпретация автогамма-спектрометрических данных проводилась в комплексе с результатами других геофизических методов и геологической информацией. Границы аномальной области ^{40}K - ^{232}Th на юго-западе четко совпадают с контурами положительной магнитной аномалии (см. карту аномального магнитного поля) - это подтверждает присутствие крупного интрузивного массива, обладающего одновременно повышенной намагниченностью и радиоактивностью. Зона этого интрузива выделяется и по геологическим данным (известны выходы гранитов). С другой стороны, некоторые аномальные зоны, выявленные методом вызванной поляризации (ВП-ЭП), соответствуют сульфидной минерализации в углеродисто-шунгитовых сланцах, не проявлены в гамма-поле, поскольку сами по себе эти породы бедны радиоэлементами. Имеются и совпадения: например, одна из аномалий поляризации, расположенная на контакте гранитоидов и вмещающих сланцев, пространственно совмещена с локальным повышением гамма-фона. Вероятно, в зоне разлома, контролирующего рудную минерализацию, произошло обогащение пород вторичными радиоэлементами, что отразилось в автогамма-спектрометрических данных. Интегрированный анализ показал, что сочетание методов - магнитной съемки, электроразведки (ВП-ЭП) и автогамма-спектрометрии - существенно повышает достоверность геологической интерпретации. Автогамма-съемка внесла ценный геохимический компонент, позволив дифференцировать породы по составу, выделить интрузивные тела и зоны метасоматоза. В совокупности с аномалиями электроразведочных работ (показавшими потенциально рудоносные зоны) и с геологической картой, радиометрические данные помогли оконтурить наиболее перспективные участки для дальнейшей разведки и уточнить геологическое строение района. Благодаря этому комплексному подходу были выделены объекты, наиболее отвечающие критериям золотосульфидного оруденения, что послужило основой для успешного продолжения поисково-разведочных работ.

4.3 Обработка и интерпретация данных электроразведки

Обработка полевых данных электроразведки (метода вызванной поляризации) проводилась в два этапа - предварительный (полевой) и окончательный (камеральный) [1]. Предварительная обработка выполнялась непосредственно в полевых условиях по завершении каждого дня работ.

Геофизические данные суток вечером загружались и подвергались экспресс-анализу: усреднялись повторные замеры на одних и тех же пикетах, отбраковывались ошибочные точки и строились оперативные псевдоразрезы кажущейся поляризуемости и сопротивлений в цветовой шкале. Для оценки

структуры поля уже в поле проводились и первые инверсии - по отдельным профилям и в целом по участку. Это дало возможность предварительно представить геоэлектрический разрез и при необходимости скорректировать сеть наблюдений (удлинить профили, добавить промежуточные замеры и т.п.).

Интерпретация данных электроразведки. На фрагменте геологической карты (Рисунок 2) показано геологическое строение района, необходимое для интерпретации геофизических данных. Северную и центральную часть площади занимают терригенно-вулканогенные породы ниже-среднекарбонового возраста (углеродистая толща - отмечена условно зеленым цветом), которые интенсивно дислоцированы и пронизаны интрузиями гранитоидов пермского возраста (розовым цветом обозначены граниты, гранодиориты и т.п.). В структуре района присутствует несколько крупных разломов: преобладают разрывные нарушения северо-западного простирания, а также прослеживаются субширотные (близкие к широтному направлению) разломы. Месторождение золота Беспоки приурочено к пересечению разломов этих направлений, главным из которых является крупный северо-западный разлом, выраженный как в рельефе, так и в геофизических полях. Именно в зоне этого разлома ожидается развитие сульфидной минерализации, способной вызывать аномалии вызванной поляризуемости. Осадочные толщи карбона содержат графитизированное органическое вещество («черные сланцы»), что может обуславливать повышенную электропроводность фундамента и фоновые отклики поляризуемости. Интрузивные массивы, напротив, обычно характеризуются повышенным электрическим сопротивлением и низкой поляризуемостью, хотя по их периферии могут развиваться ореолы гидротермальных изменений с сульфидной минерализацией. Учет всех этих геологических факторов критически важен при интерпретации аномалий электроразведки.

Общие результаты. В результате инверсии данных получены геоэлектрические разрезы по 8 профилям (№1-8) и карты распределения параметров на трех глубинных уровнях (135 м, 400 м, 630 м). Анализ этих материалов позволил выявить ряд аномальных зон поляризуемости и сопротивления, пространственно приуроченных к определенным геологическим структурам. Аномалии поляризуемости на участке свидетельствуют о присутствии участков с повышенным содержанием рассеянных металлических минералов (сульфидов), тогда как аномалии электрического сопротивления отражают зонирование по литологии и степень трещиноватости/влагонасыщения пород. Ниже приведена по-профильная интерпретация разрезов и анализ карт по горизонтам.

Профиль 6. (Рисунок 26). На профиле 6 выраженных контрастных аномалий поляризуемости уже не наблюдается, что говорит о выходе за пределы основной рудоносной зоны. В центральной части профиля 6 сохраняется полоса несколько пониженных сопротивлений (~50 Ом·м) и умеренно повышенной поляризуемости (~5-6 мВ/В). Это может быть разломная зона, со слабой минерализацией, здесь прослеживается продолжение структур, связанных с

рудной зоной, но бедных сульфидами (либо минерализация выклинивается на этом расстоянии). В западной половине профиля 6 бросается в глаза резко возросшее сопротивление (до 500-700 Ом·м) – вероятно, это проявление крупного гранитного штока, выходящего в данном районе. Поляризуемость над этим блоком снижается до фоновых значений (<2 мВ/В), что подтверждает предположение о преимущественно магматических породах, лишенных рассеянных сульфидов. На востоке профиля 6 отмечается локальное падение сопротивления (~30 Ом·м) при незначительном росте поляризуемости (до 4 мВ/В) - это еще одна зона дробления (возможно, продолжение отмеченного на профиле 4 восточного разлома), но без существенной минерализации.

Горизонтальный срез 135 м. (Рисунок 27). Планы, составленные по результатам инверсии, дополняют картину разрезов, позволяя проследить аномалии в плоскости. На уровне 135 м (относительно условной горизонтальной плоскости, близкой к дневной поверхности) карта поляризуемости показывает несколько четких аномальных объектов. Главный из них - вытянутая полоса повышенной поляризуемости (значения >8 мВ/В) в центральной части участка, ориентированная в северо-западном направлении. Эта полоса прослеживается от района профиля 2 через профиль 3 к профилям 4-5, т.е образует непрерывную аномальную зону длиной порядка 1-1,5 км.

Она соответствует проекции на горизонтальную плоскость главной рудоносной зоны месторождения Бешпоки. Вдоль этой зоны также наблюдается пониженное электрическое сопротивление (менее 50 Ом·м) на карте сопротивлений для уровня 135 м. (Рисунок 28). Комбинированная аномалия «высокая поляризуемость + низкое сопротивление» четко выделяется в центре площади и совпадает с местоположением северо-западного разлома, контролирующего оруденение.

Кроме главной, на глубине 135 м выявляется еще несколько локальных аномалий поляризуемости: в юго-восточной части участка (район профилей 4-6 на восточном фланге) имеется участок с поляризуемостью ~6-7 мВ/В, совпадающий с пересечением субширотного разлома и границы литологических комплексов. Он сопровождается умеренным снижением сопротивления (~70-100 Ом·м), что может указывать на глинизацию в зоне разлома. На западе карты (около профилей 1-2) заметно относительно высокое сопротивление (>500 Ом·м) и практически отсутствует аномалия - это соответствует поверхности крупного гранитного массива, где аномальных источников нет. Фоновые значения поляризуемости на уровне 135 м составляют ~2-4 мВ/В в пределах осадочного чехла карбона и <2 мВ/В в зоне гранитоидов.

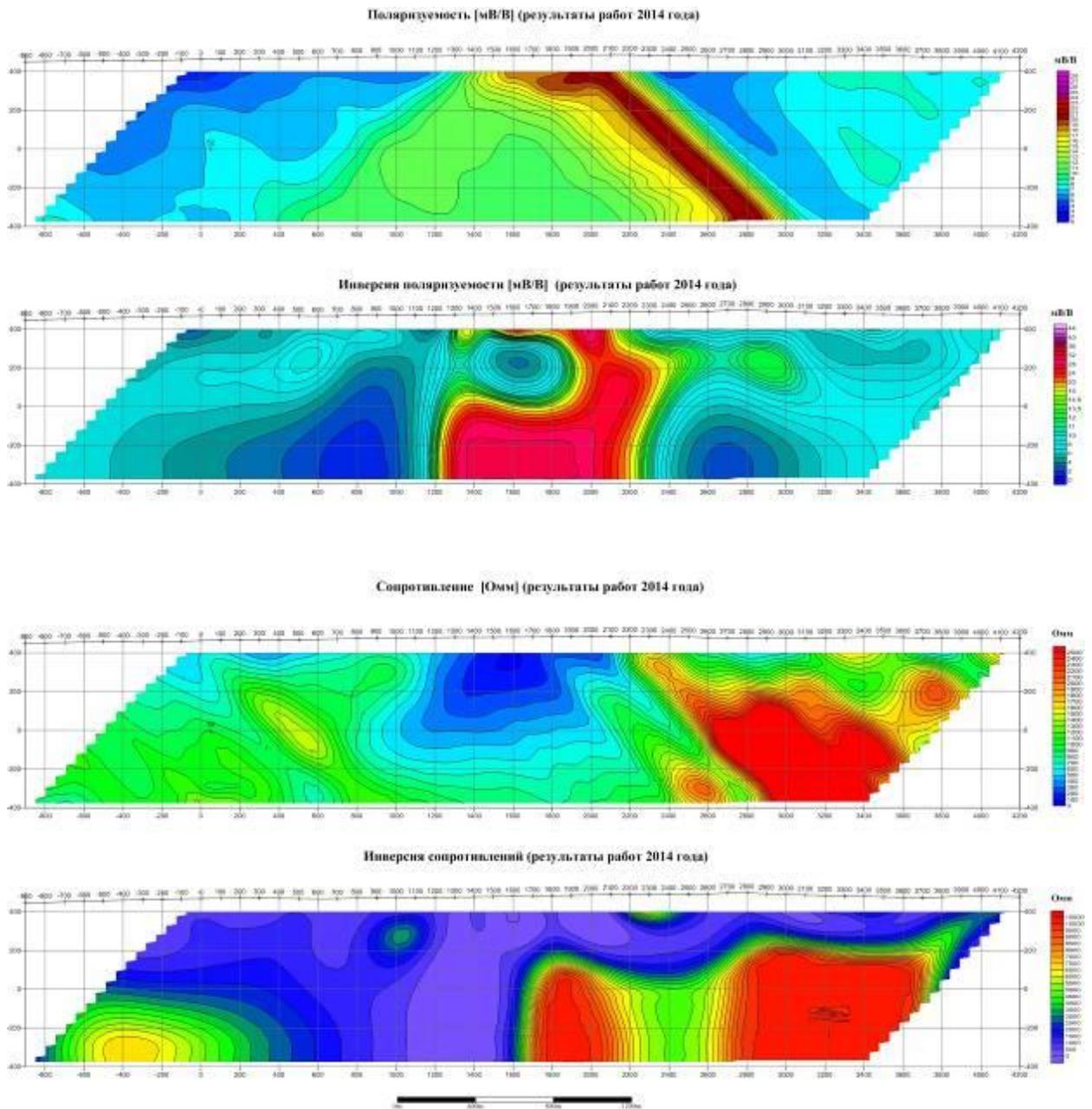


Рисунок 26 - Участок Беспокы. Разрез по профилю 6

На небольших глубинах метод ВП-ЭП четко дифференцирует области разного строения и выделяет главную аномальную зону вдоль разлома.

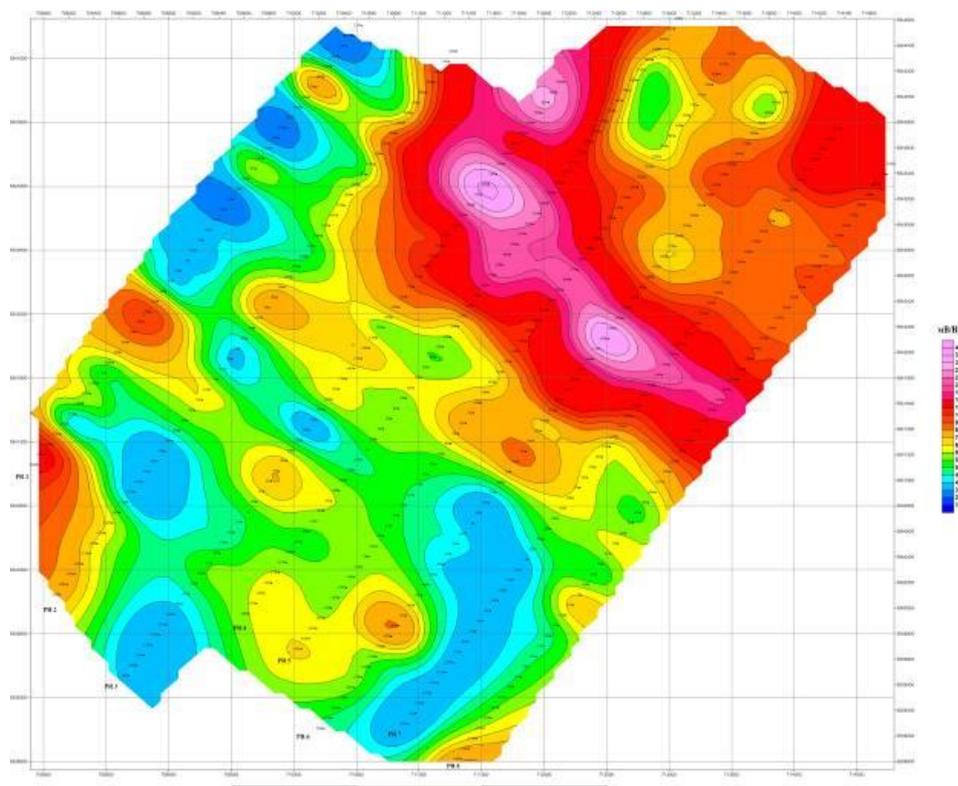


Рисунок 27 - Участок Беспочки. Поляризуемость. Уровень 135 м

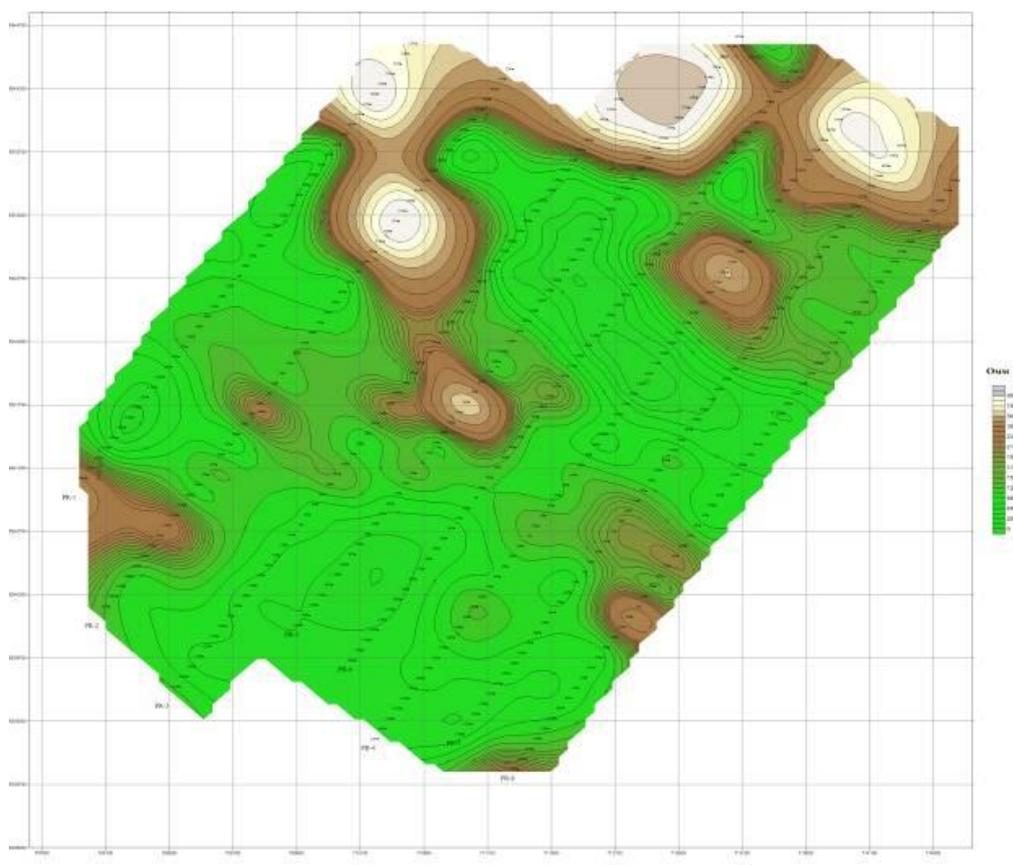


Рисунок 28 - Участок Беспочки. Сопротивление. Уровень 135 м

Типизация и геологическая интерпретация аномалий. На основании совокупности разрезов и карт можно выделить несколько типов аномальных геоэлектрических эффектов и дать им геологическое толкование. Первый тип - аномалии комплексные, характеризующиеся одновременно повышенной поляризуемостью и пониженным электрическим сопротивлением. К этому типу относится главная аномальная зона, прослеженная вдоль северо-западного разлома. Такие аномалии интерпретируются как *рудные*: они указывают на зоны интенсивной трещиноватости, пропитанные сульфидными минералами (пирит, арсенопирит и др.), которые вызывают высокий отклик и снижают сопротивление среды. Геологически это соответствует золото-сульфидной минерализации в углеродисто-терригенных толщах по разлому. Второй тип - аномалии сопротивления без сопутствующего аномального сигнала. Они проявляются как зоны высоких сопротивлений (сотни-тысячи Ом·м) при фоновых значениях поляризуемости (<3 мВ/В). Примеры - южная часть профилей 1-2, большая часть профилей 7-8, а также обширная область на картах глубинных уровней, соответствующая гранитному плутону. Эти аномалии отражают *литологические блоки* устойчивых пород - интрузивные массивы гранитов, гранодиоритов, либо выдержанные плотные метаморфические породы. Отсутствие поляризуемости подтверждает, что они практически не содержат сульфидов. Данные зоны сами по себе не представляют рудного интереса, но важны как элементы геологической модели (экранирующие блоки, кровля фундамента и пр.). Третий тип - аномалии поляризуемости "в чистом виде" либо слабо выраженные, без заметного снижения сопротивления. Подобные объекты отмечены, к примеру, на профилях 3 и 8 (небольшие аномалии поляризуемости при относительно высоком сопротивлении) и частично на периферии главной зоны. Их можно объяснить присутствием небольших количеств диссеминированных сульфидов в более устойчивых породах, либо эффектом графитистости сланцев. Часть таких аномалий может быть связана с вторичными ореолами вокруг рудных тел - сульфидизация в зонах разломов или по мелким трещинам, где общая пористость невелика и потому проводимость не сильно падает. Отчет 2014 г. отмечает, что достоверность выделения объектов повышенной поляризуемости зависит от контраста с фоном и влияния помех (экранирования низкоомными слоями. В нашем случае фоновые эффекты (графит, влажность) могли несколько повышать общий уровень поляризации в сланцах, но сочетание с данными по сопротивлению позволило уверенно отделить аномалии первого порядка (рудные) от фоновых.

Заключение по интерпретации. Совокупный анализ геофизических данных ВП-ЭП и геологических материалов показывает, что на участке Бесшоки выделяется главная аномальная зона, соответствующая известной золотоносной минерализации вдоль северо-западного разлома. Эта зона прослежена по ряду профилей и уходит в глубину, хотя и сокращается на больших глубинах (~400-500 м). Также выявлены дополнительные локальные аномалии, которые могут указывать на новые перспективные участки: аномалия на восточной окраине (профили 8 и рядом) свидетельствует о присутствии параллельной структуры с

признаками сульфидной минерализации, требующей проверки. Согласно данным отчета 2014 года, рекомендуется проведение детализации и горно-геологических работ на выявленных аномальных участках. Главная зона высокой поляризуемости рекомендована под поисковое бурение для подтверждения запасов золотосульфидной руды, а второстепенные аномалии - для опережающей разведки (шурфовка, мелкое бурение) с целью оценки их рудоносности. Результаты электроразведки успешно интерпретированы в контексте геологического строения: они подтверждают известные элементы (рудоконтролирующий разлом, интрузивные массивы) и дают новую информацию о возможных скрытых объектах, что значительно обогащает геологическую модель участка и направляет дальнейшие этапы поисков.

Увязка геофизических данных с геологическим строением. Полученные аномальные поля и их интерпретация были тщательно сопоставлены с известной геологией района по материалам геологических карт и разрезов. Геологическая изученность участка к началу работ была ограниченной (детальное геологическое описание района в самом геофизическом отчете отсутствует). Уже по доступным данным выяснено, что в разрезе преобладают вулканогенно-осадочные толщи палеозойского возраста, прорванные интрузивными телами. Оруденение золото-сульфидного типа связано с зонами интенсивной гидротермальной измененности и вкрапленниками сульфидов (пирит, халькопирит и др.) в породах. Эти зоны контролируются, как правило, разломами северо-западного направления. На геологической карте (Рисунок 2) такие разломы выражены линейными тектоническими контактами и сдвигами границ формаций. Совокупный анализ результатов магнитной съемки показал, что аномалии ΔT четко отражают указанную структуру: выделяются линейные градиентные зоны, совпадающие с трассами крупных разломов. Магнитные минимумы прослеживаются вдоль тектонических зон, что объясняется размагниченностью пород в зонах дробления и выветрелости, либо пирротиновыми минерализациями с обратной намагниченностью. Магнитные максимумы, напротив, соответствуют участкам с повышенным содержанием магнитных минералов - например, с интрузивными породами или зонами скарнового изменения. Магниторазведка позволила провести структурный обзор района: подтвердить положение известных разломов и выявить ряд новых локальных нарушений, не отмеченных ранее на геологических схемах.

Электроразведка методом ВП-ЭП дала ценную информацию о распределении аномалий поляризуемости в разрезе. Высокие значения поляризуемости (до десятков мВ/В) выявлены на ряде профилей и, как показала последующая интерпретация, приурочены к зонам сульфидной минерализации. Например, на профильных разрезах заряда отчетливо выделяются аномальные зоны над известными рудными телами месторождения Бесшоки (по данным бурения), а также аналогичные аномалии в сопряженных структурах, что указывает на возможное продолжение минерализованных зон вглубь и в сторону флангов. Эти аномалии располагаются в интервалах разреза, соответствующих

определенным стратиграфическим уровням. Одновременно с понижением сопротивления в зонах аномалий (установленным по разрезам кажущегося сопротивления) это свидетельствует о присутствии проводимых минералов - сульфидов. Данные электроразведки позволили геологам уточнить глубинное простирание рудных зон и залегание рудных тел, что крайне важно для планирования дальнейшего бурения.

Автогамма-спектрометрические данные, в свою очередь, использованы для литологической привязки: по ним были составлены карты распределения ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , которые сопоставлены с геологической картой. Обнаружилось, что повышенные концентрации калия и тория характерны для областей выхода на поверхность вулканических и гранитоидных пород, нижние подразделения), тогда как пониженный уровень радиоэлементов свойствен осадочным покровным образованиям (углистым сланцам, песчаникам верхнего палеозоя). Это подтверждает соответствие результатов автогамма-съемки стратиграфической колонке и помогает более уверенно проводить границы пород там, где они покрыты делювием или нечетко выражены на местности. Локальные урановые аномалии, выявленные спектрометрией, могут указывать на зоны повышенного оруденения или вторичного изменения (в т.ч. на наличие мелких ураноносных минералов в ореоле вокруг золото-сульфидной минерализации). Все эти интерпретационные выводы были сделаны в тесной связке с геологами: геофизические карты и разрезы совместно анализировались, что позволило выработать интегрированную геолого-геофизическую модель участка. Комплексирование методов - магнитного, электрического и автогамма-съемки - в полной мере оправдало себя для разведки подобного рода объектов. Каждый метод отобразил «свой» аспект строения недр, а в совокупности они дали целостную картину, значительно дополнившую геологические представления.

Рекомендации по оптимизации методики для дальнейших исследований. Опираясь на полученный опыт, можно предложить несколько мер для повышения эффективности геофизических работ в будущем. Во-первых, целесообразно наметить дополнительные профили и площадки детальной съемки в зонах выявленных аномалий. По аномалиям (ВП-ЭП) высокой интенсивности стоит выполнить сгущенную сеть электроразведки (с шагом профилей 100 м или менее) и возможно применить различные конфигурации электродов (диполь-диполь для повышения разрешения неглубоких объектов, или трехмерную установку с несколькими токовыми точками для объемного обследования). Во-вторых, следует продолжить интегрирование методов: привлечение дополнительных геофизических данных (например, гравиразведка для выявления плотностных неоднородностей или электромагнитных профилей для уточнения проводимости) может обогатить интерпретацию. Уже проведенное сочетание магниторазведки, электроразведочного метода ВП-ЭП и автогамма-съемки показало высокую информативность, и дальнейшее совместное использование различных методов и их результатов (совместная инверсия данных) позволит с большей достоверностью выделять геологические

объекты. Также рекомендуется шире применять современные технические средства: беспилотные летательные аппараты для магнитной съемки крупных площадей, более мощные передатчики электроразведки для увеличения глубины исследования, новые программные алгоритмы обработки. Необходимо и далее строго соблюдать процедуры контроля качества: регулярные повторные измерения, применение базовых станций (для магнитного поля) и контрольных профилей (для автогамма-спектрометрии) останутся неотъемлемой частью методики. Совокупность этих мер направлена на то, чтобы в последующих исследованиях получить еще более подробную и надежную геофизическую информацию, облегчающую геологическое моделирование и поиски полезных ископаемых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геологическая часть подробно характеризует район исследований: описано географо-геологическое положение, строение палеозойского основания (стратиграфия девона и карбона, тектонические структуры герцинского комплекса, интрузивный магматизм перми), а также четвертичный покров. Особое внимание уделено рудному оруденению - золотомедной брекчии Бесшоки и вкрапленной медной минерализации Котансор - в связи с их геологическим окружением. На основе анализа истории изучения показано, как эволюционировали представления о месторождении: от первых советских находок медной руды до новейших 3D-моделей, включающих данные бурения и геофизики. Эта преемственность подтверждает высокую перспективность применения современных методов для доизучения даже давно известных рудных полей.

Геофизическая часть работы демонстрирует эффективность комплексного подхода. Выявлено, что совмещенное применение магнитной съемки, электроразведки (ВП-ЭП) и автогамма-спектрометрии обеспечивает максимальную информативность при поиске скрытых рудных тел. В условиях Бесшоки каждый метод сыграл свою роль: магнитная съемка откартировала магматические тела и разломы, электроразведка четко выделила зоны сульфидной минерализации по аномалиям поляризуемости, автогамма-спектрометрия дополнила сведения о литологии и позволила уверенно идентифицировать интрузивы по повышенному содержанию ^{40}K , ^{232}Th . Все три набора данных согласованно указывают на основные рудоносные элементы: на профилях через брекчию все методы проявили аномалии (магнитное поле - градиент, ВП-ЭП - высокая поляризуемость, гамма-понижение ^{40}K), что существенно повышает достоверность интерпретации.

По итогам интерпретации геофизических материалов 2014 г. было подтверждено и уточнено геологическое строение месторождения. Основное рудное тело Бесшоки прослежено до глубин порядка 300 м, что расширяет объём потенциальной руды. Контролирующая структура (северо-западный разлом) четко проявлена геофизически и может служить ориентиром для поисков аналогичных тел вдоль простирания. Интрузивный шток Бесшоки детально оконтурен по комбинации магнитных и автогамма-спектрометрических данных; внутри него обнаружены локальные аномалии, указывающие на неоднородное распределение сульфидов. Выявлен также ряд новых аномальных зон, ранее не фиксировавшихся: они могут соответствовать дополнительным объектам минерализации и требуют проверки. Эти результаты имеют большое практическое значение - на их основе недропользователем были намечены новые точки бурения и корректировка проекта освоения месторождения.

Обновленная геологическая модель, интегрирующая все доступные данные (геология, геофизика, геохимия), прошла успешную экспертизу: балансовые запасы золота и меди, утвержденные ранее, подтверждены, а прогнозные ресурсы увеличены с учетом новых зон. Применение комплекса

геофизических методов способно существенно повысить информативность поисково-разведочных работ даже на уже изученных месторождениях, позволяя выявлять скрытые рудные участки и снижать геологические риски.

Выводы. Результаты дипломной работы продемонстрировали значимость системного и комплексного подхода при решении геолого-разведочных задач в районах сложным геологическим строением. Методы и методика выполнения работы может служить основой для проведения дальнейших исследований в регионе и использоваться в качестве типовых инструментов при решении задач поисков и оценки ресурсов рудных месторождений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Everest Geophysics (2020): Induced Polarization – методические материалы (описание принципов ВП и применимости к сульфидным рудам).
- 2 Frontier Mining Ltd. – Investment Memorandum (данные по медно-золоторудным объектам Бесчоку, Котансор, Юбилейное).
- 3 ResearchGate: Airborne gamma-ray spectrometry measures K, Th, U (применительно к геологическому картированию).
- 4 Геофизические методы исследований: учебное пособие / Под ред. В. В. Федынского – М.: Недра, 1981 (раздел «Магниторазведка»). – 111 с.
- 5 Самыгин С.Г. Чингизский сдвиг и его роль в структуре Центрального Казахстана. – М.: Наука, 1974. – 216 с.
- 6 Федынский В.В. Разведочная геофизика – 1964. 664 с.
- 7 Э. А. Абишев, А. Б. Садуов, М. М. Абдыров, А. Шарапатов. Методика получения значений магнитных аномалий с применением программного обеспечения Oasia Montaj и результаты их качественной интерпретации.
- 8 Глухенький В.Я., Пахолук В.П. Государственная карта СССР масштаба 1:200 000, лист М-43-ХVIII (объяснительная записка) / В.Я. Глухенький, В.П. Пахолук – М: 1982 - 254 с.
- 9 Д. Каражанова, М. Керимжанова, Г. Баймаханова, А. Альпеисов. Стандарт организации. Система менеджмента качества НАО КазННТУ им. К. И. Сатпаева. Общие требования к построению, изложению, оформлению содержания текстового и графического материала. СТ КазННТУ – 09 – 2013. 49 с.