

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи



Секерина Дарья Денисовна

**ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
КРИТЕРИИ РУДОНОСНОСТИ ЗМЕИНОГОРСКОГО РУДНОГО
РАЙОНА (АЛТАЕ-САЯНСКАЯ СКЛАДЧАТАЯ ОБЛАСТЬ)**

Специальность 1.6.9. Геофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Егоров А.С.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ И ТЕКТОНИКЕ РУДНОГО АЛТАЯ	14
1.1. Развитие научных представлений о тектонике и геодинамике Рудного Алтая.....	14
1.2. Особенности глубинного строения Рудного Алтая по данным геолого-геофизических исследований	15
1.3. Геотектонические модели Рудного Алтая	17
1.4. Колчеданно-полиметаллическое оруденение VMS-типа в вулканогенно-осадочных комплексах активной континентальной окраины Алтае-Саянской складчатой области.....	19
ГЛАВА 2 ФАКТОЛОГИЧЕСКАЯ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	22
2.1. Геолого-геофизическая изученность и формирование рабочего банка данных	22
2.2. Методологическая схема исследований.....	27
2.2.1. Способы обработки геолого-геофизических данных.....	29
2.2.2. Последовательность применения способов интерпретации геолого-геофизических данных	38
ГЛАВА 3 ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ И ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНОГО АЛТАЯ	43
3.1. Геотектоническое районирование Рудного Алтая.....	43
3.2. Палеотектонические схемы Рудного Алтая.....	45
3.3. Особенности глубинного строения земной коры Рудного Алтая в сечении регионального геофизического профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» ..	51
3.4. Палеотектонические разрезы Рудного Алтая	54
ГЛАВА 4 ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗМЕИНОГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	60
4.1. Геолого-структурная схема глубинного строения Змеиногорско-Быструшинского прогиба	60
4.2. Геотектонические модели строения и эволюции Змеиногорско-Быструшинского прогиба в ходе палеозойских эпох тектогенеза.....	62
ГЛАВА 5 ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ О ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ ЗМЕИНОГОРСКО-БЫСТРУШИНСКОГО ПРОГИБА	68

5.1.	Обоснование геолого-структурных и геофизических критериев.....	68
5.2.	Выбор эталонных объектов	73
5.3.	Результаты решения задачи распознавания образов с обучением	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		80
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ		82
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		84
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании результатов кандидатской диссертации		103

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Актуальной задачей восполнения минерально-сырьевой базы Российской Федерации является выявление остродефицитных и высоколиквидных полезных ископаемых в пределах старых промышленно освоенных регионов. Особый промышленный интерес представляет минерально-сырьевая база Алтая. Среди 1500 выявленных здесь месторождений полезных ископаемых особого внимания заслуживают 16 разведанных колчеданно-полиметаллических рудопроявлений, характеризующихся как перспективные на выявление скрытого и слабо проявленного на поверхности оруденения.

Благодаря своей промышленной значимости регион имеет высокую геолого-геофизическую изученность на всех масштабных уровнях. Однако большинство выявленных рудопроявлений, по состоянию на 14.01.2022 г., не доведены до уровня месторождений [25,84], поскольку недостаточно обоснованы глубинные геологические критерии локализации колчеданно-полиметаллического оруденения на более глубоких уровнях верхней коры (до 20 км). В этой связи требуется проведение дополнительных прогнозно-минерагенических исследований на перспективных площадях, установленных в результате ранее выполненных поисковых исследований. Предполагается, что скрытое и слабо проявленное на поверхности колчеданно-полиметаллическое оруденение может быть обнаружено в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба центральной минерагенической зоны Рудного Алтая [9,82,83].

В соответствии с этой постановкой задачи автором выполнена специализированная обработка и комплексная геотектоническая интерпретация геофизических данных территории Змеиногорско-Быструшинского прогиба с выявлением геолого-структурных и геофизических критериев рудоносности для решения задачи распознавания образов с обучением.

Степень проработанности исследуемого направления

Значительный вклад в исследования глубинного геологического строения Алтайского региона в целом, и Змеиногорского рудного района, в частности внесли работы Б.А.Дьячкова, Л.К.Филатовой, Л.Г.Никитиной, Е.К.Ермолаева, В.Б.Караулова, М.М.Буслова и других ученых в конце XX века. Особое значение в развитии представлений о геотектонике исследуемой площади имеют результаты работ, выполненных коллективами ФГБУ ЦНИГРИ, ФГУ НПП «Геологоразведка», ФГУП СНИИГГиМС, ФГУП «ВНИИГЕОФИЗИКА», Томского политехнического университета, ФГУП ИМГРЭ, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского» и ОАО «Рудно-Алтайская экспедиция». Результаты этих исследований отражены в научных трудах Т.В.Серавиной, В.В.Кузнецова, Г.Д.Ганженко, М.А.Юдовской, С.В.Кашина, И.В.Викентьева, Н.И.Гусева, А.И.Гусева, Ю.Е.Вовшина, С.В.Кузнецовой, М.Л.Куйбиды, И.В.Гаськова, Ю.А.Туркина, О.М.Гринева, Н.Г.Кудрявцевой, К.Л.Новоселова, А.Л.Дергачева, С.П.Шокальского, Д.В.Титова, А.И.Черных и других ученых. Важную роль играют исследования отечественных ученых, специализирующихся на развитии технологических инструментов многофакторного прогнозирования. Среди них выделяются работы Д.Ф.Калинина, М.К.Овсова, М.А.Мизерной, А.П.Пятковой, З.И.Черненко, О.Н.Кузьминой, Н.А.Зимановской, Т.А.Ойцевой, Н.И.Еремина, Ю.С.Ананьева, В.Г.Ворошилова, А.А.Поцелуева, В.Г.Житкова, А.С.Кузнецова, И.И.Приезжева, Г.К.Григорьева, Н.П.Сенчиной.

Важная роль в работе отводилась изучению зарубежного опыта исследований геологических структур, вмещающих колчеданно-полиметаллическое оруденение (W.P.Schellart, 2023 [117]; L.R.Berio, 2022 [94]; Eric A.de Kemp, 2021 [98]; J.C.Duarte, 2013 [116] и др.).

Высокая степень разработанности проблем прогнозирования скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Рудноалтайской минерагенической зоны позволяет составить определенное представление о закономерностях рудоформирования. Однако

богатая фактологическая основа осложнена противоречивыми гипотезами, которые характеризуют глубинное строение региона и механизмы рудоформирования. Исходя из чего, требуется привлечение дополнительных инструментов для создания актуальных прогнозных моделей.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по пунктам:

п.1 Изучение строения Земли геофизическими методами по её физическим свойствам и характеристикам.

п.5 Структура, физические процессы и физические свойства вещества в коре и мантии Земли. Движения магнитных полюсов. Изучение динамики коры и мантии Земли. Мантийная конвекция. Реологические модели коры и мантии Земли.

п.8 Взаимодействие геосфер, деформационных и геофизических полей. Изучение, оценка и моделирование напряженно-деформированного состояния оболочек Земли. Временная эволюция геофизических характеристик земных недр.

п.11 Природа и свойства физических полей Земли с источниками в земных недрах, их геологическая и геодинамическая интерпретация. Поля во внешних оболочках Земли, если они используются для изучения её внутренней структуры или взаимодействия её различных оболочек. Теоретические и экспериментальные исследования потенциальных полей Земли. Теория механических, электромагнитных и тепловых процессов в Земле.

п.14 Математические методы и численное моделирование в теории прямых и обратных задач геофизики, включая геофизические методы разведки, скважинную и инженерную геофизику. Алгоритмы решения прямых и обратных задач геофизики, методы аппроксимации геофизических полей, цифровой фильтрации (в том числе – с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта). Проблемы повышения чувствительности, разрешающей способности методов, подавления помех, построения изображений. Создание соответствующих компьютерных технологий, в том числе для

суперкомпьютеров и графических процессоров, а также их применение в геолого-геофизической практике при достаточной математической новизне.

п.17 Компьютерные системы обработки, численной инверсии и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, включая ГИС-технологии.

Объект исследования – Змеиногорский рудный район (Рудный Алтай).

Предмет исследования – глубинное строение, тектоника и геодинамика верхней коры Змеиногорского рудного района, геолого-структурные критерии локализации колчеданно-полиметаллического оруденения (вулканогенные месторождения массивных сульфидных руд).

Цель работы – геотектоническая интерпретация комплекса геолого-геофизических данных с выявлением структурно-вещественных (тектонических) и геофизических критериев рудоносности для изучения закономерностей пространственной локализации и прогнозно-минерагенической оценки скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай).

Идея работы – на основе выявленных геотектонических и геофизических критериев локализации колчеданно-полиметаллического оруденения возможно выполнение оригинальных прогнозно-минерагенических оценок рудного района на скрытое и слабо проявленное на поверхности оруденение с использованием технологии распознавания образов с обучением.

Задачи (структура исследования)

Поставленная в диссертации цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

Аналитический обзор современных научных представлений о геолого-структурных (геотектонических) закономерностях формирования колчеданно-полиметаллического оруденения в вулканогенно-осадочных формациях.

Анализ и обобщение результатов ранее выполненных глубинных геолого-геофизических и прогнозно-минерагенических исследований Рудного Алтая.

Разработка методологической схемы исследований, включающей обработку и интерпретацию геолого-геофизических данных с построением историко-эволюционных моделей в форме площадных схем и глубинных разрезов, характеризующих закономерности формирования колчеданно-полиметаллических руд в пределах Змеиногорского рудного района.

Разработка мелкомасштабной историко-эволюционной модели формирования геоструктур Рудного Алтая.

Обоснование параметров глубинного строения Змеиногорского рудного района и разработка геолого-структурных и геофизических критериев рудоносности колчеданно-полиметаллического оруденения и решение задач распознавания образов с обучением.

Методика исследований: теоретические исследования, методы аналогии, дедукция, индукция, генерализация.

Научная новизна:

1. Разработана многоэтапная методическая схема обработки и комплексной интерпретации геофизических данных, обеспечивающая решение задачи глубинного моделирования верхней коры (до 20 км), изучение геодинамических обстановок и последовательности формирования структурно-вещественных неоднородностей Рудного Алтая и выполнение на новом уровне прогнозно-минерагенических построений в пределах Змеиногорского рудного района.

2. Составлены историко-эволюционные схемы формирования геоструктур Рудного Алтая.

3. Обоснованы историко-эволюционные модели формирования разреза верхней коры Змеиногорского рудного района, с использованием которых выявлены критерии локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

4. Выполнено решение задачи «распознавания образов с обучением» с использованием обоснованных критериев локализации оруденения, проведено районирование площади Змеиногорского рудного района с оценкой перспектив

обнаружения скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработана методическая схема многоэтапной обработки и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с построением геотектонических и глубинных геолого-геофизических моделей земной коры Рудного Алтая и верхней коры Змеиногорского рудного района.

2. Построена историко-эволюционная модель формирования верхней коры Змеиногорского рудного района, которая использована для изучения закономерностей локализации колчеданно-полиметаллического оруденения в вулканогенно-осадочных формациях рифтогенного генезиса.

3. Обоснован набор геолого-структурных (тектонических) и геофизических критериев рудоносности Змеиногорского рудного района.

4. Результаты диссертационной работы использованы при разработке моделей скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения на лицензионных площадях (Акт о внедрении от 07.05.2024 г. ООО «СЗГГК «Геокомплекс»).

Методология и методы исследований

Формирование рабочего банка данных проводилось на основе структурирования и увязки в единых форматах цифровых карт, схем, дистанционных основ, матриц, разрезов, в специализированных программных пакетах Surfer 16.0, ArcGIS 10.0. Обработка и интерпретация геолого-геофизических данных выполнялась с использованием отечественных программных комплексов КОСКАД-3D, ГИС Интегро, MultAlt, а также с привлечением таких программных пакетов, как Oasis Montaj, SeiSee и др. Для преобразования профильных материалов на основе гравитационных и магнитных данных использовались алгоритмы решения обратных задач геофизики. Визуализация и картопостроение проводились с использованием графического редактора CorelDraw 20.0 [65,111,118].

Положения, выносимые на защиту

1. Многоэтапная методика моделирования структурно-вещественных неоднородностей земной коры, базирующаяся на обработке, качественной и количественной интерпретации комплекса геолого-геофизических данных на мелко-, средне- и крупномасштабном уровнях, обеспечивает установление закономерностей глубинного строения, геодинамических обстановок формирования и истории геологического развития Змеиногорского рудного района Рудного Алтая.

2. Согласно результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, формирование колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района обусловлено последовательным проявлением герцинских геодинамических обстановок: заложением трога в условиях тыловодужного рифтогенеза активной континентальной окраины (D_{1-2}); складчато-надвиговых деформаций комплексов трога в ходе коллизионного орогенеза, определивших разный уровень денудации трех перспективных зон Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба.

3. Геолого-структурные и геофизические признаки оруденения, обоснованные в ходе многоэтапных геолого-геофизических исследований региона, обеспечивают, с использованием технологии распознавания образов с обучением, выполнение прогнозной оценки Змеиногорского рудного района на поиски скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

Степень достоверности результатов исследования

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием качественных фактических геолого-геофизических данных, современных алгоритмов их обработки и интерпретации с использованием апробированных программных комплексов, а также опорой на богатый опыт прогнозно-минерагенических исследований, выполненных предшественниками на данной площади.

Апробация результатов

Основные тезисы и выводы по результатам работы получили апробацию в рамках следующих мероприятий: 1) «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии», 12-15 октября 2021 года, ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск; «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии», 3-7 октября 2022 года, ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты; «Новое в процессах рудообразования», 28 ноября – 2 декабря 2022 года, ИГЕМ РАН, г. Москва; Рудная школа ЦНИГРИ (IV Молодежная научно-образовательная конференция) «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче», 15-17 февраля 2023 года, ФГБУ «ЦНИГРИ», г. Москва; XXVII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова, 3-7 апреля 2023 года, г. Томск; XIX Международный форум-конкурс «Актуальные проблемы недропользования», 22-28 мая 2023 года, Санкт-Петербург; LV (55) Тектоническое совещание, 30 января – 2 февраля 2024 года, г. Москва- ГИН РАН; XIII Международная научно-практическая конференция «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», 10-12 апреля 2024 года, ФГБУ «ЦНИГРИ», г. Москва. 2) производственная стажировка «По следам палеоземлетрясений» в рамках полевого лагеря «Field Camp 2023», 5-20 июля 2023 года, Горный Алтай, ПИШ НГУ.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в анализе мирового и отечественного опыта изучения закономерностей локализации колчеданно-полиметаллических месторождений, в составлении рабочих банков геолого-геофизических данных по площади Рудного Алтая в целом и в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба; разработке многоэтапной методической схемы комплексной интерпретации обширного набора фактических данных с последующим формированием площадных геолого-структурных схем и глубинных разрезов и построением глубинных геолого-геофизических и историко-эволюционных моделей верхней коры; в обосновании набора геолого-структурных

(тектонических) и геофизических критериев рудоносности и разработке прогнозной схемы Змеиногорского рудного района с обоснованием перспективной рудоносности его центральной зоны и отдельных ареалов в западной и восточной зоне.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 14 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, в 9 тезисах – в изданиях, входящих в систему РИНЦ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 121 наименование и 1 приложения. Диссертация изложена на 103 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков и 4 таблицы.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность за помощь в подготовке диссертации научному руководителю д.г.-м.н., профессору Алексею Сергеевичу Егорову.

За консультации, ценные замечания и советы автор выражает благодарность профессорско-преподавательскому составу кафедры геофизики: профессору д.т.н. Д.Ф.Калинину; профессору д.т.н. В.В.Глазунову, профессору д.т.н. А.П.Сысоеву, доценту к.г.-м.н. И.Б.Мовчану, доценту к.г.-м.н. Н.П.Сенчиной, доценту к.г.-м.н. С.М.Данильеву, доценту, к.г.-м.н. Н.А.Данильевой, доценту к.г.-м.н. С.Г.Алексееву, старшему преподавателю к.г.-м.н. Н.В.Большаковой.

Особую благодарность автор выражает за консультации, переданный опыт и содействие ведущему научному сотруднику ФГБУ «Всероссийский научно-

исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского» С.В.Кашину, начальнику отдела цветных металлов ФГБУ ЦНИГРИ к.г.-м.н. В.В.Кузнецову, ученому секретарю ФГБУ ЦНИГРИ к.г.-м.н. Т.В.Серавиной, директору ООО СЗГГК «Геокомплекс» А.Д.Кузовенкову.

ГЛАВА 1 НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ И ТЕКТОНИКЕ РУДНОГО АЛТАЯ

1.1. Развитие научных представлений о тектонике и геодинамике Рудного Алтая

Первые гипотезы о формировании колчеданно-полиметаллического оруденения Рудного Алтая предусматривали его увязку со структурами энциалических островных дуг [63,85,89]. Позднее рассматривалась версия, согласно которой особое влияние на формирование богатой минерагенической зоны Рудного Алтая оказали коллизионные процессы среднекарбонОВО-раннепермского возрастов, обусловленные столкновением Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов; при этом предполагалась левосторонняя кинематика смещений в зоне столкновения [11,12]. Существование левосдвиговой кинематики в данный период допускается и другими авторами [89], однако большая часть исследователей региона предполагает преобладание правосдвиговых смещений в пределах Рудно-Алтайской зоны [14,19,20].

Основные гипотезы рудоформирования позиционируют вулканогенно-осадочную модель образования месторождений VMS-типа (вулканогенные массивные сульфиды) в пределах Рудноалтайской минерагенической зоны [53,101,110]. Альтернативные гипотезы и модели образования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая представлены в таблице 1.1. Таблица 1.1 – Гипотезы формирования колчеданно-полиметаллических месторождений в пределах Рудного Алтая [35,54,91].

Гипотеза	Период	Автор
Эпигенетическое оруденение в осадочно-вулканогенных толщах генетически связано с жильной серией (кварцевые порфиры, альбит-порфиры) многофазового змеиногорского интрузивного комплекса	1932	Н.А.Елисеев

Продолжение Таблицы 1.1.

Гипотеза	Период	Автор
Алтайские полиметаллические месторождения являются «корнями» палеозойских вулканов, уничтоженных денудацией	1934	В.А.Обручев
Тектономагматическое проявление гидротермальной деятельности как основного механизма рудоформирования	1954-1964	А.К.Каюпов
Месторождения сформировались в герцинский цикл в рифтогенной геодинамической обстановке (D _{1e} –D _{3fr1}).	2013	В.М.Чекалин, Б.А.Дьячков
Колчеданно-полиметаллические руды образовались в герцинский цикл в рифтогенной геодинамической обстановке (D ₁₋₃) до проявления главной саурской (C ₁) фазы складчатости, интенсивного многоактного расщепления и смятия пород, становления гранитоидных интрузий Змеиногорского комплекса. Главным источником рудоносных растворов являлись сложнодифференцированные глубинные очаги базальтоидного магматизма.	2021	М.А.Мизерная, А.П.Пяткова, Б.А.Дьячков и др.

1.2. Особенности глубинного строения Рудного Алтая по данным геолого-геофизических исследований

Детальные исследования последних лет указывают на то, что в пределах Рудного Алтая развивались комплексы вулканоплутонического пояса, которые являются индикаторами обстановки активной континентальной окраины (АКО) [35,89]. Кроме того, весомым аргументом в пользу геодинамической обстановки АКО можно считать рифтогенные структуры, которые широко развивались в раннем-среднем девоне в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба, что подтверждается закономерным повышением здесь теплового потока [25,32,36].

В качестве восточной границы Рудного Алтая выступает Северо-Восточная зона смятия, контрастно проявленная в потенциальных гравитационном и магнитном полях, на геологических и геофизических разрезах, в том числе по

данным глубинного сейсмического зондирования до глубины 50 км [7,89]. С запада Рудный Алтай обрамлен Иртышско-Маркакольским разломом, который отчетливо выделяется на региональном и среднем масштабных уровнях [25,82].

Аккреционно-коллизийные и активно-окраинные процессы в Рудном Алтае сопровождались заложением региональных праводвиговых дислокаций [89]. Формирование структур этого типа многими авторами связываются с косоаккрецией плит, микроплит и островных дуг по отношению к окраине Сибирского палеоконтинента [1,11,42]. Эти структуры также контрастно проявляются в потенциальных полях.

Пространственно герцинские структуры Рудного Алтая отделены от Чарышско-Чуйской структурно-формационной зоны, представленной каледонидами, Северо-Восточной зоной смятия. Наибольший прогностический интерес в пределах Рудного Алтая представляет Змеиногорско-Быструшинский рифтогенный прогиб (объект детальных исследований в данной работе), выполненный вулканогенно-осадочными комплексами (D_1-C_1), которые являются рудовмещающими для колчеданно-полиметаллического оруденения [54,55,97].

Змеиногорско-Быструшинский прогиб локализован вдоль восточной окраины Рудного Алтая [61,62]. Особенности глубинного строения прогиба, в первую очередь, обусловлены его заложением в геодинамической обстановке тыловодужного рифтогенеза АКО [89]. Об этом свидетельствуют такие характеристики, как сокращение (до 10 км) мощности земной коры с увеличением мощности нижнекорового слоя (до 21 км). Зона развития рифтогенного прогиба маркируется градиентными значениями аномалий поля силы тяжести в Северо-Восточной зоне смятия (восточная граница прогиба). Морфология этой структуры в целом моделируется по комплексу геофизических данных [21,72,77]. Вулканогенно-осадочные комплексы в пределах прогиба смяты в протяженные линейные складки [18,19].

Характеризуя основной механизм мобилизации рудного вещества в пределах исследуемого прогиба, стоит отметить, что главным источником поступающего в верхнюю кору рудного вещества в обстановках

активноукраинного и коллизионного орогенеза принято считать «астеносферные окна» [25]. Мантийный астенолит фиксируется по данным сейсморазведки в разрезе Рудного Алтая на глубинах более 50 км [89]. Кроме того, такие индикаторы растяжения, как сокращение мощности земной коры, интенсивный вулканизм, увеличение теплового потока, могут свидетельствовать о близком расположении относительно поверхности «астеносферного окна» [24,48,62]. Поскольку все эти модели являются дискуссионным, в диссертации задействованы инструменты историко-эволюционного моделирования (см. главу 2).

1.3. Геотектонические модели Рудного Алтая

Согласно результатам региональных геолого-геофизических исследований, выполненных на территории Рудного Алтая в течение последних десятилетий [24,25,35], удастся сформировать следующее представления о его строении:

- Глубинное строение разнотипных структур региона адекватно отображается в рамках «зонально-блоковой модели» земной коры [49,72,73];
- На дневной поверхности и в разрезе земной коры прослеживаются структуры каледонского и герцинского орогенеза [18,19,25].

Особое внимание следует уделить геодинамическим обстановкам, повлиявшим на формирование структур Рудного Алтая (Таблица 1.2).

Геотектоническое обоснование эндогенного оруденения Рудного Алтая предполагает последовательное проявление здесь обстановок каледонского и герцинского орогенезов [25,29,73]. В ходе этих орогенных процессов проявлялись следующие геодинамические обстановки: а) каледонский орогенез-океанического спрединга (PR_2-O_1), островодужная (ϵ_2-O_1), трансформной континентальной окраины (O_1-D_1); б) герцинский орогенез – океанического спрединга (D_1), активной континентальной окраины (D_1-C_1), коллизии (C_{2-3}). Внутриконтинентальные обстановки проявлялись на постколлизионном ($P-J_2$) и позднем платформенном ($K-Q$) этапах развития региона [25].

Таблица 1.2 – Геодинамические обстановки и рудные формации Рудного Алтая (составлено с использованием тектонической схемы листа карты М-44 [25]).

Оро- генез	Возрастной интервал	Геодинамическая обстановка (этап)	Рудные формации	
			Вулканогенно- осадочные	Интрузивные
	Q	Внутриплитная	Платформенного чехла	-
	J-K		Молассоидная	-
Герцинский (PZ ₃)	P ₁ -T ₁	Постколлизийная (ПК)	-	Гранитовая- плюмазит-гранитовая
	C ₁ -C ₃	Коллизийная (К)	Молассоидная, андезитовая	Габбро-гранодиорит- гранитовая
	D ₁ -C ₁	Вулкано- плутонической дуги активной континентальной окраины (АКО)	D ₃ -C ₁ – алевролитовая	Габбро-гранодиорит- гранитовая
			D ₂₋₃ – базальт-дацит- риолитовая	Плагиограниты, гранодиорит- гранитовая
			D ₁₋₂ – бимодальная базальт-риолитовая, риолит- риодацитовая	Габбро- плагиогранитовая
Каледонский (PZ ₁)	D ₁	Океаническая (О)	Пестроцветная молассовая	-
	S ₁ -D ₁₋₂	Трансформной континентальной окраины (ТКО)	Флишоидная	-
	O ₁ -S ₁		Терригенно- карбонатная	-
	Є ₂ -O ₁	Островодужная (ОД)	Флишоидная	-
	PR ₂ -O ₁	Океаническая (О)	Щелочно-базальтовая	-

Формирование структур Рудного Алтая связывается с косо́й субдукцией Центрально-Азиатской океанической плиты под Сибирский палеоконтинент с образованием складчато-надвиговых и сдвиговых дислокаций на окраине последней. Осложняющим фактором в реконструировании последних событий в пределах Рудного Алтая является влияние герцинского коллизийного орогенеза, вызванного столкновением Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов [25,89]. Именно это событие повлияло на значительную деформацию ранее сформированных рудных тел [89].

1.4. Колчеданно-полиметаллическое оруденение VMS-типа в вулканогенно-осадочных комплексах активной континентальной окраины Алтае-Саянской складчатой области

Анализ описанных выше факторов позволяет говорить о том, что геодинамические условия формирования Рудного Алтая являются благоприятными для локализации месторождений VMS-типа, которые приурочены к вулканогенно-осадочным формациям АКО [53,113,115].

В настоящее время основной геодинамической обстановкой, определившей формирование колчеданно-полиметаллического оруденения Рудного Алтая, принято считать режим активной континентальной окраины (АКО), протекавшей здесь в девонское время. Кроме того, значительное влияние на формирование современного облика Рудного Алтая оказал процесс аккреции Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов в ходе закрытия Палеоазиатского океана в середине карбона [25,29,30]. Данный процесс сопровождался формированием складчато-надвиговых дислокаций и заложением региональных правосдвиговых дислокаций [25,28,89].

Именно в этих условиях широко развился гидротермально-метасоматический тип колчеданно-полиметаллического оруденения [35]. Активное внедрение гранитоидных батолитов разного возраста, в том числе минерагенически наиболее значимых порфировых малых интрузий гранитоидного состава, привело на завершающем этапе активноокраинного вулканизма к формированию гидротермально-рециклинговой системы. Эта система претерпела значительные физико-химические изменения, связанные с глубинными событиями [35,101,121], например, с изменением угла падения литосферного слэба [89,99,100]. Наиболее известными аналогами таких геологических объектов являются месторождения Казахстана (Риддер-Сокольное) [13,36,87], Австралии (Ред-Розбери) и Канады (Манитувейдж) [96,102,103].

Обобщая приведенные предположения о механизмах формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, можно сделать

вывод о том, что они образовались в ходе герцинского орогенного этапа в обстановке активной континентальной окраины. Рудные объекты приурочены к ареалам развития вулканоплутонического пояса (ВПП) и тыловодужного рифта. Рассматриваемые месторождения VMS-типа локализуются в пределах тыловодужных рифтогенных структур АКО. Здесь повышенные рудные концентрации тяготеют к ареалам развития бимодальной базальт-риолитовой формации [35]. Вулканические комплексы представлены массивными лавами, лавобрекчиями. Сульфидные тела приурочены к субвулканическим порфирировым интрузиям и терригенно-карбонатным вмещающим формациям и характеризуются линзовидными или пластовыми формами залегания [36].

Рудные формации в пределах исследуемой площади подразделяются по типу вмещающих формаций на: 1) свинцово-цинковую колчедансодержащую, которая соответствует базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации, 2) медно-свинцово-цинковую колчеданную, соответствующую базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации [25].

Таким образом, Рудно-Алтайские колчеданно-полиметаллические месторождения пространственно и генетически связаны с контрастной базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формацией и приурочены к зоне ранне-среднедевонского тыловодужного рифтогенеза активной континентальной окраины [22,89]. Осложняющим фактором для расшифровки закономерностей локализации рудных тел является широкое проявление надвиговых деформаций, возникших в ходе последующих коллизионных событий и вызвавших развитие надвиговых систем с глубокой денудацией вулканогенно-осадочных толщ АКО и выведением на поверхность более древних терригенно-осадочных комплексов пассивной континентальной окраины [25].

В качестве объекта детальных исследований в пределах Рудного Алтая рассматривается Змеиногогорско-Быструшинский рифтогенный прогиб, в котором локализован Змеиногогорский рудный район, перспективный на обнаружение скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения [43,48,84]. Для решения этой задачи необходимо выполнить

моделирование структур вулканоплутонических поясов и тыловодужного рифтогенеза девонского и каменноугольного периода [72,73,74]. Рудоконтролирующее значение могут иметь субширотные и субмеридианальные разрывные нарушения и ареалы их пересечения более позднего заложения [9,82,91].

Выводы

Анализируя представления о глубинном строении, тектонике и минерагении Рудного Алтая, можно сделать вывод о том, что основными геодинамическими обстановками, определившими формирование колчеданно-полиметаллического оруденения региона, являются ранне-среднедевонские вулканоплутонический пояс и тыловодужный рифтогенез АКО. Выявлено, что колчеданно-полиметаллические месторождения Рудноалтайской минерагенической зоны в мировой классификации относятся к VMS-типу, который характеризуется пространственно-генетическими связями с вулканогенно-осадочными формациями. Основной механизм поступления рудного вещества объясняется гидротермально-рециклинговой системой на завершающем этапе вулканоплутонического цикла.

Картина первоначального рудоотложения искажена складчато-надвиговыми и сдвиговыми дислокациями коллизионного орогенеза позднего девона-среднего карбона, вызванного аккрецией Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов. В это время в результате проявления складчато-надвиговых дислокаций произошло выдвигание на приповерхностные уровни ранее глубоко погруженных флишоидных толщ каледонской пассивной окраины.

ГЛАВА 2 ФАКТОЛОГИЧЕСКАЯ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Геолого-геофизическая изученность и формирование рабочего банка данных

Геологическая изученность

Начало геологоразведочных исследований Рудного Алтая датируется XVIII веком [25,54]. На сегодняшний день по данному региону накоплен обширный геолого-геофизический материал. Принципиальное значение для построений имеют материалы Государственного геологического картирования масштаба 1:1 000 000 (ГГК-1000/3), с врезками геологических карт масштаба 1: 200 000, выполненного специалистами ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского» [25,61,62].

В ходе исследований использовались карты гравитационного и магнитного полей масштаба 1:200 000, тектонические схемы, карты геоморфологических и геохимических съемок, отработанных в результате поисковых работ. Последние выполнены Каменской геофизической экспедицией Сибирского геофизического треста с 1951 года [62,82]. В рабочий банк данных включены «Дистанционные основы Гослеолкарты-1000». Картограмма геолого-геофизической изученности 1:1 000 000, 1:200 000 и 1:50 000 масштабов - карт, схем, разрезов в аналоговой и цифровой формах, задействованных при выполнении данной работы [61,62], представлена на рисунке 2.1.

Детальные геологические съемки масштаба 1:50 000 Рудного Алтая, выполненные в период с 1975 по 1983 гг., послужили основой для проведения поисковых работ. В рамках этих исследований были первично оценены перспективы изучения Змеиногорского рудного района [43,54,83].

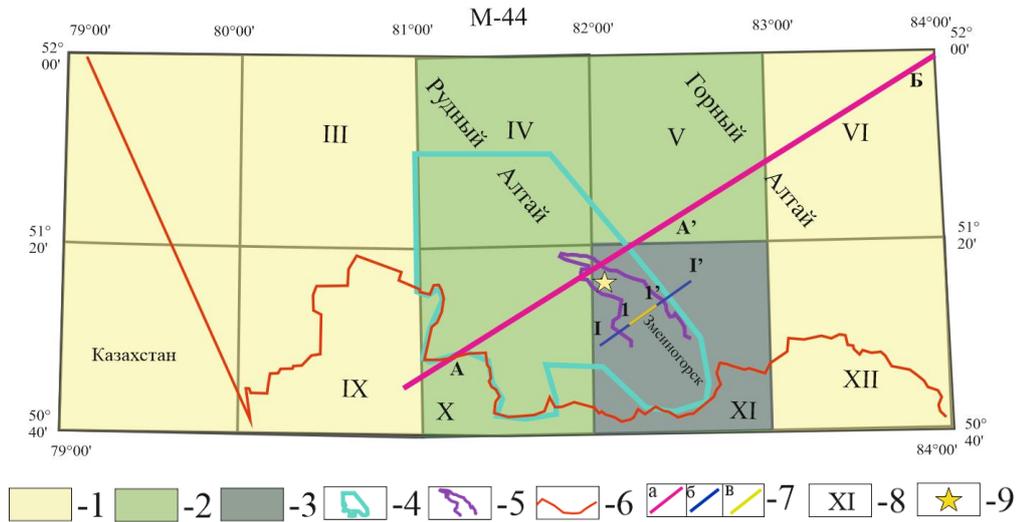


Рисунок 2.1 – Картограмма геолого-геофизической изученности Рудного Алтая.

Условные обозначения: 1-3 – площади геологических и геофизических съемок масштаба: 1 – 1:1 000 000, 2 – 1:200 000, 3 – 1:100 000-1:50 000; 4-8 – прочие обозначения: 4 – площадь детальных геолого-геофизических съемок, 5 – контур Змеиногорского рудного района, б – государственная граница, 7 – положение опорных профилей (а – «А-Б» вдоль сейсморазведочного профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» с врезкой среднемасштабного интерпретационного профиля «А-А'», б – детального интерпретационного профиля «I-I'», в – сейсморазведочного профиля МОГТ-2D-ВРС «I-I'»), 8 – индексы планшетов масштаба 1:200 000, 9 – положение Змеиногорска.

Последующие геологические исследования региона были нацелены на доизучение, в том числе глубинное моделирование перспективных площадей. Так, на стыке веков активно велись работы по составлению листов М-44-Х, М-44-ХІ [67], на основе которых были выполнены геохимические и геофизические исследования, позволившие определить приоритетность проведения поисковых работ.

В период с 2010 по 2012 гг. тематическими коллективами ФГБУ ЦНИГРИ [54,82,83] и ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского» [25,48,62] проводились работы по систематизации материалов и переоценке перспектив полиметаллического оруденения в пределах Рудного Алтая [13,52,68]. По заключению ФГБУ ЦНИГРИ, в качестве наиболее перспективных для прогнозно-минерагенических исследований выделены: Змеиногорский, Золотушинский и Рубцовский районы [53,54].

Геофизическая изученность

Отличительной особенностью Рудного Алтая является высокий уровень его геофизической изученности, что обусловлено проведением здесь прогнозно-минерагенических исследований.

В 1970-1980-х гг. прошлого века активно выполнялись гравиметрические и магнитометрические исследования в масштабах 1:1 000 000 и 1:200 000 [25]. Последние позволили уточнить границы структурно-формационных зон Рудного Алтая (Рисунок 2.2).

В этот период также выполнялись уточняющие гравиметрические и спектральные космические съемки для уточнения строения территории, при геолого-геофизическом районировании листов М-44-Х, М-44-ХІ [61,62,67].

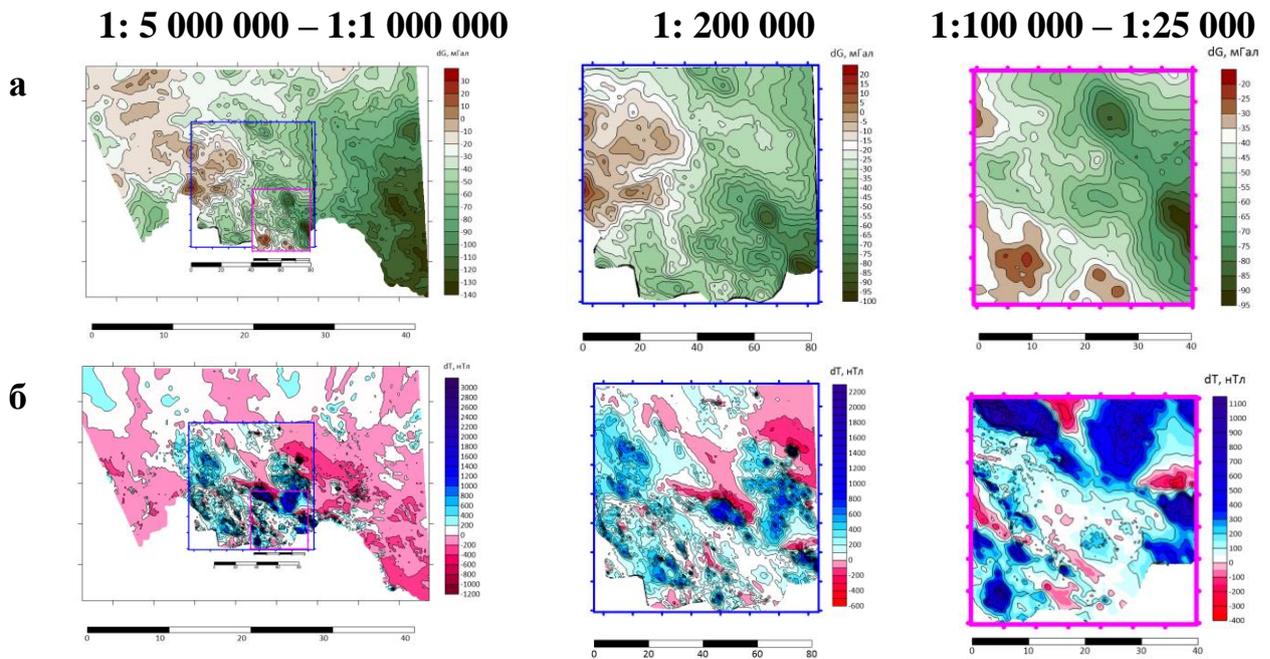


Рисунок 2.2 – Фрагменты мелкомасштабных, среднемасштабных и крупномасштабных карт гравитационного (а) и магнитного (б) полей, задействованных в данной работе.

Главным источником информации о глубинном строении земной коры Рудного Алтая являются данные сейсмического зондирования, полученные методом ГСЗ-МОВЗ по линии профиля «Базальт» [7]. Глубинный разрез представлен в форме скоростных доменов, ограниченных субгоризонтальными и субвертикальными границами (Рисунок 2.3).

Алтае-Саянская складчатая область

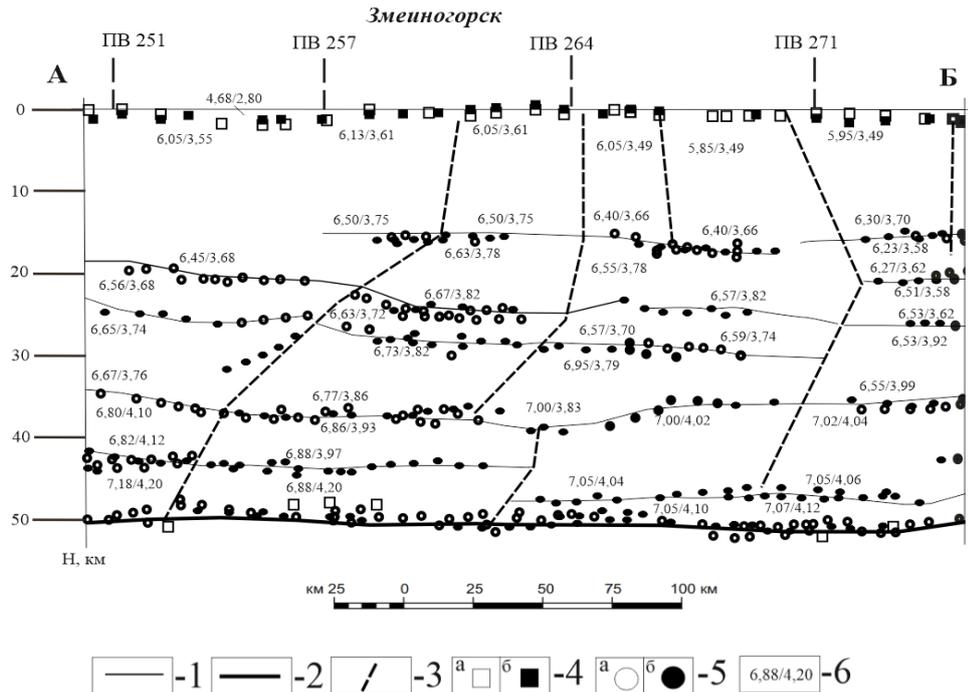


Рисунок 2.3 – Фрагмент сейсморазведочного профиля ГСЗ – МОВЗ «Базальт» [7].

Условные обозначения: 1 – сейсмические границы, которым соответствуют теоретические годографы, 2 – граница Мохоровичича, 3 – границы доменов с разными скоростями упругих волн, 4 – метки преломляющих границ (а – по продольным волнам, б – по поперечным), 5 – метки глубин отражающих границ (а – по продольным волнам, б – по поперечным волнам), б – значения средних скоростей упругих волн (для продольных волн – в числителе, для поперечных волн – в знаменателе, км/с).

В начале 2000-х годов на основе съемок масштаба 1:200 000 была составлена геофизическая основа (ГФО) листа М-44 масштаба 1:1 000 000 [25].

В 2010-2012 годах в пределах Рудно-Алтайского блока (Змеиногорский, Золотушинский и Рубцовский рудные районы) были проведены детальные исследования масштаба 1:25 000, нацеленные на изучение особенностей его глубинного строения [9,44,67]. На территории Змеиногорского рудного района силами «ВНИИГЕОФИЗИКА» отработаны сейсмические профили с вибрационными источниками (МОГТ-2D-ВРС), общей протяженностью 200 пог. км. [82,83]. Материалы были доступны растровой форме и задействованы автором диссертации при выполнении геологической интерпретации комплекса геофизических данных (Рисунок 2.4).

Змеиногорско-Быструшинский прогиб

Центральная зона

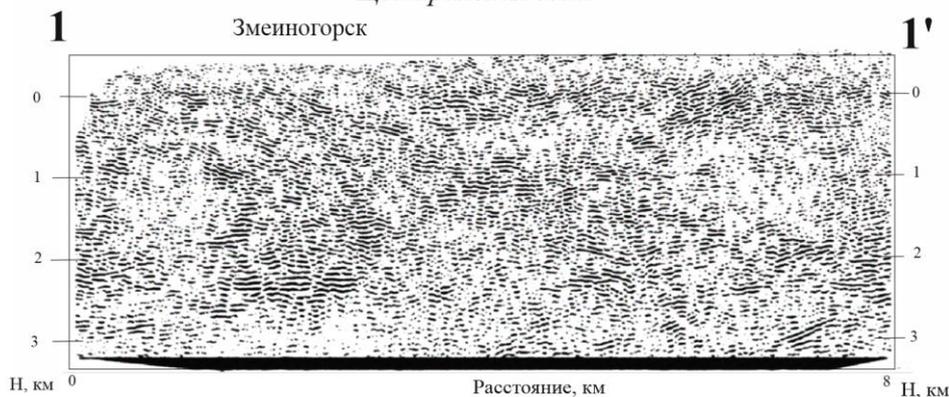


Рисунок 2.4 – Сейсмический разрез МОГТ-2D-ВРС после повышения контрастности по опорному профилю «1-1'» (см. положение профиля на рисунке 2.1) Змеиногорского рудного района (ЦНИГРИ, ВНИИГЕОФИЗИКА) [82].

Важную роль в исследованиях региона занимали геохимические работы, позволившие по первичным и вторичным ореолам рассеяния выявить контур колчеданно-полиметаллического рудопроявления [35,48,91].

Результаты прогнозно-минерагенических исследований

Прогнозно-минерагенические исследования Рудного Алтая начали проводиться во второй половине XX века и были направлены на исследование перспектив рудоносности вулканогенно-осадочных комплексов.

К концу XX века был составлен комплект прогнозно-металлогенических карт Змеиногорского рудного района в масштабе 1:200 000 [54] и дана положительная оценка перспективности региона на поиск скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

Важное значение в исследованиях наиболее перспективных площадей Змеиногорского рудного района придавалось прогнозно-минерагеническим оценкам рудоносности масштаба 1:50 000-1:25 000, нацеленным на обнаружение колчеданно-полиметаллических руд [54]. Особый интерес представляют результаты структурно-формационного анализа, выполненного В.Б.Карауловым, Л.К.Филатовой и М.И.Никитиной в 1991 году по площади Змеиногорского рудного района [82,90]. А также многофакторным прогнозным работам, выполненным Д.Ф.Калининым и М.К.Овсовым [46]. Кроме того, в последние

десятилетия коллективами ФГБУ ЦНИГРИ и «СНИИГГиМС» выполнялось комплексное дешифрирование материалов мультиспектральных космических съемок [82,83].

Анализ результатов геолого-геофизической изученности и поисково-разведочных работ в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба, являющегося главным объектом авторских исследований, свидетельствует о ее неравномерном характере: хорошо изучен южный фланг и недостаточно полно – северо-западный. В геофизических полях хорошо расшифровываются границы прогиба – Северо-Восточный разлом, обрамляющий прогиб с востока, и Отраднинско-Верхалейский, ограничивающий прогиб с западной стороны. В геофизических полях активно проявляются разрывные дислокации внутренних зон прогиба и ареалы внедрения интрузивных комплексов. Последние характеризуются понижениями поля силы тяжести и повышенными значениями магнитного поля [41,52].

Все вышеперечисленные фактические материалы включены в рабочий банк данных (БД) цифровой информации трех масштабных уровней – мелко-, средне- и крупномасштабного. Эти информационные слои пространственно увязаны; интерпретационные параметры выполнены в согласованной системе условных обозначений.

2.2. Методологическая схема исследований

Фактологическая геофизическая основа исследований, оцифрованная и систематизированная в составе рабочего банка данных, подвергается последовательной обработке, методной и комплексной геологической интерпретации в соответствии с разработанной многоэтапной методологической схемой (Рисунок 2.5). В составе каждого этапа работ выделяется 4 основных стадии: 1) формирование рабочего банка данных с оценкой их качества, 2) обработка, 3) интерпретация, 4) прогноз.

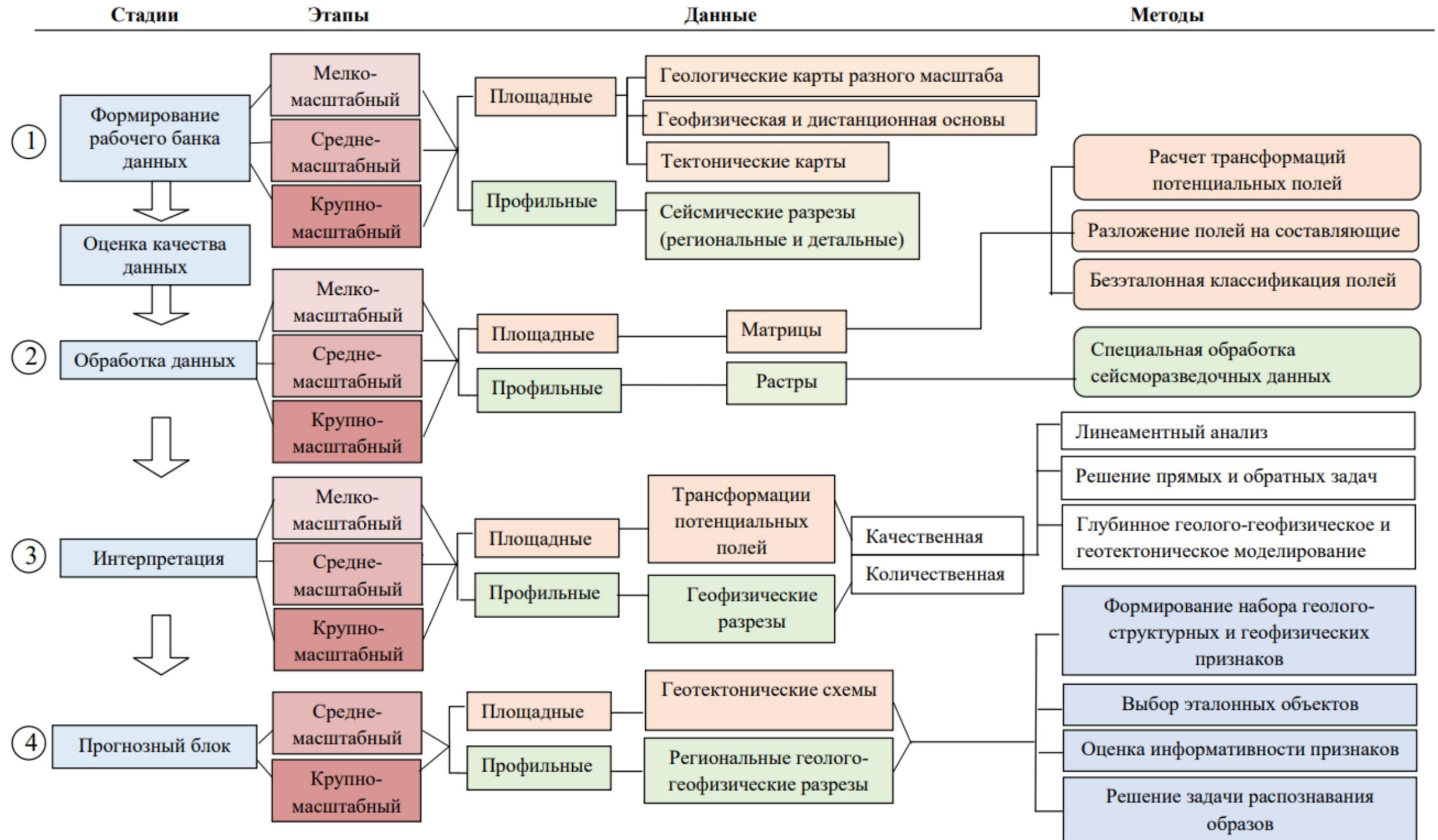


Рисунок 2.5 – Методологическая схема этапности и стадийности операций сбора, обработки, геологической и прогнозно-минерогенической интерпретации геолого-геофизических материалов.

2.2.1. Способы обработки геолого-геофизических данных

Первичная обработка разнородных геолого-геофизических данных, сведенных в единый рабочий банк данных, подразделяется на площадную и профильную.

К инструментам площадной обработки относятся:

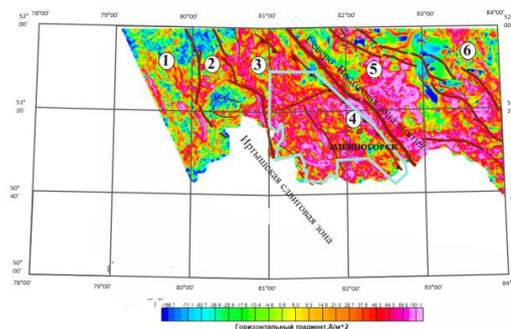
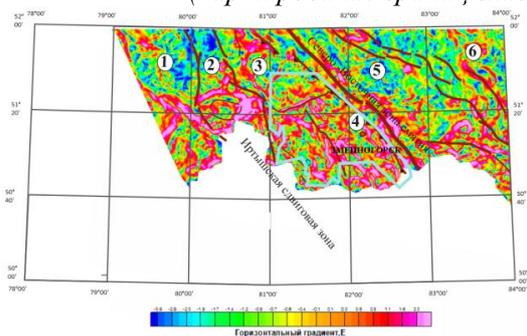
1) расчет трансформант потенциальных полей (вертикальные и горизонтальные производные, представление полей в форме «искусственного псевдорельефа», высоко- и низкочастотная фильтрация и спектральное разложение и т.д.). Основная задача применения данных процедур заключается в выделении полезного сигнала на фоне помех по исходным матрицам гравитационного и магнитного полей. Далее представлены примеры расчета трансформант потенциальных полей на крупно-, средне- и мелкомасштабном уровнях с первичной интерпретацией (Рисунок 2.6) [78,79];

Гравитационное поле

Магнитное поле

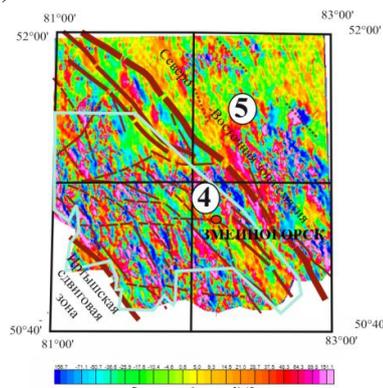
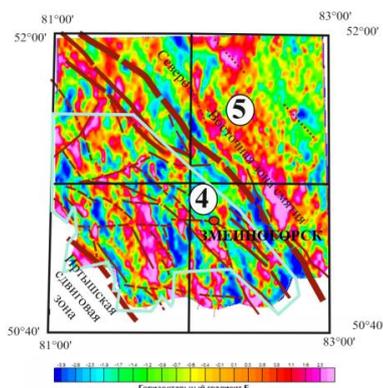
а

Региональный масштаб
(картирование границ главных структурно-формационных зон)



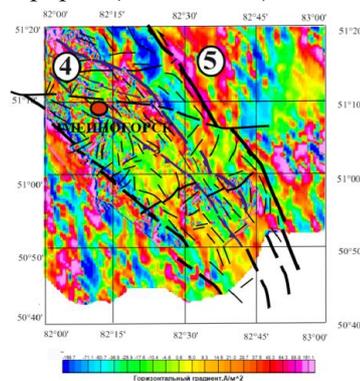
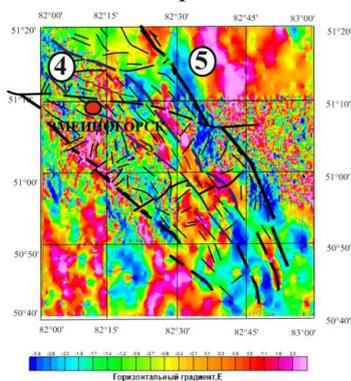
б

Средний масштаб (картирование главных разрывных дислокаций в пределах структурно-формационных зон)



в

Детальный масштаб (картирование наиболее полного набора структурно-вещественных неоднородностей в пределах структурно-формационных зон)



Структурно-формационные зоны:

- ① -Калба-Нарымская ④ -Змеиногорско-Быструшинский прогиб
② -Иртышская ⑤ -Горно-Алтайская
③ -Рудно-Алтайская ⑥ -Чарышско-Талицкая

- 1 2 3
4 5 а б 6

Рисунок 2.6 – Картирование тектонических границ на мелко-, средне- и крупномасштабных картах горизонтального градиента гравитационного и магнитного полей.

Условные обозначения: 1 – контур детальной изученности, включающий Змеиногорский рудный район, 2 – 6 – разрывные нарушения: 2 – главные разломы (1 – Северо-Восточный, 2 – Центрально-Алейский, 3 – Отраднинско-Верхалейский), 3 – границы рифтогенной структуры, 4 – надвиги, 5 – второстепенные разломы, 6 – предполагаемые разломы (а – проявленные по ряду геофизических признаков в пределах контура, б – проявленные по ряду геофизических признаков за пределами контура).

2) разложение полей на разночастотные составляющие с использованием алгоритма спектрального разложения на основе рядов Фурье [3,10,34]. По этим данным удастся оценить положение контуров Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба, доминирующие разрывные нарушения, основные структурные зоны, наметить положение «корней» интрузивных комплексов, которые могут быть проявлены в виде повышенных и пониженных значений аномальных объектов в зависимости от состава, и локализованы на глубинах до трех километров, подтвердить современные направления рудоконтролирующих формаций [34];

3) безэталонная классификация исходных и преобразованных данных с использованием алгоритмов, реализованных в отечественном программном комплексе КОСКАД 3D [49,80]. Данная технология позволяет установить корреляционные зависимости между геолого-структурными и геофизическими параметрами и выполнить районирование площади исследований на ареалы, однотипно проявленные по набору признаков. Задача решается четырьмя основными методами [49,69,81]:

- общего расстояния;
- динамического сгущения (к-средних);
- авторской классификации по А.В.Петрову, базирующейся на теории многомерного дисперсионного анализа [69];
- знаковой классификации, позволяющей разбить исследуемую площадь на группы с положительными и отрицательными характеристиками признаков с предварительным их центрированием.

Безэталонная классификация в данной работе реализована как по исходным матрицам гравитационного и магнитного полей, так и по отдельным их параметрам, задействованным в комплексе данных в виде трансформант (градиенты, разночастотные составляющие, псевдопересчеты и т.д.) [78,79,80]. Наибольший интерес при интерпретации схем представляют результаты классификации объединенных моделей гравитационного и магнитного полей,

поскольку в этом случае удастся оценить классовое районирование территории по комплексу параметров.

Характерным примером качественной интерпретации геофизических полей является картирование внешних тектонических границ Змеиногорско-Быструшинского прогиба и его тектоническое районирование границ по результатам преобразования гравитационного и магнитного полей способами «динамических сгущений» и способом А.В.Петрова (Рисунок 2.7).

Гравитационное поле

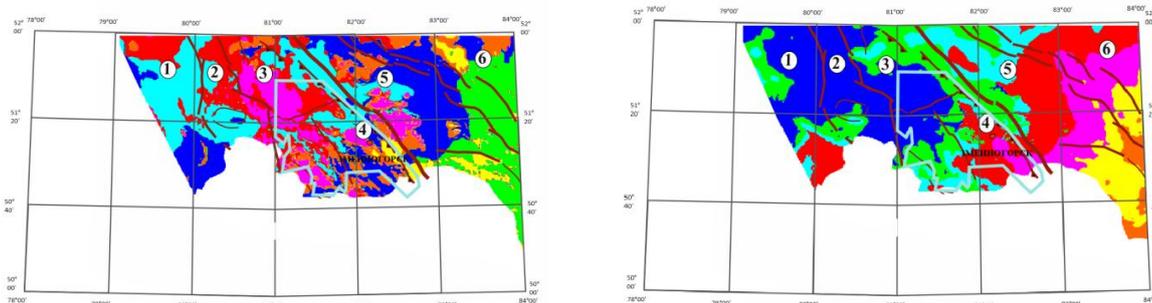
Магнитное поле

Метод динамических сгущений

Классификация по А.В.Петрову

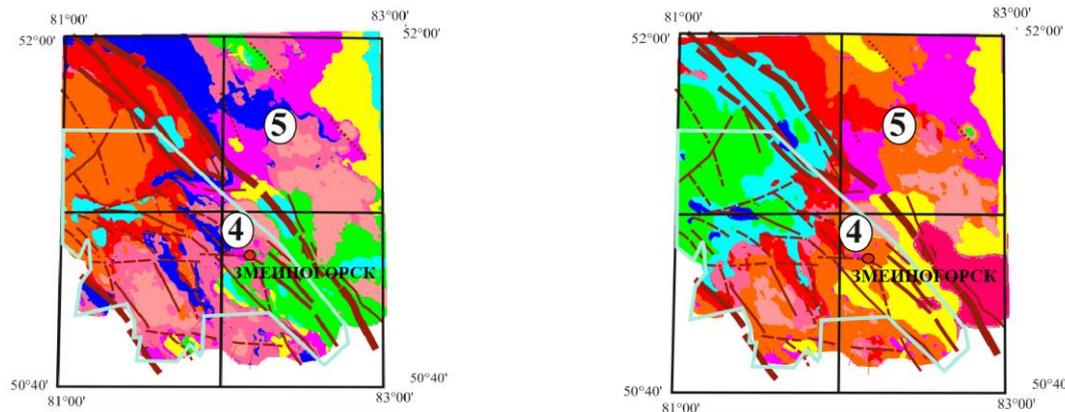
а

Масштаб 1:1 000 000

(картирование границ главных структурно-формационных зон)

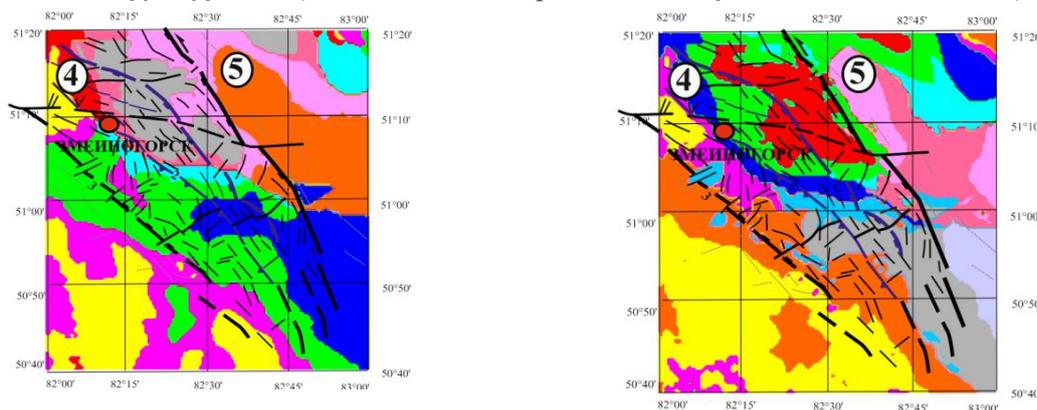
б

Масштаб 1:200 000

(картирование главных разрывных дислокаций в пределах структурно-формационных зон)

в

Масштаб 1:100 000

(картирование структурно-вещественных неоднородностей в пределах выделенных зон)

Классы



Рисунок 2.7 – Результаты безэталонной классификации рудоносности по потенциальным гравитационному и магнитному полям на всех масштабных уровнях (условные обозначения см. на рисунке 2.6).

Наиболее информативные трансформации потенциальных полей, установленные автором на основе их сопоставления с данными геологического картирования, включены в технологическую схему обработки и интерпретации геофизических данных. Критерием информативности являлось контрастирование аномального проявления объектов глубинного моделирования (блоков и межблоковых зон, вулканических комплексов активной континентальной окраины, гранитоидных плутонов, разрывных нарушений, отдельных геологических границ).

Так, применение алгоритма спектрального разложения полей позволило исключить помехи, искажающие полезные сигналы, к которым относится влияние случайной высокочастотной составляющей. Кроме того, удалось изучить закономерности локализации аномальных источников (гранитных интрузивов) на разных глубинах [34,88,92].

Результаты безэталонной классификации гравитационного и магнитного полей [72,77,80] позволили наиболее уверенно оконтурить блоки (палеоплиты) с корой континентального типа и межблоковые (сутурные) зоны [78], а также границы структурно-вещественных подразделений, сформированных в разнотипных геодинамических обстановках [19,22].

К алгоритмам профильной обработки относятся:

1) алгоритм расчета сейсмического разреза в показателях «рефлективности» [38,45,86]. В скользящем окне по растровым представлениям глубинных и временных сейсмических разрезов ГСЗ-МОВЗ (Рисунок 2.8а) и МОГТ-2D-ВРС (Рисунок 2.8б) рассчитывается число рефлекторов, попадающих на единичное окно (рефлективность). Распределение параметра «рефлективности» в сечении сейсмического разреза представляется в форме изолиний [7,75,76];

Качественная интерпретация этих разрезов (с учетом данных тектонического картографирования и результатов решения обратных задач гравитационного и магнитного полей в тех же сечениях) позволяет выделить и проследить на глубину разрывные нарушения, наметить субгоризонтальные границы радиальной расслоенности земной коры, оконтурить отдельные

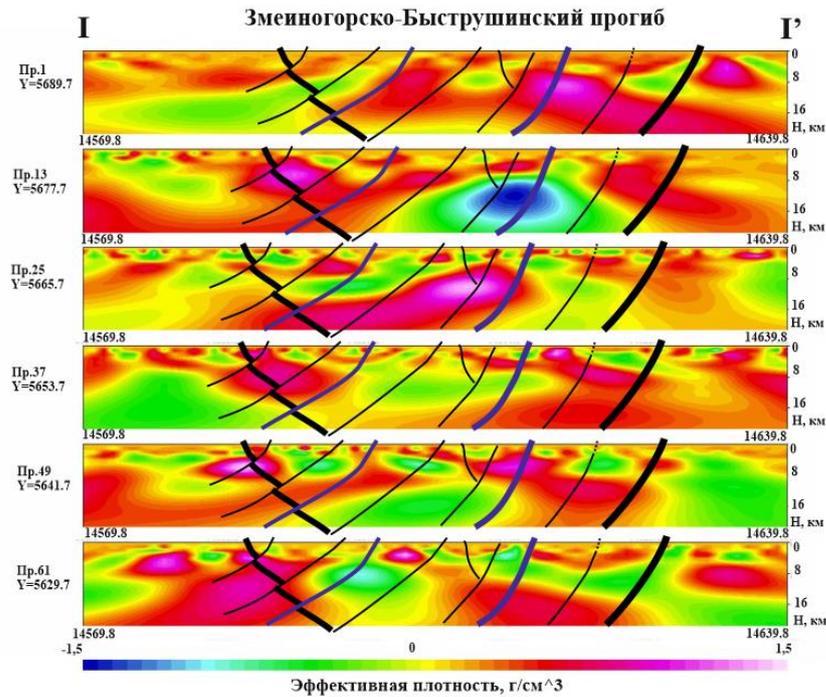


Рисунок 2.9 – Результат решения обратной задачи гравитационного поля в сечениях расчетных геофизических профилей, заданных вкрест простирания Зmeinогорско-Быструшинского прогиба (метод И.И.Приезжева [115]); детальный уровень моделирования.

В результате применения алгоритма удается оценить интенсивность и закономерности распределения глубинных источников потенциального поля, отвечающих структурно-вещественным подразделениям земной коры разных типов [3,4,34].

По результатам фильтрации полей удастся оценить интенсивность и закономерности распределения гравитационных и магнитных масс на разных глубинных срезах [27,49,69].

3) применение вероятностно-стохастического подхода, включающего такие методы, как: корреляционно-регрессионный анализ гравитационного и магнитного полей, оценка линейной оптимальной фильтрации полей, спектральный анализ, оценка градиентных параметров геополей, распознавание образов на основе многопризнаковых наблюдений (см. Глава 5) [45,46,47]. На среднем масштабном уровне реализована двумерная взаимно-корреляционная функция между гравитационным и магнитным полями, которая обусловлена возмущениями от разных геологических [68];

4) решение обратных задач геофизики (по гравитационному и магнитному полям) и расчет особых точек на основе деконволюции Эйлера, позволяет предположить проявление аномальных источников в сечении глубинных разрезов [34,71] и перейти от значения аномального поля к петрофизическим параметрам моделируемой среды [8,31,51] (Рисунок 2.10);

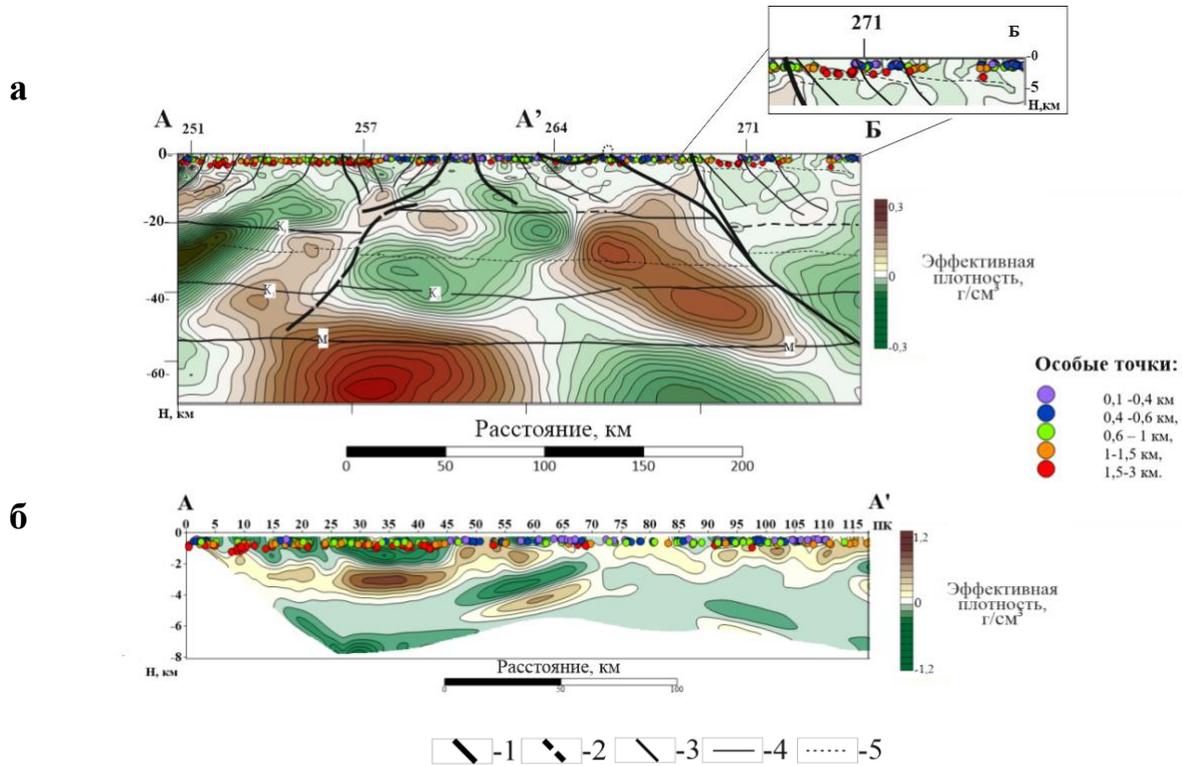


Рисунок 2.10 – Моделирование разрывных нарушений по результатам решения обратных задач гравиметрии способом М.Б.Штокаленко [118,119]; с наложением особых точек (решение по деконволюции Эйлера [71]) для а) регионального и б) среднемасштабного уровня исследований.

Условные обозначения: 1 – 3 – разрывные нарушения: 1 – главные, 2 – предполагаемые, 3 – второстепенные, 4 – 5 – субгоризонтальные границы: 4 – основные, 5 – второстепенные.

Данные процедуры позволяют трассировать разрывные нарушения на глубину на региональном и среднем масштабном уровнях. Главная технологическая сложность в реализации этого подхода – увязка данных геотектонического картографирования на дневной поверхности с параметрами псевдоплотностного (или эффективной намагниченности) разреза. Так Змеиногогорско-Быструшинский прогиб в целом отвечает ареалу отрицательных значений псевдоплотностного разреза с разуплотненными глубинными корнями;

более молодые надвиговые дислокации трассируются границами отдельных локальных аномалий этого разреза.

2.2.2. Последовательность применения способов интерпретации геолого-геофизических данных

Комплексное геотектоническое моделирование структурно-вещественных неоднородностей Рудного Алтая выполнено в рамках зонально-блоковой модели земной коры [38,39,72].

На первой стадии интерпретации проведено трассирование разрывных нарушений, фрагменты которых закреплены на интерпретационных тектонических схемах разного масштаба и выделяются по результатам линеаментного анализа гравитационного и магнитного полей, и их трансформаций. Разрывные нарушения классифицируются по иерархическому уровню и ранжируются по морфокинематическому типу [45,72,73].

На региональном уровне моделируются контуры основных структурно-вещественных подразделений, включая блоки и межблоковые (сутурные, рифтогенные, сдвиговые зоны) (см. Рисунок 2.7). На среднемасштабном уровне проводится детализация ранее выделенных тектонических границ; на крупномасштабном уровне картируются вторичные разрывные нарушения, оперяющие основные разрывные дислокации (см. Рисунок 2.8).

При выполнении качественной интерпретации разнородной геофизической информации высокоинформативными оказались разночастотные составляющие гравитационного и магнитного полей и данные их безэталонной классификации [72,77] (Рисунок 2.11).

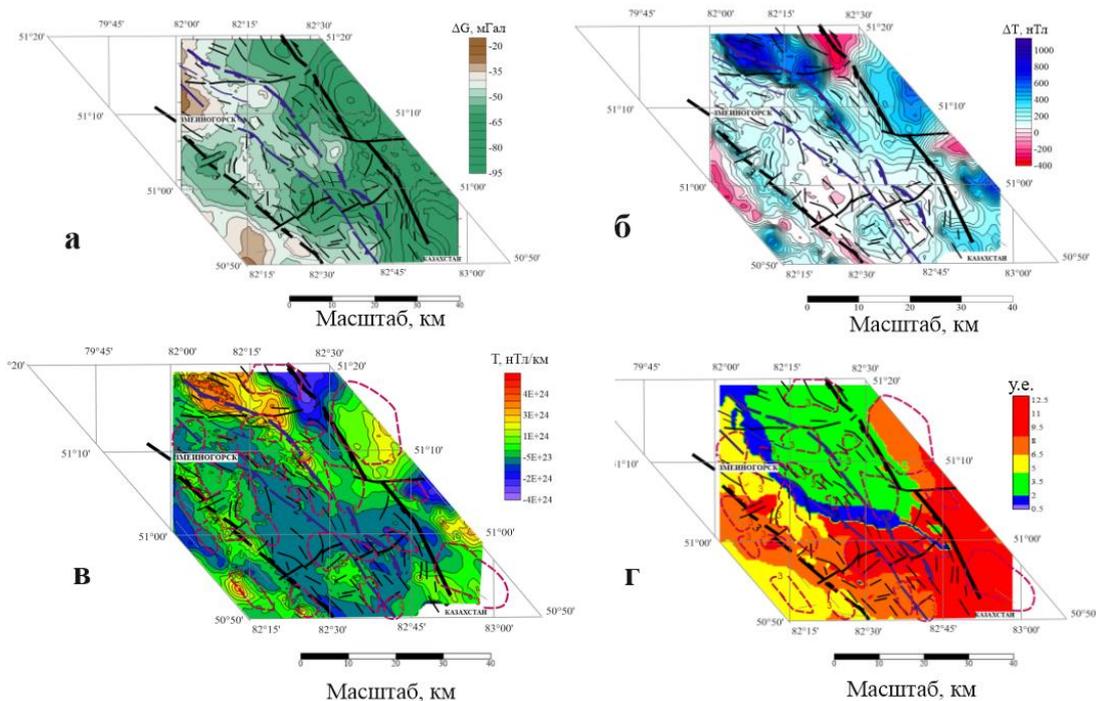
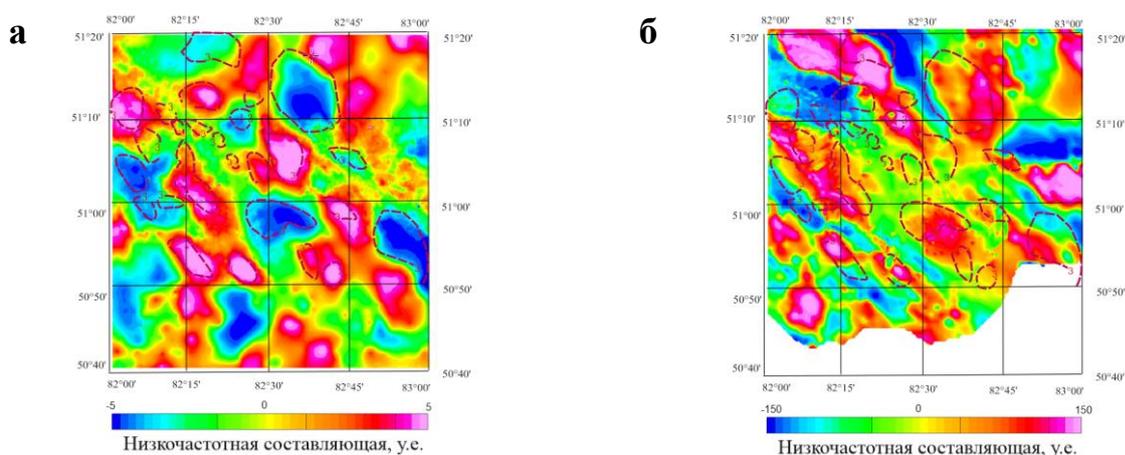


Рисунок 2.11 – Интерпретационные тектонические схемы строения Змеиногорско-Быструшинского прогиба, выполненные на основе: а – карты гравитационного поля, б – карты магнитного поля, в – карты низкочастотной составляющей магнитного поля с предполагаемым положением контуров гранитоидных массивов на глубинном срезе 5 км, г – карты безэталонной классификации площади исследований по «методу динамических сгущений» [49] по параметрам исходных гравитационного и магнитного полей (условные обозначения см. на рисунке 2.6).

Низкочастотные и среднечастотные составляющих потенциальных полей позволили выделить контуры интрузивных комплексов на заданных глубинных срезах [3,6,71] (Рисунок 2.12).



 – контур интрузивных массивов, проявленных на глубинном срезе 3-х км.

Рисунок 2.12 – Сопоставление результатов выделения массивов с низкочастотными составляющими а) гравитационного и б) магнитного полей (на детальном уровне исследований 1:100 000 (+1:50 000, +1:25 000)).

Глубина срезов определялась автором при задании параметров фильтрации. В качестве наиболее информативных были выбраны срезы на глубине 1,5 и 3 км на основе сопоставления с исходными потенциальными полями и геологическими характеристиками проявления интрузивных массивов [3,65,72]. Выявлено, что кислые интрузивные тела на представленных схемах характеризуются пониженными значениями, что связано с менее магнитными свойствами относительно интрузивов с преобладанием основного состава.

При выполнении моделирования структурно-вещественных неоднородностей в сечениях глубинных разрезов применялись процедуры, позволяющие провести интерпретацию по результатам решения обратных задач: трассирование на глубину разрывных нарушений, закартированных на дневной поверхности; выделение субгоризонтальных границ радиальной расслоенности земной коры, определение скоростных и плотностных характеристик основных комплексов, залегающих на характерных глубинах (Рисунок 2.13).

Прогиб проявляется на разрезах (псевдоплотностном и эффективной намагниченности) характерной мозаичной инфраструктурой расчетных аномалий на фоне более однородной вмещающей среды. Разрывные нарушения трассируются по совпадению аномальных особенностей этих разрезов.

Морфология границ, выделяемых по результатам решения обратных задач геофизики, позволяет оценить мощности вулканогенно-осадочных комплексов до глубины 3-х километров [34,72]. Кроме того, по распределению параметров эффективной плотности и намагниченности удается выявить разный характер денудации для центральной и западной зон Змеиногорско-Быструшинского прогиба, которые отличаются от восточного фланга разреза более высоким уровнем денудации [44,50,52].

По результатам комплексной интерпретации разнородных геофизических данных строится набор взаимоувязанных геолого-структурных схем и геофизических разрезов, позволяющих оценить закономерности локализации рудоформирующих структур на различных глубинах (см. рисунки 2.6, 2.7).

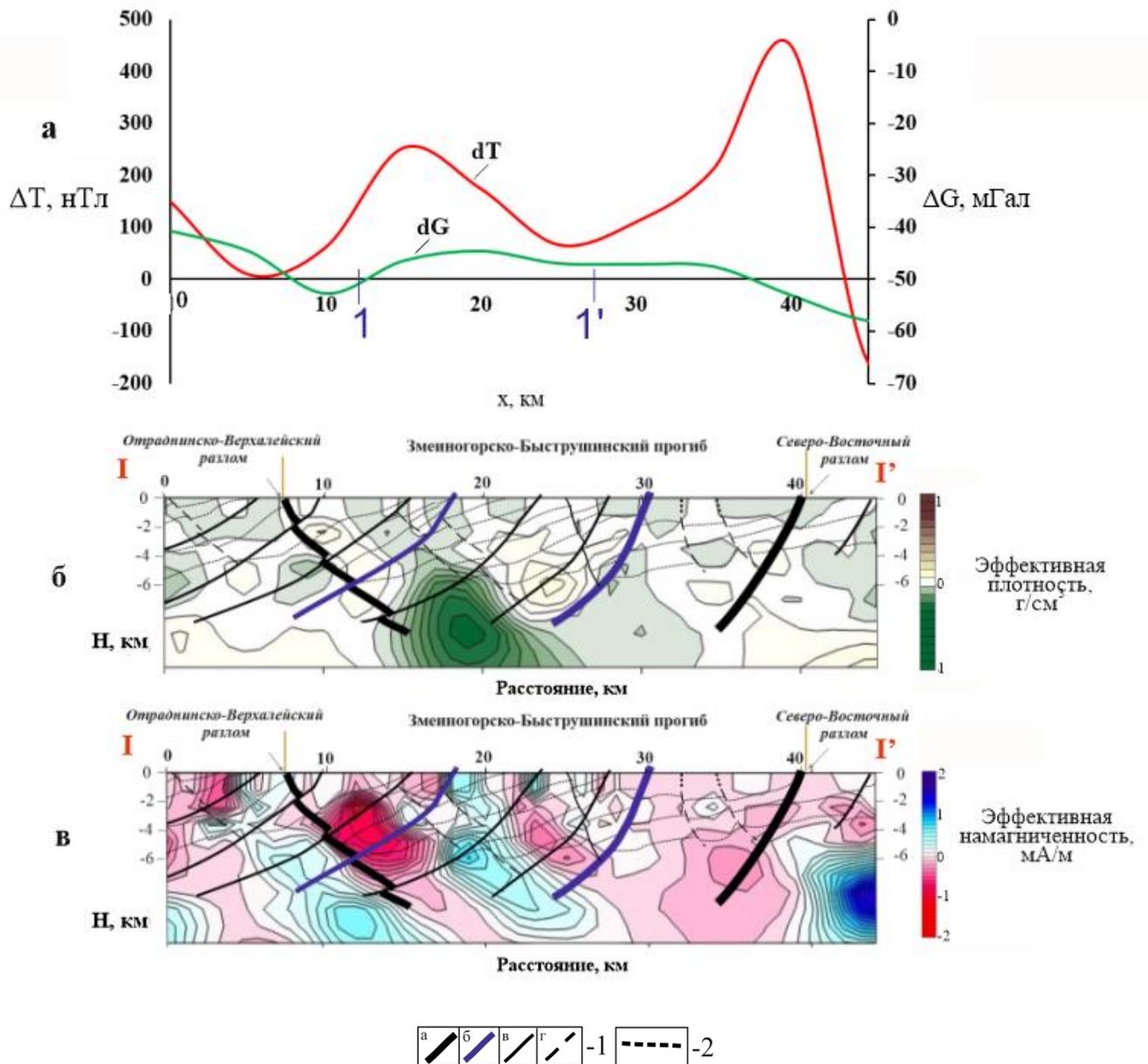


Рисунок 2.13 – Обоснование морфологии разрывных нарушений и границ радиальной расслоенности Змеиногорско-Быструшинского прогиба по результатам инверсии гравитационного поля (б) и магнитного поля (в) (детальный уровень моделирования); а – графики аномального магнитного и гравитационного полей.

Условные обозначения: 1 – разрывные нарушения (а – главные (сбросы), б – надвиги, в – второстепенные), 2 – субгоризонтальные границы.

Прогнозно-минерагенические построения, выполненные автором с использованием обоснованных геофизических и геолого-структурных критериев рудоносности, детально рассматриваются в главе 5.

Выводы

Фактологическая основа исследований Рудного Алтая в целом и Змеиногорского рудного района в частности представлена широким набором мелко-, средне- и крупномасштабных геолого-геофизических данных, комплексная интерпретация которых позволила выполнить обработку и геотектоническое моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры в латеральном и радиальном измерениях.

Методика систематизации, обработки и интерпретации разнородной информации включает: оцифровку и увязку в единых условных обозначениях и координатах геолого-геофизических карт и разрезов, расчет трансформант потенциальных полей и решение обратных задач гравитационного и магнитного полей, выполнение безэталонной классификации и линеаментного анализа с выделением основных структурно-вещественных неоднородностей на всех масштабных уровнях, обоснование информативности геолого-структурных и геофизических критериев рудоносности на основе комплекса преобразованных данных.

На базе этих материалов, представленных на 3-х масштабных уровнях, удастся выполнить геолого-структурное моделирование с выделением основных блоков и межблоковых зон (в том числе Змеиногорско-Быструшинского прогиба), параметров латеральной и радиальной зональности этого прогиба с оценкой особенностей глубинного строения уровня денудации отдельных его зон, ареалов развития интрузивных комплексов.

Результаты комплексной геотектонической интерпретации позволяют обосновать нестандартные геолого-структурные и геофизические критерии, которые вовлекаются в решение задачи распознавания образцов с обучением при проведении прогнозно-минерагенического районирования.

ГЛАВА 3 ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ И ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНОГО АЛТАЯ

3.1. Геотектоническое районирование Рудного Алтая

Геолого-геофизическое картографирование структур верхней коры Рудного Алтая выполнено автором на основе качественной интерпретации широкого комплекса геолого-геофизических данных, включающих данные регионального геологического картирования, дистанционную основу, цифровые модели потенциальных полей разных масштабов, а также средне- и крупномасштабные геофизические материалы, скомпонованные в единый банк данных. Моделирование параметров глубинных разрезов земной коры в целом выполнено в ходе количественной интерпретации разнородных геофизических данных в рамках «радиально-зональной модели Земли» [37,38,39], позволяющей расшифровать ряд спорных особенностей строения юго-западной части Алтае-Саянской складчатой области.

В качестве научной основы геотектонической интерпретации геолого-геофизических построений приняты научные теоретические представления о плейт-тектонической эволюции Алтае-Саянского региона, разработанные Л.П.Зоненшайном, В.Е.Хаиным, Г.А.Гусевым и другими учеными [25,89].

В соответствии с современными представлениями о геотектонике и минерагии региона Рудного Алтая, колчеданно-полиметаллическое оруденение связано с обстановкой активной континентальной окраины (АКО), развивавшейся в девонское время вдоль границы Палеоазиатского океана [22,30,32]. Основными объектами на мелкомасштабном этапе геолого-геофизического моделирования в данном исследовании являлись структурно-вещественные неоднородности вулканоплутонического пояса [28,29] и тыловодужной рифтогенной впадины АКО. Объектом средне- и крупномасштабных геолого-геофизических, геотектонических и прогнозно-минерагенических исследований был выбран

Змеиногорско-Быструшинский прогиб (ЗБП), заложение которого связывается с девонским рифтогенезом активной континентальной окраины.

На рисунке 3.1 приведена тектоническая схема Рудного Алтая, отражающая расположение основных геоструктур региона и опорного геофизического профиля, вдоль которого выполнено геолого-геофизическое и историко-эволюционное моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры.

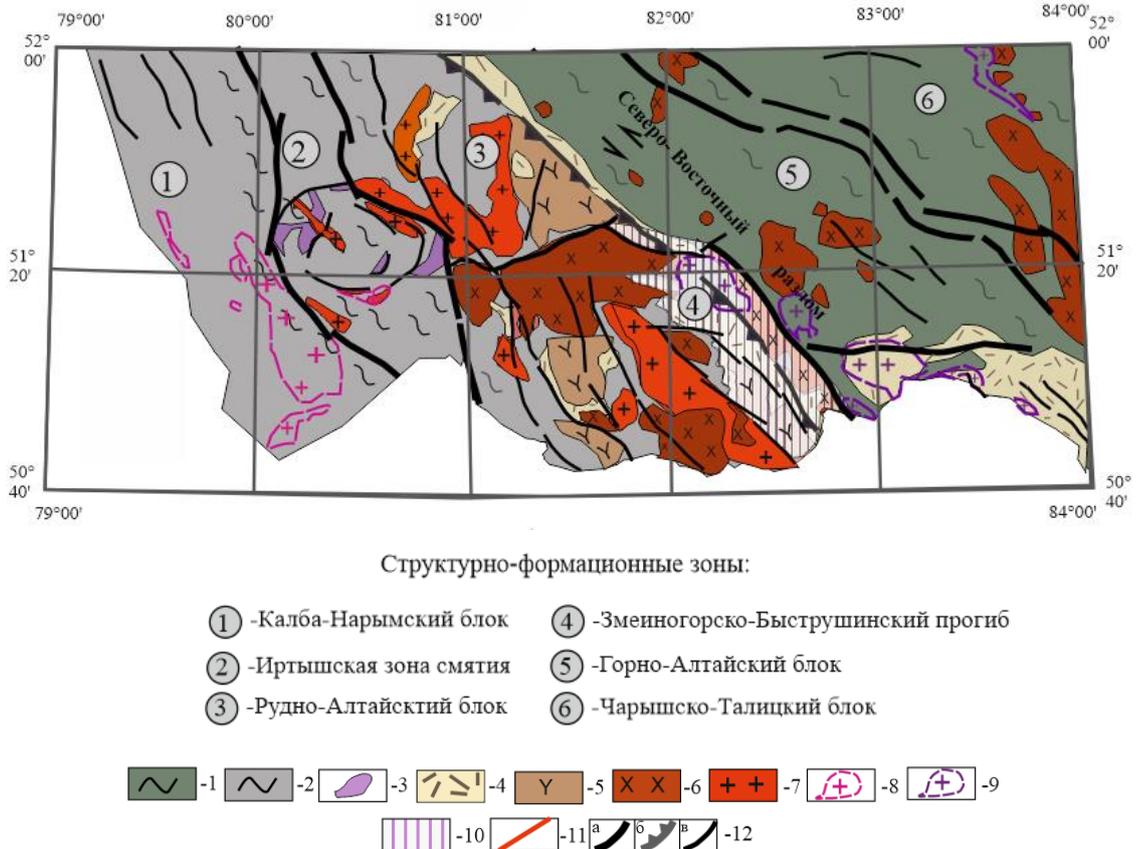


Рисунок 3.1 – Обзорная тектоническая схема Рудного Алтая.

Условные обозначения: 1 – 9 – структурно-вещественные подразделения: 1 – каледонские (PZ_{1-2}) орогенные структуры; 2 – ареалы проявления герцинского орогенеза (PZ_{2-3}); 3 – офиолиты (D_1); 4 – 6 – комплексы активной континентальной окраины: 4 – тыловодужного рифтогенеза (бимодальная базальт-дацит-риолитовая формация (D_{1-2})), 5 – 6 – вулканоплутонических поясов (5 – базальт-дацит риолитовая формация (D_{2-3}), 6 – габбро-гранодиорит-гранитовая формация (D_3)), 7 – коллизионная габбро-гранодиорит-гранитовая формация (C_1); 8 – 9 – коллизионные и постколлизионные (8 – гранитовая формация (P_1), 9 – плюмазитгранитовая формация (T_1)); 10 – 12 – прочие обозначения: 10 – конур Змеиногорско-Быструшинского прогиба, 11 – геотраверс ГСЗ – МОВЗ «Базальт», 12 – разрывные нарушения (а – главные разрывные нарушения, б – фронтальная зона проявления герцинского складчатонадвигового пояса, в – второстепенные разрывные нарушения).

Особенности локализации структур юго-западной части Алтае-Саянской складчатой области (АССО) связывается с характером проявления палеозойских орогенных процессов.

В раннем палеозое, в условиях раннекаледонского аккреционного причленения микроплит континентального типа и островных дуг к окраине Сибирского палеоконтинента, были заложены основные элементы зонально-блоковой структуры земной коры АССО.

В среднем палеозое преобразование структурно-вещественных ранее сформированных неоднородностей земной коры АССО связывается с раннегерцинским орогенезом активной континентальной окраины, обусловленным погружением Палеоазиатской океанической плиты под Алтае-Саянскую окраину Сибирского палеоконтинента.

Позднегерцинский коллизионный орогенез, обусловленный аккрецией Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов и островных дуг на месте закрывающегося Палеоазиатского океана, проявляется на площади исследований ареалом развития герцинского складчато-надвигового пояса

С учетом задействованного в данном исследовании принципа районирования по возрасту завершающей складчатости к каледонидам отнесены Горно-Алтайская и Чарышско-Талицкая структурно-формационные зоны; к герцинидам – Калба-Нарымская, Иртышская, Рудно-Алтайская и большая часть Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

3.2. Палеотектонические схемы Рудного Алтая

Проблемам эволюционного развития Горного и Рудного Алтая посвящены работы большой группы новосибирских ученых [1,57,58]. С опорой на этот богатый научный опыт и на результаты собственных геолого-геофизических построений в данном исследовании разработаны палеотектонические схемы Рудного Алтая на главные этапы эволюции его коры. На серии взаимосвязанных схем показаны контуры крупнейших структурно-вещественных подразделений

земной коры (блоков, межблоковых зон, разрывных нарушений разных морфокинематических типов и др.), последовательно сформированных в ходе каледонского и герцинского тектономагматических циклов.

Каледонский орогенный этап

Раннекаледонский этап характеризуется причленением в раннем палеозое многочисленных континентальных микроплит (в т.ч. Горно-Алтайской, Рудно-Алтайской и Чарышко-Талицкой) и островных дуг к окраине Сибирского палеоконтинента. Зоны аккреционного сочленения этих структур на рассматриваемой площади представлены Чарышко-Чуйской сутурной зоной и Северо-Восточной зоной смятия. Эволюция региона в режиме пассивной континентальной окраины привела к накоплению мощных (до 6 км) толщ флишеидной и терригенно-карбонатной формаций (Рисунок 3.2) [16,18,53].

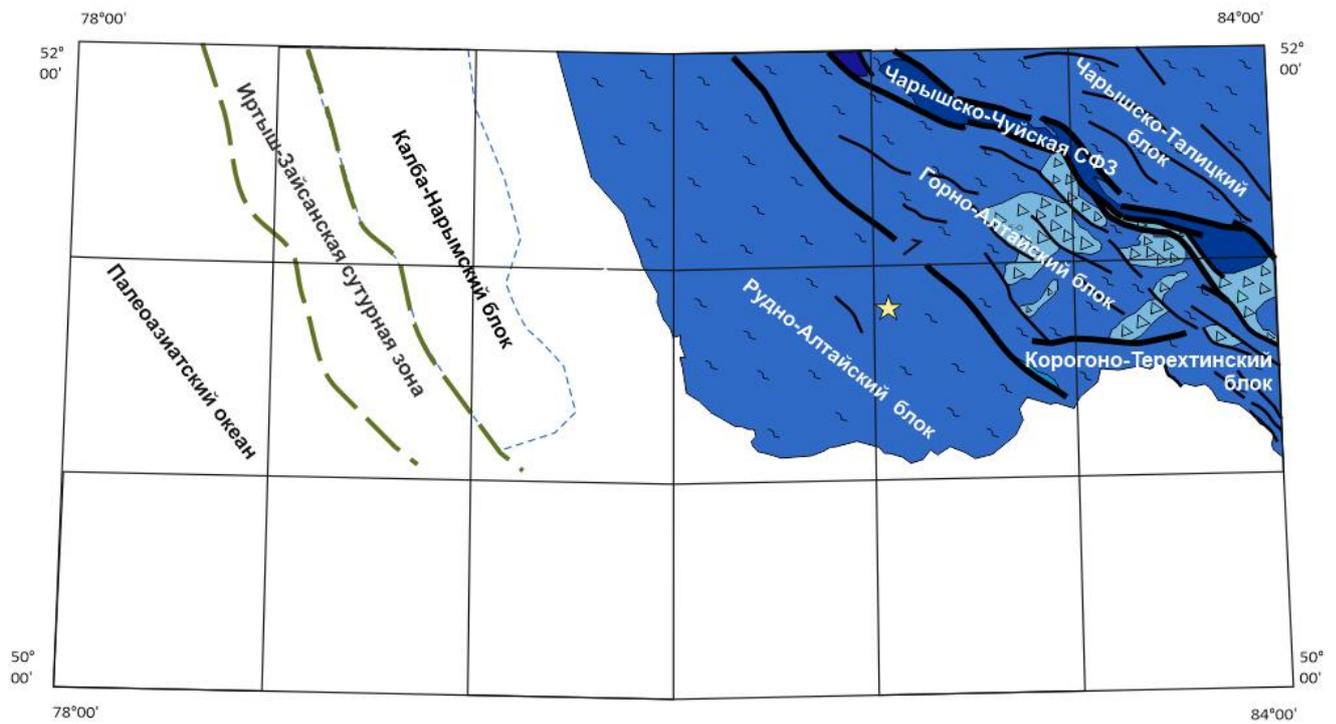


Рисунок 3.2 – Раннепалеозойская аккреция континентальных блоков Горно-Рудно-Алтайского региона к окраине Сибирского палеоконтинента (условные обозначения см. на рисунке 3.3).



Рисунок 3.3 – Общие условные обозначения к рисункам 3.2, 3.4, 3.5:

1-12 – ареалы формирования: 1–5 – раннекаледонского орогенеза (1 – блоки с корой континентального типа, 2 – межблоковые зоны, 3 – комплексы аккреционной призмы островной дуги, 4 – контур Калба-Нарымского блока, 5 – положение Иртыш-Зайсанской сутурной зоны вне площади исследования); 6 – 10 – позднекаледонского – раннегерцинского орогенеза (6 – офиолиты (толеит-базальтовая метаморфизованная формация), 7 – блоки, 8 – межблоковые зоны (а – комплексы аккреционной призмы, комплексы океанического типа), 9 – бимодальная базальт-дацит-риолитовая формация, 10 – комплексы вулканоплутонического пояса); 11 – 12 интрузивных комплексов (11 – гранодиориты поздней стадии АКО, 12 – гранодиорит-граниты коллизионного орогенеза); 13 – разрывные нарушения (а – Северо-Восточная зона смятия и главные разломы, б – граница складчато-надвиговых деформаций, в – второстепенные разломы), 14 – положение Змеиногорска.

Вблизи от Чарышско-Чуйской сутурной зоны картируются образования преддугового аккреционного комплекса позднекембрийско-раннеордовикского возраста [17,22,23]. Особый интерес для последующей интерпретации представляет Северо-Восточная зона смятия, которая является границей Горно- и Рудноалтайского блоков. Данная зона уверенно прослеживается в геофизических полях на всех масштабных уровнях [72,73]. Рядом исследователей она рассматривается как перспективная зона развития золото-сульфидного оруденения [24,28,40].

Позднекаледонский коллизионный и герцинский активноокраинный орогенные этапы

Временной интервал с раннего девона по ранний карбон характеризуется проявлением двух сближенных по времени орогенных процессов: коллизионного и активноокраинного [2,16] (Рисунок 3.4).

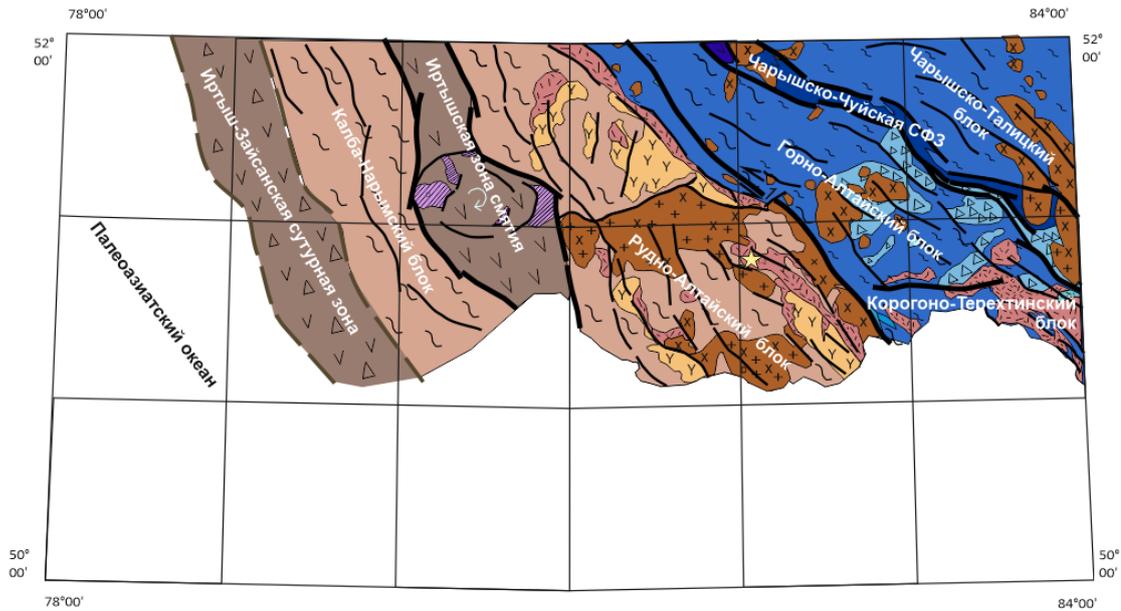


Рисунок 3.4 – Проявление позднекаледонского коллизионного и раннегерцинского активноокаинного орогенеза в пределах Горно-Рудно-Алтайского региона (условные обозначения см. на рисунке 3.3).

Позднекаледонские коллизионные процессы развивались на фоне ранее сформированных раннекаледонских орогенных структур. В это время в пределах Алтае-Саянской складчатой области происходит закрытие остаточных океанических бассейнов с внедрением массивов гранодиорит-гранитов [57,92]. Интенсивная тектоническая деструкция Иртышской зоны смятия и смежного Калбинского континентального блока обусловлена постагрегационными сдвиговыми перемещениями континентальных плит вдоль Чарышско-Чуйской зоны разломов в условиях косой субдукции Палеоазиатской океанической плиты [25,57,58].

Интересной особенностью Иртышской зоны смятия является выделяемая в центральной части кольцевая структура, на флангах которой картируются офиолиты раннедевонского возраста [25]. Кольцевая зональность офиолитов позволяет предположить, что в пределах Иртышской зоны локализован блок с корой океанического типа, испытавший ротацию в процессе столкновения литосферных блоков с корой континентального типа. Столкновение сопровождалось формированием складчато-надвиговых деформаций по окраинам блоков [78].

Режим *герцинской активной континентальной окраины* в пределах юго-западного фланга Алтае-Саянской складчатой области проявлен ареалами обширного развития раннедевонско-раннекаменноугольных вулканогенно-осадочных, вулканических и субвулканических комплексов риолитовой и базальт-риолитовой формаций и интрузивными образованиями габбро-плагиогранитовой, габбро-гранодиорит-гранитовой, габбро-долеритовой формаций, а также осадочными молассоидными отложениями [5,26,33]. В составе магматических комплексов выделяются два типа образований активной континентальной окраины:

1 – образования тыловодужного рифтогенеза, представленные бимодальной базальт-риолитовой и габбро-плагиогранитовой формациями (D_{1-2});

2 – образования вулканоплутонического пояса, представленные габбро-гранодиоритовыми интрузивными массивами и базальтовыми вулканическими комплексами (D_3-C_1).

Причиной пространственного совмещения ареалов вулканоплутонического и рифтогенного магматизма в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба может являться изменение в девоне угла наклона литосферного океанического слэба [120]. Пространственное совмещение на дневной поверхности Рудно-Алтайского блока вулканических и интрузивных тел активной континентальной окраины может свидетельствовать об интенсивной тектонической деформации блоков земной коры и высоком уровне их денудации [59,60].

Именно с процессом формирования девонского вулканоплутонического пояса связывается аккумуляция колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Рудноалтайской минерагенической зоны.

Режим герцинского коллизионного орогенеза проявился на завершающих этапах закрытия Палеоазиатского океана и аккреции Казахстанского, Сибирского (включая его Алтае-Саянскую окраину) континентов и островных дуг (Рисунок 3.5).

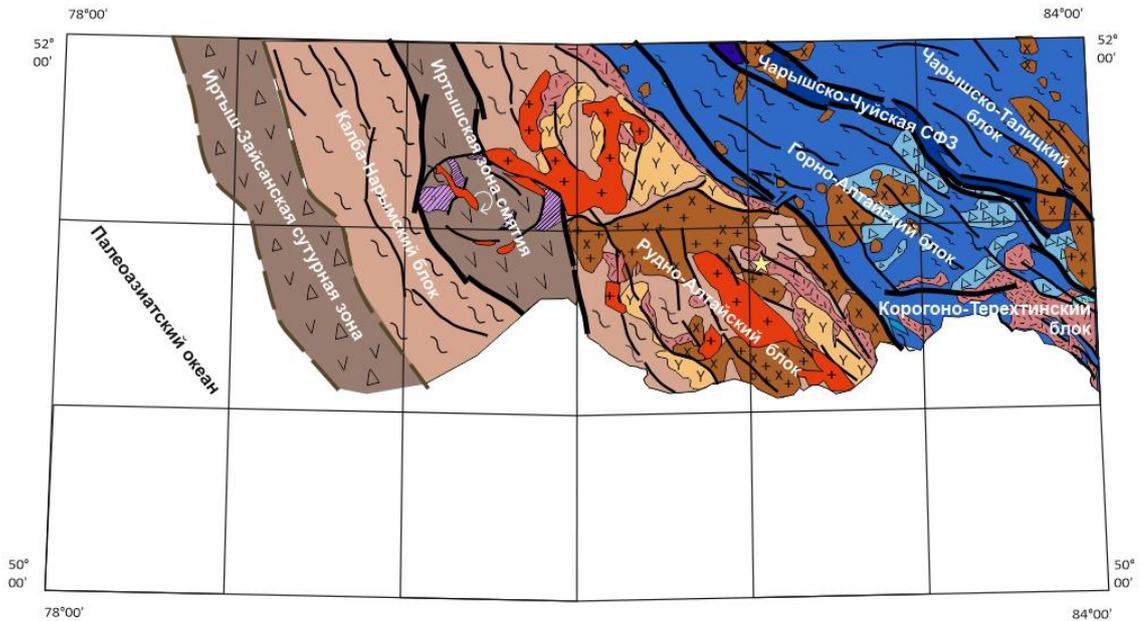


Рисунок 3.5 – Схема проявления герцинского орогенеза (условные обозначения к схеме представлены на рисунке 3.3).

К середине карбона завершилась аккреция Сибирского, Казахстанского палеоконтинентов и островных дуг. Реликты океанической коры, выполненные ультрамафитами дунит-гарцбургитовой формации [66] и амфиболитами, картируются в составе пород Иртышского метаморфического комплекса [64].

Орогенные коллизионные процессы характеризуются формированием обширной системы складчато-надвиговых деформаций, гранитоидным плутонизмом и заложением осадочных впадин, выполненных молассоидными комплексами. В средне-позднекаменноугольный период во внутренних частях Рудно-Алтайского блока формировались вулканогенные образования дацит-риолитового комплекса и комагматичные гранитоиды габбро-гранит-лейкогранитового комплекса [25].

Пермско-среднеюрский постколлизионный этап характеризуется релаксацией земной коры, при которой важную роль играли процессы внедрения мантийных магм толеитового состава [5,21].

Результаты изучения глубинного строения и истории развития региона позволяют выявить характер наложения каледонских и герцинских орогенных процессов на территории объекта детальных исследований – Змеиногорского рудного района [9,83], локализованного в пределах Змеиногорско-

Быструшинского прогиба. Разрез прогиба выполнен широким комплексом раннепалеозойских пород раннекаледонской пассивной окраины, девонских рифтогенных горных пород герцинской активной окраины, испытавших интенсивные деформации в карбоне ходе герцинских коллизионных процессов.

Раннекаледонский орогенный этап в пределах Змеиногорского рудного района проявлялся отложениями мощных комплексов пассивной континентальной окраины, представленных флишоидной и турбидитовой формациями (оценочная мощность – 1.5-3 км). Этап герцинской активной континентальной окраины в пределах прогиба характеризуется пространственным совмещением образований тыловодужного рифтогенеза (D_{1-2}) и вулканоплутонического пояса активной континентальной окраины (D_{2-3}). Именно с этой геодинамической обстановкой связывается развитие колчеданно-полиметаллического оруденения [13].

Рифтогенные процессы привели к заложению вулканического трога, выполненного вулканогенно-осадочными породами, вмещающими колчеданно-полиметаллические месторождения Змеиногорского рудного района. Рифтогенные образования перекрываются комплексами вулканоплутонического пояса АКО. Комагматичные этим вулканитам интрузивные массивы внедряются в разрез трога.

Раннегерцинские орогенные процессы в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба представлены тектоническими складчато-надвиговыми структурами и комплексами андезитового вулканизма (D_{1-2}) [48,58,59].

3.3. Особенности глубинного строения земной коры Рудного Алтая в сечении регионального геофизического профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт»

С привлечением результатов решения обратных задач гравитационного и аномального магнитного полей (см. Рисунок 2.10а) выполнено глубинное моделирование вдоль опорного профиля «А-Б» (положение профиля см. на рисунке 2.1), включающего фрагмент сейсморазведочного профиля ГСЗ-МОВЗ

«Базальт» [7]. Построения выполнялись автором в рамках «радиально-зональной модели земной коры» [39] (Рисунок 3.6).

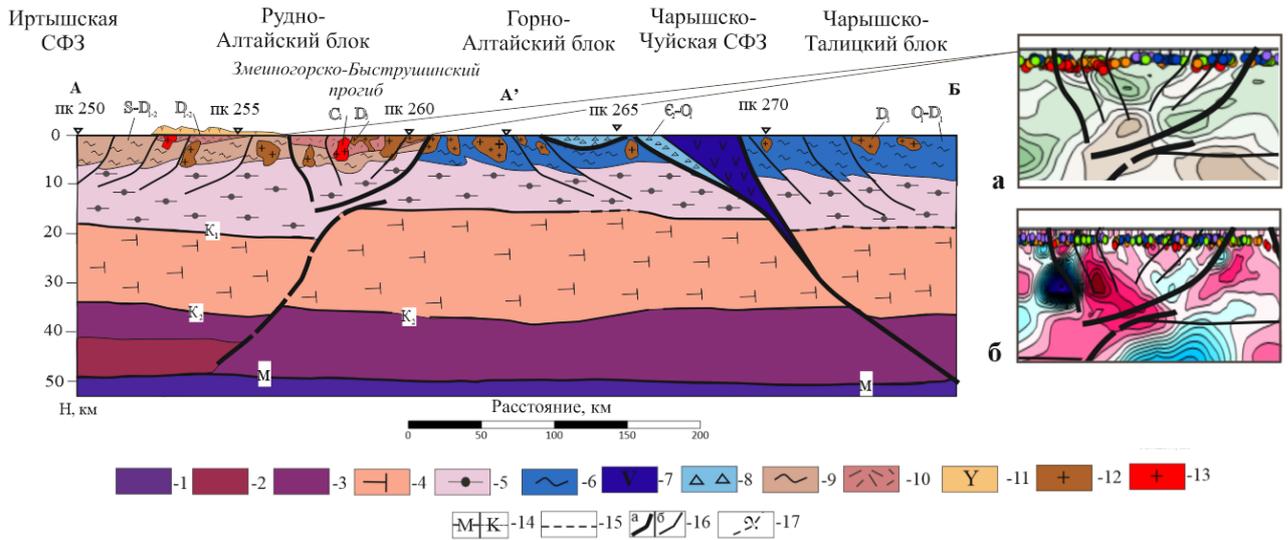


Рисунок 3.6 – Глубинный геолого-геофизический разрез Горно- и Рудно-Алтайского блоков в сечении профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» с фрагментом совмещения по а) гравитационному и б) магнитному разрезам структуры Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

Условные обозначения: 1-13 – структурно-вещественные подразделения: 1 – литосферная мантия, 2-3 – нижняя кора, в том числе, корово-мантийная зона (2), 4 – средняя кора, 5 – верхняя кора (гранито-гнейсовый слой, 6 – терригенно-карбонатные комплексы пассивной континентальной окраины, 7 – межблоковая зона с корой океанического типа, 8 – аккреционная призма (флишиоидные комплексы), 9 – терригенно-карбонатные осадки, 10 – бимодальные базальт-дацит-риолитовые комплексы, 11 – комплексы вулканоплутонического пояса, 12 – габбро-гранодиорит-гранитовые комплексы АКО (D), 13 – гранодиорит-гранитовые комплексы коллизионного орогена (C); 14-17 – структурно-вещественные границы: 14 – главные границы радиальной расслоенности земной коры (M – граница Мохоровичича, K – подошва верхней коры), 15 – второстепенные границы радиальной расслоенности, 16 – разрывные нарушения (а – главные, б – второстепенные), 17 – разрывные нарушения, выделяемые по косвенным признакам.

По сейсмическим данным прослежены основные границы радиальной расслоенности земной коры. Анализ инфраструктуры сейсмического разреза и моделей инверсии гравитационного и магнитного полей позволяет оценить на разрезе параметры рифтогенного Змеиногорско-Быструшинского прогиба и неоднородности вулканоплутонического пояса Рудного Алтая [41,72]. По этим данным разрывные нарушения ранжированы по глубинности проявления и роли в формировании доминирующих структур земной коры (I-го ранга – глубинные границы блоков и межблоковых (сутурных) зон, складчато-надвиговых поясов и

рифтогенных структур; II-го ранга – верхнекоровые разрывные нарушения, заложенные в условиях активной континентальной окраины и коллизионного орогенеза).

В рассматриваемом сечении выделяются три фрагмента, которые резко различаются глубинным строением земной коры.

Западный фрагмент геотраверса (ПК 255-260) пересекает Рудно-Алтайский блок [44]. Верхняя часть разреза выполняется здесь образованиями вулканоплутонического пояса активной континентальной окраины, представленными базальт-дацит-риолитовой (D_{2-3}) и габбро-гранодиорит-гранитовой (D_3) формациями. Ареал их развития в разрезе весьма уверенно проявляется на результатах решения обратных задач гравитационного и магнитного полей [8,51]. В пределах этого фрагмента расположен Змеиногорско-Быструшинский прогиб, характеризующийся как вулканическая депрессия, выполненная отложениями рудоносных формаций [16,25].

Вулканиды подстилаются более древними терригенно-осадочными комплексами (O-S), мощность которых удается оценить по особым точкам до глубин 2-3 км. Гипсометрически ниже в разрезе моделируется образования гранитогнейсового (AR) слоя. Его параметры по данным ГСЗ характеризуются скоростями 6.45-6.50 км/с. [7]. Вергентность надвиговых дислокаций Рудно-Алтайского блока северо-восточная. Особое внимание следует уделить высокоскоростной зоне (6.88-7.34 км/с), которая фиксируется в базальной части земной коры западного фланга по данным ГСЗ, отвечающая, предположительно, слою «коромантийной смеси» [7].

На интервале ПК 260 и 261 картируется глубинная граница Горно- и Рудно-Алтайского блоков земной коры. Эта тектоническая граница, часто называемая «Северо-Восточной зоной разломов», испытывает общее пологое погружение в западном направлении и контрастно проявляется на потенциальных полях и их трансформантах [73].

Центральный фрагмент глубинного разреза (ПК 260-265), отвечающий Горно-Алтайскому блоку, характеризуется увеличенной мощностью земной коры.

Формирование этой структуры обусловлено особенностями проявления каледонских орогенных процессов [73,74]. Вдоль восточной границы блока картируется Чарышско-Чуйская структурно-формационная зона, выполненная комплексами океанической коры и аккреционной призмы и имеющая клиновидную морфологию в приповерхностной части и полого погружающийся в западном направлении глубинный канал. Западнее зоны (ПК 264-266) осадочные комплексы Горно-Алтайского блока перекрыты образованиями древней аккреционной призмы. Эти комплексы выполняют тектонический покров, обдуцированный на окраину континентального блока из зоны океанической субдукции в ходе каледонской коллизии. Разрывные нарушения блока представлены надвигами юго-западной вергентности [73], которые вылаживаются в базальтовой части гранитогнейсового слоя.

Восточный фрагмент глубинного разреза (от ПК 265 до конца профиля) представлен Чарышско-Талицким континентальным блоком. Верхняя кора последнего выполнена гранитизированными в ходе каледонской эпохи тектогенеза ранне-среднепалеозойскими шельфовыми осадками. Отличительной особенностью глубинного разреза блока является наличие «волновода» (зоны пониженных скоростей – 6.23-6.27 км/с на фоне 6.3-6.4 км/с) на глубинном уровне 12-17 км [48,89,90].

3.4. Палеотектонические разрезы Рудного Алтая

На основе геологической интерпретации комплекса геофизических данных автором построен комплект палеоразрезов, отражающих последовательность и обстановки формирования структур земной коры Рудного Алтая в данном сечении (Рисунок 3.7).

Первый разрез (Рисунок 3.7 а) характеризует геологическое развитие земной коры региона в обстановке герцинской активной континентальной окраины Сибирского палеоконтинента в раннем-среднем девоне [44,90]. Над погружающейся океанической плитой предполагается развитие многочисленных промежуточных магматических очагов, что объясняет активное внедрение

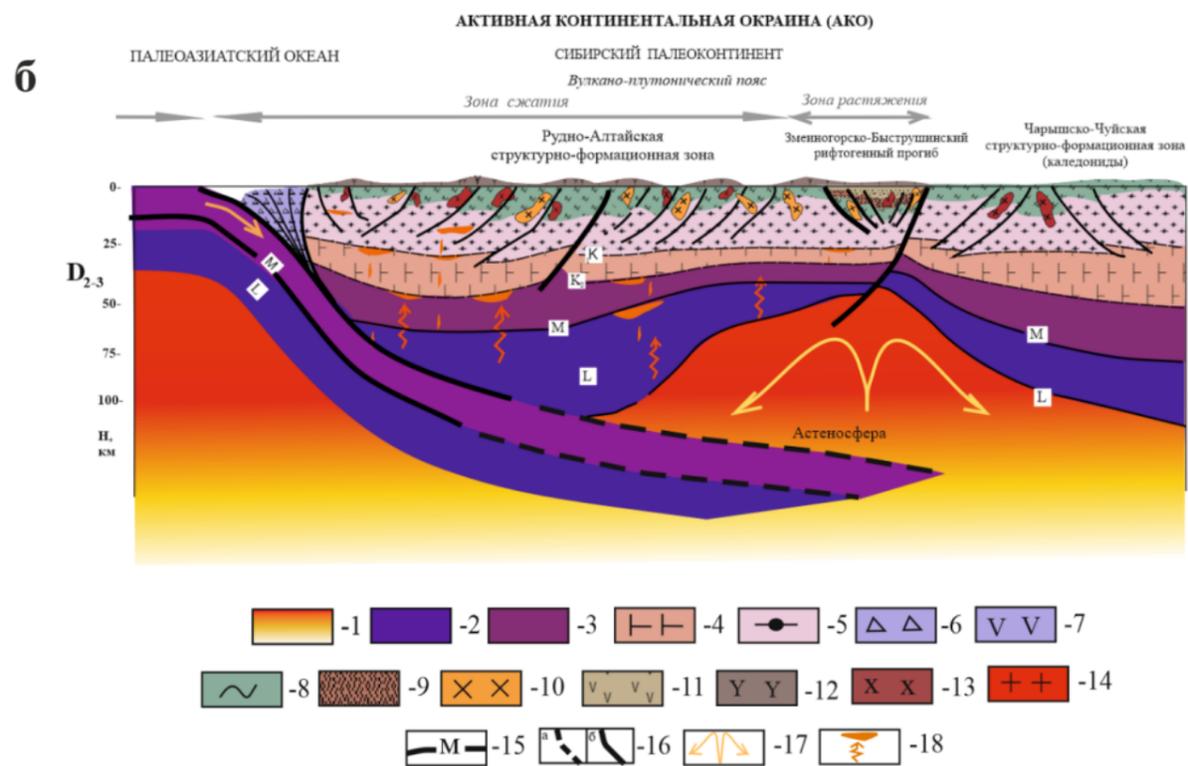
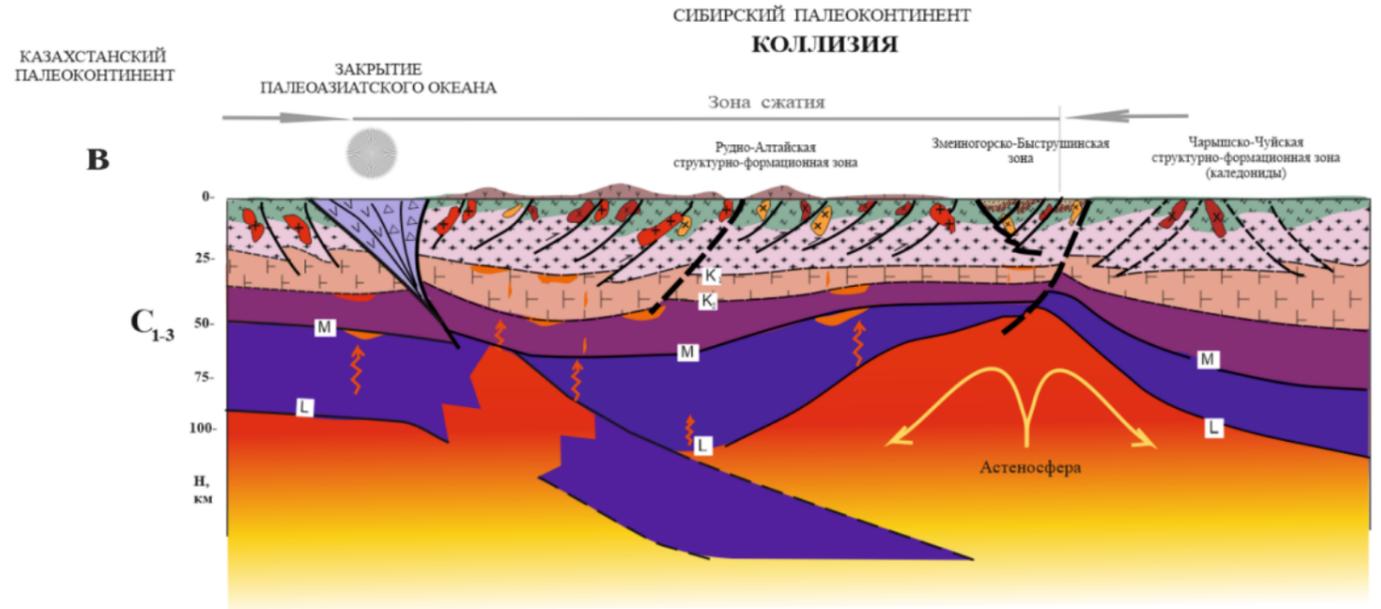
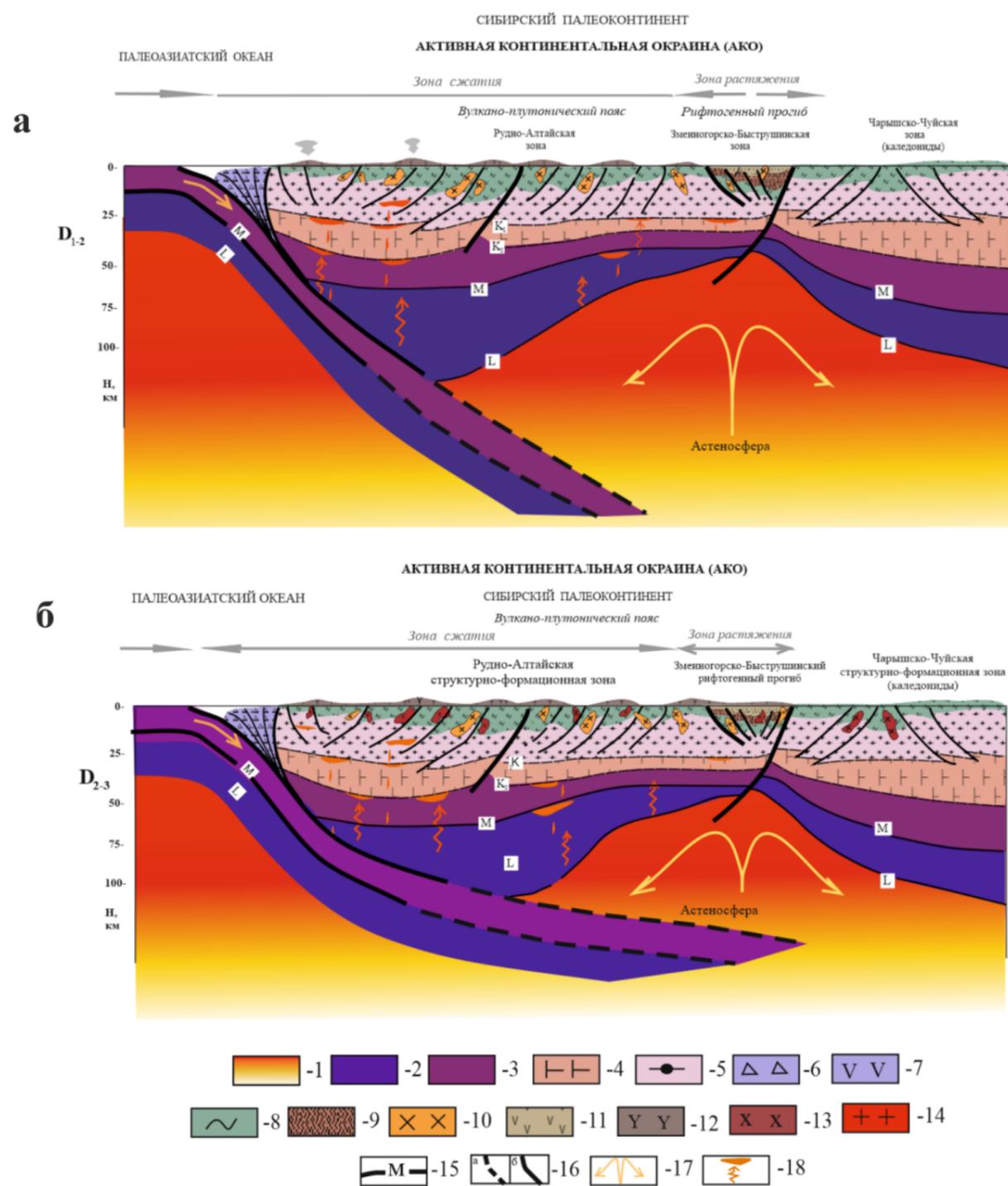
интрузивных комплексов гранитоидного состава в верхней части разреза. В пределах западной и центральной частей Рудного Алтая развиваются ранне-среднедевонские комплексы вулканоплутонического пояса. Они перекрывают более древние раннепалеозойские флишевые и флишоидные отложения пассивной континентальной окраины. В условиях общего сжатия здесь закладывается система надвиговых и сдвиговых дислокаций. В современном разрезе следом древних субдукционных процессов является Иртыш-Зайсанская сутурная зона, в составе которой картируются офиолиты раннедевонского возраста [1,30,32].

На восточном (в современных координатах) фланге АКО в геодинамической обстановке тыловодужного рифтогенеза закладывается Змеиногорско-Быструшинский прогиб. Исследователи этого региона выделяют две фазы формирования рифтогенных вулканитов, связанных:

- 1) с образованием бимодальной серии базальт-риолитового состава;
- 2) с проявлением риолит-риодацитов [25,90].

К завершающему этапу рифтогенеза приурочено внедрение интрузий габбро-плагиогранитов [17,57,88], которые являются продуктами плавления амфиболитового субстрата и локализуются вдоль разломных зон [89].

Второй разрез (Рисунок 3.7. б) описывает процессы, протекавшие в среднем-позднем девоне на завершающей стадии раннегерцинской активной континентальной окраины. Расширение ареала развития базальт-дацит-риолитовых комплексов и гранодиорит-гранитовых интрузивных массивов вулканоплутонического пояса в восточном направлении позволяет выдвинуть предположение о более пологом погружении субдукционной зоны в сравнении с предыдущим этапом. Этим обстоятельством объясняется и прорывание гранитоидами змеиногорского комплекса ранее сформированных (D_2) рифтогенных образований. Важная роль данного этапа отводится закономерностям формирования рудовмещающих вулканогенно-осадочных.



Условные обозначения: 1 – 14 – структурно-вещественные подразделения: 1 – астеносфера, 2 – литосферная мантия, 3 – нижняя кора, 4 – средняя кора, 5 – гранито-гнейсовый слой (верхняя кора), 6 – комплексы аккреционной призмы, 7 – комплексы островной дуги, 8 – осадки пассивной континентальной окраины (PZ₁₋₂), 9 – 13 – комплексы активной континентальной окраины (9 – бимодальная базальт-дацит-риолитовая рифтогенная серия (D₁₋₂), 10 – интрузивные плагиограниты рифтогенные (D₂), 11 – базальт-дацит-риолитовая формация вулканоплутонического пояса (ВПП) D₂₋₃, 12 – вулканы дацит-риолитового состава ВПП D₂₋₃, 13 – габбро – гранодиорит-гранитовая формация ВПП (D₃), 14 – коллизионные гранитоиды (C₁); прочие обозначения: 15 – границы радиальной расслоенности земной коры, в том числе K₁ - подошва верхней коры, K₂- подошва средней коры, М-граница Мохоровичича, подошва литосферы; 16 – разрывные нарушения (а – более древние, б – сформированные на рассматриваемом этапе эволюции), 17 – мантийный плюм, 18 – направления тепло-массопереноса и промежуточные магматические очаги.

Рисунок 3.7 – Развитие структур земной коры Рудного Алтая в ходе:
 а) начального цикла активной континентальной окраины D₁₋₂, б) завершающего цикла активной континентальной окраины D₂₋₃, в) коллизионного орогенеза C₁₋₃.

кремнисто-терригенных ($D_{1fr}-D_{3fm1}$) толщ, к которым приурочено образование колчеданно-полиметаллического оруденения. Рудовмещающими структурами для оруденения являются ранее сформированные рифтогенные комплексы [24].

Третий разрез (Рисунок 3.7 в) отражает характер проявления герцинских коллизионных процессов в условиях ранне-позднекарбонового закрытия Палеоазиатского океана и аккреции Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов [22,39,58]. На этом этапе происходит внедрение интрузивов каменноугольного возраста и заложение системы складчато-надвиговых дислокаций [58]. Надвиги, имеющие преимущественно восточную вергентность, моделируются в пределах Рудного Алтая от Иртыш-Зайсанской зоны на западе вплоть до центральной зоны Змеиногорско-Быструшинского прогиба – на востоке. Осложняющим геологическим фактором, приуроченным к данной стадии и влияющим на особенности прогнозно-минерагенического моделирования скрытого оруденения, является выведение на поверхность надвиговыми структурами более древних осадочных комплексов [61].

Последующее развитие структур Рудного Алтая, связанное с постколлизионной релаксацией земной коры, характеризуется внедрением гранитов (P_1) и плюмазитгранитов (T_1), контрастно проявляющихся в гравитационном и магнитном полях [88].

Выводы

Историко-эволюционное моделирование развития Рудного Алтая демонстрирует изменение структурных и вещественных параметров разреза земной коры вдоль субширотного сечения в ходе главных геодинамических процессов герцинского тектономагматического цикла.

Обстановка активной континентальной окраины в раннем-среднем девоне характеризовалась заложением на древнем континентальном основании Рудного Алтая образований вулканоплутонического пояса; на

восточном фланге активной окраины в обстановке задугового рифтогенеза заложен Змеиногорско-Быструшинский рифтогенный прогиб (D₁₋₃).

В среднем – позднем девоне ряд факторов указывает на уменьшение угла наклона субдукционной зоны, что привело к расширению ареала развития вулканоплутонического пояса, образования восточного фланга которого перекрывают ранее сформированный рифтогенный прогиб. Соответствующая палеореконструкция показывает развитие в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба комплексов базальтового состава и внедрение гранитоидных батолитов. Вулканогенно-осадочные комплексы для Рудно-Алтайской минерагенической зоны выступают в роли вмещающих пород, которые контролируют развитие ареалов колчеданно-полиметаллического оруденения. Внедрение интрузивов на данном этапе является осложняющим фактором для геолого-структурных построений, разработки новых критериев оруденения и выявления перспективных структур.

В карбоне активно проявлен коллизионный этап развития региона, обусловленный сближением и последующим столкновением Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов. В пределах Рудного Алтая коллизия континентов сопровождалась заложением складчато-надвигового пояса [93].

Сопоставляя площадные геолого-структурные схемы с моделью регионального глубинного разреза можно сделать следующие выводы:

1. Граница сочленения герцинской Рудно-Алтайской и каледонской Чарышско-Чуйской структурно-формационных зон отчетливо прослеживается в потенциальных полях и на их трансформантах. Морфология данной границы верифицируется результатами линеаментного анализа и решениями обратных задач гравитационного и магнитного полей (см. Рисунок 2.6).

2. На качественном уровне выполнена оценка морфологии Иртышской структурно-формационной (сутурной) зоны, поскольку ареал ее развития не попадает на площадь исследований. Характер заложения

Чарышско-Чуйской структурно-формационной (сутурной) зоны весьма уверенно картируется по данным комплексного анализа схем рефлексивности по профилю ГСЗ-МОВЗ «Базальт» и решению обратных задач потенциальных полей.

3. По ряду косвенных признаков (глубина заложения, закономерности локализации особых точек, расчеты в показателях рефлексивности) можно предположить более высокий уровень денудации Рудно-Алтайского блока, в сравнении с Горно-Алтайским блоком.

Анализ закономерностей локализации колчеданно-полиметаллического оруденения Змеиногорского рудного района, в пределах региональных орогенных структур, позволяет наметить следующие факторы, которые следует учитывать в детальном исследовании района:

- тесная связь рудогенеза с формированием девонских вулканических трогов базальт-риолитовой формации;

- сложное проявление разновозрастных орогенных процессов в пределах исследуемой территории, которые являются рудоконтролирующими структурами промышленного колчеданно-полиметаллического оруденения Рудного Алтая.

ГЛАВА 4 ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗМЕИНОГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

4.1. Геолого-структурная схема глубинного строения Змеиногорско-Быструшинского прогиба

Геотектоническая интерпретация обширного набора геолого-геофизических материалов по площади Змеиногорско-Быструшинского прогиба на среднемасштабном уровне исследований выполнена с использованием алгоритмов обработки и интерпретации данных геофизических съемок, зарекомендовавших себя на этапе регионального моделирования.

Базируясь на результатах «спектрального разложения», «расчета полного градиента», «осреднения в скользящем окне» потенциальных полей [27,31,78], а также картах их классификации по методу «динамических сгущений» (см. рисунки 2.6, 2.7), закартированы основные структурно-вещественные комплексы исследуемой площади. К ним относятся: разрывные нарушения (характерные для обстановок активной континентальной окраины и коллизии), блоки и межблоковые (сдвиговые, рифтогенные) зоны. Интерпретационная тектоническая схема Змеиногорско-Быструшинского прогиба приведена на рисунке 4.1.

На схеме выделены три структурные зоны, различающиеся по уровню денудации и мощности вулканогенно-осадочных толщ: I – зона умеренной денудации, II – зона с интенсивной денудацией и выведением на поверхность древних комплексов (O-S), III – зона слабой денудации. Западный фланг (I зона) характеризуется умеренной интенсивностью надвиговых дислокаций общего северо-западного простирания с картированием на поверхности ранне-среднедевонских вулканогенно-осадочных комплексов, что свидетельствует об умеренном характере денудации верхней части разреза земной коры. В центральной (II зоне) фиксируется наиболее интенсивное воздымание образований верхней коры с выведением на поверхность ранне-среднепалеозойских шельфовых осадков и высоким уровнем денудации

девонских рифтогенных формаций. Восточный фланг (III зона), расположенный вне зоны проявления герцинских надвиговых дислокаций, характеризуется высокой сохранностью девонских рифтогенных толщ.

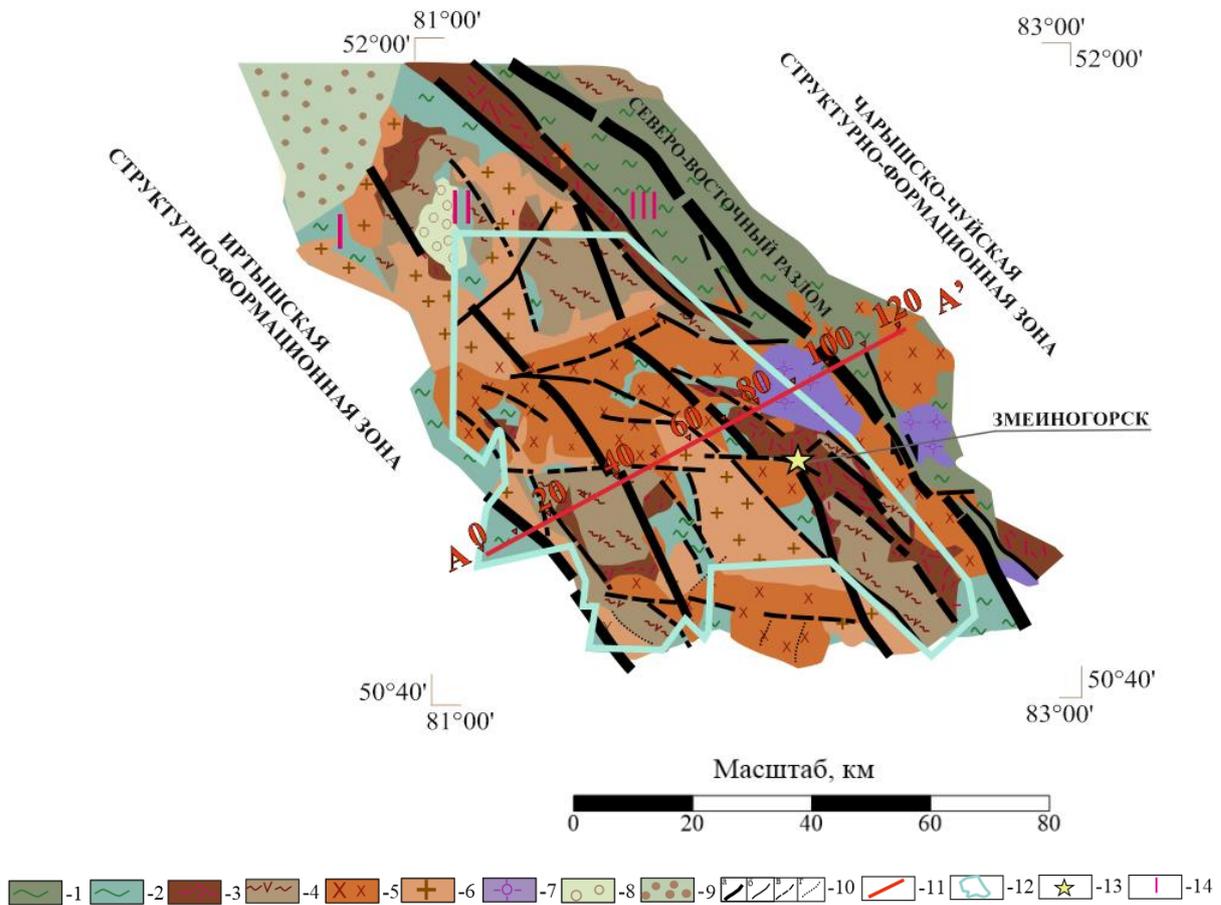


Рисунок 4.1 – Тектоническая схема Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

Условные обозначения: 1 – 9 – структурно-вещественные подразделения (формации): 1 – 2 – флишеидная (1 – терригенно-карбонатные осадки (O_1-D_1), 2 – флиши ($S-D_{1-2}$)), 3 – бимодальная базальт-дацит-риолитовая (D_1), габбро-плагиогранитовая, 4 – базальт-дацит-риолитовая (D_{2-3}), 5 – габбро-гранодиорит-гранитовая (D_3), 6 – габбро-гранодиорит-гранитовая (C_1), 7 – плюмазит-гранитовая (T_1), 8 – моласса (J_1), 9 – образования платформенного чехла (K_2), 10 – разрывные нарушения (а – главные (внешние тектонические границы), б, в, г – второстепенные - выделяемые уверенно (б), менее уверенно (в), вне площади исследования (г)), 11 – интерпретационный профиль А-А', 12 – контур детальной изученности, включающий Змеиногорский рудный район, 13 – положение Змеиногорска, 14 – структурные зоны прогиба с разным уровнем денудации (I – западная, II – центральная, III – восточная).

Таким образом, наибольший прогностический интерес представляет II зона Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба и отдельные ареалы I и III зон.

4.2. Геотектонические модели строения и эволюции Змеиногорско-Быструшинского прогиба в ходе палеозойских эпох тектогенеза

С учетом высокой прогностической значимости ареалов развития вулканоплутонического пояса и рифтогенного тыловодужного прогиба АКО, их проявление наиболее детально исследовано на площади Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

Автором выполнена интерпретация комплекса геофизических съемок и построен геолого-геофизический разрез верхней коры в сечении профиля «А-А'». Это интерпретационное сечение заложено вдоль линии профиля глубинного сейсмического зондирования «Базальт» [7], что позволяет сопоставлять данные региональных и детальных геотектонических построений (Рисунок 4.2).

Восточной границей рифтогенного прогиба является Северо-Восточная зона смятия. Последняя отчетливо фиксируется на сейсмических разрезах ГСЗ-МОВЗ и на моделях инверсии гравитационного и магнитного полей [31]. Западная граница прогиба также имеет глубинное заложение, сбросовую кинематику и контрастно проявляется в геофизических полях [8].

Расшифровка структурно-вещественных неоднородностей прогиба, включая изучение морфологии границ вулканогенно-осадочных толщ и разновозрастных интрузивных массивов, выполнена по результатам комплексной интерпретации результатов решения обратных задач гравитационного и магнитного полей. Для определения вергентности разломов, оказавших влияние на формирование скрытого оруденения, сопоставлялись данные геологического картирования крупного масштаба [25] с параметрами геофизических разрезов.

При изучении закономерностей локализации рудных объектов необходимо учитывать индикаторы проявления разрывных дислокаций активной континентальной окраины (D_{1-3}) и коллизионного орогена (D_3-C_1).

По результатам качественной интерпретации гравитационного и магнитного полей (см. Рисунок 2.6) на площади исследований моделируется серия надвиговых деформаций, которые искажают структуры Змеиногорско-Быструшинского прогиба, заложенного на более ранней – рифтогенной стадии

развития региона. При этом характер складчато-надвиговых деформаций существенно различается на западном, центральном и восточном флангах [72,73].

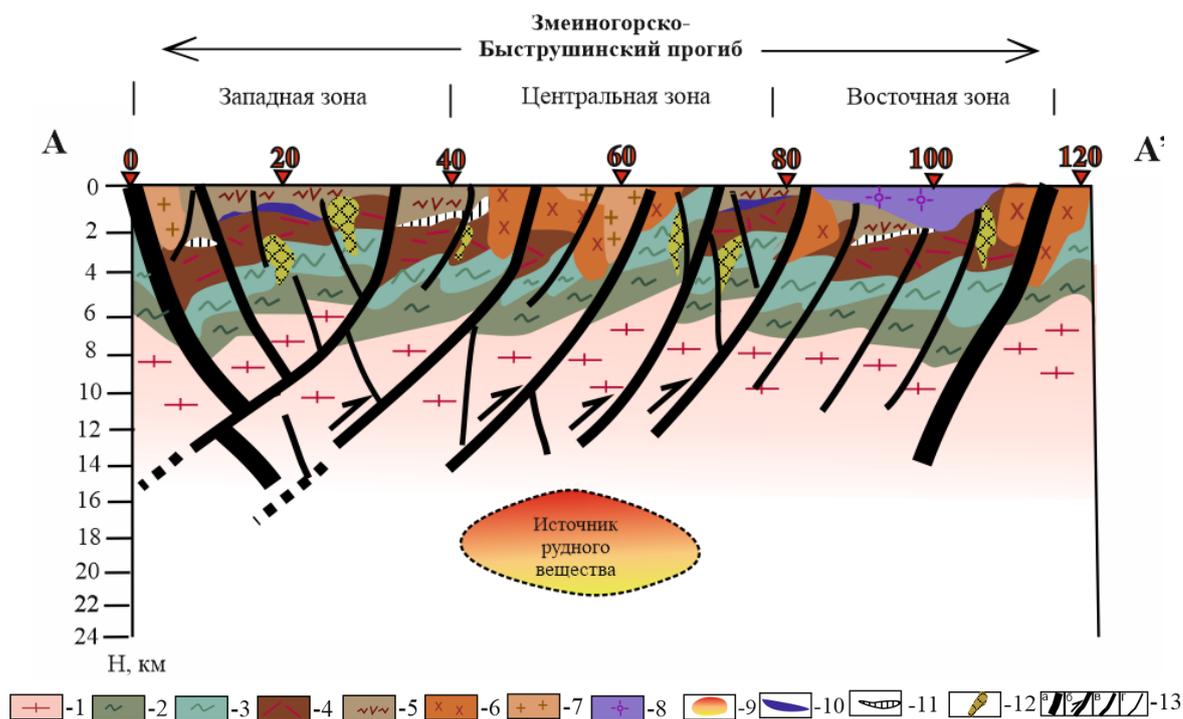


Рисунок 4.2 – Геолого-геофизический разрез по опорному профилю «А-А'».

Условные обозначения: 1-8 – структурно-вещественные подразделения: 1 – гранито-гнейсовый слой верхней коры, 2-3 – осадочные формации древнего шельфа (2 – терригенно-карбонатная (O-S), 3 – флишиоидная (S-D₁₋₂), 4 – бимодальная базальт-риолитовая, риолит-риодацитовая и габбро-плагиигранитовая серия (D₁₋₂), 5 – вулканогенно-осадочные отложения базальт-дацит-риолитовой серии (D₂₋₃), 6 – габбро-гранодиоритовая формация (D₃), 7 – габбро-гранодиорит-гранитовая формация (C₁), 8 – плюмазитгранитовая формация (T₁), 9 – предполагаемый источник рудного вещества; 10 – 12 – рудные формации (10 – сплошные колчеданно-полиметаллические руды, 11 – прожилково-вкрапленные, 12 – субвулканические порфиоровые тела с гнездово-вкрапленным оруденением); 13 – разрывные нарушения (а – б – рифтогенные: главные (а), второстепенные (б); в – надвиговые, обусловленные, предположительно, герцинским орогенезом).

Западная часть относительно умеренно затронута надвиговыми дислокациями, вследствие чего здесь моделируется высокая мощность вулканогенно-осадочной толщи, включающей ранне-среднепалеозойские шельфовые осадки и более молодые девонские вулканические формации рифтогенного генезиса [19,56]. По результатам расчетов методом особых точек, оценочная мощность упомянутого слоя составляет 2-3 км.

Центральная часть наиболее интенсивно деформирована надвигами, которые выводят на дневную поверхность раннекаледонские шельфовые осадки. Мощность вулканической толщи здесь минимальна, следовательно, здесь можно ожидать проявления рудных объектов только приконтактового типа.

Восточная часть слабо затронута надвиговыми дислокациями, что позволяет сохранить в исходной форме образования активной континентальной окраины. В вертикальном сечении здесь выделяются вулканогенно-осадочные толщи базальт-дацит-риолитовой формации (D_{1-2} и D_{2-3}). Вдоль всего профиля картируются ареалы развития гранитоидов (D_3-C_1).

Для заверки полученных результатов геолого-геофизического моделирования Змеиногорско-Быструшинского прогиба (см. Рисунок 2.10), выполнены историко-эволюционные построения, отражающие главные этапы развития активной континентальной окраины Сибирского палеоконтинента и начальный этап коллизии (D_3-C) Казахстанского и Сибирского палеоконтинентов.

Согласно выполненным построениям надвиговые деформации в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба имеют строгую продольную зональность [106, 107, 108]. Как показано выше, по результатам решения обратных задач гравитационного и магнитного полей в пределах прогиба выделяется три зоны: западная зона подвержена умеренным надвиговым деформациям герцинского коллизионного орогенеза; центральная зона подвергается наиболее интенсивному воздействию этих надвиговых деформаций; восточный фланг слабо затронут надвиговыми деформациями, что предопределяет высокую вероятность сохранения здесь рифтогенных рудовмещающих толщ (Рисунок 4.3).

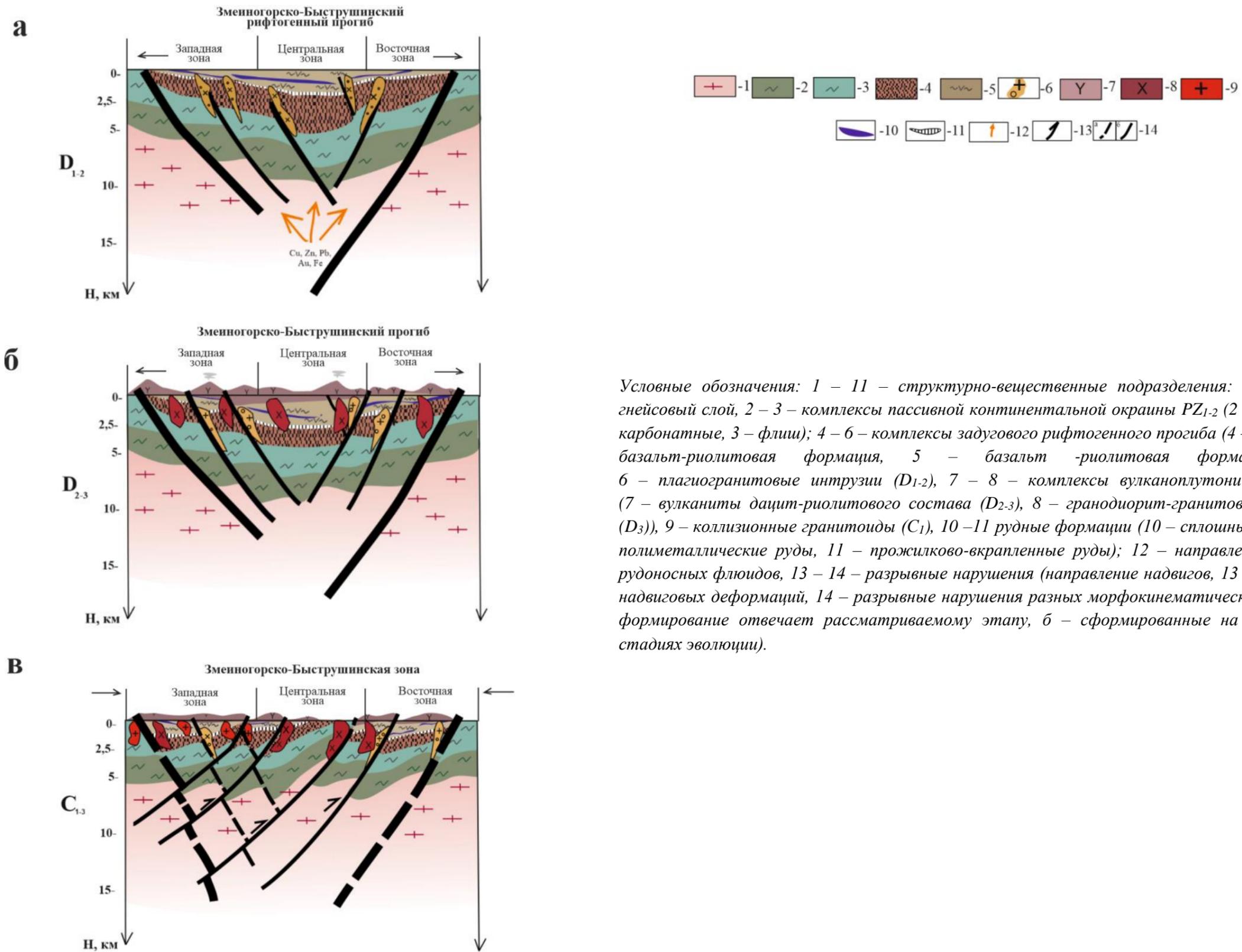


Рисунок 4.3 – Развитие структурно-вещественных подразделений верхней коры Змеиногогорско-Быструшинского прогиба в ходе: а) начального цикла активной континентальной окраины D_{1-2} , б) завершающего цикла активной континентальной окраины D_{2-3} , в) коллизионного орогенеза C_1

Первый разрез (Рисунок 4.3 а) отражает события, протекавшие в раннем-среднем девоне в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба в обстановке тыловодужного рифтогенеза активной континентальной окраины. На начальной фазе происходит излияние мантийных магм бимодальной базальт-дацит-риолитовой серии [90]. На завершающей фазе формировались вулканиты дацит-риолитового состава суммарной мощностью до 1.5 км и произошло внедрение плагиогранитов (D_2) [109]. В ходе этого процесса поступающее флюидное вещество сформировало колчеданно-полиметаллическое оруденение в форме вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд [24, 104, 105]. Главные рудовмещающие формации локализуются на глубинах до 3 км.

Второй разрез (Рисунок 4.3 б) отображает формирование в пределах прогиба комплексов вулканоплутонического пояса активной континентальной окраины, что, как показано в главе 3, обусловлено уменьшением угла наклона океанического слэба. В этот период происходит излияние вулканических комплексов базальт-риолитовой формации и внедрение позднедевонских змеиногорских гранитов [58], прорывающих структуры более раннего возраста [59].

Третий разрез (Рисунок 4.3 в) демонстрирует смену режима активной континентальной окраины на коллизионную обстановку, которая оказала контрастное деформационное воздействие на современный облик Рудного Алтая. Коллизия проявлена в виде надвиговых дислокаций, которые привели к выведению на дневную поверхность ранне-среднепалеозойских комплексов пассивной континентальной окраины. На этом этапе заложены крупные плутоны гранитов (C_1) [19, 58].

Таким образом, историко-эволюционные схемы (см. Рисунок 4.3), построенные по результатам обработки и интерпретации комплекса геолого-геофизических данных (см. Рисунок 2.10), позволяют выявить закономерности локализации колчеданно-полиметаллического оруденения и могут быть использованы для разработки генетической модели, отражающей особенности

миграции рудоносного вещества, необходимого для образования оруденения в вулканогенно-осадочных комплексах Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

Выводы

Геотектоническое моделирование структурно-вещественных неоднородностей Змеиногорско-Быструшинского прогиба, выполненное на основе обработки и интерпретации разнотипных геолого-геофизических данных, позволяет охарактеризовать основные геодинамические обстановки, с которыми связано формирование Рудного Алтая.

Результаты детального геолого-геофизического моделирования глубинного строения Змеиногорско-Быструшинского прогиба позволяют сформулировать следующие выводы об истории его геотектонического развития:

– в разрезе прогиба моделируется проявление двух фаз ранне-среднедевонского рифтогенеза с формированием бимодальной базальт-дацит-риолитовой формации и внедрением плагиогранитов;

– на средне-позднедевонском этапе произошло активное внедрение гранитоидных батолитов;

– коллизионные процессы девона-среднего карбона привели к заложению надвиговых деформаций, искаживших характер образования рудовмещающих формаций и оказавших влияние на формирование прожилково-вкрапленного колчеданно-полиметаллического оруденения.

Таким образом, наибольший интерес для прогноза зон локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения представляют две обстановки: вулканоплутонического пояса и рифтогенного прогиба активной континентальной окраины. Обстановки активной континентальной окраины и коллизионного орогенеза имеют характерные проявления в разрывной тектонике и морфологии главных структурно-вещественных подразделений. В качестве вмещающих формаций для скрытого оруденения выступают вулканогенно-осадочные комплексы, которые идентифицируются в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба на глубине до 3 км.

ГЛАВА 5 ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ О ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ ЗМЕИНОГОРСКО- БЫСТРУШИНСКОГО ПРОГИБА

В пределах Змеиногорского рудного района выделяется несколько типов оруденения: 1) сплошные колчеданно-полиметаллические руды, для которых характерны куполообразные формы, локализующиеся над выходами газогидротермальных растворов; 2) прожилково-вкрапленные руды, указывающие на гидротермально-метасоматические механизмы образования; 3) субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением, характеризующие наличие ингредиентов глубинного очага в процессе формирования рудных тел [118].

Наибольший интерес для прогноза зон локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения представляют две обстановки, сформированные в ходе активной континентальной окраины: вулканоплутонического пояса и рифтогенного прогиба. Как показано выше, структурно-вещественные неоднородности как активной континентальной окраины, так и более молодого коллизионного орогенеза, уверенно дешифрируются по геофизическим данным. Вмещающими для скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения выступают вулканогенно-осадочные комплексы, которые идентифицируются в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба на глубине до 3 км.

5.1. Обоснование геолого-структурных и геофизических критериев

Базируясь на результатах среднемасштабной геотектонической интерпретации, представленных в виде историко-эволюционных схем и разрезов, можно выделить основные геолого-структурные элементы, которые требуют верификации на более детальном масштабном уровне. Для достижения поставленной задачи применяется тот же методологический подход, что и на предыдущем этапе, включая площадную и профильную интерпретации.

Построенная по данным комплексной геологической интерпретации материалов детальных геофизических съемок геотектоническая схема Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба характеризует особенности его глубинного строения, которые далее включаются в виде геолого-структурных факторов для прогнозно-минерагенических построений с использованием технологии распознавания образов с обучением (Рисунок 5.1).

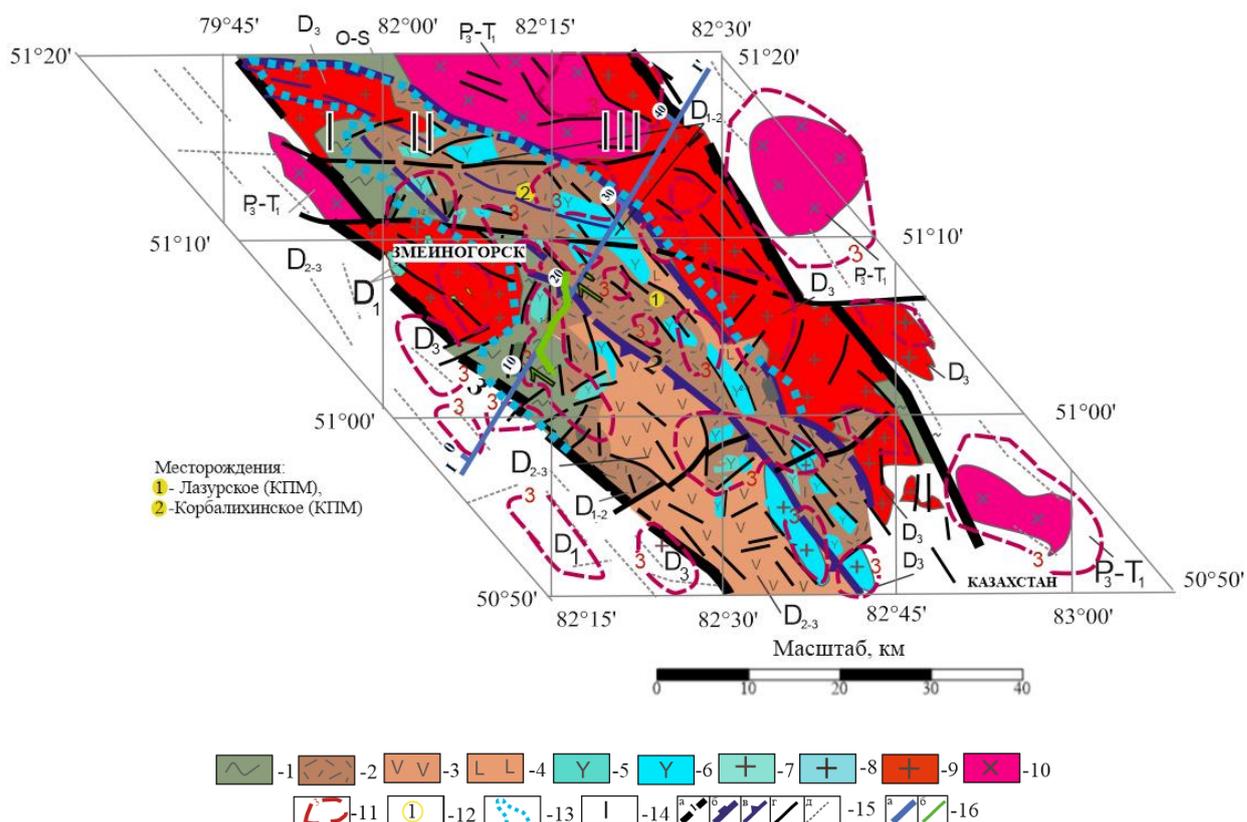


Рисунок 5.1 – Геотектоническая схема Змеиногорского рудного района.

Условные обозначения: 1-10 – структурно-вещественные подразделения: 1 – карбонатно-терригенные комплексы (песчаники, сланцы, известняки (PZ_1)), 2 – риолиты, риодациты (D_{1-2}), 3 – базальты (D_{2-3}), 4 – лавобрекчи, базальты (D_{2-3}), 5-6 – субвулканические комплексы (5 – дайки риолитов D_{1-2} , 6 – дайки андезитов, риолитов D_2), 7-10 – интрузивные комплексы (7 – плагиограниты D_1 , 8 – гранодиориты D_3 , 9 – габброиды D_3 , 10 – плагиограниты (P_2-T_1)); 11-16 – прочие обозначения: 11 – предполагаемые по геофизическим данным контуры интрузивных массивов на глубинном срезе 3 км, 12 – рудопроявления (а – Лазурское, б – Корбалихинское), 13 – контур Змеиногорского рудного узла, 14 – структурные зоны прогиба с разным уровнем денудации (I-западная, II-центральная, III-восточная), 15 – разрывные нарушения (а – главные разломы: 1 – Северо-Восточный, 2 – Центрально-Алейский, 3 – Отраднинско-Верхалейский, б – границы рифтогенной структуры, в – надвиги, г – второстепенные разломы, д – разломы за пределами исследуемой площади), 16 – положение профилей (а – опорный геофизический профиль «А-А'», б – сейсморазведочный профиль «1-1'»).

Тектоническая схема сопровождается детальным геолого-геофизическим разрезом, отображающим распределение структурно-вещественных неоднородностей верхней коры на глубинах до 3-7 км (Рисунок 5.2).

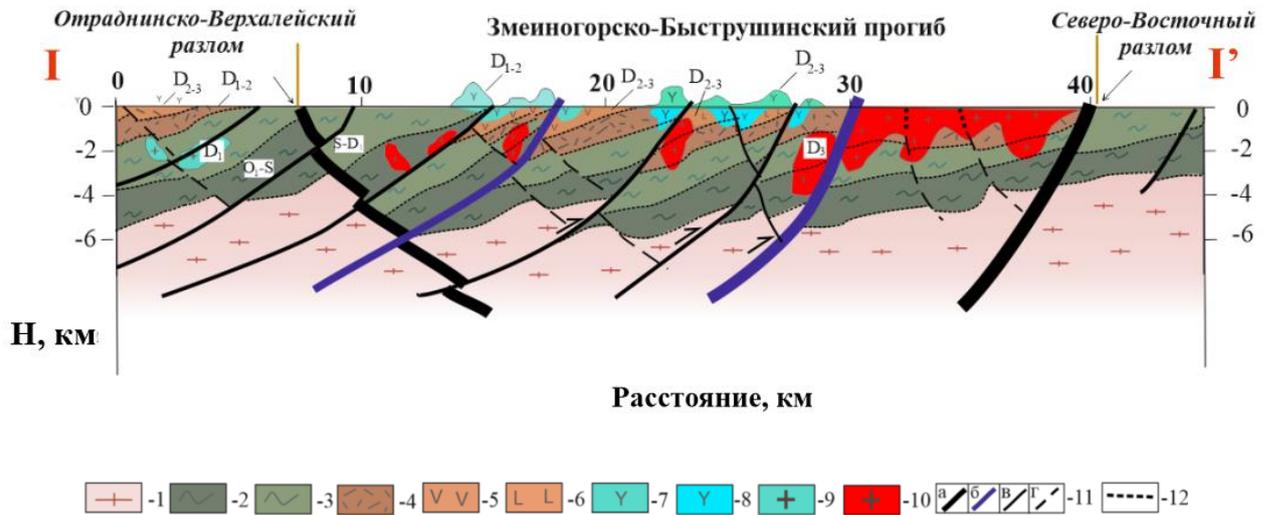


Рисунок 5.2 – Детальный геолого-геофизический разрез верхней коры Змеиногорского рудного района по линии профиля «I-I'».

Условные обозначения: 1 – 10 – структурно-вещественные подразделения: 1 – гранито-гнейсовый слой (верхняя кора); 2 – 3 – комплексы пассивной континентальной окраины (O-S) (2 – терригенно-карбонатные, 3 – флиши); комплексы активной континентальной окраины (4 – бимодальная базальт-риолитовая формация (риолиты, риодациты (D_{1-2})), 5 – базальты (D_{2-3}), 6 – лавобрекчии, базальты (D_{2-3}), 7 – 8 – субвулканические комплексы АКО (7 – дайки и силлы риолитов D_{1-2} , 8 – дайки и силлы андезитов, риолитов D_2), 9 – 10 – интрузивные комплексы (9 – гранитоиды змеиногорской свиты (D_3); 10 – габброиды D_3)); 11 – 12 – прочие обозначения: 11 – разрывные нарушения (а – главные разломы (сбросы), б – надвиги, в – второстепенные разломы), 12 – субгоризонтальные границы.

Интерпретационные построения в сечении опорного профиля выполнены на основе комплексирования сейсморазведочного разреза МОГТ-2D-ВРС (высокоразрешающая сейсморазведка методом общей глубинной точки) [71,82,112] с результатами решения обратных задач гравитационного и магнитного полей (см. Рисунок 2.10). Для идентификации разломов, выделенных на глубинном разрезе в приповерхностной части земной коры, были задействованы материалы геологического картирования, выполненные разными коллективами за последние десятилетия [25,82]. На разрезе, помимо разрывных нарушений, выделены субгоризонтальные границы радиальной расслоенности прогиба, оконтурены ареалы развития вулканических толщ бимодальной риолит-

риодацитово́й формации (по повышенной рефлексивности) и интрузивных комплексов (по ареалам пониженной рефлексивности) [95]. Эти параметры были включены в набор дополнительных геолого-структурных критериев скрытого и слабо проявленного на поверхности оруденения.

Историко-эволюционные и геотектонические модели формирования Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба Рудного Алтая позволяют выделить главные геолого-структурные и геофизические характеристики, влияющие на формирование колчеданно-полиметаллического оруденения. В качестве главных геолого-структурных критериев выделены контуры Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба и Алейского поднятия, а также крупнейшие разрывные дислокации северо-западного простирания (Северо-Восточный, Центрально-Алейский и Отраднинско-Верхалейский разломы) (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Геолого-структурные и геофизические критерии локализации оруденения в пределах Змеиногорского рудного района.

№ п/п	Критерии		Тип критерия	Форма задания критерия
Геолого-структурные (тектонические) критерии				
<i>Главные</i>				
1	Разломы	Северо-Восточный разлом	линейный	расстояние до разлома (км)
2		Центрально-Алейский разлом	линейный	расстояние до разлома (км)
3		Отраднинско-Верхалейский разлом	линейный	расстояние до разлома (км)
4	Геологические структуры	Змеиногорско-Быструшинский рифтогенный прогиб	контурный	да/нет
5		Алейское поднятие	контурный	да/нет

Продолжение Таблицы 5.1

№ п/п	Критерии	Тип критерия	Форма задания критерия	
<i>Дополнительные</i>				
6	Зоны денудации	Зона умеренной денудации рифтогенных комплексов	контурный	да/нет
7		Зона интенсивной денудации рифтогенных комплексов с выведением шельфовых комплексов (O-S) на поверхность	контурный	да/нет
8		Зона слабой денудации рифтогенных комплексов	контурный	да/нет
9	Интрузивные комплексы	Интрузивы, проявленные на поверхности	контурный	да/нет
10		Контурные интрузивов, выявленные на глубине 3-х км	контурный	да/нет
Геофизические критерии				
11	Магнитное поле	метризованный	уровень поля (нТл)	
12	Первая вертикальная производная магнитного поля	метризованный		
13	Низкочастотная составляющая магнитного поля отвечающая глубинному срезу 3 км	метризованный	уровень поля (нТл)	
14	Среднечастотная составляющая магнитного поля	метризованный	уровень поля (нТл)	
15	Среднечастотная составляющая гравитационного поля	метризованный	уровень поля (мГл)	
16	Классификация потенциальных полей по методу динамических сгущений	метризованный	у.е.	

Влияние герцинского коллизионного орогенеза на структуры Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба представлено критериями уровня денудации его сегментов: умеренно денудированным западным сектором, высоко денудированным центральным сектором и относительно слабо денудированным восточным флангом. С денудационными процессами связываются масштабы разрушения рифтогенных рудовмещающих толщ, зоны и амплитуды выдвигания на приповерхностные уровни земной коры более древних терригенно-карбонатных комплексов пассивной континентальной окраины (O-S) [72].

Прогностическое значение имеют контуры интрузивных массивов: плагиогранитов (D₂) и гранодиорит-гранитов (D₃), которые закартированы на поверхности, и их проявление на глубине 3-х км.

В состав прогнозных критериев входят цифровые матрицы магнитного поля и трансформанты потенциальных полей (первая производная и низкочастотная составляющая). Данные материалы включены в цифровой массив, поскольку позволяют выделить контуры аномалиеобразующих объектов, к которым относятся интрузивные массивы (на глубине до 3-х км), а также зоны разрывных нарушений в области контрастной смены значений магнитного поля [3,31]. Стоит отметить, что эти критерии являются относительными и ориентированы под характеристики объектов, рассматриваемых в данной работе.

Кроме того, в набор критериев включены среднечастотные составляющие магнитного и гравитационного полей, которые позволяют выделить структуры, характеризующие строение фундамента [3,34].

Важным элементом прогноза является критерий безэталонной классификации, рассчитанный по методу динамических сгущений. Данный подход позволяет провести первичное геолого-структурное районирование исследуемой площади, которое основано на объединении группы по общему признаку с использованием матриц потенциальных полей. Этот прогнозный критерий позволяет выделить основные блоки и зоны прогиба [69].

5.2. Выбор эталонных объектов

Прогнозные построения в данной работе базируются на использовании алгоритмов распознавания образов с обучением. В ходе работы автором был проанализирован опыт работ этого типа [46,47,82] который основан на интерпретации широкого комплекса геофизических данных и применении статистических алгоритмов и выполнении прогнозных оценок изучаемых территорий на основе многофакторного анализа. Качество прогнозных решений зависит от количества и информативности признаков, вовлекаемых в расчет задачи распознавания образов. С учетом опыта работ этого типа, выполненных в пределах Алтае-Саянской складчатой области [46], выделение перспективных на обнаружение колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах

Змеиногорско-Быструшинского прогиба выполнено на основе набора геолого-структурных и геофизических критериев рудоносности [47].

В рамках задействованной в работе технологии распознавания образов с обучением, на первой стадии была выполнена оценка пространственного совмещения эталонов с контурами зон, характеризующих заданные признаки. Затем проводился расчет доверительных интервалов для заданных критериев рудоносности [16,47,74].

Выбор эталонных объектов для решения задачи распознавания образов основывался на представительности известных рудопроявлений по традиционным признакам оруденения [46,54]. С учетом выполненных геолого-геофизических и геотектонических построений в рамках данного исследования определяющее значение придавалось приуроченности эталонных рудопроявлений к контурам развития базальт-риолитовой формации в осевой зоне Змеиногорско-Быструшинского прогиба. Этим условиям отвечают Лазурское (1) и Корбалихинское (2) колчеданно-полиметаллические рудопроявления (Рисунок 5.3) [53,54].

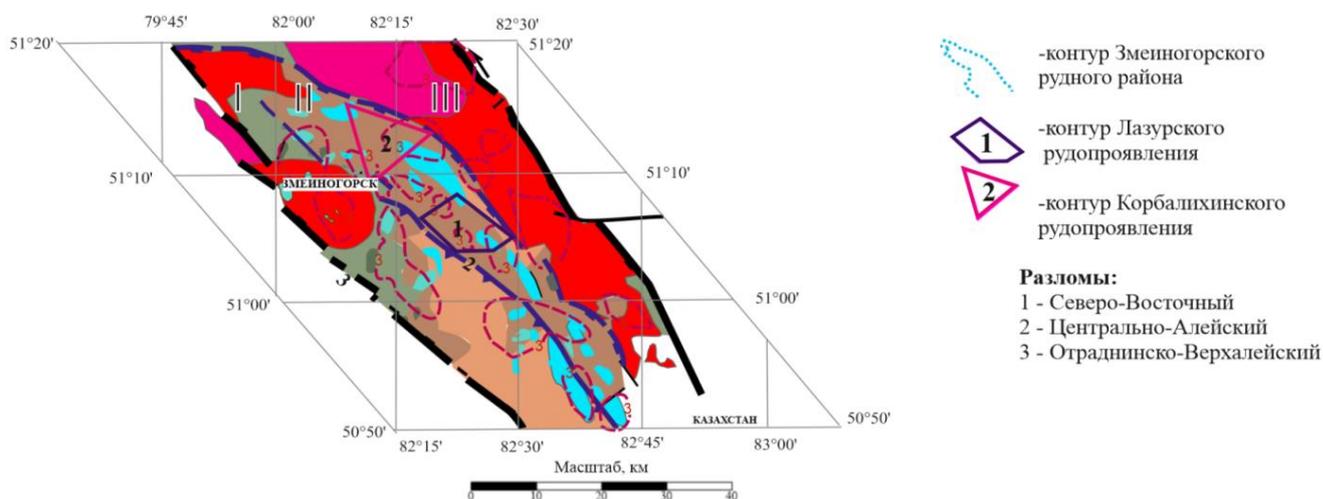


Рисунок 5.3 – Расположение эталонных объектов прогнозно-минерагенической оценки площади Змеиногорского рудного района (см. условные обозначения на рисунке 5.1).

На примере Лазурского месторождения можно выделить следующие поисковые критерии: пониженные значения в гравитационном поле, средние значения по намагниченности, повышенные значения на низкочастотной составляющей магнитного поля и др.

Алгоритмы распознавания образов основаны на выявлении корреляционных зависимостей в многомерном пространстве, сочетающем линейные, контурные, точечные и относительные критерии, которые задаются в формате оцифрованных моделей. В состав прогностического алгоритма заложена возможность оценки относительной информативности (веса) заданных критериев рудоносности по модулю коэффициента корреляции [10,15] (Таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Оценка веса задействованных критериев рудоносности по параметрам (1 – Лазурского рудопроявления, 2 – Корбалихинского рудопроявления).

Критерий	1		2		3		4		5		6		7		8	
Эталон	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Вес	0.05	0.16	0.58	0.73	0.27	0.38	0.32	0.27	0.06	0.06	0.04	0.03	0.12	0.16	0.42	0.44
Критерий	9		10		11		12		13		14		15		16	
Эталон	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Вес	0.13	0.10	0.02	0.03	0.65	0.53	0.02	0.03	0.61	0.49	0.38	0.35	0.05	0.22	0.34	0.25

Для визуализации результатов оценки информативности прогнозных критериев, построена гистограмма, которая отражает относительную весовую значимость признаков (суммарный вес всего набора критериев составляет 100%) (Рисунок 5.4).

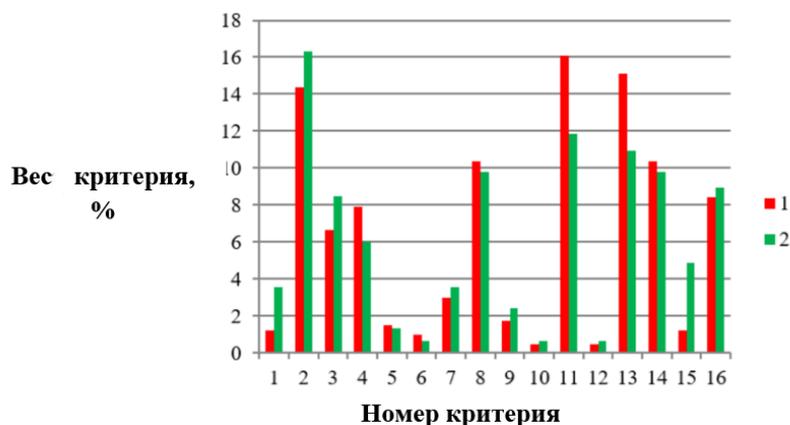


Рисунок 5.4 – Гистограмма относительных весов критериев (%), рассчитанных по эталонам – Лазурское (1) и Корбалихинское (2) рудопроявления. (Суммарный вес критериев принят за 100 %.)

В результате оценки весов, к наиболее информативным прогнозным критериям можно отнести: 2, 3, 4, 8, 11, 13, 14, 16 (см. Таблица 5.1). Весьма значимыми геолого-структурными критериями являются линейные, характеризующие удаленность эталонных объектов от основных разломов, и контурные, отвечающие «зоне слабой денудации рифтогенных комплексов» Змеиногорско-Быструшинского прогиба. Из числа информативных геофизических критериев можно выделить «уровень магнитного поля» и «среднечастотная составляющая магнитного поля», а также положительные аномалии на схеме «классификации параметров гравитационного и магнитного полей по методу динамических сгущений» [49,79].

Для минимизации искажающего эффекта на результирующее решение признаки, вес которых близок к нулю, в ходе дальнейших прогнозных построений были исключены [10,40,70].

5.3. Результаты решения задачи распознавания образов с обучением

Решение задачи распознавания образов с обучением представляется в виде схемы распределения вероятностей, характеризующих степень близости значений признаков в каждой точке площади исследований, с этими же признаками в пределах эталонов (0 – отсутствие совпадения, 1 – наиболее вероятное совпадение) [15,46] (Рисунок 5.5).

Анализ построенных схем свидетельствует о том, что наиболее высокие перспективы на выявление скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения имеет центральная зона, характеризующаяся наиболее интенсивной денудацией вулканогенно-осадочных комплексов прогиба [73]. В пределах этой зоны на фоне рифтогенных комплексов ранне-среднедевонского возраста на дневную поверхность выведены терригенно-карбонатные формации ранне-среднепалеозойского шельфа (O-S). Кроме того, значимую прогностическую роль играют ареалы развития гранодиорит-гранитовых массивов (D₃) АКО и гранитоидных массивов (D₃-C₁) [57], сформированные в ходе коллизионного орогенеза [89].

Определяющую роль при прогнозе играют критерии, которые позволяют охарактеризовать положение в разрезе прогиба и на площади исследований образований бимодальной базальт-дацит-риолитовой формации, являющейся рудовмещающей для колчеданно-полиметаллического оруденения. Важное значение для поиска скрытого оруденения играют критерии, характеризующие интенсивную деформацию структур прогиба (главные разломы и ареалы внедрения интрузивов), связанную с коллизионной обстановкой формирования.

Западная и восточная зоны Змеиногорско-Быструшинского прогиба являются менее перспективными, по сравнению с центральной. Однако западная зона может представлять особый прогностический интерес, поскольку характеризуется активным внедрением гранодиорит-гранитов, которые являются источником регенерации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения [25]. В свою очередь, восточная зона также может быть перспективной на обнаружение скрытого оруденения, поскольку наименее подвержена влиянию коллизионных деформаций. Этот фактор может свидетельствовать о том, что именно в восточной зоне высокая вероятность сохранности рудовмещающих формаций на большей глубине.

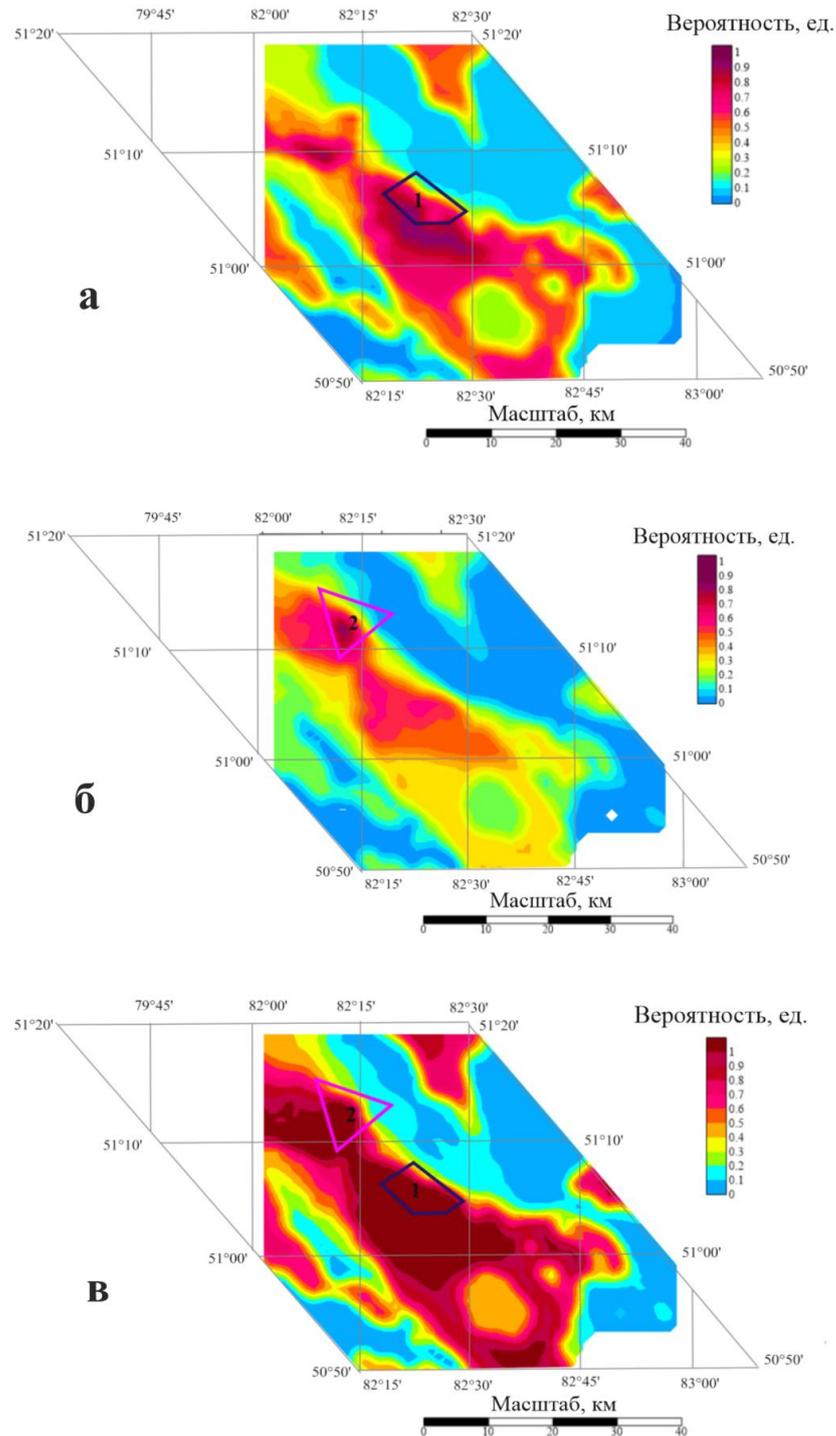


Рисунок 5.5 – Результаты прогнозно-минерогенической оценки площади Змеиногорского рудного узла: а) по параметрам эталона 1 (Лазурское рудопроявление), б) по параметрам эталона 2 (Корбалихинское рудопроявление), в) по суммарным параметрам эталонов 1 и 2.

Результаты прогнозных построений могут иметь практическое значение при планировании детальных поисково-оценочных работ в районах, перспективных на обнаружение скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

Выводы

В результате геотектонической интерпретации широкого комплекса геолого-геофизической информации по территории Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) изучены закономерности пространственного распределения основных структурно-вещественных подразделений земной коры. Латеральные и радиальные модели верхней коры и построенные историко-эволюционные схемы развития региона позволили оценить параметры глубинного строения Змеиногорско-Быструшинского прогиба и обосновать основные закономерности локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения.

На основе выполненных построений обоснован набор прогностических критериев, включающий геолого-структурные критерии, задаваемые в виде контурной, линейной и метризованной формах, а также отдельных характеристик геофизических полей и их трансформант. Для решения прогнозной задачи на основе алгоритма распознавания образов с обучением в качестве эталонных объектов задействованы контуры Лазурского и Корбалихинского рудопроявлений.

В качестве наиболее перспективных для планирования детальных геологоразведочных исследований рекомендуется центральная зона Змеиногорско-Быструшинского прогиба, которая наиболее интенсивно подвержена денудации девонских рифтогенных комплексов. Западная и восточная зоны прогиба характеризуются проявлением отдельных ареалов, перспективных на обнаружение скрытого и слабо проявленного колчеданно-полиметаллического оруденения на более глубинном уровне.

Особый прогностический интерес представляют ареалы проявления гранитоидных массивов D_{1-3} и C_{1-3} , как возможные источники регенерации рудного вещества для колчеданно-полиметаллического оруденения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную квалификационную работу, отражающую практическое решение актуальной задачи – прогнозную оценку закономерностей локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения с выделением перспективных зон для дальнейших поисковых исследований в пределах Рудного Алтая.

По результатам выполнения диссертации сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Формирование богатой минерагенической зоны Рудного Алтая связывается с последовательным проявлением процессов каледонского и герцинского орогенеза. В пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба выявлена тесная связь рудогенеза с формированием девонских вулканических трогов базальт-риолитовой формации.

2. Палеорекострукции, составленные для Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба, демонстрируют:

– проявление двух фаз ранне-среднедевонского рифтогенеза с формированием бимодальной базальт-риолитовой формации и внедрением интрузивов;

– на средне-позднедевонском этапе произошло активное внедрение гранитоидных батолитов;

– коллизионные процессы девона-среднего карбона привели к заложению надвиговых деформаций, исказивших характер заложения рудовмещающих формаций и проявление прожилково-вкрапленного колчеданно-полиметаллического оруденения.

Таким образом, наибольший интерес для прогноза зон локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения, представляют 2 обстановки: вулканоплутонического пояса и рифтогенного прогиба активной континентальной окраины.

В результате комплексной геотектонической интерпретации выделены геолого-структурные и геофизические прогнозные критерии локализации

скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения. Выводы, представленные в диссертации, имеют практическую значимость при планировании прогнозно-поисковых исследований в пределах Змеиногорского рудного района. Анализ потенциальной рудоносности перспективных зон требует привлечения дополнительных геохимических и минерагенических прогнозных оценок на детальном уровне локальных рудопроявлений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АКО – активная континентальная окраина

АССО – Алтае-Саянская складчатая область

БД – банк данных

ВПП – вулканоплутонический пояс

ГГК – Государственное геологическое картирование

ГСЗ-МОВЗ – глубинное сейсмическое зондирование методом обменных волн землетрясений

ГФО – геофизическая основа

ЗБП – Змеиногорско-Быструшинский прогиб

ЗРР – Змеиногорский рудный район

К – коллизионный этап

КПММ – колчеданно-полиметаллическое месторождение

МОГТ-2D-ВРС – высокоразрешающая сейсморазведка методом общей глубинной точки

О – океанический этап

ОЗ – обратная задача

ОД – островная дуга

П – платформенный этап

ПК – пикет

ПО – программное обеспечение

ПП – потенциальное поле

РА – Рудный Алтай

СФЗ – структурно-формационная зона

ТКО – этап трансформной континентальной окраины

AR – архей

C₁ – раннекаменноугольный период

C₂ – среднекаменноугольный период

C₃ – позднекаменноугольный период

D₁ – раннедевонский период

D₂ – среднедевонский период

D₃ – позднедевонский период

D_{1fr}-D_{3fm} – раннедевонский (франкский) – позднедевонский (фаменский) возраст

KZ – кайнозой

MZ – мезозой

O-S – комплексы ордовик-силурийского периода

PZ – палеозой

Q – четвертичные отложения

SEDEX (Sedimentary Exhalative deposits) – месторождения типа «Седиментационный выдох»

VMS (Volcanogenic massive sulfide deposits) – массивные вулканогенные сульфидные месторождения

ΔG, мГал – аномальное гравитационное поле

ΔT, нТл – аномальное магнитное поле

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абилдаева, М.А. Позднепалеозойские деформации пород Курайского блока: структурно-кинематический анализ (верховья реки Курайка, Горный Алтай)/ М.А.Абилдаева, С.В.Зиновьев С.В., М.М.Буслов // Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – 10(4). – С.937 - 943. DOI: GT-2019-10-4-0450.
2. Алексеев, В.И. Тектоно-магматические факторы локализации литий-фтористых гранитов Востока России // Записки Горного института. -2021. – Т. 248. – С. 173-179. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.1.
3. Алексеев, С.Г. Закономерности проявления рудных систем в потенциальных полях / С.Г.Алексеев, А.С.Духанин, Н.П.Сенчина, М.Б.Штокаленко // Материалы 46 сессии Международного научного семинара им. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2019. – С. 26-32.
4. Алексеев, С.Г. Особенности 2D- И 3D-интерпретации аномалий потенциальных полей / С.Г.Алексеев, С.А.Козлов, М.Б.Штокаленко, В.Е.Смирнов// Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 128-131.
5. Алексеев, С.Г. Визуализация в потенциальных полях мантийно-коровых структур, контролирующих кимберлитовый и лампроитовый магматизм / С.Г.Алексеев, П.А.Бочков, Н.П.Сенчина [и др.]// Смирновский сборник. – М.: Макс ПРЕСС. – 2018. – С. 292-307.
6. Ананьев, Ю.С. Космоструктурная модель Зырянского рудного района (Рудный Алтай) / Ю.С.Ананьев, Поцелуев А.А., Житков В.Г., Назаров В.Н., Кузнецов А.С. // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 316. – № 1: Науки о Земле. – С. 24-31.
7. Атлас "Опорные геолого-геофизические профили России" Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. Профиль «Базальт»//ВСЕГЕИ, – 2013 год. [Электронный ресурс: URL: <https://webftp.vsegei.ru/glubgeoph/seism54.pdf> // (Дата обращения: 21.12.2023)].
8. Балк, П.И. Аддитивные методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки. – М. : Научный мир. – 2020. – 456 с.

9. Бестемьянова, К.В. Минералогия барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) / К.В.Бестемьянова, О.М.Гринев // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 9. — С. 210-222.

10. Большакова, Н.В., Сенчина Н.П., Григорьев Г.К. Геотектоническое моделирование нефтегазоперспективных структур северной части Охотоморского региона с использованием алгоритмов «распознавания образов» / Н.В.Большакова, Н.П.Сенчина Н.П., Г.К.Григорьев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова (Екатеринбург, 23–27 января 2023 года). Екатеринбург: Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. — 2023. — С. 53-57.

11. Буслов, М.М. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области / М.М.Буслов, Х.Джен, А.В.Травин [и др.] // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54, № 10. — С. 1600-1627. — EDN RFXDPB.

12. Волков, В.В. Проблемы плитной тектоники в региональной геологии Алтае-Саянской складчатой области // Региональная геология и металлогения. — 2013. — № 54. — С. 38-44.

13. Ганженко, Г.Д. Золото-полиметаллическая минерализация Риддер-Сокольного месторождения на Рудном Алтае (Восточный Казахстан)/ Г.Д. Ганженко, М.А.Юдовская, И.В.Викентьев // Минералогия. — 2018. — 4(1). — С.8-34.

14. Гаськов, И.В. Особенности эндогенной металлогении Горного и Рудного Алтая (Россия) // Геология и геофизика. — 2018. — Т.59. — №8. — С.1254-1270.

15. Григорьев, Г.К. Применение свёрточной нейронной сети в задаче формализованного геологического прогноза по геофизическим данным / Г. К. Григорьев, Е. К. Григорьев, Э. О. Садыхов // Молодые - Научкам о Земле: Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми

томах. (31 марта – 01 апреля 2022 г., г. Москва) / Т. 4. Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе. – 2022. – С. 73-77.

16. Гусев, А.И. Критерии продуктивных магматических комплексов Алтайского региона на золотое оруденение / А.И.Гусев, Е.М.Табакеева. – Бийск: Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина. – 2014. – 146 с. – ISBN 978-5-85127-814-3. – EDN XWSTED.

17. Гусев, А.И. Петрология плагиогранитоидов выдрихинского комплекса Салаира // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 2. – С. 65-70.

18. Гусев, А.И. Геодинамика и металлогения мезозой-кайнозойского этапа Горного Алтая / А.И.Гусев, Н.И.Гусев // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 60-65.

19. Гусев, А.И. Петрогенезис и геодинамическая обстановка формирования золото-обогащенных колчеданных систем Рудно-Алтайского металлогенического пояса / А.И.Гусев, А.Ф.Коробейников // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 30-35. – EDN NWHEVN.

20. Гусев, Г.С. Обь-Зайсанская, Алтае-Саянская и Восточносаяно-Енисейская покровно-складчатые области: основные особенности тектонического развития / Г. С. Гусев, Н. В. Межеловский, А. Ф. Морозов [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 72. – С. 26-41. – EDN YNJJNFU.

21. Гусев, А.И. Мантийно-коровое взаимодействие в генерации различных типов оруденения: геофизический и петрологический аспекты // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315. – № 1: Науки о Земле. — С. 18-25.

22. Гусев, Н.И. Геохронология магматизма Рудного Алтая / Н.И.Гусев, Л.Ю. Романова. // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции, Иркутск, 17–20 октября 2023 года. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН. – 2023. – С. 58-60. – EDN TPBJQM.

23. Гусев, Н.И. Геохимические особенности, возраст и геодинамическая обстановка формирования осадочных образований в фундаменте Рудного Алтая // Геология, геофизика и минеральные ресурсы. – 2021. – 25. – С.29-41.
24. Гусев, Н.И. Мезозойская тектонотермальная активизация и эпитеермальное золотое оруднение в Северо-Восточном Горном Алтае/ Н.И.Гусев, А.И.Гусев А.И., С.П.Шокальский, С.В.Кашин, А.Н.Ларионов, Е.В.Толмачева // Региональная геология и металлогения. – 2014. –57. – С. 49 - 61.
25. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-44 – Рубцовск. Объяснительная записка / Н.И.Гусев, Ю.Е.Вовшин, А.А.Круглова, М.Г.Пушкин [и др.] – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2015. – 415 с.
26. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (издание второе). Серия Горно-Алтайская. Лист М-44-IV – Рубцовск. Объяснительная записка / С.И.Федак, Ю.А.Туркин, П.Ф.Селин и др. // М. : Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019.
27. Данильев, С.М. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных / С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева // Записки Горного института. – 2024. – С.1-12. – EDNIEWVBO.
28. Дергачев, А.Л. Вулканогенные колчеданные месторождения богатых золотом руд / А.Л.Дергачев, Н.И.Еремин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2018. – № 3. – С. 3-11. – EDN UNYXPW.
29. Дергачев, А.Л. Разномасштабные тенденции в эволюции состава руд вулканогенных колчеданных месторождений / А.Л.Дергачев, Н.И.Еремин, Н.Е.Сергеева // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2013. – № 5. – С. 31-40. – EDN RGQSZR.
30. Диденко, А.Н. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии / А.Н.Диденко, А.А.Моссаковский, Д.М.Печерский, С.В.Руженцев, С.Г.Самыгин, Т.Н.Хераскова // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 7–8. – С. 59-75.

31. Долгаль, А.С. Гравиметрия и магнитометрия: трансформации геопотенциальных полей: Допущено методическим советом Пермского государственного национального исследовательского университета в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистров «Геология»//Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета. – 2022. – 140 с. – EDN QVOOYK.

32. Диденко, А.Н. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии / А.Н.Диденко, А.А.Моссаковский, Д.М.Печерский, С.В.Руженцев, С.Г.Самыгин, Т.Н.Хераскова// Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35 (7—8). – С. 59—75.

33. Дурягина, А.М. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья / А.М.Дурягина, И.В.Таловина, Х.Либервирт Х., Р.К.Илалова // Записки Горного института. – 2022. – 256, – С. 527-538. – DOI: 10.31897-PMI.2022.76

34. Духанин, А.С. Структура струйных ореолов рассеяния глубокозалегающих месторождений Рудного Алтая / А.С.Духанин, С.Г.Алексеев, Н.П.Сенчина //Региональная геология и металлогения. – 2019. –№ 80. – С 75 - 94.

35. Дьячков, Б.А. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая/ Б.А.Дьячков, М.А.Мизерная, А.П.Пяткова [и др.]//Отечественная геология. – 2021. – № 5. – DOI:10.47765/0869-7175-2021-10024.

36. Дьячков, Б.А. К методике прогнозно-поисковых работ (Восточный Казахстан) / Б.А.Дьячков, О.Н.Кузьмина, И.Е.Матайбаева, Т.А.Ойцева // Национальная ассоциация ученых (НАУ). – 2015. – Т. III (8). – С.168-171.

37. Егоров, А.С. Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок / А.С.Егоров, Д.Ф.Калинин, **Д.Д.Секерина** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 148–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431.

38. Егоров, А.С. Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структур его складчатого обрамления / А.С.Егоров, Н.В.Большакова, Д.Ф.Калинин, А.С.Агеев // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 703-719. – DOI 10.31897/PMI.2022.63. – EDN GYWKXW.

39. Егоров, А.С. Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России // Записки Горного института. – 2015. – Т. 216. – С.13-30.

40. Ермолин, Е.Ю. Оптимизация наземной геофизики для поиска кварцевых золотоносных жил в республике Саха (Якутия) / Е.Ю.Ермолин, А.В.Мельников, Г.К.Григорьев // Инженерная и рудная Геофизика 2023 : Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2023. – С. 224-229. – EDN VFAXBO.

41. Зайцев, С.В. Опыт применения трехмерной инверсии магнитотеллурических данных в районе Рудного Алтая / С.В.Зайцев, В.А.Куликов, А.П.Ионичева, А.Г.Яковлев // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии : Труды Международной геолого-геофизической конференции, Москва, 05–08 февраля 2018 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2018. – С. 715-719. – EDN ORTVIP.

42. Зиндобрый, В.Д. Условия и особенности формирования metabазитовых пород Телецкой зоны Горного Алтая / В.Д.Зиндобрый, М.М.Буслов // ВСЕРОССИЙСКИЕ СТУДЕНЧЕСКИЕ ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 17 февраля 2022 года. Том Часть 2. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2022. – С. 502-512. – DOI 10.46916/21022022-5-978-5-00174-481-8. – EDN GYITTC.

43. Иванов, А.И. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов, золота, меди, свинца, цинка Российской Федерации (по результатам работ ФГУП ЦНИГРИ за 2012-2015 гг.) / А.И.Иванов, С.С.Вартанян,

А.И.Черных [и др.] // Отечественная геология. – 2016. – № 5. – С. 11-62. – EDN UPTVSC.

44. Караулов, В.Б. Девонские геологические формации Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) / В.Б.Караулов, Л.К.Филатова, М.И.Никитина // Известия ВУЗов, Геология и разведка. - 1997. - № 2.

45. Калинин, Д.Ф. Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным / Д.Ф.Калинин, А.С.Егоров, Н.В.Большакова // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2022. – № 1(53). – С. 59-75. – DOI 10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75.

46. Калинин, Д.Ф. Многоальтернативный вероятностный прогноз минерагенических объектов с использованием структурного анализа геофизических данных (часть 1 и 2) / Д.Ф.Калинин, М.К.Овсов // Геофизика. 2013. №№ 2-4. С. 45-50; 8-14.

47. Калинин, Д.Ф. Информационно-статистический прогноз нефтегазоносности в краевой части Корякско-Камчатской складчатой области / Д.Ф.Калинин, А.С.Егоров, Н.В.Большакова, Д.Д.Секерина // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2023. – № 1(57). – С. 63-88. – DOI 10.31431/1816-5524-2023-1-57-63-88. – EDN GUXIOE.

48. Кашин, С.В. Гидротермально-метасоматические формации регионального распространения и их использование для прогнозирования скрытого колчеданно-полиметаллического оруднения (на примере Змеиногорского рудного района, Рудный Алтай) / С.В.Кашин, А.В. Молчанов, В.В.Шатов // Региональная геология и металлогения. – 2013. –№ 56. – С.65-77.

49. Керимов, И.А. Применение программного комплекса "Коскад 3D" для анализа потенциальных полей Терско-Каспийского прогиба / И.А.Керимов, А.В.Петров, Э.А.Абубакарова // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12, – № 3. – С. 88-96. – DOI 10.31161/1995-0675-2018-12-3-88-96. – EDN DNNGZP.

50. Козлов, М.С. Условия формирования Рудно-Алтайской металлогенической провинции // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т.57. – 4. – С. 299-326.

51. Косьянов, А. Н. Методология решения обратных задач геофизики // Молодой ученый. — 2012. — № 1 (36). — Т. 1. — С. 77-79. — URL: <https://moluch.ru/archive/36/4143/> (дата обращения: 14.05.2024)]

52. Кудрявцева, Н.Г. Геодинамические обстановки формирования колчеданно-полиметаллического оруденения Рудного Алтая и Салаира // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов: Сборник тезисов докладов VII научно-практической конференции, Москва, 13–14 апреля 2017 года. – Москва: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2017. – С. 32-33. – EDN YPERGT.

53. Кузнецов, В.В. Прогноз и поиски месторождений свинца и цинка в вулканогенных (VMS) и терригенно-карбонатных ассоциациях (SEDEX) / В. В. Кузнецов, Т. В. Серавина // Новые идеи в науках о Земле : Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах, Москва, 02–05 апреля 2019 года. Том 2. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2019. – С. 173-176. – EDN ITTFQB.

54. Кузнецов, В.В. Научно-методические основы прогноза и поисков полиметаллических месторождений Алатае-Саянской минерагенической провинции / В.В.Кузнецов, Т.П.Кузнецова, Т.В.Серавина // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов : Сборник тезисов докладов VII научно-практической конференции, Москва, 13–14 апреля 2017 года. – Москва: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2017. – С. 34-35. – EDN YPERHC.

55. Кузнецов, В.В. Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем / В.В.Кузнецов, И.А.Чижова // Руды и

металлы. – 2021. – № 1. – С. 26-41. – DOI 10.47765/0869-5997-2021-10002. – EDN BRLOGH.

56. Кузнецова, С.В. Некоторые вопросы генезиса и минералогические особенности стратиформных руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Алтайский край / Руды и металлы, ЦНИГРИ, г. Москва. – 2017. – С.40-50.

57. Куйбида, М.Л. Надсубдукционные плагиограниты Рудного Алтая: возраст и особенности состава / М. Л. Куйбида, Н. Н. Крук, С. П. Шокальский [и др.] // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 464, № 3. – С. 317. – DOI 10.7868/S0869565215270171. – EDN UGEWYX.

58. Куйбида, М.Л. Инициальный базитовый вулканизм Алтайской активной окраины Сибирского континента (Горный Алтай): геохимические характеристики и геохронология / М.Л.Куйбида, В.И.Крупчатников, О.М.Попова [и др.] // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит : материалы IV Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 17–23 сентября 2018 года. – Владивосток: Федеральное государственное унитарное предприятие "Издательство Дальнаука", 2018. – С. 180-183. – EDN VJRAQQ.

59. Куйбида, М.Л. Базальтовый вулканизм системы островная дуга-задуговой бассейн (Алтайская активная окраина) / М.Л.Куйбида // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 108-120. – DOI 10.30911/0207-4028-2019-38-3-108-120. – EDN MWRYPO.

60. Кисин, А.Ю. Общекоровая складчатость и горообразование / А.Ю.Кисин // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2009. – Т. 151, № 3. – С. 216-228. – EDN KXOJDP.

61. Легенда Алтае-Саянской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 1 000 000 (третье издание) / Г.А.Бабин, Л.Л.Зейферт, А.Ф.Щигрев и др., Новокузнецк. Фонды ВСЕГЕИ, НРС. – 2009.

62. Легенда Алтайской серии листов ГК РФ масштаба 1 : 200 000 (второе издание). Объяснительная записка / Гл. ред. С. П. Шокальский. – ФГУ АлтГФГИ. – 1999.

63. Литвиненко, В.С. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / В.С.Литвиненко, Е.И.Петров, Д.В.Василевская [и др.] // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95-111. – DOI 10.31897/PMI.2022.100. – EDN APFXQN.

64. Лось, В.Л. Прогноз и поиски рудных объектов на основе картирования полей концентрации элементов, рудный алтай / В.Л.Лось, И.С.Гольдберг, Г.Я.Абрамсон // Руды и металлы. – 2011. – № 3-4. – С. 115-116. – EDN NTUFGVB.

65. Мовчан, И.Б. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии / И.Б.Мовчан, З.И.Шайгаллямова, А.А.Яковлева // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 217-233. – DOI 10.31897/PMI.2022.23. – EDN FUHNTS.

66. Мовчан, И.Б. Уточнение оценок сейсмического микрорайонирования с оптимизацией априорных данных/ И.Б.Мовчан, А.А.Яковлев// Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С.133-141. – DOI: 10.31897/pmi.2019.2.133.

67. Мурзин, О.В. Геологический отчет о работах по составлению и подготовке к изданию комплекта Государственной геологической карты масштаба 1: 200 000 на Змеиногорской площади, листы М-44-Х, М-44-ХI (Российская часть) в 1996–2000 гг./ О.В.Мурзин, В.И.Горшечников, В.М.Чекалин [и др.]// АлтФ ФБУ «ГФГИ по СФО». – 2001.

68. Никитин, А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130201 "Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых" / А. А. Никитин, А. В. Петров ; Федеральное агентство по образованию РФ, Российский гос. геологоразведочный ун-т им. Серго Орджоникидзе. – Москва: Центр информ. технологий в природопользовании, 2008. – 112 с. – ISBN 978-5-9751-0062-7. – EDN QKHUPL.

69. Петров, Д.А. Особенности структуры руд Рубцовского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167, № 2. – С. 40.

70. Петров, А.В. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты / А.В. Петров, Г.В. Демура, С.В. Зиновкин // Недропользование – XXI век. – 2017. – №1. – С. 46-61.

71. Сайтгалеев, М.М. Применение нейронной сети в целях картирования разрывных нарушений / М.М.Сайтгалеев, Г.К.Григорьев // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 4. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 85-87. – EDN WJKNQ.

72. Сенчина, Н.П. Деконволюция Эйлера в интерпретации данных потенциальных полей Казанско-Кажимского авлакогена // Междунар. научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11 (113).

73. **Секерина, Д.Д.** Особенности глубинного строения, геотектонической позиции и эволюционной истории Змеиногорско-Быструшинского прогиба Рудного Алтая / **Д.Д.Секерина, А.С.Егоров** // Региональная геология и металлогения. – 2024. – № 97. – С. 17-26. – EDN JGBRAX.

74. **Секерина, Д.Д.** Закономерности локализации структур каледонского и герцинского орогенеза Рудного Алтая / **Д.Д.Секерина, Е.А.Дергилева, А.С.Егоров** // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 93. – С. 52-62. – DOI 10.52349/0869-7892_2023_93_52-62. – EDN HECSGY.

75. **Секерина, Д.Д.** Особенности глубинного строения и обоснование нестандартных критериев рудоносности Змеиногорского рудного района//Сборник тезисов докладов XIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». (10–12 апреля 2024 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). – М. : ЦНИГРИ. – 2024. – 452 с.

76. **Секерина, Д.Д.** Эволюционная последовательность проявления геодинамических обстановок Рудного Алтая, определивших рудогенез Змеиногорского рудного района / **Д.Д.Секерина, А.С.Егоров** // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024: Материалы LV Тектонического совещания, Москва, 29 января – 03 2024 года. – Москва: ООО "Издательство ГЕОС", 2024. – С. 149-152. – EDN KNPkSS.

77. **Секерина Д.Д.** Особенности глубинного строения каледонских и герцинских структур Рудного Алтая/ **Д.Д.Секерина, Е.А.Дергилева** // Актуальные проблемы недропользования, тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. Том 1. Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург. – 2023. – С.349-350.

78. **Секерина, Д.Д.** Геолого-структурное районирование Змеиногорского рудного узла по результатам комплексной интерпретации// Рудная школа 2023. Сборник тезисов докладов IV Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ (15–17 февраля 2023 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М.: ЦНИГРИ. – 2023. – 200 с.

79. **Секерина, Д.Д.** Эффективность применения трансформации геофизических полей при картировании границ шовных зон и консолидированного фундамента/ **Д.Д.Секерина, Е.А.Дергилёва** //Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии: материалы XXXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, г. Апатиты, 3–7 октября 2022 г. Издательство ФИЦ КНЦ РАН, – 2022. — 260 с.

80. **Секерина, Д.Д.** Применение отечественных геоинформационных систем для решения задачи классификации потенциальных полей / **Д.Д.Секерина, Е.А.Дергилева** // Новое в познании процессов рудообразования: Сборник материалов Одиннадцатой Российской молодежной научно-практической Школы. Тезисы докладов молодых учёных, Москва, 28 ноября – 02 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской

Академии наук, 2022. – С. 239-243. – EDN HJESKN.

81. **Секерина, Д.Д.** Методика преобразования и классификации потенциальных полей с целью уточнения границ рудных объектов / Д. Д. Секерина // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии : Материалы XXXII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, Петрозаводск, 12–15 октября 2021 года / Отв. редактор А.А. Ковальчук. – Петрозаводск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр Российской академии наук", 2021. – С. 148-151. – EDN GSDJCV.

82. **Секерина, Д.Д.** Применение классификации и преобразования потенциальных полей с целью уточнения наиболее перспективных рудоносных участков / Д. Д. Секерина // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 4. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 89-90. – EDN VQFCWJ.

83. **Серавина, Т.В.** Опыт и результаты прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений (2009-2017 гг.) / Т. В. Серавина, В. В. Кузнецов // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов: Сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 16–18 апреля 2018 года. – Москва: Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, 2018. – С. 63-64. – EDN LWPQIS.

84. **Серавина, Т.В.** Особенности вещественного состава вмещающих пород и руд Лазурского рудного поля (Змеиногорский рудный район, Рудноалтайская минерагеническая зона) / Т.В.Серавина, С.В.Кузнецова, Л.К.Филатова // Отечественная геология. – 2021. – № 3-4. – С. 36-47. – DOI 10.47765/0869-7175-2021-10020. – EDN QEMALW.

85. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Алтайского края (на 15.06.2020 г.) Федерального агентства по недропользованию от 26.12.2019 г. № 049-00017-20-04.// ФГБУ «ВСЕГЕИ». [Электронный ресурс: // <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/b019320175472cfb966bca1390867e79.pdf?ysclid=lwhmywvpxc752938764> /Дата обращения: 15.03.2023].

86. Сурков, В.С. Тектоника и глубинное строение Алтае-Саянской складчатой области / В.С.Сурков, О.Г.Жеро, Д.Ф.Уманцев, Г.М.Зайцева / Недра. – 1973. – 144 с.

87. Таловина, И.В. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова)/ И.В.Таловина, Н.С.Крикун, Ю.Ю.Юрченко, А.С.Агеев//Записки Горного института. – 2022. –Т. 254. – С.158-172. – DOI: 10.31897/PMI.2022.45

88. Травин, А.В. Петрологическая модель редкометалльных месторождений Калба-Нарымского пояса (восточный Казахстан) / А.В.Травин, А.Г.Владимиров, Н.Г.Мурзинцев [и др.] // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д.Серикбаева. – 2021. – № 3. – С. 21-28. – DOI 10.51885/1561-4212_2021_3_21. – EDN WSCWHS.

89. Туркин, Ю.А. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая / Ю.А.Туркин, К.Л.Новоселов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 1. – С. 5-15. – EDN PBRXJJ.

90. Туркин, Ю.А. Особенности тектонического строения и геотектоническая позиция Рудного Алтая// Геология, геофизика и минеральные ресурсы. – 2010. – Т.13. – С. 55-67.

91. Филатова, Л.К. Кремнекислые вулканиты девонской базальт-риолитовой формации Рудного Алтая / Л.К.Филатова, Е.И.Филатов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2015. – № 1. – С. 37-44. – EDN TMGDQN.

92. Чекалин, В.М. Рудноалтайский полиметаллический пояс: закономерности распределения колчеданного оруденения / В.М.Чекалин, Б.А.Дьячков//Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 6. – С. 513-532. – DOI: 10.7868/S0016777013060026.

93. Хромых, С. В. Базитовый и сопряженный гранитоидный магматизм как отражение стадий развития Алтайской аккреционно-коллизийной системы (Восточный Казахстан) // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 3. – С. 330–355.

94. Alekseev, V. I. Deep structure and geodynamic conditions of granitoid magmatism in the Eastern Russia// Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 243. – PP. 259–265.

95. Berio, L. R. Storti F., Balsamo F., Mittempergher S., Bistacchi A., & Meda M. Structural evolution of the Parmelan anticline (Bornes Massif, France): Recording the role of structural inheritance and stress field changes on the finite deformation pattern/ L.R.Berio, F.Storti, F.Balsamo, S.Mittempergher, A.Bistacchi, M.Meda// Tectonics. – 2021. – P.40. –DOI:10.1029/2021TC006913.

96. Daniliev, S. Integration of Seismic Refraction and Fracture-Induced Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings/ S.Daniliev, N.Danilieva, S.Mulev, V.Frid // Minerals. – 2022. – PP.1-11. – DOI: doi.org/10.3390/min12050609.

97. Denisová, N. Evolution of the Hydrothermal System Associated with the ABM Replacement-Style Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada/ N.Denisová, S.J.Piercey. Economic Geology. – 2023. – PP.1-29. – DOI: 10.5382/econgeo.5004.

98. De Wolfe, Y.M. Volcanology, geochemistry and geodynamic setting of Neoproterozoic Sunrise volcanogenic massive sulfide deposit, Beaulieu River volcanic belt, Slave craton, Northwest Territories, Canada/ Y.M.,De Wolfe, B.Knox, S.Lilley, E.J.MacMillan, C.A.Partin // Precambrian Research, 72: 106608. –2022. – P. 372. – DOI: 10.1016/j.precamres.2022.106608.

99. De Kemp, E. A. Spatial agents for geological surface modeling//Geosci. Model Dev. – 2021. Vol. 14. –PP. 6661–6680. – DOI: 10.5194/gmd-14-6661-2021, 2021.

100. Egorov, A.S. Deep structure of the Barents-Kara region according to geophysical investigations along 1-AR and 2-AR geotravers / A. S. Egorov, E. S. Belevskaya, A. S. Ageev [et al.] // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences : 7, Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences, Saint Petersburg, 11–14 апреля 2016 года. – Saint Petersburg, 2016. – P. 728-732. – DOI 10.3997/2214-4609.201600173. – EDN WUMRZN.

101. Egorov, A.S. Deep structure, tectonics and petroleum potential of the western sector of the Russian arctic / A.S.Egorov, O.M.Prischepa, Y.V.Nefedov [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9, No. 3. – P. 1-26. – DOI 10.3390/jmse9030258. – EDN ZRHHUV.

102. Deng, X.-H. Copper and zinc isotope variation of the VMS mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China/ X.-H.Deng, R.Mathur, LI Y., Q.-G Mao., Y.-S WU., L.-Y.Yang., X., U J Chen. // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – Vol. 196. – PP. 8–19.

103. Hannington, M.D. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits//Treatise on Geochemistry (Second Edition). Elsevier. – 2014. –PP. 463-488. –DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01120-7.

104. Jan, M.Peter. Stable and radiogenic isotopes in the exploration for volcanogenic massive sulfide deposits / Jan M.Peter and James A.Kidder [et al.]// The Canadian Mineralogist – 2022. – Vol. 60. – PP. 433-468. – DOI: 10.3749/canmin2000068.

105. Kiss, G.B. Tracing the Source of Hydrothermal Fluid in Ophiolite-Related Volcanogenic Massive Sulfide Deposits: A Case Study from the Italian Northern Apennines / G. B. Kiss, K. Molnár, Z. Benkó [et al.] // Minerals. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 8. – DOI 10.3390/min13010008. – EDN OQIWIE.

106. Kiss, G.B. Reconstruction of hydrothermal processes in the Cyprus type Fe-Cu-Zn deposits of the Italian Northern Apennines: Results of combined fluid inclusion microthermometry, SEM-CL imaging and trace element analyses by LA-ICP-MS/ G.B.Kiss, Z.Bendő, G.Garuti, F.Zaccarini, E.Király, F.Molnár.// Minerals. – 2021. – PP.1-21.
107. Kudryavtseva, N.G. Stages of formation of non-ferrous and noble metal deposits in the Greater Altai in various geodynamic settings / N.G.Kudryavtseva, V.V.Kuznetsov, T.V.Seravina // Геология и охрана недр. – 2022. – No. 4(85). – PP. 65-72. – EDN KTUCKA.
108. Lafrance, B. Internal and external deformation and modification of volcanogenic massive sulfide deposits/ B.Lafrance, H.L.Gibson, M.S.Stewart // Reviews in Economic Geology. 2020. – Vol. 21. – PP.147–171.
109. Leybourne, M.I. Geochemical evidence for a magmatic contribution to the metal budget of the Windy Craggy Cu-Co(\pm Zn) volcanogenic massive - sulfide deposit, northwestern British Columbia; in Targeted Geoscience Initiative 5: volcanic- and sedimenthosted massive-sulfide deposit genesis and exploration methods, (ed.) J.M. Peter and M.G. Gadd/ M.I.Leybourne, J.M.Peter, M.A.Schmidt, D.Layton-Matthews, A.Voinot, L.Mathieu// Geological Survey of Canada Bulletin. – 2022. –Vol.617. – PP.287-312.
110. Ma, X. Devonian volcanicrocks of the southern Chinese Al-tai, NW China: petrogenesis and implication for a propagating slab-window magmatism induced by ridge subduction during accretionary orogenesis / X.Ma., K.Cai., T.Zhao [et al.] // J. Asian Earth Sci. – 2018. – Vol.160. – PP. 78–94.
111. Manor, M. J. Age and Chemostratigraphy of the Finlayson Lake District , Yukon: Implications for Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Mineralization and Tectonics along the Western Laurentian Continental Margin/ M.J.Manor, S.J.Piercey, D.C.Murphy, C.J.Wall//Lithosphere. –.2022. – PP.1-45.
112. Movchan, I. Early assessment of seismic hazard in terms of voronezh massif-moscow depression contact / I.Movchan, A.Yakovleva, Z.Shaygallyamova,

A.Movchan // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Vol. 15, No. 3. – P. 62-70. – DOI 10.33271/MINING15.03.062. – EDN FQINBK.

113. Movchan, I.B. Approach to automation of field diagnosis data interpretation for localization of pitting in the pipeline wall / I.B.Movchan, A.A.Yakovleva // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10, No. 2. – P. 1571-1581. – EDN AWUNRK.

114. Moye, R.J. Volcanogenic polymetallic massive sulfide deposits (VMS) of the Carolina Terrane in central North Carolina: New perspectives and historical reports and data from the files of Phelps Dodge Exploration East (1975-1982): North Carolina Geological Survey/ R.J.Moye, J.C.Reid, D.F.Lee // Special Publication. – 2017. – Vol.11. – 456p.

115. Nozaki, T. Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization/ T.Nozaki, T.Nagase, Y.Takaya, T.Yamasaki, T.Otake // Scientific Reports, v. 11, 2021. – p. 1–11.

116. Priezzhev, I.I. Seismic waveform classification based on Kohonen 3D neural networks with RGB visualization / I.I.Priezzhev, P.C.H.Veeken, U.Strecker [et al.] // First Break. – 2019. – Vol. 37, No. 2. – P. 37-43. – DOI 10.3997/1365-2397.2019012. – EDN ZATVYX.

117. Pilote, J.L. Evolution of the subseafloor hydrothermal system associated with the Ming VMS deposit, Newfoundland Appalachians, and its controls on base and precious metal distribution / J.L.Pilote, S.J.Piercey, P.Mercier-Langevin // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 55, No. 5. – P. 913-936. – DOI 10.1007/s00126-019-00899-z. – EDN XTCODF.

118. Schellart, W.P. Subduction invasion polarity switch (SIPS): A new mechanism of subduction initiation, with an application to the Scotia Sea region/ W. P.Schellart, V.Strak, A.Beniest, J.C.Duarte, F.M.Rosas // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-5747.–.2023. – DOI:10.5194/egusphere-egu23-5747.

119. Shtokalenko, M.B. Areas of Negative Excess Density of the Earth's Crust as Sources of Energy for Ore Formation/ M.B.Shtokalenko, S.G.Alekseev,

N.P.Senchina, S.Y.Shatkevich //Kazan: Kazan Federal University. – 2019. – Vol. 1. – PP.279 - 284.

120. Vorontsov, A.A. Plume magmatism in the northeastern part of the Altai–Sayan region: Stages, source compositions, and geodynamics (exemplified by the Minusinsk Depression) / A.A.Vorontsov, S.I.Dril, Y.I.Katraevskaya [et al.] // Doklady Earth Sciences. – 2017. – Vol. 472, No. 2. – P. 184-189. – DOI 10.1134/S1028334X1702009X. – EDN AIVXTI.

121. Yang, F.A combined fluid inclusion and S–H–O–He–Arisotope study of the Devonian Ashele VMS-type copper–zinc deposit in the Altay orogenic belt, northwest China / F.Yang, Q.Li, C.Yang, Z.Zhang // J. Asian Earth Sci. – 2018. –Vol. 161. – PP.139–163.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Общество с ограниченной ответственностью
«Северо-Западная Геолого-Геофизическая Компания «Геокомплекс»

Россия, 195265, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-кт, д. 111, Лит. А, офис 235. Телефон: 8 (921) 973-22-36
E-mail: geocomplex@szggk.ru, www.szggk.ru



Утверждаю
Генеральный директор
ООО "СЗГГК "Геокомплекс"
А.Д. Кузовенков

Дата «04» мая 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Секериной Дарьи Денисовны

по научной специальности 1.6.9. Геофизика

Специальная комиссия в составе: председатель А.Д. Кузовенков; члены комиссии: Станишевская Ю.Л., Кириллов В.С., составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Глубинное строение и геолого-геофизические критерии рудоносности Змеиногорского рудного района (Алтае-Саянская складчатая область)», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, целесообразно внедрить в процесс обработки и интерпретации полевых геолого-геофизических данных деятельности ООО "СЗГГК "Геокомплекс" при разработке моделей скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения на лицензионных площадях **АРХ 002597 ТП от 26 апреля 2022 г. (участок «Гильский»)** и **Лицензия АРХ 002598 ТП от 26 апреля 2022 г. (участок «Чёрный»):**

- методик расчета и моделирования геолого-геофизических разрезов;
- рекомендаций по выявлению прогнозных критериев для решения задач распознавания образов на основе геологических, геофизических и минерагенических признаков.

По итогам рассмотрения принято принципиальное решение руководства организации о намерении внедрения результатов кандидатской диссертации в сроки 2024-2026 гг.

Использование указанных результатов позволит:

- улучшить качество прогностического моделирования на основе комплексирования геолого-геофизических прогнозных критериев;
- повысить уровень подготовки начинающих специалистов по методике обработки и интерпретации геофизических данных.

Председатель комиссии
Генеральный директор
ОО "СЗГГК "Геокомплекс"

Члены комиссии:
Инженер-геофизик 1 кат.
Инженер-геофизик 1 кат.

А.Д. Кузовенков

Станишевская Ю.Л.

Кириллов В.С.