

Соколов Степан Витальевич

**ПЕТРОФИЗИКА ЗОЛОТОСУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ В
УГЛЕРОДИСТЫХ ТОЛЩАХ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)**

25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель	доктор геолого-минералогических наук, профессор Ерофеев Леонид Яковлевич
Официальные оппоненты:	доктор геолого-минералогических наук, профессор Сальников Владимир Николаевич кандидат геолого-минералогических наук Оленченко Владимир Владимирович
Ведущая организация	Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья

Защита состоится «28» декабря 2011 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.12 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета по
защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.269.12,
д.г.-м.н., профессор

А.А. Поцелуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Байкало-Патомская золотоносная провинция является одной из старейших в России. Эксплуатация её месторождений началась с середины XIX века и сосредоточилась, главным образом, на россыпях Бодайбинского рудного района, из которых на сегодняшний день добыто более 1500 т благородного металла.

Открытие во второй половине прошлого столетия в центральной части рудного района уникального месторождения золота Сухой Лог, чьи запасы составляют 1500 т, стало кульминацией работы нескольких поколений геологов, изучавших эту территорию.

Поблизости от Сухого Лога были обнаружены несколько менее крупных по запасам месторождений: Вернинское, Высочайшее, Невское, а также ряд перспективных рудопроявлений. Таким образом, внимание исследователей сосредоточилось в одном районе, тогда как изученность других территорий с высокой потенциальной золотоносностью остаётся слабой. Примером тому служит Кевактинский рудный узел (северная часть Тонодского рудного района), где найдено крупное золоторудное месторождение Чертово Корято с запасами около 100 тонн.

В Кевактинском рудном узле в 1973 – 1980 гг. проводился комплекс геологоразведочных работ, который включал геофизические исследования. По результатам работ эффективность геофизических методов для картирования широко распространённых в регионе пологих рудовмещающих структур в углеродистых толщах (как на месторождении Чертово Корято) была признана низкой. Это обусловлено, главным образом, тем, что петрофизика такого типа промышленно значимых месторождений золота до настоящего времени остаётся практически не изученной.

Цель работы. На основе детальных петрофизических исследований месторождения Чертово Корято выявить геофизические признаки локализации золотого оруденения в пологих тектонических структурах и определить поисково-разведочные возможности геофизических методов для повышения эффективности геологоразведочных работ.

Основные задачи исследований.

1. Изучить физические свойства пород и природу аномалий магнитного, естественного электрического и радиогеохимического полей месторождения Чертово Корято.

2. Исследовать и сопоставить пространственное распределение петрофизических комплексов и золота в пределах рудовмещающего метасоматического ореола месторождения.

3. Создать физико-геологическую модель месторождения.

4. Выявить геофизические признаки локализации месторождения и определить поисково-разведочные возможности геофизических методов.

Фактический материал и методика исследований. Геофизический облик месторождения Чертово Корято и его района рассмотрен на основе материалов магнитной (ΔT) и гамма-спектрометрической съёмок в масштабе 1:10 000.

Дополнительно использовались результаты магниторазведки (ΔZ) и измерения естественного электрического поля (ЕП) предшествующих этапов. Геологическая интерпретация аномалий физических полей проводилась на основе детальных исследований магнитных, поляризационных, радиогеохимических свойств пород и их плотности. Все физические свойства пород месторождения изучались на керне разведочных скважин. В общей сложности изучен керн 33 скважин по 4 буровым линиям. Сделано более 14500 измерений магнитной восприимчивости (χ), послуживших основой для построения четырёх петромагнитных разрезов. Исследованы магнитная анизотропия, палеомагнитные характеристики, зависимость направления остаточной намагниченности от распределения сульфидной минерализации, электродные потенциалы сульфидов и углеродистого вещества, плотностные свойства пород, проведён нейтронно-активационный анализ для определения содержания радиоактивных элементов в породах месторождения. Все исследования выполнялись в соответствии с регламентирующими их инструкциями и методиками.

Личный вклад автора. Состоял в сборе, обработке и систематизации ранее полученного фактического материала, в проведении специальных полевых геофизических исследований, лабораторном изучении физических свойств пород месторождения Чертово Корято и анализе комплекса полученных данных.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. В распределении пирротина и золота проявлена отчётливая зональность: интервалы с промышленным содержанием золота полностью локализируются в пределах ореола пирротинизации, но обособляются от участков с максимальными концентрациями сульфида.

2. В породах месторождения Чертово Корято проявлена магнитная анизотропия, связанная с доминирующим направлением длинных осей кристаллов пирротина во вкрапленниках, прожилках и микропрожилках.

3. В рудовмещающем метасоматическом ореоле месторождения Чертово Корято по поляризационным, магнитным, радиогеохимическим и плотностным свойствам выделяются три петрофизических комплекса. Их пространственное положение выражает петрофизическую зональность месторождения, в которой рудное тело занимает закономерную позицию среди пород с максимальным значением калий-ториевого отношения.

4. Аномальный петрофизический облик рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Чертово Корято позволяет оценить общий размах оруденения и выделить наиболее продуктивные его интервалы в магнитном, естественном электрическом и радиогеохимическом полях.

Научная новизна.

1. Впервые на примере месторождения Чертово Корято создана физико-геологическая модель золотого оруденения, локализованного в пологой тектонической структуре.

2. Установлен петрофизический контроль продуктивной минерализации

золоторудного месторождения Чертово Корято.

3. Определены геофизические признаки локализации месторождения Чертово Корято, относящегося к одному из наиболее важных промышленных типов месторождений золота, и рациональный комплекс геофизических методов для поисков и разведки аналогичных рудных объектов.

Достоверность полученных результатов обеспечена детальностью исследования физических свойств пород и полей месторождения Чертово Корято, проверкой геологической интерпретации полученных данных путём численного моделирования геофизических аномалий.

Практическая значимость. Интерпретация геофизических аномалий путём детального изучения физических свойств пород месторождения Чертово Корято позволила определить возможности геофизических методов, показать их высокую эффективность для обнаружения золотого оруденения в пологих тектонических структурах. Впервые для Кевактинского рудного узла обоснована целесообразность использования магниторазведки, электроразведки методом естественного электрического поля и гамма-спектрометрии при геологоразведочных работах на рудное золото.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований обсуждались на всероссийской конференции-конкурсе «Лучший выпускник России» (г. Санкт-Петербург, 2008г.), международной конференции «Пятое научные чтения Ю.П. Булашевича» при Институте геофизики УрО РАН (Екатеринбург, 2009), «XI Уральской молодёжной научной школе по геофизике» при Институте геофизики УрО РАН (г. Екатеринбург, 2010), «V Сибирской международной конференции молодых учёных по наукам о Земле» при ИГМ/ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск, 2010), Всероссийской научно-практической конференции «Геофизические методы при изучении недр» (г. Томск, 2011). По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе две статьи в ведущих рецензируемых журналах (Записки горного института, Т.181, 2009, Отечественная геология, №4, 2010).

Работа выполнена на кафедре геофизики Томского политехнического университета под руководством доктора геолого-минералогических наук, профессора, заведующего кафедрой геофизики Л.Я. Ерофеева, которого автор благодарит за всестороннюю помощь и поддержку при выполнении работы.

Автор признателен доцентам кафедры геофизики ТПУ В.П. Меркулову, Е.В. Гусеву, Г.Г. Номоконовой за методическую помощь в проведении исследований и участие в обсуждении их результатов.

Автор искренне благодарит доцента кафедры геофизики ТПУ Ю.В. Колмакова за неоценимую помощь на каждом этапе исследований, рекомендации и замечания при обсуждении работы, которые способствовали её улучшению.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Содержит 22 рисунка, 5 таблиц и список использованных источников из 58 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость исследования.

Глава 1. Геодинамическое развитие и источники золота Байкало-Патомской металлогенической провинции

Главными тектоническими элементами провинции являются Байкало-Патомский и Мамско-Бодайбинский синклинории, а также, разделяющий их Чуйско-Нечерский антиклинорий. Согласно многолетним работам В. А. Буряка, А. И. Иванова, И. К. Рундквиста, М. И. Кузьмина, Л. П. Зоненшайна, А. Т. Королькова, Т. М. Страховой и других исследователей, структурно-вещественные комплексы, слагающие перечисленные тектонические элементы региона, формировались, начиная с нижнего рифея до верхнего палеозоя, в течение серии самостоятельных геологических и геодинамических событий.

Наиболее важными из них, с позиции рассматриваемых в диссертации вопросов, являются коллизионные. В результате тангенциальных напряжений, господствующих в коллизионную эпоху развития региона в венде – раннем палеозое, в пределах Байкало-Патомской золотоносной провинции получили широкое распространение пологозалегающие рудовмещающие структуры. Это определило большое значение не только вертикальных, но и горизонтальных направлений для продвижения металлоносных флюидов и их разгрузки.

Пространственная близость Бодайбинского синклинория и Тонодского поднятия позволяет предполагать схожие, а, возможно, единые источники золота для формирования месторождений, локализованных в обеих структурах. В качестве источников металла в месторождениях Бодайбинского синклинория рассматриваются базит-ультрабазитовые породы и гранулиты существенно меланократового состава нижней части коры архей-раннепротерозойского возраста. Обогащение углеродистых осадков золотом, возможно, происходило и за счёт метаболизма бактерий (биогенно-хемогенное накопление) и привноса металла в бассейн седиментации с терригенным материалом речных водотоков.

Глава 2. Геологическое строение месторождения

Глава составлена по материалам исследований И. В. Кучеренко, Р. Ю. Гаврилова, В. Г. Мартыненко, А. В. Верховина.

2.1. Стратиграфия

Месторождение расположено в верхах раннепротерозойской михайловской свиты (верхняя подсвита), породы которой содержат до 2 об. % углеродистого вещества и представляют собой слои ритмично чередующихся разнозернистых метапесчаников, метаалевролитов и аргиллитов. Обломочная фракция занимает до 90 об. %. Изменения пород отвечают зеленосланцевой фации метаморфизма.

2.2. Тектоника

Пликативную тектонику Кевактинского рудного узла в районе месторождения представляет михайловская синклиналь, которая имеет пологое погружение крыльев (10 - 20°) и в восточном брахиформном замыкании ядерной части вмещает руды месторождения. Появление синклинали связывают с самым ранним этапом эволюции тектонической обстановки

месторождения. Также наиболее древней считается синскладчатая сланцеватость напластования. Вероятно, разрывы, согласные слоистости или образующие с ней острый угол, возникали многократно и в более поздние этапы, так что все вместе они представляют наиболее распространенную систему пологих деформаций простой формы.

Позднее образовалась многочисленная группа трещин отрыва неправильной формы, но преимущественно полого ориентированных. Наиболее крупные из них оперяют крутопадающие локальные разломы. Сами тела крутопадающих разломов малопроницаемы и практически не содержат рудной минерализации, но их сопровождают многочисленные субпараллельные им трещины скола, хорошо проводящие рудоносные растворы. Сколовые деформации падают под углами 35-45° в направлениях 240-260° и 130-200°.

Перечисленные деформации в совокупности образуют сложнодислоцированную рудовмещающую структуру, которая развита висячем боку самой крупной разрывной дислокации на месторождении, диагностируемой как взбросо-сдвиг. Его относят к числу ранних, дорудных нарушений, а в генетическом аспекте он рассматривается как рудоподводящий канал. Обе структуры, рудовмещающая и рудоподводящая, погружаются в запад-юго-западном направлении под углами 15° и 60° соответственно.

2.3. Характеристика руд и зональность метасоматического ореола месторождения

Золото-сульфидно-кварцевая минерализация жильно-прожилково-вкрапленного типа развита в охарактеризованных выше деформационных структурах. Основными сульфидными минералами являются пирит, пирротин, арсенопирит, в меньших количествах встречаются галенит, сфалерит, халькопирит. Участки распространения сульфидов объединены в минерализованную зону, включающую рудное тело.

На месторождении выделяются следующие метасоматические зоны: внешняя, углеродистая, хлоритовая, альбитовая, березитовая. Основным объемом метасоматического ореола сложен образованиями углеродистой зоны, в которой рассредоточены участки хлоритовой, альбитовой и березитовой зон.

Глава 3. Методика исследований

Площадные магнитные (ΔT) и гамма-спектрометрические наблюдения выполнялись по сети размером 100*10 м и 100*20 м соответственно. Пункты наблюдений при профильной съемке отстояли друг от друга на 5 м.

На месторождении Чертово Кобыло проведена серия петрофизических исследований: измерение магнитной восприимчивости (χ), палеомагнитные исследования, изучение анизотропии магнитных свойств, измерение электродных потенциалов (ЭП) и плотности, нейтронно-активационный анализ.

Все свойства пород изучались на керне разведочных скважин. Изучен керновый материал 33 скважин по 4 поисковым линиям. При измерении χ на каждом метре керна через равные промежутки делалось минимум 3 измерения. Всего выполнено 14500 измерений. Для измерений применялся прибор ПИМВ.

Палеомагнитные характеристики пород определялись на астатическом

лабораторном магнитометре МАЛ-036 в земном магнитном поле. Ориентировка кернового материала в лабораторных условиях не соответствовала его положению в естественном залегании, поэтому из угловых характеристик вектора остаточной намагниченности (J_n) удалось определить лишь наклонение (j) в силу вертикального положения всех скважин на месторождении. Всего изучено 46 образцов из БЛ 7, 8а, 19, 30 (рис. 1-6).

Исследование зависимости направления остаточной намагниченности пород от ориентировки вкрапленников, микропрожилков и прожилков, образующих в породах структурно-морфологические системы сульфидных выделений, проводилось по следующей методике. В координатах образца по уравнению плоскости рассчитывались нормали (n) к поверхностям, ограничивающим микропрожилки и прожилки, а также к плоскостям сланцеватости, вдоль которых развивались вкрапленники сульфидов. При измерении J_n системы координат образца и магнитной лаборатории совмещались. Углы между J_n и рассчитанными нормальными ($n^{\wedge}J_n$) вычислялись по формуле скалярного произведения векторов.

Для выявления анизотропии χ изучался характер изменения индуктивной намагниченности образцов при их повороте относительно магниточувствительной системы с шагом 20° . В этих же образцах изучалась ориентировка длинных осей зерен пирротина в сульфидных агрегатах для сопоставления их с направлением легкого намагничивания и вектором J_n .

Электродные потенциалы измерялись на углеродистом веществе (УВ) и сульфидах по отношению к неполяризуемому медному электроду. Исследовано 369 образцов по буровым линиям 7, 8а, 19, 30. На этих же образцах методом гидростатического взвешивания измерялась плотность.

Нейтронно-активационный анализ (НАА) проводился в ядерно-геохимической лаборатории на базе исследовательского ядерного реактора Томского политехнического университета. Всего изучена 181 проба.

Глава 4. Структура геофизических полей месторождения

4.1. Магнитное поле

Структурным элементом первого порядка магнитного поля месторождения является дипольная аномалия (рис. 1). Соседство двух разноимённых полюсов фиксируется в ΔZ - и ΔT -аномалиях, формы которых до значений ± 150 нТл хорошо совпадают. На участках, где отклонения от фона превышают указанную интенсивность, характер полей различается.

Полю ΔZ свойственны многочисленные локальные линейные аномалии разной интенсивности. Локальные возмущения существенно осложняют и, в определённой степени, «затушевывают» выделяемый в ΔZ диполь. В поле ΔT они отсутствуют, поэтому его структура значительно проще.

На восточном фланге месторождения фиксируется самая интенсивная и протяжённая положительная линейная аномалия. В поле ΔZ её ось претерпевает серию коленчатых изломов, местами она заметно раздувается и достигает интенсивности в $+850$ нТл. В поле ΔT интенсивность аномалии не превышает $+450$ нТл и не так очевидна линейность её структурных элементов.

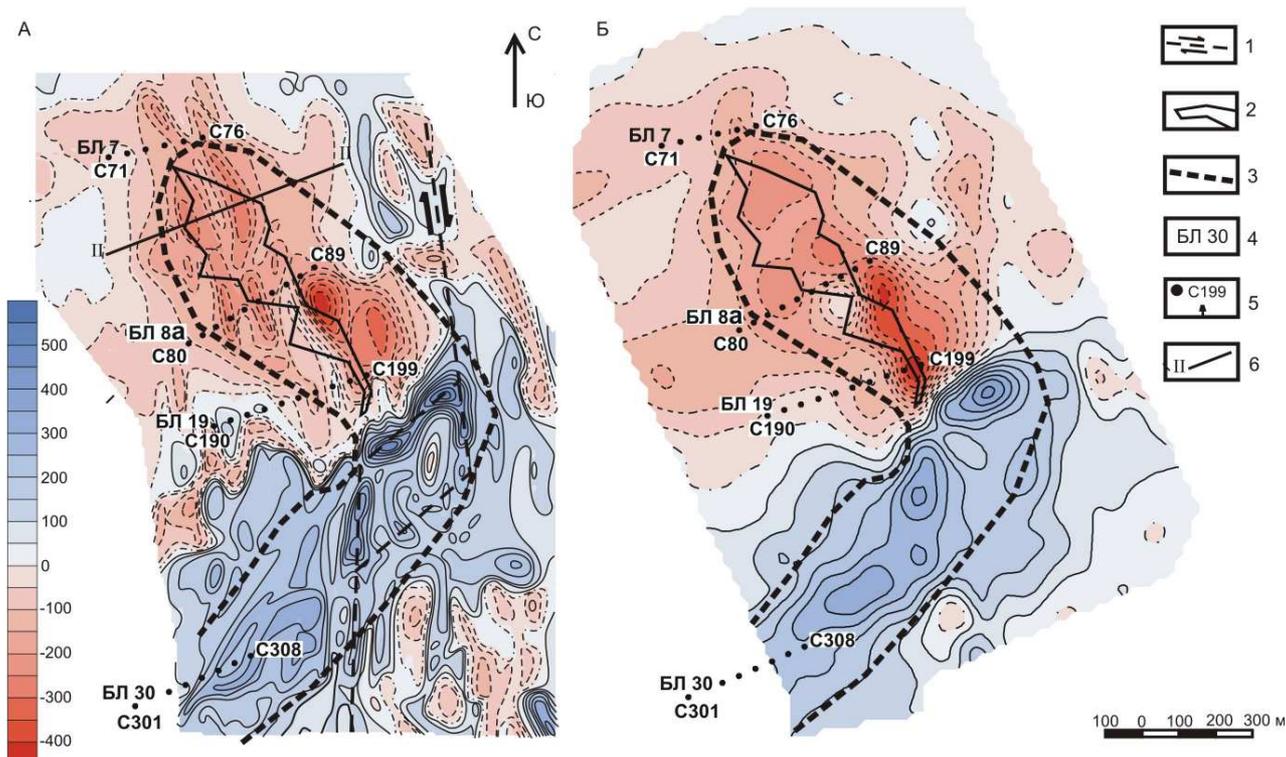
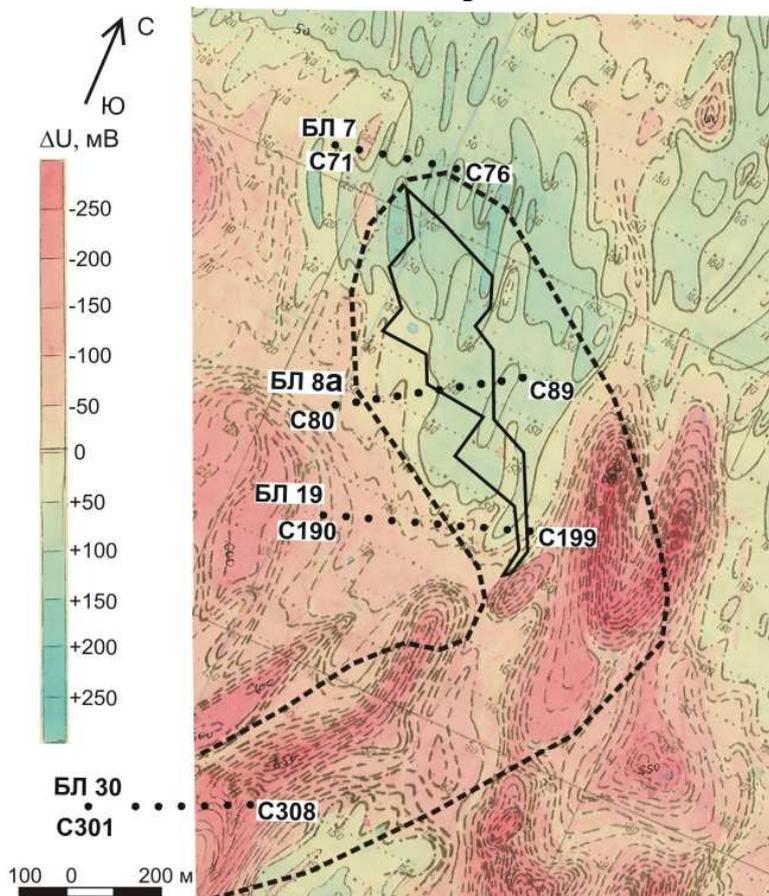


Рис. 1. Карты изодинам, нТл (А – ΔZ , Б – ΔT): 1 – предполагаемый взбросо-сдвиг и направления движений блоков по сместителю; 2 – 3 – границы: рудного тела (2), минерализованной зоны (3); 4 – буровые линии; 5 – скважины; 6 – профиль для моделирования линейных локальных аномалий ΔZ (см. ниже).

4.2. Естественное электрическое поле



Интенсивные отрицательные аномалии ЕП (до -850 мВ) линейного характера и субмеридианальной или северо-северо-восточной ориентировки проявлены на юго-востоке, юге и юго-западе месторождения (рис. 2).

Они со всех сторон, кроме север-северо-западной, окружают зону локализации рудного тела, которая отмечается слабыми положительными аномалиями ЕП, достигающими +150, редко +200 мВ. Зона слабых положительных аномалий протягивается за пределы месторождения в север-северо-западном направлении.

Рис. 2. План изолиний потенциала ЕП. Условные обозначения см. на рис.1.

4.3. Радиогеохимические ореолы

Зона с содержанием калия до 5% на фоне пород с содержанием элемента около 2,2% отчётливо прослеживается в пределах месторождения и имеет субмеридианальное простирание (рис. 3). Интенсивный калиевый ореол совпадает с рудным телом, и вытянут, как и оно, на север-северо-запад.

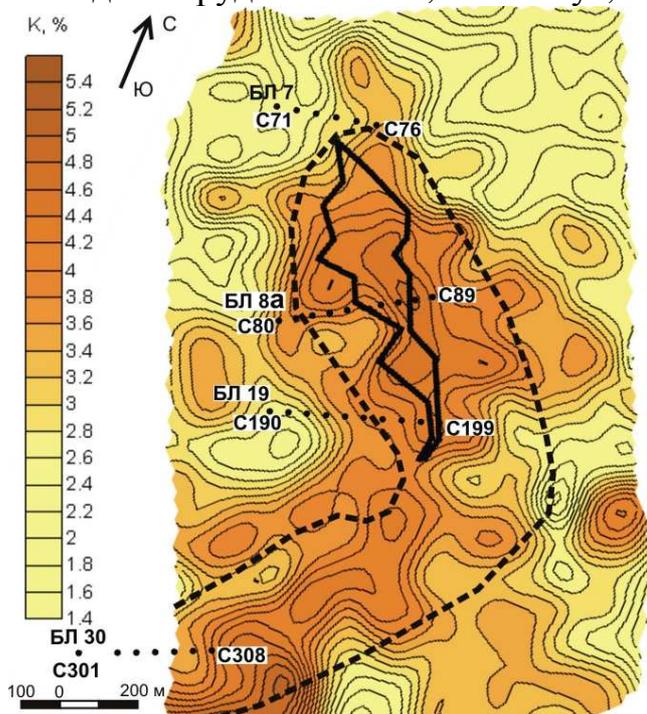


Рис. 3. План изоконцентрат калия.
Условные обозначения см. на рис. 1.

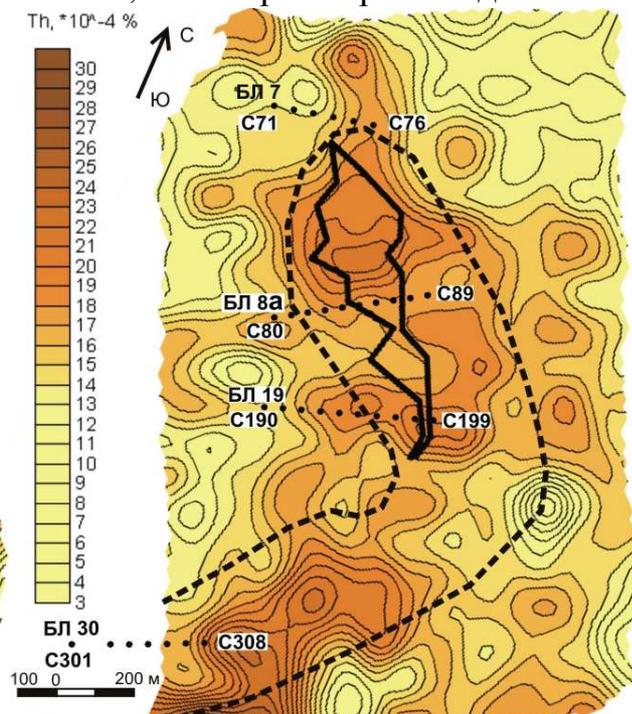


Рис. 4. План изоконцентрат тория.
Условные обозначения см. на рис. 1.

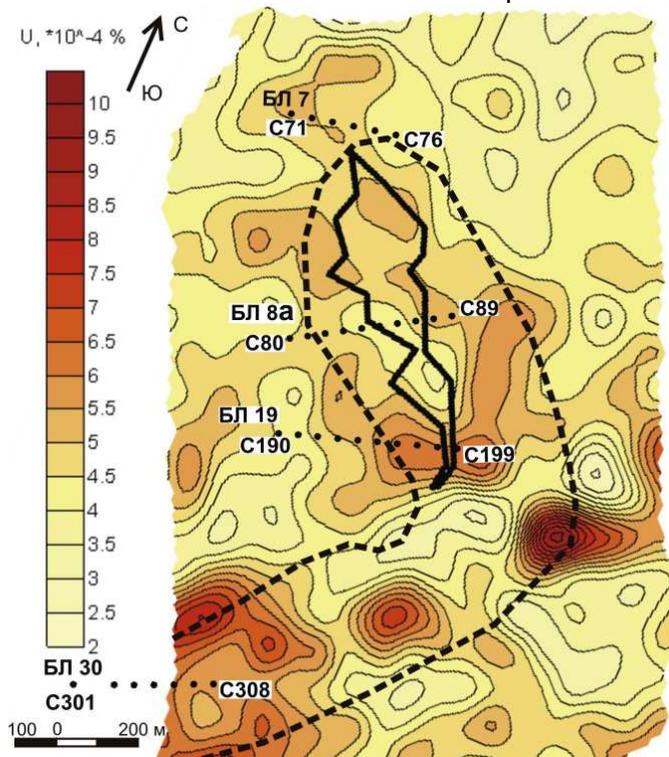


Рис. 5. План изоконцентрат урана.
Условные обозначения см. на рис. 1.

Ториевые ореолы (рис. 4) более дифференцированы, и их ориентировка отличается от направления простирания рудного тела. Интенсивный ореол тория совпадает с северной частью рудного тела.

Уран имеет иное распределение, чем калий и торий (рис. 5). Ореолы накопления урана заметно более дифференцированы и имеют более сложную структуру. Исключением является локальная зона на самом юге месторождения. Она проявляется повышенными концентрациями всех радиоактивных элементов.

В северной части месторождения прослеживается

ореол с содержанием урана $(4-6) \cdot 10^{-4}\%$, который обрамляет рудное тело. В зоне локализации рудного тела прослеживается относительное понижение концентраций радионуклида.

Глава 5. Природа геофизических аномалий месторождения

5.1. Характеристика петромагнитных образований

Песчаники михайловской свиты имеют низкую χ $((20-50) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Образования золотосодержащей минерализованной зоны весьма дифференцированы по этому параметру – их χ варьирует от $(3-5) \cdot 10^{-5}$ до $1500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и напрямую зависит от содержания пирротина. В разрезе структура петромагнитной неоднородности месторождения характеризуется сочетанием множества различных по размеру тел двумерного облика, разобщенных интервалами немагнитных пород. В совокупности они образуют полого погружающийся пласт с отчётливой вертикальной зональностью: магнитные свойства закономерно нарастают с глубиной и наиболее магнитные породы залегают в подошвенной части минерализованной зоны (рис. 6, А).

Сопоставление с результатами пробирного анализа на золото показало, что продуктивные интервалы, как правило, приурочены к полям распространения пород с аномальными значениями χ , при этом наиболее золотоносные интервалы локализуются в пределах магнитных образований с χ не более $300 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. В интервалах, где χ превышает это значение, происходит резкое уменьшение содержания золота вплоть до полного исчезновения. Так, например, породы из БЛ 19 более магнитны, но заметно менее золотоносны по сравнению с породами из БЛ 8а (см. рис. 6 А, Б).

При совместном рассмотрении участков развития золотой и пирротиновой минерализации (см. рис. 1) проявляется горизонтальная зональность, выражающаяся сокращением объёма промышленных руд по мере увеличения интенсивности магнитного поля.

Таким образом, золотоносные интервалы локализуются в пределах пирротинсодержащих пород с умеренными магнитными свойствами и отчётливо обособляются от участков с максимальной концентрацией сульфида.

Остаточная намагниченность исследованных образцов изменяется от 0.12 до 11.92 А/м. В общей намагниченности пород месторождения остаточная составляющая значительно превосходит индуцированную – фактор Кенигсбергера изменяется от 2.0 до 34.7 при среднем значении и стандартном отклонении 10.7 и ± 9.2 соответственно. По наклонению J_n все породы удалось разделить на две группы. В первой, более многочисленной, группе из 39 образцов оказались представители всех литотипов, распространенных на месторождении, и березиты. Они имеют пологое намагничение с наклоном от 1 до 28 градусов при среднем значении 12° и стандартном отклонении $\pm 8^\circ$. Оставшиеся семь образцов сгруппированы по более крутому намагничению. Из них три образца отобраны в зоне влияния взбросо-сдвиговой структуры (скв. 198 и 199, см. рис. 1) и имеют наклоны 58° , 62° и 46° , а другие четыре – среди пород, создающих линейные локальные аномалии ΔZ (скв. 74, 305 и 306). Наклонение J_n в них изменяется в пределах $37^\circ-45^\circ$

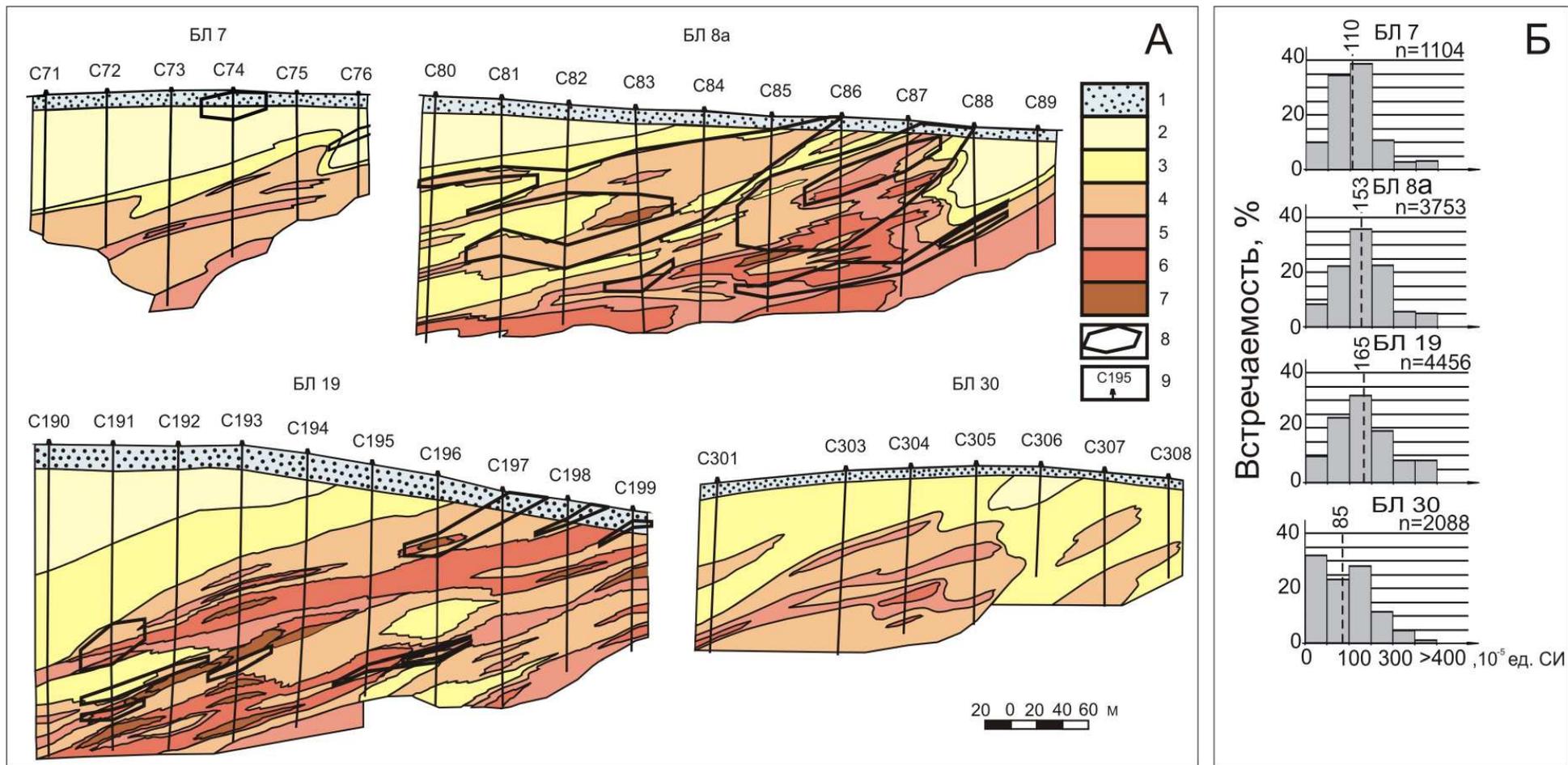


Рис. 6. Петромагнитные разрезы (А) и распределение χ по разрезам буровых линий (Б) месторождения: 1–7 - интервалы значений χ : зона окисления (1), < 50 (2), 50-100 (3), 100-200 (4), 200-300 (5), 300-400 (6), > 400 (7); 8 – границы рудного тела; 9 – скважины; n – объем выборки; пунктиром показано среднее значение χ по выборке.

Результаты исследования зависимости направления остаточной намагниченности от распределения сульфидной минерализации в образце показали, что в образцах, где проявлена одна структурно-морфологическая система сульфидных выделений (в дальнейшем просто система) $\chi^{\wedge} J_n$ близок к 90° . Когда в одном образце содержится несколько систем – J_n может не совпадать ни с одной из них. Надо полагать, это происходит из-за суммирования компонентов вектора J_n , принадлежащих разным системам, поэтому результирующий вектор не совпадает ни с одной из них, но отклоняется в сторону той, чей вклад больше. Так, например, в образце С198-59.9 (рис. 7, А) основной вклад в результирующий вектор J_n вносит компонент, принадлежащий системе №1 (пологие сульфидные прожилки) и, вероятно, №3 (минерализация по сланцеватости), а слабо проявленная система №2 (крутые прожилки и просечки сульфидов) практически не влияет на итоговое направление J_n .

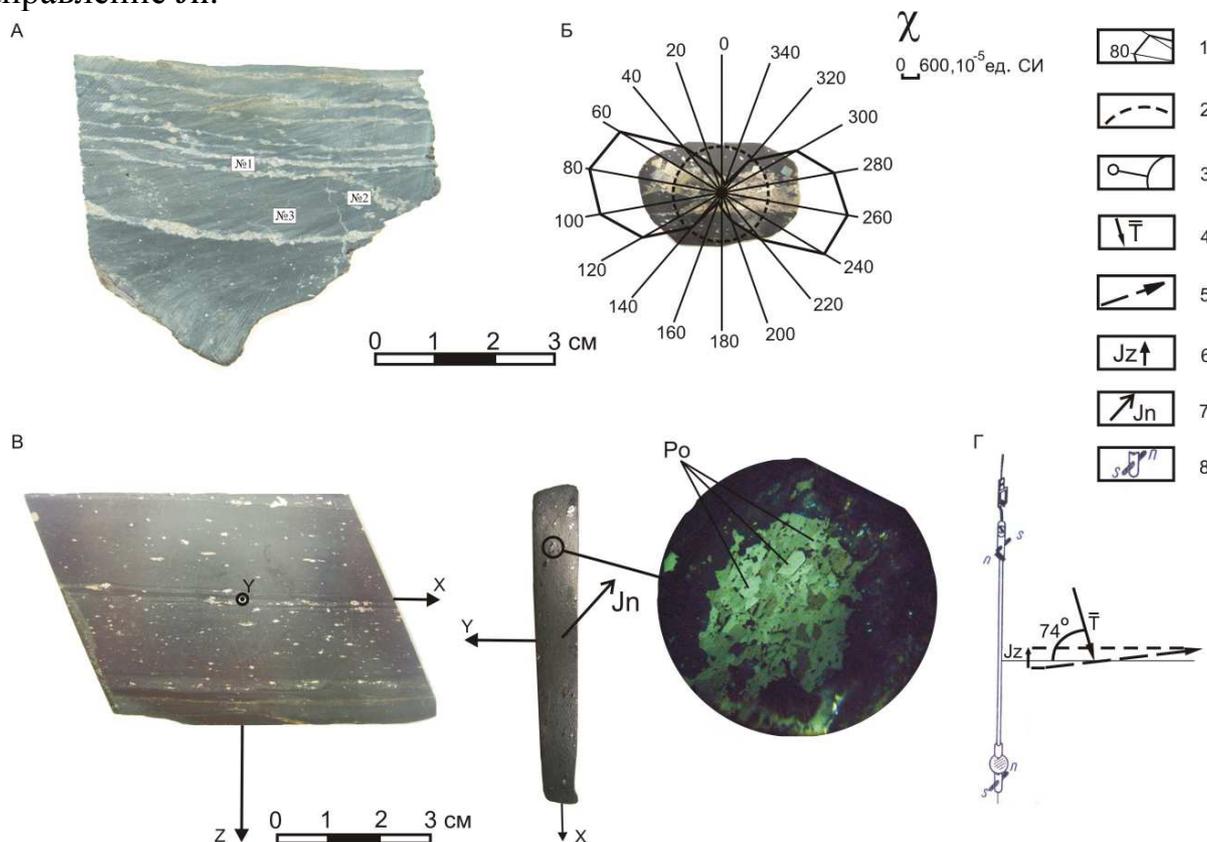


Рис. 7. Структура сульфидной минерализации и ее влияние на магнитную анизотропию пород: прожилково-вкрапленная (А), прожилковая (Б) и вкрапленная (В). Схема интерпретации отрицательных значений магнитной восприимчивости (Г). 1 – диаграмма магнитной восприимчивости в образце с сульфидным прожилком при различной ориентировке образца относительно магниточувствительной системы; 2 – нулевая линия кажущейся магнитной восприимчивости; 3 – агрегат с зёрнами пирротина (Po) под микроскопом; 4 – 7 – направления: магнитного поля Земли (4), легкого намагничения образца (5), вертикальной составляющей индуктивной намагниченности (6), остаточной намагниченности (7); 8 – элемент чувствительной системы магнитометра.

В системе координат аншлифа С194-169.0 (рис. 7, Б) поверхность сульфидной жилы совпадает с плоскостью XY. Координатные проекции (в условных единицах) $J_{nx} = +8.3$, $J_{ny} = -40.6$, $J_{nz} = -1$, что определенно указывает

на то, что вектор J_n также лежит в плоскости XY. Максимальное значение χ достигается при таком повороте образца, когда вектор J_n наилучшим образом совпадает с намагничивающим полем (его наклонение на широте лаборатории составляет 74°). Примечателен факт появления отрицательных значений χ , который подтвердился повторными наблюдениями.

Закономерное распределение вкрапленных агрегатов пирротина в форме тонких линзочек по горизонтально проявленной сланцеватости хорошо прослеживается в аншлифе С303-39.2. Под микроскопом видно, что весь агрегат вытянут в одном направлении с длинными осями кристаллов пирротина, образуя с осью X угол около 30° (рис. 7, В).

Проекция вектора остаточной намагниченности образца на координатные оси $J_{nx} = -4.7$, $J_{ny} = -3.9$, $J_{nz} = +0.2$. Очевидно, что в образце вектор J_n лежит в горизонтальной плоскости (плоскости сланцеватости), образуя с осью X угол около 40° (см. рис. 7, В), близкий к наиболее распространенной ориентировке кристаллов пирротина.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что в исследованных образцах соблюдается коллинеарность вектора J_n и линии легкого намагничивания, определяемой преимущественным направлением длинных осей пирротина, – единственным направлением намагничивания в этом минерале. По всей видимости, рост уплощенных и вытянутых кристаллов пирротина происходил параллельно поверхностям трещин. В образовавшихся вкрапленниках, прожилках и микропрожилках под воздействием фактора размагничивания появилась значительная анизотропия магнитных свойств (АМС). Влияние фактора размагничивания, вероятно, настолько велико, что оно наблюдалось непосредственно в ходе эксперимента по исследованию АМС – в определенных положениях образца относительно чувствительной системы астатического магнитометра наблюдались отрицательные значения магнитной восприимчивости (рис. 7, Г). Связь намагниченности с пространственным положением систем сульфидных прожилков и микропрожилков привела к ярко выраженной текстурной магнитной анизотропии.

Доминирующие на месторождении рассеянные вкрапленники зерен и прожилки сульфидов, приуроченные к пологим поверхностям рассланцевания и трещинам отрыва, определили преимущественно субгоризонтальное намагничение минерализованной зоны и ее отображение в дипольной магнитной аномалии. Линейные локальные возмущения на фоне диполя в поле ΔZ создаются крутопадающими рудоносными системами трещин скола. Наиболее интенсивную и протяженную линейную положительную аномалию с ломаной осью на восточном фланге месторождения создают породы из зоны влияния взбросо-сдвигового нарушения, выполняющего функцию рудоподводящего канала. Наклонения намагниченностей рудной минерализации в трещинах скола $37-45^\circ$, а у пород взбросо-сдвиговой структуры - $58-62^\circ$. Близкое совпадение наклонов намагничения этих аномальных объектов с углами их погружения ($35-45^\circ$ для трещин скола и 60° для рудоподводящего канала), с учетом выявленной текстурной анизотропии,

возможно только при их намагничении по падению. Очевидно, что при субширотной ориентировке намагничения амплитуда аномалии от взбросо-сдвиговой структуры в поле ΔT почти в два раза меньше, чем – в ΔZ , а скопления более пологих сульфидных прожилков в трещинах скола практически не просматриваются в аномалиях ΔT (см. рис. 1).

Корректность трактовки магнитных элементов в структуре месторождения и определения их намагниченностей оценивалась методом подбора моделированных полей в процессе сравнения с наблюдаемыми аномалиями. При этом в качестве входных данных по магнитным параметрам для теоретических расчетов привлекались только результаты экспериментальных исследований. Моделировалось поле ΔZ наклонного пласта, выходящего на дневную поверхность под углом 28° (13° равен средний угол погружения рудной структуры и 15° – наклон дневной поверхности), составленного из элементарных диполей кубической формы со стороной 100 метров (рис. 8, А).

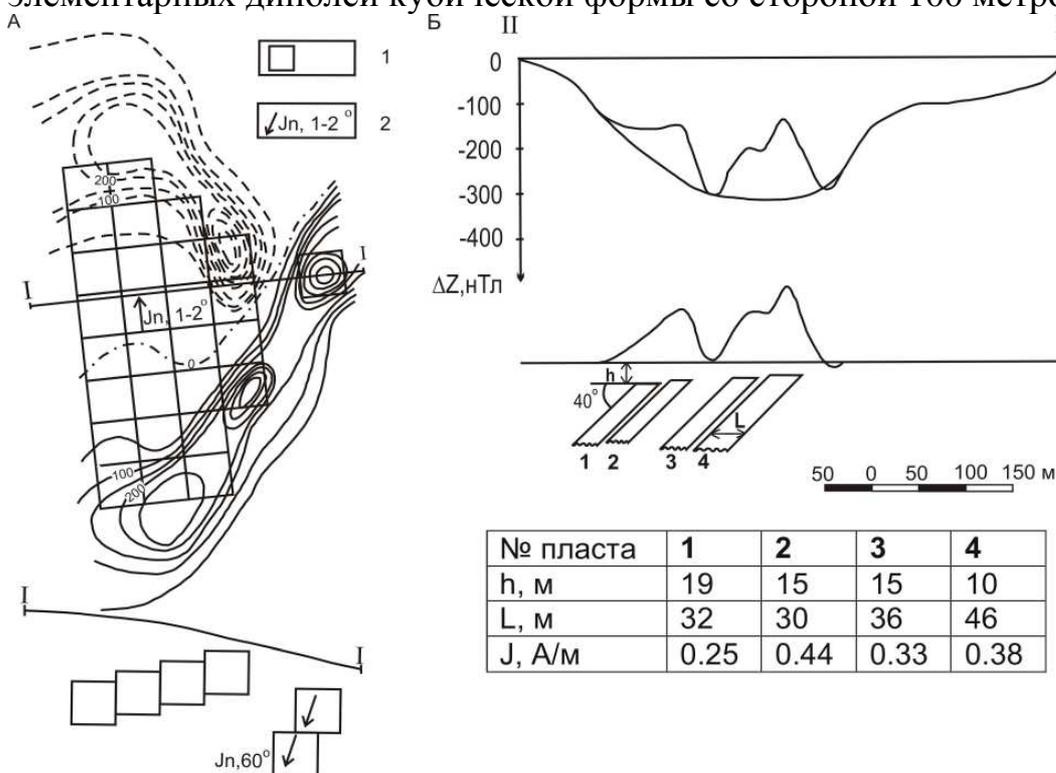


Рис. 8.

Результаты моделирования площадной (А) и локальных линейных (Б) аномалий: 1 – элемент аппроксимации и минерализованной зоны; 2 – направление и наклонение намагниченности (остальные пояснения в тексте).

Амплитуда и форма расчетной аномалии оказались наиболее приемлемыми при следующих параметрах модели: намагниченность диполей с наклоном $1 - 2^\circ$ и азимутом 340° , величина намагниченности увеличивается с глубиной погружения пласта от 3 до 5.5 А/м. В правой части модели фрагмент взбросо-сдвиговой структуры аппроксимирован двумя кубами, намагниченными под углом 60° . Интерпретация локальных линейных магнитных аномалий ΔZ проводилась по профилю, пересекающему северный фланг рудного тела (см. рис. 1, А). Для их расчета из наблюдаемого поля графически визуальным сглаживанием убрана дипольная фоновая составляющая. В качестве аномалиеобразующих выбраны полубесконечные наклонные пласты, падающие на юго-запад под углами 40° (рис. 8, Б) и намагниченные по падению. Средняя квадратическая погрешность подбора составила 8 нТл.

Таким образом, проверка результатов интерпретации путем решения прямой задачи показала, что структура магнитного поля месторождения может быть связана с охарактеризованными аномальными объектами.

5.2. Поляризационные свойства пород

В пределах минерализованной зоны месторождения встречается метасоматическое углеродистое вещество, обладающее электродными потенциалами до 400 мВ, оно нередко слагает секущие слоистость прожилки мощностью до 5 см. Распределение поляризующихся углеродистых метасоматитов в минерализованной зоне неравномерно. Они обнаружены лишь в керне БЛ 30 (см. рис. 2). Их выходу на поверхность отвечает интенсивная отрицательная аномалия ЕП. Остальное углеродистое вещество, встреченное в породах из 7, 8а и 19 буровых линий, не создаёт электродных потенциалов.

Среди сульфидов максимальные ЭП были зафиксированы на пирите, они изменялись в пределах от 245 до 100 мВ. Для пирротина и арсенопирита значения ЭП изменялись от 100 до 20 мВ.

Вещественный состав пород, их электродные потенциалы и характер проявления в естественных электрических полях, заставляют полагать, что интенсивные отрицательные аномалии ЕП связаны с зонами локализации поляризующихся углеродистых метасоматитов.

Выход минерализованной зоны на дневную поверхность расположен в зоне слабых положительных аномалий ЕП, хотя следовало бы ожидать аномалий противоположного знака. Объяснением такой ситуации может служить косая поляризация, возникшая за счёт контакта графитистых и сульфидных образований (в силу различий в их электродных потенциалах). Первые будут выполнять функцию катода, а вторые – анода. На поверхности, в результате распределения электрических зарядов в гальванической паре, будет фиксироваться асимметричная дипольная аномалия ЕП.

На структуру аномалий ЕП не исключено влияние фильтрационных потенциалов. Скорее всего, на месторождении проявлена суперпозиция естественных электрических полей различного происхождения, которые в совокупности создают наблюдаемую картину.

5.3. Распределение радиоактивных элементов в породах

В первом приближении калиевые и ториевые ореолы пространственно совпадают, но при более детальном рассмотрении прослеживаются различия в их распределении. На это указывают и низкие коэффициенты корреляции между элементами ($r_{Th, K}$), рассчитанные по данным НАА (таблица).

Распределение радиоактивных элементов в породах месторождения по данным НАА.

Литология	Содержания элементов*			Коэффициенты корреляции			Кол-во проб
	U, мкг/г	Th, мкг/г	K, %	U, Th	U, K	Th, K	
Песчаник	4,04	13,22	2,71	0,53	0,30	0,01	50
-	1,53	3,88	1,32	-	-	-	-
Алеврит	3,29	12,59	2,70	0,34	0,25	0,19	29
-	1,29	2,45	1,53	-	-	-	-

продолжение таблицы

Аргиллит	5,87	16,75	4,91	0,79	0,22	0,24	31
-	3,09	6,84	2,11	-	-	-	-
Березит	3,70	9,72	2,10	0,69	0,13	-0,40	16
-	2,44	4,87	1,21	-	-	-	-
Породы с поляризуемым УВ	8,32	26,48	4,23	0,8	0,58	0,90	17
-	5,07	13,04	2,13	-	-	-	-
Все образцы	4,80	15,41	3,18	0,75	0,44	0,42	181
-	2,97	8,01	1,86	-	-	-	-

* в столбцах верхнее число – среднее арифметическое в выборке, нижнее – стандартное отклонение.

В березитах отмечается существенное понижение содержаний тория при не столь значительном уменьшении концентраций калия, что выражается $r_{Th, K} = -0,4$ (см. табл.). Березиты имеют самое низкое на месторождении содержание калия, тория и урана и максимальное количество карбонатов (десятки об. %).

Согласно исследованиям Г.Б. Наумова, перенос урана в форме комплексных карбонатных соединений в гидротермальных растворах представляется

наиболее вероятным. Между торием и ураном во всех породах месторождения, в том числе в березитах, отмечается высокая положительная корреляция (см. таблицу), что указывает на схожий характер поведения радионуклидов. Таким образом, вероятно, происходил вынос урана и тория в процессе рудообразования из зон интенсивного метасоматизма. Калий в меньшей степени подвергся перераспределению. В результате заметно возросло калий-ториевое отношение в зонах интенсивной метасоматической проработки, сопутствующей образованию продуктивной минерализации, что выразилось пространственной близостью рудного тела и зоны максимальных значений K/Th (рис. 9). В зоне локализации рудного тела возникла интенсивная аномалия калия, окруженная ореолами урана (см. рис. 3, 5).

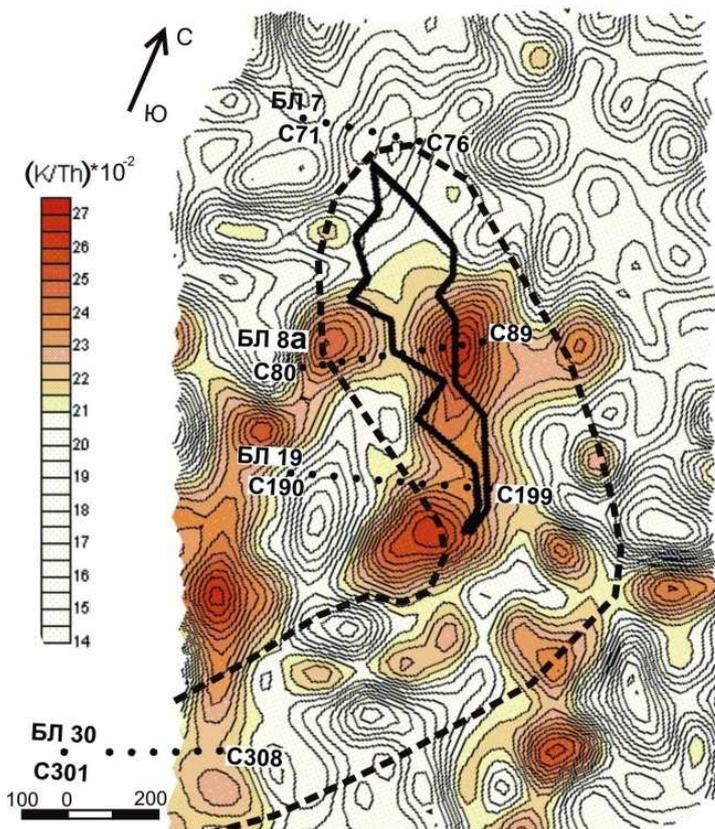


Рис. 9. План изолиний калий-ториевого отношения. Условные обозначения см. на рис. 1. близость рудного тела и зоны максимальных значений K/Th (рис. 9). В зоне локализации рудного тела возникла интенсивная аномалия калия, окруженная ореолами урана (см. рис. 3, 5).

Высокий коэффициент корреляции между торием и калием (0,90) в пределах минерализованной зоны обнаружен по данным НАА лишь в образцах

из БЛ 30, содержащих поляризующееся углеродистое вещество. При этом концентрации всех радиоактивных элементов в этих породах заметно повышены и являются максимальными на месторождении. Аргиллиты из других буровых линий также содержат углеродистое вещество, но такой высокой корреляции, равно как и столь высоких содержаний радиоактивных элементов в них не обнаружено. Тем не менее, очевидно обогащение углеродсодержащих аргиллитов радиоактивными элементами по сравнению с другими породами (см. табл.).

Примечательно, что корреляция между ураном и торием по данным НАА существенно выше, чем по результатам площадной съёмки. По всей видимости, такое несоответствие обусловлено различием миграционной способности радионуклидов в зоне гипергенеза.

Глава 6. Петрофизическая зональность и геофизические признаки локализации месторождения

Подтвержденные численным моделированием представления об аномальном отображении в магнитном поле тектонических структур месторождения позволяют построить магнитогеологическую модель (рис. 10).

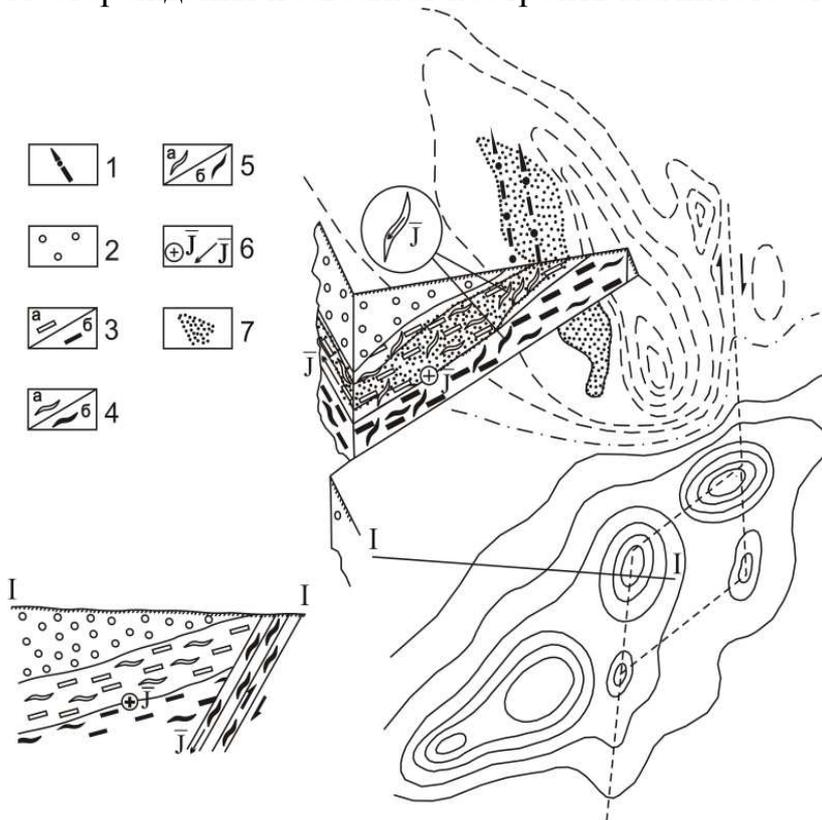


Рис. 10. Магнитогеологическая модель месторождения Чертово Корыто: 1 – оси линейных локальных аномалий ΔZ ; 2-5 – морфологические типы эпигенетической сульфидной минерализации и магнитная восприимчивость (10^{-5} ед. СИ) пород михайловской свиты: 2 – неизменные и слабоминерализованные, <50 ; 3 – рассеянные вкрапленники по плоскостям сланцеватости; 4-5 – прожилки и микропрожилки: субгоризонтальные (4), с углами падения до 40° (5), для всех случаев 3-5 – интервалы изменения χ : а) 50-300, б) >300 ; 6 – намагниченность пород минерализованной зоны и ее направление; 7 – рудное тело; остальные обозначения на рис. 1.

Золотосодержащую минерализацию локализуют многочисленные полихронные деформации, развитые по сланцеватости напластования, трещины отрыва и менее распространенные - скола. Вхождение пирротина в рудную ассоциацию в качестве одного из главных минералов придает вмещающей структуре аномальный характер по магнитным свойствам. Распределение золота и пирротина зонально: продуктивные участки полностью локализуются внутри ореола пирротинизации, но отчетливо обособляются от его наиболее магнитных

структурных элементов.

Действие фактора размагничивания привело к магнитной анизотропии пород и выразилось в тесной связи направления намагниченности пород с ориентировкой систем сульфидных прожилков и микропрожилков. Разнонаправленная намагниченность явилась ключевой причиной, определяющей структуру магнитного поля месторождения, заметное влияние на которую оказало и зональное распределение пирротина.

Аномальное проявление рудовмещающей структуры представлено суперпозицией площадной дипольной и локальных линейных аномалий, связанных с пологими и крутопадающими системами сульфидных выделений, соответственно. В зоне развития линейных аномалий на севере месторождения наблюдается увеличение мощности рудного тела.

Вмещающая структура своим восточным флангом примыкает к рудоподводящему каналу, прослеживаемому наиболее уверенно в поле ΔZ по протяженной субмеридиональной аномалии. На участке сочленения структур аномалия коленчато изгибается, заметно увеличиваются ее поперечные размеры. По такой форме аномалии можно предположить, что совместно с взбросовой деформацией проявился правосторонний сдвиг, который привел к раскрытию структуры на участке искривления сместителя и сделал ее флюидопроводником.

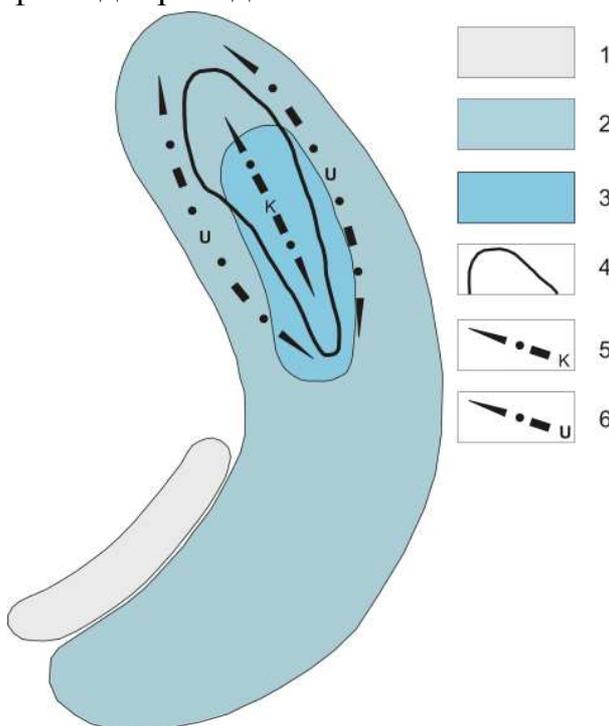


Рис. 11. Петрофизическая зональность месторождения. 1 – 3 – петрофизические комплексы: углеродистые метасоматиты с поляризующимся УВ (1), углеродистые метасоматиты с пирротинном (2), зона интенсивной березитизации (3); 4 – рудное тело; 5-6 – оси радиогеохимических аномалий: калия (5), урана (6).

На месторождении выделено три петрофизических комплекса (ПФК), обуславливающих петрофизическую зональность месторождения (рис. 11). К первому относятся углеродистые метасоматиты с поляризующимся УВ. Они обладают самыми высокими концентрациями радионуклидов (см. табл.) и имеют очень низкую χ . Их плотность изменяется в пределах ($2,55-2,75 \text{ г/см}^3$).

Углеродистые метасоматиты второго ПФК распространены во всей минерализованной зоне. Они содержат неполяризующееся углеродистое вещество и имеют высокую χ . Их плотность составляет в среднем $2,8 \text{ г/см}^3$, содержание К, U и Th в них сравнительно высокое (см. аргиллиты в таблице).

Березиты имеют самое низкое содержание К, U, Th, самую высокую плотность ($2,85-2,9 \text{ г/см}^3$), в них полностью отсутствует УВ. Содержание

пирротина в березитах варьирует, поэтому χ в них заметно различается. Перечисленные свойства позволяют отнести березиты к третьему ПФК.

На месторождении выявлен петрофизический контроль продуктивной минерализации. Рудное тело локализуется в зоне максимальных значений калий-ториевого отношения. По результатам нейтронно-активационного анализа породы первого ПФК, расположенные в непромышленной части месторождения, имеют $(K/Th) \cdot 10^{-2} = 14$. В породах второго ПФК $(K/Th) \cdot 10^{-2} = 23$. Максимальное значение $(K/Th) \cdot 10^{-2} = 29$ свойственно березитам из наиболее продуктивных интервалов месторождения. Неслучайно в березитах отмечается отрицательная корреляция между калием и торием ($r_{Th,K} = -0,4$).

Заключение

В физико-геологической модели месторождения Чертово Корыто, элементы которой представлены на рисунках 10 и 11, визуализировано проявление петрофизических комплексов в аномалиях физических полей, что позволяет охарактеризовать возможности геофизических методов.

Картирование в магнитном поле структурных элементов месторождения, возникших в результате его длительного, многоэтапного тектонического развития, ставит магниторазведку в разряд высокоэффективных поисковых методов. При этом в поле ΔZ лучше отображаются крутопадающие, а в поле ΔT – пологозалегающие нарушения, поэтому для поисков и разведки аналогичных рудных объектов наиболее информативными представляются компонентные измерения магнитного поля.

Месторождение сопровождают интенсивные отрицательные аномалии ЕП, связанные с углеродистыми метасоматитами. Их контакт с зоной развития сульфидной минерализации, по всей видимости, обусловил появление слабых положительных аномалий ЕП на фоне интенсивных отрицательных. Такая структура ЕП – аномалий является отличительной чертой месторождения, что позволяет с помощью электроразведки методом ЕП выделять золоторудные объекты, аналогичные месторождению Чертово Корыто.

Метасоматические преобразования пород месторождения сопровождались привнесением и перераспределением радиоактивных элементов, поэтому минерализованная зона отчетливо проявляется аномальными содержаниями калия, урана и тория. Зона локализации промышленных руд выражается максимальными значениями калий-ториевого отношения и аномалией калия, которая окружена ореолами урана (см. рис. 3, 5, 11).

Таким образом, магниторазведка, электроразведка методом естественного поля и гамма-спектрометрия представляют эффективный геофизический комплекс, который целесообразно использовать в геологоразведочных работах при изучении золоторудных районов, аналогичных по физико-геологическим условиям Кевактинскому рудному узлу.

Список работ автора по теме диссертации

В ведущих рецензируемых изданиях:

1. **Соколов С.В.** Комплекс геофизических признаков локализации оруденения золотосульфидного типа (Ленский золоторудный район) // Записки горного института. - 2009. - Т. 181 - С. 28-30.

2. Колмаков Ю.В., **Соколов С.В.**, Гусев Е.В. Геодинамические условия образования месторождений золота в Патомском нагорье, Восточная Сибирь: факторы их проявления в аномалиях магнитного поля // Отечественная геология. - 2010. - № 4 - С. 8-14.

В других изданиях:

3. Колмаков Ю.В. **Соколов С.В.** О влиянии геодинамических условий образования месторождений золота на их проявление в магнитном поле // Пятые научные чтения Ю.П. Булашевича. Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей» Институт геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 2009. - С. 247-251.

4. **Соколов С.В.** Особенности структуры магнитных образований на золоторудном месторождении Чёртова корыто. Сборник трудов XI Международного симпозиума студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2007. - С. 259-261.

5. **Соколов С.В.** Природа геофизических аномалий золоторудного месторождения Чёртова Корыто. Сборник трудов XII Международного симпозиума студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2008. С. 324-325.

6. **Соколов С.В.** Неоднородность петромагнитных свойств золоторудного месторождения Чёртова Корыто (Патомское нагорье). Сборник трудов XIII Международного симпозиума студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2009. - С. 320-322.

7. **Соколов С.В.** Петромагнитная анизотропия как фактор неоднородности структур магнитного поля золоторудного месторождения Чёртова Корыто (Патомское нагорье, Восточная Сибирь). Сборник трудов XI Уральской молодёжной научной школы по геофизике при Институте геофизики УрО РАН. - Екатеринбург, 2010. - С. 219-222.

8. **Соколов С.В.**, Колмаков Ю.В., Гусев Е.В. Магнитные свойства золотого оруденения в пологозалегающих структурах на примере месторождения Чёртова Корыто (Патомское нагорье, Восточная Сибирь). Электронный сборник тезисов V Сибирской международной конференции молодых учёных по наукам о Земле при ИГМ/ИНГГ СО РАН. Новосибирск: CD-ROM; <http://sibconf.igm.nsc.ru/>, 2010.

9. Колмаков Ю.В., **Соколов С.В.**, Гусев Е.В. Магнито-геологическая модель месторождения Чертова Корыто (Патомское нагорье, Россия). Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья». - Улан-Удэ, 2010. - С. 96 - 98.

10. Колмаков Ю.В., **Соколов С.В.**, Гусев Е.В. Природа магнитных аномалий золотого оруденения в пологозалегающих структурах на примере месторождения Чертова Корыто. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Геофизические методы при изучении недр». - Томск. 2011. - С. 106-108.

11. Соколов С.В. Геофизические признаки локализации месторождений золота в Патомском нагорье (Восточная Сибирь): Сборник трудов XV Международного симпозиума студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2011. - С. 349-350.

12. Колмаков Ю.В., **Соколов С.В.**, Гусев Е.В. Магнито-геологическая модель золотого оруденения в пологозалегающих структурах на примере месторождения Чертова Корыто (Байкало-Патомское нагорье) // Шестые научные чтения Ю.П. Булашевича. Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей» Институт геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 2011. - С. 187-190.

13. **Соколов С.В.** Причины анизотропии магнитных свойств пород золоторудного месторождения Чертова Корыто // Современные технологии и результаты геологических исследований в изучении и освоении недр Земли: научные труды лауреатов Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области наук о Земле в рамках Всероссийского фестиваля науки. - Томск, 2011. - С. 115-119.