

**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**  
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

**СЕНЧИНА Наталия Петровна**

**ПОИСКИ КОРЕННОЙ ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ  
ПУТЕМ ИЗУЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И  
ОРЕОЛОВ РАССЕЙЯНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**Научный руководитель – доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Путиков Олег Федорович**

**Санкт-Петербург – 2017**

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 МНОГООБРАЗИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПЛАТИНОИДОВ .....	14
1.1 Электрохимические процессы в горных породах платиноносных массивов .....	14
1.2 Краткое описание геологического строения рассматриваемых платиноносных массивов.....	22
1.2.1 Качканарский массив (Средний Урал) .....	22
1.2.2 Светлоборский массив (Средний Урал) .....	25
1.2.3 Аганозерский массив (Карелия) .....	28
1.3 Сводная электрохимическая и конкретизированные физико-геологические модели объектов исследования.....	32
Глава 2 ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ .....	41
2.1 Физико-химические условия формирования естественного электрического поля.....	41
2.2 Физико-математическое моделирование формирования естественного электрического поля окислительно-восстановительного происхождения.....	44
2.3 Интерпретация данных измерений естественных электрических полей.....	52
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	58
3.1 Экспериментальное моделирование перехода элементов платиновой группы в подвижную форму.....	58
3.2 Основные особенности поведения различных металлов и соединений под действием электрического тока.....	63
Глава 4 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ В СТРУЙНЫХ ОРЕОЛАХ РАССЕЯНИЯ .....	72

4.1	Гипотезы формирования струйных ореолов рассеяния подвижных форм химических элементов.....	72
4.2	Физико-математическое обоснование процессов перемещения подвижных форм химических элементов в горных породах .....	79
4.3	Известные способы регистрации ореолов рассеяния подвижных и вторично закрепленных форм нахождения химических элементов.....	85
Глава 5 СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ СТРУЙНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЙНИЯ – АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗУЕМОЙ ФРАКЦИИ .....		
	5.1 Принцип работы поляризационного сепаратора .....	92
	5.2 Характеристика воздействия на образцы горных пород пондеромоторных сил электрического поля .....	96
	5.3 Результаты экспериментальных исследований .....	98
Глава 6 КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СТРУЙНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЙНИЯ ПРИ ПОИСКАХ УЧАСТКОВ ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ.....		
	6. 1 Результаты исследований на Качканарском массиве.....	107
	6. 2 Результаты исследований на Светлоборском массиве.....	108
	6. 3 Результаты исследований на Аганозерском массиве.....	112
	6. 4 Обобщение результатов исследований.....	116
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
	Приложение А.....	145
	Приложение Б.....	146
	Приложение В.....	148
	Приложение Г.....	152

## Введение

### Актуальность темы

Наращивание запасов элементов платиновой группы (ЭПГ) является важной задачей, так как эти элементы относятся к категории «стратегических» – необходимых для обороноспособности и промышленности страны. В связи с постепенным исчерпанием основных россыпных месторождений ЭПГ, несколько десятилетий назад стало актуальным изучение массивов, перспективных на коренное платиноидное оруденение, несмотря на возможные трудности поисков, разведки и дальнейшей эксплуатации. В современных условиях, когда изучено большинство легкооткрываемых (залегающих у поверхности) месторождений, эта задача усложняется, так как традиционно использовавшиеся ранее геохимические методы позволяют изучать объекты, которые располагаются у поверхности в пределах первых метров по глубине, тогда как фактически не несут информации о глубокозалегающих рудах или погребенных залежах. Геофизические методы поисков и разведки также не всегда эффективны при решении данной задачи в связи с тем, что малые концентрации ЭПГ во вмещающих породах не меняют их физических свойств настолько, чтобы это отражалось в наблюдаемых на поверхности физических полях. Исключение составляют рудно – формационные группы: сульфидная платиноидно – медноникелевая, платиносодержащая титаномагнетитовая, платиносодержащая хромитовая, для которых характерна тесная пространственная взаимосвязь распределения ЭПГ и минералов, которые дают контрастные аномалии по результатам электро-, магнито-, гравиразведочных работ. Однако, и в этом случае не всегда наблюдается прямая зависимость концентраций ЭПГ от наличия и характеристик сульфидных, хромитовых, титаномагнетитовых рудных тел, в результате чего могут быть пропущены перспективные на собственно ЭПГ участки. Геоэлектрохимические методы сочетают преимущества геофизических и геохимических способов изучения геологической среды.

Рассмотрение особенностей проявления перекрытой платиноидной минерализации в ореолах рассеяния, изучаемых геоэлектрохимическими методами, является основной задачей настоящей работы. Эффективность геоэлектрохимии при поисках других полезных ископаемых подтверждена большим количеством практических примеров проведения поисковых работ на медно-никелевых, полиметаллических, нефтегазовых, золоторудных месторождениях [Антропова и др., 1980, Рысс, 1983, Гольдберг, 1989, Antropova et al., 1992, Комаров, 1994, Путиков и др., 2000, Путиков, 2009, Алексеев и др., 2002, Виноградова и др., 2002, Алексеев и др., 2008, Холмянский и др., 2014, Штокаленко и др., 2004, 2009], где строго сформулированы и обоснованы принципы преобразования форм нахождения и переноса химических элементов в горных породах. Применение геоэлектрохимических методов рекомендовано при работах на закрытых и полузакрытых территориях [Соколов и др., 2005]. Количество примеров исследовательских и поисково-разведочных работ на платиновые металлы, включающих геоэлектрохимические исследования, на данный момент наращивается [Алексеев, 2002ф, Вешев, 2003ф, Cin-Ty et al., 2003, Блинов и др., 2003, Марченко, 2004, Макарова, 2004, Keiko et al., 2004, Dyer et al., 2007, Kropacheva et al., 2007, Колонских и др., 2009, Pumer et al., 1987, Suhong et al., 2009, Колонских, 2009, Gertsch et al., 2011, Радомский и др., 2013, Junge et al., 2015] и появляется все больше информации, позволяющей сделать заключение об эпигенетических процессах перемещения подвижных форм платиноидов. Следует указать, что подобным вопросам, рассмотренным для сульфидной платиноидной минерализации, были посвящены диссертационные работы Н.С. Колонских, Ю.В. Макаровой [Колонских, 2009, Макарова, 2008]. За рубежом исследователи Германии, Канады, Великобритании, Австралии, Китая рассматривали процессы эпигенетического переноса ЭПГ на комплексах Лак дез Илль, Лэгрис-лэйк (Северная Америка), Бушвельд (Африка) и других. В России внимание процессам переноса благородных металлов уделили Радомский С.М.,

Радомская В.И., Марченко А.Г., Соколов С.В., Кубракова И.В., Фортыхин А.В., Блинов К.В., Ермохин К.М., Сергеев С.П., Лобов С.Г., Кошечева И.Я., Тютюнник О.А., Мироненко М.В. и другие исследователи. Несмотря на то, что уже достаточно много лет назад было установлено наличие способности к перемещению подвижных форм ЭПГ в горных породах (вопреки существовавшему ранее мнению о полной инертности этих благородных металлов), взгляды на эти процессы не являются однозначными, в том числе по причине разнообразия рудно – формационных типов платиноносных объектов и условий на них, а также из - за достаточно слабой изученности, которую следует, на взгляд автора, назвать скорее единичной, нежели полноценной. Таким образом, проведение предложенных исследований актуально для разработки и обоснования рационального комплекса геофизических и геохимических работ при поисках глубокозалегающих и перекрытых зон платиноидной минерализации. Это, в свою очередь, необходимо для расширения перспектив освоения коренных месторождений платиноидов и обеспечения долговременно стабильной сырьевой базы указанных металлов.

**Целью работы является** разработка способа поисков перекрытых зон платиноидной минерализации путём комплексирования методов изучения естественного электрического поля и регистрации струйных ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов.

**Задачи исследований:**

- установить природу формирования аномалий естественного электрического поля в пределах рассматриваемых платиноносных массивов путём физико-химического и физико-математического моделирования; оценить влияние указанных аномалий на преобразование форм нахождения платиноидов;

- путём лабораторного моделирования и в результате наблюдений в естественных условиях выделить направления перераспределения подвижных форм нахождения ЭПГ под действием физических процессов;

- исследовать возможные способы изучения подвижных и вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов, в том числе новую методику разрабатываемого автором способа анализа поляризуемой фракции (АПФ) и предложить обоснованный способ поисков перекрытых зон платинометалльной минерализации по геофизическим и геохимическим данным.

### **Фактический материал и методы исследования**

В основу работы положен фактический материал в виде проб рыхлых отложений, собранных автором самостоятельно в 2013 - 2016 годах на Светлоборском массиве (Средний Урал), Качканарском массиве (Средний Урал), Аганозерском массиве Бураковского комплекса (Южная Карелия) и исследованных на содержание вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов. Физико-химическая обработка проб (магнетизирующий обжиг, экстракция вторично-закрепленных форм в раствор кислоты, выделение поляризуемой фракции) и химико-аналитические исследования (методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для изучения концентраций ЭПГ) проведены в лабораториях Горного университета, АО «Геологоразведка», ООО «Институт Гипроникель», ООО «Геоэкохим», ООО «Полевая геофизика», в том числе, при участии автора. В полевых условиях автором организованы геофизические исследования (методом естественного электрического поля, магниторазведки), измерение физико-химических параметров почв. Реализовано физико-математическое моделирование, проведено сопоставление теоретических результатов и данных полевых исследований. Выполнен ряд экспериментов на самостоятельно сконструированных установках. Используются материалы ФГУНПП «Геологоразведка» (к настоящему моменту преобразовано в АО), группы компаний «Теллур Северо-Запад», ЗАО "Урал-металлы платиновой группы", ООО «Северо-Западная Геофизическая Компания».

**Научная новизна:**

3.1 Разработана физико-математическая модель формирования естественного электрического поля окислительно-восстановительного происхождения на локальных объектах (магнетитсодержащие дайки, горизонты, ожелезненные тектонические нарушения) в пределах изученных платиноносных массивов, выполнены критический анализ модели и сопоставление с данными наблюдений, полученных в естественных условиях.

3.2 Изучены основные закономерности формирования подвижных форм нахождения платины и палладия под действием электрического тока путём лабораторного моделирования.

3.3 Предложен методический подход, включающий комплекс исследований, включающий изучение естественного электрического поля и регистрацию струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами, позволяющий обнаруживать участки коренной платинометалльной минерализации, включая перекрытые.

**Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. В пределах ультраосновных массивов формируются аномалии потенциала естественного электрического поля в связи с неравномерным по глубине окислением магнетитсодержащих тел под действием растворенного газообразного кислорода. Интенсивность этих аномалий можно оценить путем решения нелинейного интегрального уравнения для концентрации кислорода.

2. Под воздействием естественного электрического поля платиноиды из минеральной формы нахождения преобразуются в подвижные (растворенные) формы. Платиноиды в составе комплексных ионов в виде струйных ореолов рассеяния перемещаются к поверхности земли посредством естественной ионной флотации со скоростью, определяемой решением системы нелинейных дифференциальных уравнений.

3. Комплекс исследований, включающий изучение естественных электрических полей и регистрацию струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами, позволяет обнаруживать зоны платиноидной минерализации, включая перекрытые. В качестве нового способа изучения вторично-закрепленных форм нахождения элементов предложено использовать метод анализа поляризуемой фракции.

**Практическая значимость.** Обоснована методика поисков глубинных зон платиноидной минерализации на основе комплексирования методов изучения естественного электрического поля, физико-химических свойств горных пород и регистрации струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами изучения вторично-закрепленных форм нахождения металлов.

**Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.** Полученные результаты могут быть использованы производственными и научно-исследовательскими организациями при проектировании работ на поиски коренных месторождений платиноидов, а также в учебных курсах ВУЗов для студентов направлений 21.05.03 «Технология геологической разведки» и 21.05.02 «Прикладная геология».

**Личный вклад автора:**

- Выполнено построение физико-химической модели и принято участие в разработке физико-математической модели изучаемых явлений, которые позволили обосновать новый методический подход к поискам участков платиноидной минерализации;

- выполнена оценка скорости окисления магнетита в природных условиях путём сопоставления теоретических и экспериментальных данных об изменении по глубине содержания в породах магнетита и продуктов окисления указанного минерала и обоснована скорость распространения струйных ореолов рассеяния путем решения нелинейного интегро-дифференциального уравнения для распределения концентрации подвижных форм элементов в струйном ореоле рассеяния (для одномерного случая);

- реализован эксперимент, подтверждающий возможность перехода под действием электрического тока платиноидов из минеральной формы в подвижную форму нахождения в растворе;

- проведены опытно – методические исследования с помощью геофизических и геохимических методов, включающие отбор проб горных пород в пределах Аганозерского, Светлоборского и Качканарского массивов и подготовку их для анализа (более 260 проб), в результате чего обоснован рациональный комплекс поисковых работ;

- впервые предложена методика поиска с использованием поляризационной сепарации проб АПФ (подана заявка на регистрацию нового способа поиска и устройства для его осуществления).

**Достоверность защищаемых положений, выводов** подтверждается завершенными теоретическими разработками, подтвержденными данными лабораторных экспериментов и наблюдений в естественных условиях; представительностью и надежностью исходных материалов, сопровождаемых контрольными исследованиями; результатами аналитических исследований, полученными с использованием современных методов изучения вещества; непротиворечивостью выводов автора и предшественников.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности по следующим пунктам областей исследований:

- п. 10. «Изучение физических свойств геологического вещества на образцах, если оно ориентировано на изучение новых физических явлений, ... при условии, что изучение включает геофизические проявления таких процессов»;

- п. 11. «Математические и численные исследования в теории прямых и обратных задач ... геоэлектрики .... Интегрированный анализ многомерной, многопараметровой и разнородной информации, включающей геофизические данные»;

- п. 16. Использование геолого-геофизических данных для построения геологических, гидродинамических и геодинамических моделей месторождений»,

- п. 19. «Измерительная техника, средства, технологии, системы наблюдений и сбора геофизических данных...»,

- п. 22. «Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждены на заседаниях кафедры Геофизических и геохимических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых в 2012-2017 г.г. Отдельные результаты исследований доложены и получили нейтральную либо положительную оценку на следующих научных конференциях: XII, XIII конференции Студенческого научного общества геологического факультета СПбГУ (2013, 2014), Политехнический фестиваль для студентов и молодых ученых (2013), Третья молодежная Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН (2013), IX международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика 2013», международные семинары «Применение современных электроразведочных технологий при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых» в 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 годах, конференция 7th Saint Petersburg International Conference & Exhibition – Understanding the Harmony of the Earth's Resources through Integration of Geosciences (2016), V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ [Путиков и др., 2013, 2015; Сенчина, 2012, 2013, 2014, 2015; Сенчина и др, 2013, 2015, 2016; Alekseev et al., 2016]. 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России (ссылки подчеркнуты).

Подана заявка на регистрацию способа сепарации частиц измельченной пробы горной породы с помощью электрического поля, образованного высоким напряжением, и поляризационного сепаратор для его осуществления №2015147830 / Сенчина Н.П., Миллер А.А., Пщелко Н.С., Водкайло Е.Г. (заявка находится в стадии «экспертизы по существу» с мая 2016 г). Кроме того, одна статья принята к публикации: Путиков О.Ф., Сенчина Н.П., Таловина И.В., Дурягина А.М., Телегин Ю.М., Никифорова В.С. Выявление аномальных концентраций платиноидов с применением данных геоэлектрохимии в пределах Светлоборского массива (Средний Урал), Геология и геофизика. №7, 2017.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, изложенных на 154 страницах. Содержит 54 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 171 наименования и 4 приложения.

**Благодарности.** Диссертационная работа выполнена под руководством доктора геолого-минералогических наук, профессора О.Ф. Путикова, которому автор выражает глубокую признательность за поддержку в научной работе и в жизни со студенческой скамьи. Особую благодарность автор выражает бывшим сотрудникам ФГУ НПП «Геологоразведка» Алексееву С.Г и Штокаленко М.Б. за помощь в сборе диссертационных материалов и постоянную заинтересованность в представляемой автором работе. Благодарность хочется выразить также Миллеру А.А., Таловиной И.В., Лазаренкову В.Г., Телегину Ю.М., Кузовенкову А.Д., Блинову К.В., Пилюгину А.Г., Дурягиной А.М., Ермолину Е.Ю. за содействие в проведении исследований, а также всему коллективу кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых и научно-техническому совету по работе с аспирантами Горного университета за своевременную корректировку направления исследований.

**Принятые сокращения и определения:**

Eh – см. ОВП,

pH – показатель кислотности среды,

АПФ – анализа поляризуемой фракции, метод,  
 ГК – главная компонента,  
 ГХГ – главный хромитовый горизонт,  
 ДЭС – двойной электрический слой,  
 ЕГЭ – естественный гальванический элемент,  
 ЕП – естественное электрическое поле, естественного электрического поля (метод),

ЕП ОВП – естественное электрическое поле окислительно-восстановительного происхождения,

МДИ – метод диффузионного извлечения,  
*магнетитсодержащие тела* – геологические тела, сложенные магнетитом не менее, чем на 5 %, обладающие непрерывной электронной проводимостью и представленные массивными телами, жилами или прожилками магнетита либо титаномагнетита, ожелезненными тектоническими нарушениями, обогащенными магнетитом «карманами» коры выветривания,

*миграция* химических элементов (*migratio* – перемещение, лат.) – перемещение химических элементов и их соединений под действием электрического поля,

МПФ – метод металлоорганических почвенных форм,

н.у. – нормальные условия (0 °С, 760 мм рт. ст),

ОВП (Eh) – окислительно-восстановительный потенциал,

ПИ – полезное ископаемое,

п.ф. – подвижная форма нахождения (элемента),

в.з.ф. – вторично-закрепленная форма нахождения (элемента),

т.н. – точка наблюдения,

ТМГМ – термомагнитный геохимический метод,

УГВ – уровень грунтовых вод,

УЭС – удельное электрическое сопротивление,

ЭДС – электродвижущая сила,

ЭПГ – элементы платиновой группы.

# Глава 1 МНОГООБРАЗИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПЛАТИНОИДОВ

## 1.1 Электрохимические процессы в горных породах платиноносных массивов

Электрохимические процессы в той или иной мере присутствуют во всех объектах земных недр, на разных уровнях – от микроскопического до планетарного. Классификация электрохимических процессов в горных породах, без привязки к областям платинометалльной минерализации, была выполнена ранее советскими и российскими учеными [Свешников, 1967, Рысс, 1983, Комаров, 1994]. По мнению автора, классифицируя электрохимические преобразования, связанные с платинометалльной минерализацией, необходимо разделить эти процессы на уровни, связанные с характерными размерами областей формирования и влияния электрических полей. Среди принятых уровней уже логично произвести деление по природе протекающих процессов. Такое деление – достаточно условное и во многих случаях может появляться целая группа взаимосвязанных процессов. Далее указаны процессы, как приводящие к формированию квазипостоянных естественных электрических полей (указаны со знаком плюс «+»), так и протекающие по причине наличия данных полей – указаны со знаком стрелки «→».

- **На микроуровне и уровне отдельных минералов** электрохимические процессы могут проявляться в виде:
  - + формирование ДЭС на границе минеральных электропроводящих зерен и вмещающей их ионопроводящей среды [Рысс, 1983],
  - + формирование ДЭС на границе твердой матрицы горных пород и порового вещества в результате фильтрационных процессов [Рысс, 1983],
  - + формирование ДЭС диффузионного, диффузионно-адсорбционного происхождения на контактах пород разного состава или в случае изменения химического состава поровых вод [Рысс, 1983],

- + окисление минеральных зерен под действием атмосферного кислорода [Гольдберг, 1988],
- + формирование разности потенциалов на границах зерен минералов - пьезоэлектриков под действием механических напряжений [Воробьёв, 1970],
- + формирование ДЭС на границе микропузырьков плохорастворимых газов и порового раствора [Рысс, 1983],
- восстановление самородных элементов под действием электрического тока [Нюссик и др., 1981, Дмитриев, 1981, Рысс, 1983],
- растворение минералов под действием электрического тока [Гольдберг и др., 1982].
- фиксация ионов на ДЭС микропузырьков и естественная ионная флотация [Рысс, 1983, Путиков, 2009, Штокаленко, 2009],

- **На уровне существования рудных тел:**

- + протекание окислительно-восстановительных реакций в экзогенных и эндогенных условиях [Рысс, 1983, Земцов, 1972],
- + формирование разности потенциалов, обусловленной топографией [Квон и др., 2015],
- + формирование разности потенциалов термической природы, в том числе, в регионах с развитием многолетней мерзлоты [Дмитриев, 1974, 1975],
- + колебания уровня капиллярной влаги и трещинных вод [Семенов, 1980],
- формирование зон окисления рудных тел [Свешников, 1967],
- миграция под действием ЕП элементов в ионной форме [Алексеева и др., 1973, Рысс, 1983], и формирование рудных тел на электрохимических барьерах [Копылов, 2010],
- каталитическое воздействие природных токов при химических реакциях в зоне окисления [Нюссик и др., 1981].

- **На региональном уровне:**

- + формирование разности потенциалов в областях активизации современных геотектонических процессов под действием механических напряжений [Воробьёв, 1970],

- + формирование мощного ЕП над активными фумаролами, связанное с мощными потоками восстановительного характера регионального масштаба [Legaz et al., 2009],

- перераспределение минерального вещества в расплаве, осаждение из флюидов под действием электрических полей,

- формирование полярных геохимических систем рудных районов (систем, в которых области мобилизации элементов (отрицательные геохимические аномалии), географически связаны с областями отложения (положительными аномалиями)) [Лось и др., 2003, Гольдберг и др., 2013].

- **На планетарном уровне:**

- + формирование под действием грозových разрядов квазипостоянной разности потенциалов между положительно заряженной ионосферой и поверхностью Земли, величиной около 300 кВ [Френкель, 2015],

- возникновение в атмосфере вблизи поверхности Земли вертикального градиента потенциала электрического поля величиной около 130 В/м [Френкель, 2015]. Для пород земной коры это значение на много порядков меньше, но не является нулевым. Оценка результирующих на вещество недр процессов в литературе не встречена.

Среди указанных процессов прикладным характером обладает, в большей степени, изучение явлений уровня существования рудных тел и залежей ПИ, т.к. это наиболее очевидным образом может позволить облегчить поиск месторождений полезных ископаемых. Кроме того, применение знаний об электрохимических процессах в прикладных задачах сразу для всех уровней требует длительного времени, затрат и изучения в коллективе специалистов. На уровне рудных тел такое исследование

представляется более наглядным, поэтому в диссертационной работе основной материал посвящен именно таким размерам объектов – порядка десятков – первых сотен метров.

Формирование естественных электрических полей различной природы (окислительно-восстановительной, фильтрационной, диффузионно-абсорбционной, термической, теллурической, биологической) качественно и количественно описано во многих публикациях по методам разведочной геофизики в целом и методу ЕП в частности [Свешников, 1987; Семенов, 1980; Комаров, 1994 и др., Gorby, 2006, Revil, 2013]. Формирование наиболее интенсивного и актуального с прикладной стороны решаемых геологических задач ЕП окислительно-восстановительной природы (ОВП), так называемой «геобатарей» [Sato et al., 1980, Bigalke et al., 1997] или естественного / природного гальванического элемента (ЕГЭ / ПГЭ) [Голомолзин, 1994, Федянин, 2013], детальнее описано в главе 2 для случая рассматриваемых в работе платиноносных массивов.

Важный для решения поставленных в работе задач параметр ЕП – постоянство измеряемых полей во времени. Стабильность проявленных процессов во времени зависит от их природы. Так, например, теллурические (как и блуждающие – для антропогенного происхождения) токи, и перепады температуры формируют переменные поля, вариации которых во времени могут быть секундными, суточными, сезонными, вековыми (в соответствии с длиной периода основной частотной компоненты вариаций), а амплитуда достигает десятков милливольт [Баласанян, 1990, Семенов и др., 1957]. В данной работе рассмотрена только стабильная составляющая поля ЕП. Постоянное длительно существующее ЕП может формировать стабильные области растворения и осаждения минеральных форм и направления миграции заряженных частиц, в отличие от переменного, поэтому в работе преимущественно рассмотрены квазипостоянные процессы.

Также не рассмотрены в рамках данной работы поля фильтрационного и диффузионно-абсорбционного происхождения, ввиду их относительно

слабой интенсивности – с амплитудой, в десятки раз меньшей по сравнению с полями окислительно-восстановительного происхождения (ОВП). Амплитуда аномалий ЕП ОВП может достигать сотен милливольт и связана со значением перепада окислительно-восстановительного потенциала  $E_h$  подземных вод вглубь разреза.

Ниже представлена таблица различных типов месторождений платиноидов и платиноносных массивов, содержащая указания на возможные источники ЕП для таких участков. На некоторых из них выполнены полевые работы автором, в иных случаях использованы данные фондовой и опубликованной литературы. Для отдельных типов месторождений информация о геоэлектрохимических процессах в литературе не обнаружена.

Таблица 1.1

Геолого-промышленная классификация месторождений платиноидов и возможные источники ЕП в их пределах (с использованием [Чернышов, 1998] и [Иващенко и др., 2011])

Класс месторождений	Тип месторождений	Примеры месторождений/платиноносных массивов	Особенности указанного типа месторождений, способные приводить к формированию ЕП	Представление геоэлектрохимических процессов для указанного типа в литературе и в представленной работе
Эндогенные, магматические, постмагматические	Сульфидные платиноидно-медно-никелевые	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Норильское</li> <li>– Талнахское</li> <li>– Еланское</li> <li>– Печенгское</li> <li>– Садбери (Канада)</li> <li>– массив Лак-дезиль (Канада)</li> <li>– Камбалда (Австралия)</li> </ul>	Жильные и массивные сульфиды существенной вертикальной протяженности могут формировать высокоинтенсивное ЕП (до 800 мВ) [Sato, et al., 1980, Свешников, 1987; Семенов, 1980; Комаров, 1994, Колмаков, 2008, Leybourne, 2009]	Материалы о в.з.ф. платиноидов [Колонских и др., 2008, Макарова, 2008, Kéiko et al., 2004, Курбакова и др., 2011, 2012]

Класс месторождений	Тип месторождений	Примеры месторождений/ платиноносных массивов	Особенности указанного типа месторождений, способные приводить к формированию ЕП	Представление геоэлектрoхимических процессов для указанного типа в литературе и в представленной работе
	Платиноидно-хромитовые	<ul style="list-style-type: none"> <li>– массив Рай-Из</li> <li>– ГХГ Бураковского и Аганозерского массивов</li> <li>– Кемписарайское (Казахстан)</li> <li>– Светлоборский массив</li> <li>– хромит.гориз., Бушвельд (ЮАР)</li> </ul>	Протяженные по вертикали магнетитсодержащие тела могут формировать интенсивные ЕП ОВП [Комаров, 1994, Путиков и др., 2013], также тонковолокнитстые проводящие сети, сложенные магнетитом, формируют высокоинтенсивные ЕП [Семенов, 1980]	Опубликованы материалы о подвижных формах платиноидов [Макарова, 2004], комплекс работ над ГХГ Аганозерского массива проведен автором и использованы материалы ФГУ НПП Геологоразведка [Вешев, 2003ф]
Эндогенные, магматические, постмагматические	Платинометалльные малосульфидные	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Федорово-Панское</li> <li>– Верхнеталнахское</li> <li>– Светлоборский массив</li> <li>– Луккулайсваара</li> <li>– Кивач-Сямозеро</li> <li>– Кааламский массив</li> <li>– риф Меренского в комплексе Бушвельд (ЮАР)</li> <li>– J-M риф с компл. Стиллуотер (США)</li> <li>– Бураковский массив</li> <li>– Аганозерский массив</li> </ul>	Протяженные по вертикали жильные тела магнетита могут формировать интенсивные ЕП ОВП. Имеются сведения о ЕП вкрапленных сульфидов [Hamilton, 2000]	Проведен комплекс работ на Светлоборском массиве автором и использованы материалы по Аганозерскому и Бураковскому массивам ФГУ НПП Геологоразведка [Вешев, 2003ф], ООО «СЗГК», ГК Теллур [Сергеев, 2005]
	Платиноидно-титаномагнетитовые	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Качканарское</li> <li>– Волоковское</li> </ul>	Жильные и массивные титаномагнетиты существенной вертикальной протяженности вблизи поверхности формируют интенсивные аномалии ЕП амплитудой в сотни мВ	Комплекс работ проведен автором на Качканарском массиве

Класс месторождений	Тип месторождений	Примеры месторождений/ платиноносных массивов	Особенности указанного типа месторождений, способные приводить к формированию ЕП	Представление геоэлектрохимических процессов для указанного типа в литературе и в представленной работе
	Платиносодержащие молибден-медно-порфировые, медно-свинцово-цинковые, медные и золоторудные	<ul style="list-style-type: none"> <li>– месторождения Урала, Алтае-Саянского региона</li> <li>– Сорское (Хакасия)</li> <li>– Боцекульское (Казахстан)</li> <li>– Никель-Плэйн-Мэйн (Канада)</li> <li>– Бигем (США)</li> <li>– Коронейшн-Хилл (Австралия)</li> </ul>	Жильные и массивные тела электронных проводников различного состава существенной вертикальной протяженности вблизи поверхности могут формировать интенсивные аномалии ЕП амплитудой в сотни мВ [Семенов, 1980]	Материалы о в.з.ф. формах платиноидов изучены ООО «СЗГК» и ГК Теллур [Сергеев, 2005]
Полигенные	Вулканогенно-осадочные и метаморфогенно-гидротермально-метасоматические в высокоуглеродистых комплексах	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Сухоложское</li> <li>– Тимское</li> <li>– Онежское</li> <li>– Средняя, Верхняя Падма</li> <li>– Весеннее</li> <li>– Царевское</li> <li>– Космозеро</li> <li>– Уницкий</li> <li>– Мурунтау (Узбекистан)</li> <li>– месторождения Польши, Юж.Китая, Финляндии, Канады</li> </ul>	Крутопадающие высокоуглеродистые комплексы вблизи поверхности могут формировать интенсивные аномалии ЕП амплитудой в сотни мВ [Семенов, 1980; Комаров, 1994, Рысс, 1973]	-

Класс месторождений	Тип месторождений	Примеры месторождений/ платиноносных массивов	Особенности указанного типа месторождений, способные приводить к формированию ЕП	Представление геоэлектрoхимических процессов для указанного типа в литературе и в представленной работе
Экзогенные	Россыпные	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Уральские, Вилюйские, Кондерские россыпи,</li> <li>– Салмон-Ривер (США)</li> <li>– Витватерсранд (ЮАР)</li> <li>– Чеко-Пасифико (Колумбия)</li> </ul>	Контакт тонкодисперсных ГП (глин) и среднезернистых (песчаников) может формировать ЕП относительно слабой интенсивности в условиях контраста минерализации грунтовых вод (ЕП диффузионно-адсорбционного происхождения) [Семенов, 1980]	-
	Платиносодержащие коры выветривания	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Буруктальский массив</li> <li>– Моа-Барако (Куба)</li> <li>– О'Тул (Бразилия)</li> </ul>	Магнетитсодержащие «карманы» коры выветривания при содержании магнетита более 5 вес. % (образованные под действием тектонических нарушений при разрушении ультраосновных пород) могут формировать ЕП амплитудой в сотни мВ [Рысс, 1983, Путиков и др., 2013]	Частично рассмотрено в дипломной работе автора [Сенчина, 2013], в литературе представлены концентрации благородных металлов в коре выветривания [Pumer et al., 1987, Киселев, 2003, Рыжкова и др, 2009, Дурягина, 2015]
	Платиносодержащие Fe-Mn конкреции и гидротермальные сульфиды	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Срединно-океанический хребет,</li> <li>– поля Уэйк-Магеллановых гор,</li> <li>– Гавайский хребет и др.</li> </ul>	Интенсивное ЕП существует в активных гидротермальных подводных комплексах [Каулио и др, 2009]	Изучены содержания и процессы концентрирования ЭПГ в конкрециях и гидротермальных корках [Cin-Tu, 2003]
Техногенные		<ul style="list-style-type: none"> <li>– хвосты и отвалы обогатительных фабрик</li> </ul>	Окисление в поверхностных условиях пород, поднятых с глубинных горизонтов	Рассмотрены процессы перемещения в окружающей среде токсичных соединений платины [Радомский и др., 2006, Радомская и др., 2005, 2008, Радомский, 2015]

Для большинства платиноносных объектов – от мелких проявлений платинометалльной минерализации до месторождений платиноидов – характерно наличие предпосылок для формирования квазистационарных естественных электрических полей с протяженностью аномальных по ЕП участков, соизмеримых с размерами рудных тел и платиноносных зон.

## **1.2 Краткое описание геологического строения рассматриваемых платиноносных массивов**

### **1.2.1 Качканарский массив**

Качканарский массив слагает одноименную горную гряду на Восточном склоне Среднего Урала и входит в состав Качканарского дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса (рисунок 1.1). Располагается в пределах западной части Тагило-Магнитогорского прогиба, вблизи зоны его сопряжения с Центрально-Уральским поднятием. Возраст Качканарского комплекса дискуссионен и оценивается лежащим в интервале – 320 – 430 млн.лет. Рудоносный Качканарский габбро-пироксенитовый плутон занимает площадь около 110 км<sup>2</sup>. Плутон имеет изометричную форму и относится к типу лакколитов [Шалагинов, 2001ф]. В гравитационном поле массиву отвечает положительная аномалия изометричной формы с амплитудой 50 мГл (рисунок 1.2). Магнитное поле (рисунок 1.2) - контрастно-дифференцированное с полосовидным размещением многочисленных высокоинтенсивных (более 2000 нТл) положительных аномалий, соответствующих в общих чертах концентрически-зональному строению массива. По результатам решения обратных задач гравитационного и магнитного полей показано, что форма массива близка к опрокинутому усеченному конусу с наклоном оси на восток под углом 70–80°. Вертикальная мощность тела – около 12 км. Массив сложен преимущественно дунитами, пироксенитами (рисунок 1.1). К телам клинопироксенитов приурочены промышленные залежи ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд [ Шалагинов, 2001ф ].

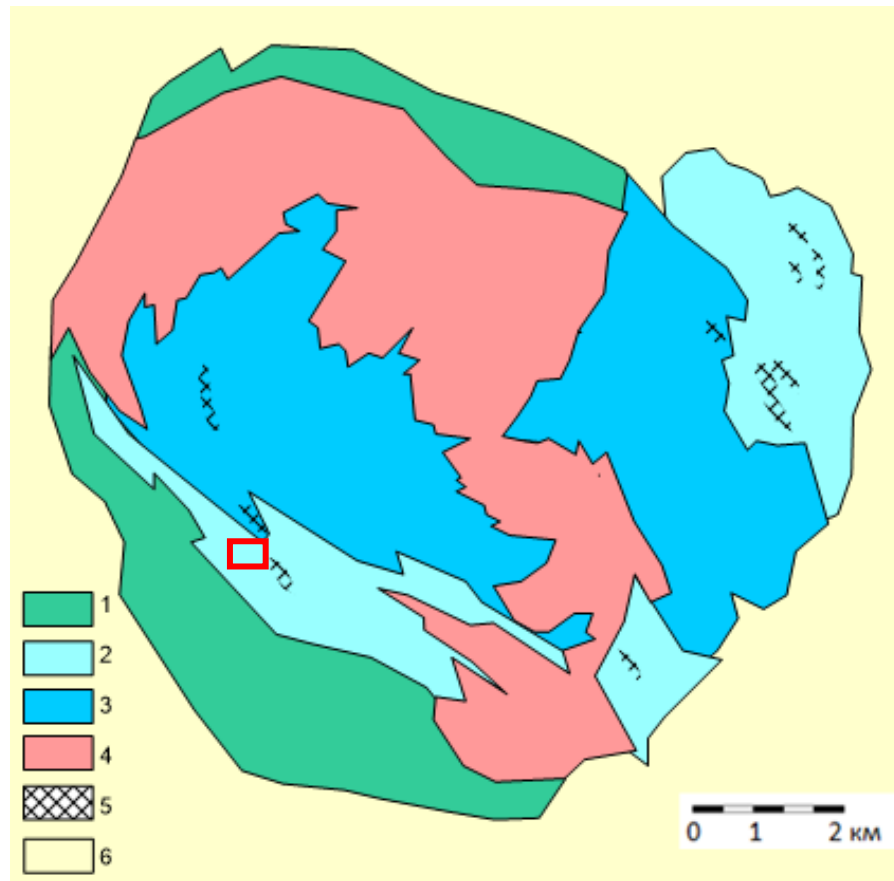


Рисунок 1.1 – Схема геологического строения Качканарского массива (по [Фоминых и др., 1967]). 1 – амфиболизированные диабазовые порфириды и их лавобрекчии, 2 – пироксениты, 3 – рудные (титаномагнетит) пироксениты, 4 – дуниты, 5 – шлировые тела магнетитовых оливинитов, перидотитов и дунитов, 6 – вмещающие массив горные породы (преимущественно хлорит-актинолитовые сланцы). Красным прямоугольником отмечен участок работ

Оруденение распространяется на глубину более 500-600 м.; скважины, пройденные до этих глубин, не вышли из кондиционных руд. Рудные тела слагаются вкрапленным титаномагнетитом, реже шлировыми выделениями и прожилками массивных руд, в основном, в пироксенитах [Шалагинов, 2001ф]. Второстепенные рудные минералы - пирит и пирротин, редко встречаются халькопирит, пентландит и борнит, а также самородная платина и платиноиды.

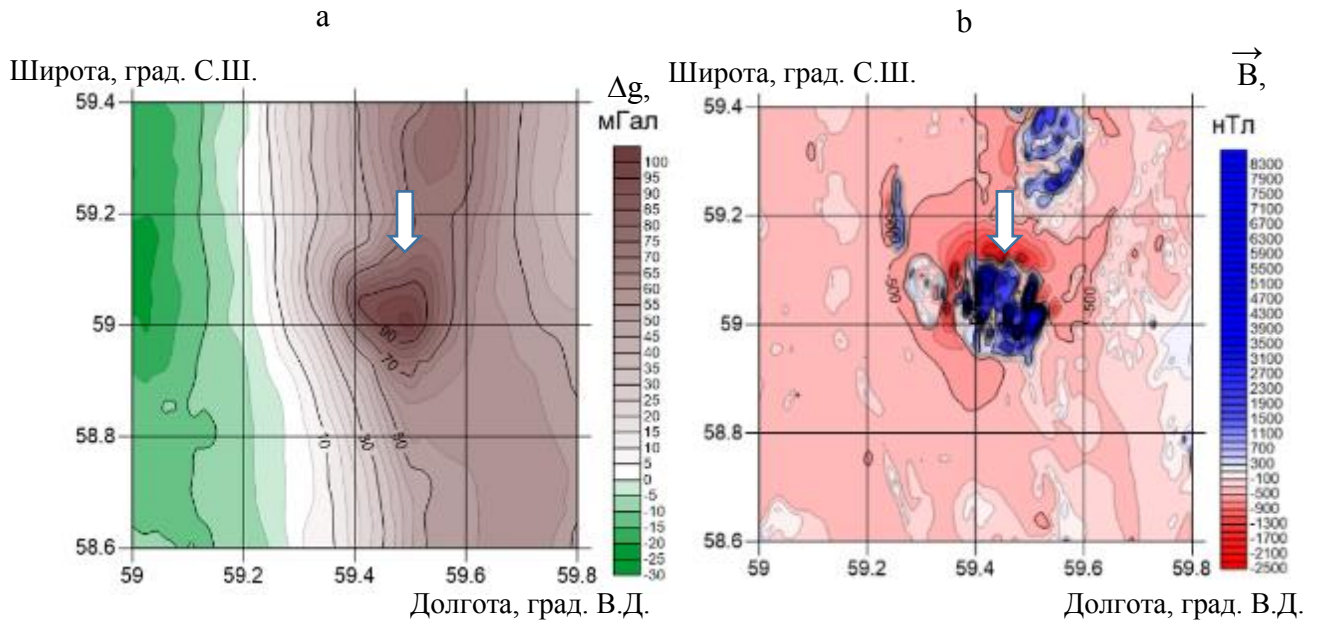


Рисунок 1.2 – Качканарский комплекс в аномальных гравитационном (а) и магнитном (б) полях

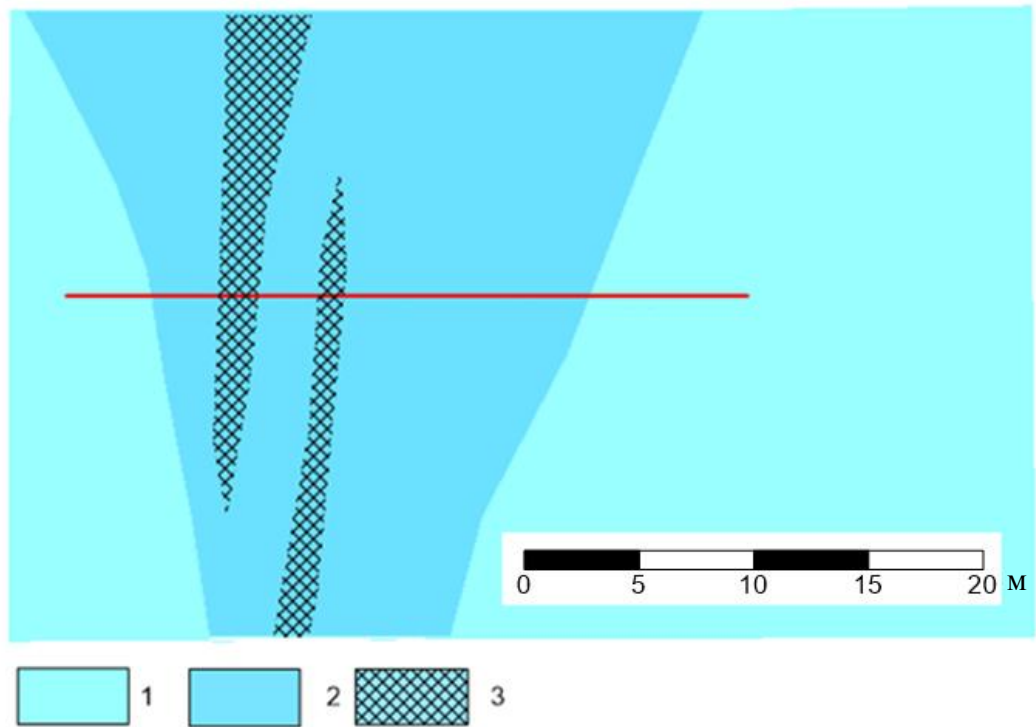


Рисунок 1.3 – Схема строения участка наблюдений на Качканарском массиве.

1 – пироксениты, 2 – рудные (титаномагнетит) пироксениты, 3 – жилы титаномагнетита (видимы на поверхности). Красной линией отмечен профиль наблюдений

Непосредственно участок работ (рисунок 1.3) сложен пироксенитами, на участке отмечены две жилы титаномагнетита меридионального простирания, частично выходящие на поверхность вблизи профиля работ. Профиль сечет указанную структуру, шаг по профилю составил два метра, изучено 15 точек (ЕП, отбор проб для ТМГМ).

### **1.2.2 Светлоборский массив**

Светлоборский массив позднеордовикского возраста входит в состав Качканарского дунит – клинопироксенит – габбрового комплекса. Светлоборский массив расположен в 1 км к западу от Качканарского массива. В плане массив имеет форму слегка вытянутого овала размером 4.5 х 7.5 км. В магнитном поле массиву отвечает сложно построенная аномалия с концентрически-зональным размещением чередующихся полос с положительными и отрицательными экстремумами от +1500 до –500 нТл. Гравитационное поле также сложное: в полосе интенсивного градиента, вызванного влиянием Качканарского массива, выделяется асимметричная аномалия овальной формы с амплитудой 8 мГл и смещенным к востоку эпицентром. Расчеты по данным гравитационного поля указывают на клиновидную форму тела в разрезе, неглубокое залегание нижней кромки массива (0.8-2.4 км), отсутствие крупных масс повышенной плотности. Падение контактов на восток: западного – под углом 40°, восточного – около 60°. Строение массива четко зональное: в центре - дунитовое ядро размером 2.4 х 6.7 км, окаймленное прерывистой пироксенитовой оторочкой мощностью до 1.4 км [Телегин, 2009].

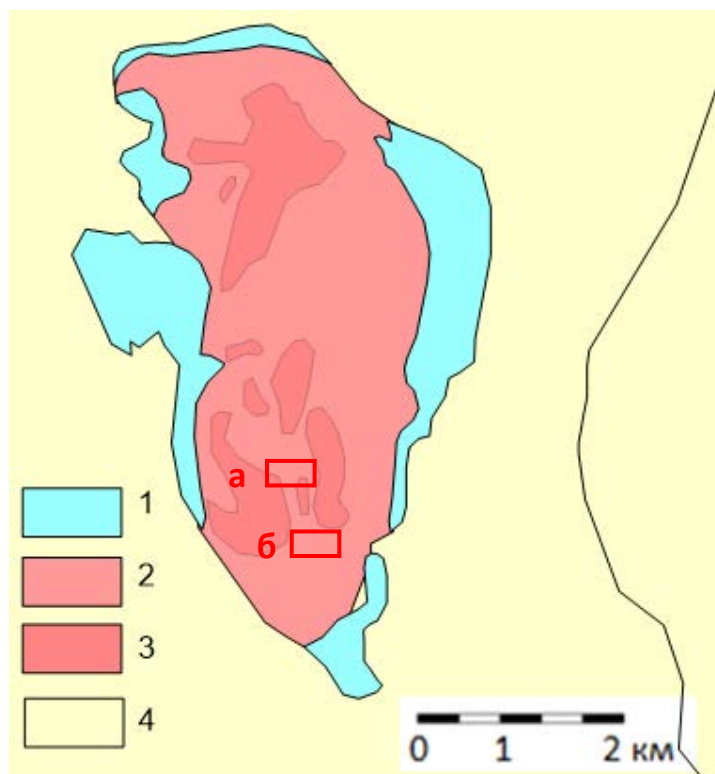


Рисунок 1.4 – Схема геологического строения Светлоборского массива (по [Телегин, 2009ф; Пилюгин, 2013, 2014]). 1 – пироксениты; 2 – тонко- и мелкозернистые дуниты; 3 – средне- и крупнозернистые дуниты; 4 – вмещающие массив породы (преимущественно, кытлымиты, зелёные сланцы). Линия в восточной части рисунка показывает западную границу Качканарского массива. Красными прямоугольниками отмечены участки исследований «а» и «б»

Интрузивные образования Светлоборского массива представлены, главным образом, ультрамафитами ультраосновного и основного состава, в меньшем объёме – габброидами. По особенностям внутреннего строения массив относится к концентрически-зональным [Иванов, 1997]. Дуниты в геологическом объёме массива составляют примерно 80 – 85%. Хромиты в пределах массива выявлены в основном вкрапленные. Массивные сплошные хромититы в самостоятельных жилах на Светлоборском массиве встречены в единичных случаях [Телегин, 2009ф]. В составе минералов ЭПГ массива отмечаются самородная платина, изоферроплатина, тетраферроплатина, ферроникельплатина, а также иридий осмий, самородный осмий, куперит

и др. [Пилюгин и др., 2013, Дурягина, 2015]. Непосредственно участки работ «а» и «б» сложены дунитами, на участке «а» строение осложнено маломощными дайками пироксенитов.

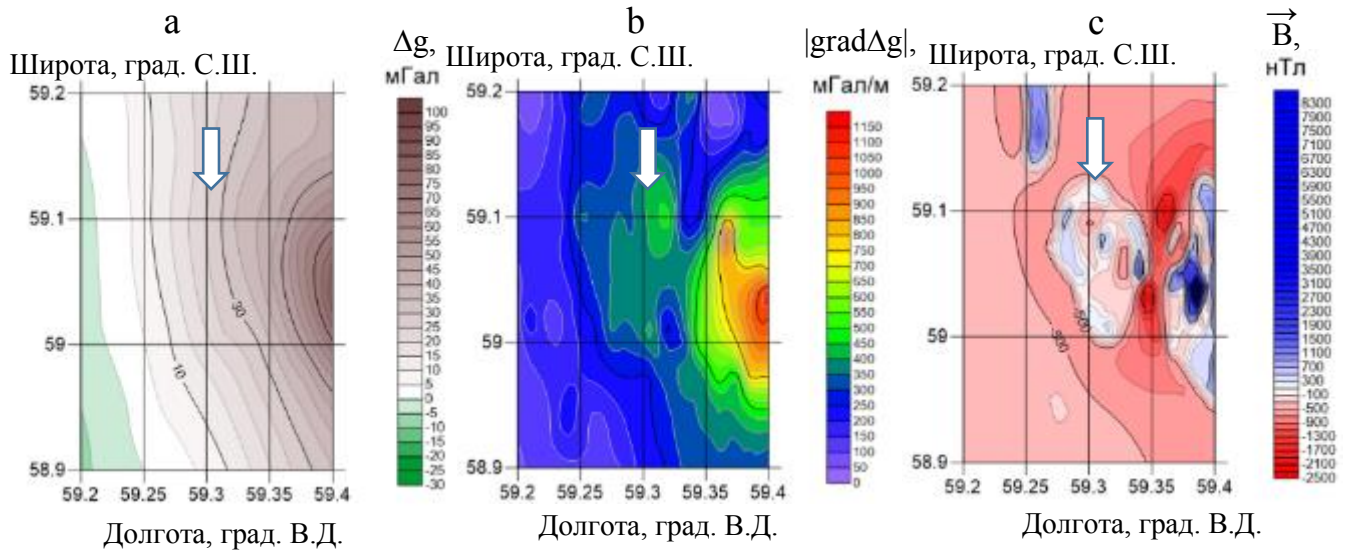


Рисунок 1.5 – Светлоборский массив в аномальных гравитационном (массив выделяется слабо, рисунок 1.5. а), магнитном (рисунок 1.5. с) полях и на карте модуля градиента гравитационного поля (рисунок 1.5. б) (с востока видны аномалии Качканарского массива)

На участке «а» выполнены наблюдения ЕП и отобраны пробы для ТМГМ на 30 точках вдоль широтного профиля с шагом 2 м вдоль канавы, где выполнено ранее бороздовое опробование. На участке «б» профиль 1 изучен методом ТМГМ с шагом 2 м, в пределах данного профиля выявлено наличие платинометалльной минерализации по данным бороздового опробования.

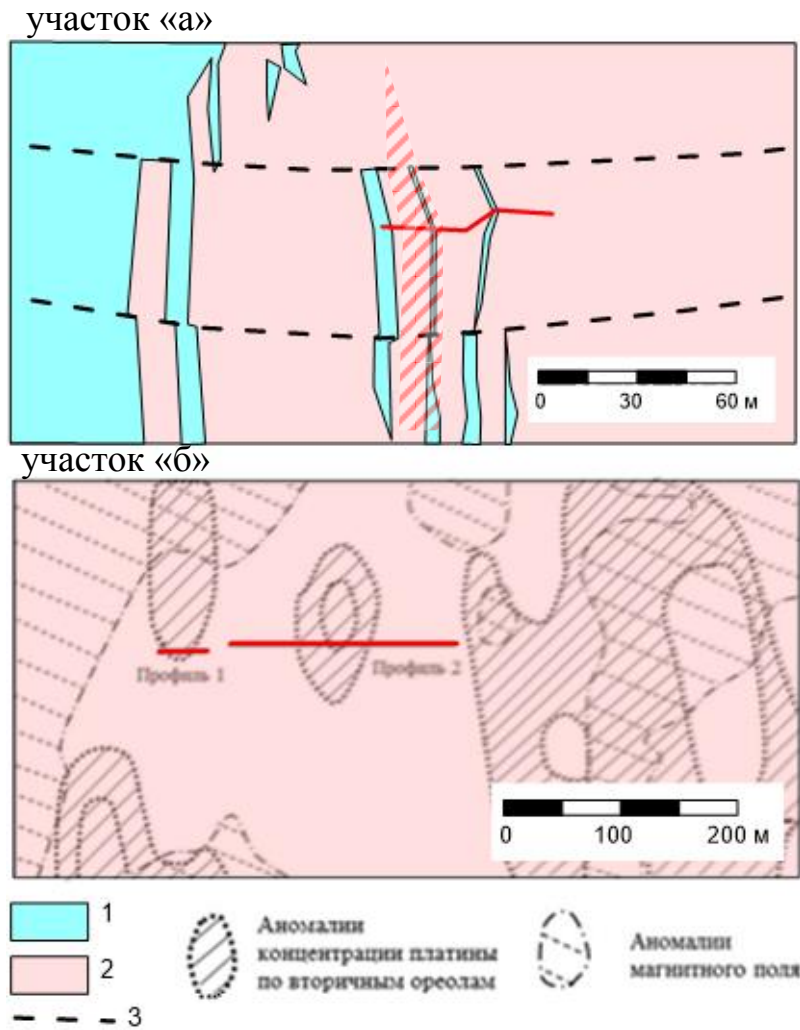


Рисунок 1.6 – Схема геологического строения участков наблюдения «а» и «б» Светлоборского массива (рисунок 1.4) (по [Телегин, 2009ф]). 1 – пироксениты (не показаны на рисунок 1.4); 2 – тонко- и мелкозернистые дуниты; 3 – разломы. Красными линиями отмечены профили наблюдений. На участке «а» заштрихована известная зона платинометалльной минерализации, пересекаемая профилем работ

Профиль 2 на участке «б» изучен слабо, ему соответствует аномалия концентрации платины, полученная по результатам изучения вторичных литохимических ореолов рассеивания в делювиально - элювиальных отложениях, выполненных по сети 200x40 м. Профиль 2 опробован с шагом 10 м. Количество точек опробования на профилях 1 и 2 составляет 20.

### 1.2.3 Аганозерский массив

Крупнейший в Европе палеопротерозойский (возрастом ок. 2450 млн. лет) [Голубев и др., 2012] интрузивный Бураковский комплекс расположен к северо-востоку от Онежского озера, на территории, практически полностью перекрытой ледниковыми отложениями. Бураковский плутон относится к дунит – пироксенит – габброноритовой формации с ярко выраженной металлогенической специализацией на хром, элементы платиновой группы (ЭПГ), золото, титан и ванадий [Чистяков и др., 2008]. Бураковский комплекс

был выявлен в начале 1950-х годов при разбурировании крупной магнитной аномалии. На данный момент Бураковский комплекс расслоенных интрузий считается наиболее значимым платиноносным объектом Южной Карелии. Типы платинометалльного оруденения установлены в пределах указанного комплекса как магматические платиносодержащие малосульфидный и хромитовый.

Системой разломов субширотного и субмеридионального простирания интрузив разбит на три блока: Бураковский, Шалозерский и Аганозерский. Морфологически Бураковский плутон представляет собой лополит с падением контактов к центру под углами 35–70°, площадью 630 км<sup>2</sup>. Наиболее эродированный Аганозерский массив, где и были проведены исследования, имеет в разрезе форму сплюсненной воронки, состав массива на 70% представлен серпентинизированными в различной степени ультрамафитами. Оруденение малосульфидного платинометалльного типа связано с сульфидсодержащими (1–3 %) горизонтами верхней части клинопироксенитовой зоны; повышенные содержания благородных металлов отмечаются также в хромовых рудах, слагающих главный хромитовый горизонт (ГХГ) и в непосредственной близости от него (платинометалльный горизонт «А») [Иващенко и др., 2011], обогащенные зоны в пределах горизонтов распределены неравномерно.

Кристаллические образования перекрыты валунными супесями мощностью около 5 м, иногда - до 10 м. По зонам тектонических нарушений нередко развиваются линейные коры выветривания. Породы брекчированы, трещиноваты, зачастую интенсивно серпентинизированы и карбонатизированы. Вторичные изменения часто сопровождаются сульфидной минерализацией.

Из минералов платиновых металлов в ЭПГ-рудопроявлениях преобладают мончеит, котульскит, меренскиит, сперрилит и куперит. С такими минералами ассоциируют самородные золото и серебро, электрум,

гессит, галенит. Кроме собственных минералов, палладий встречается в виде примеси в кобальтине, пентландите.

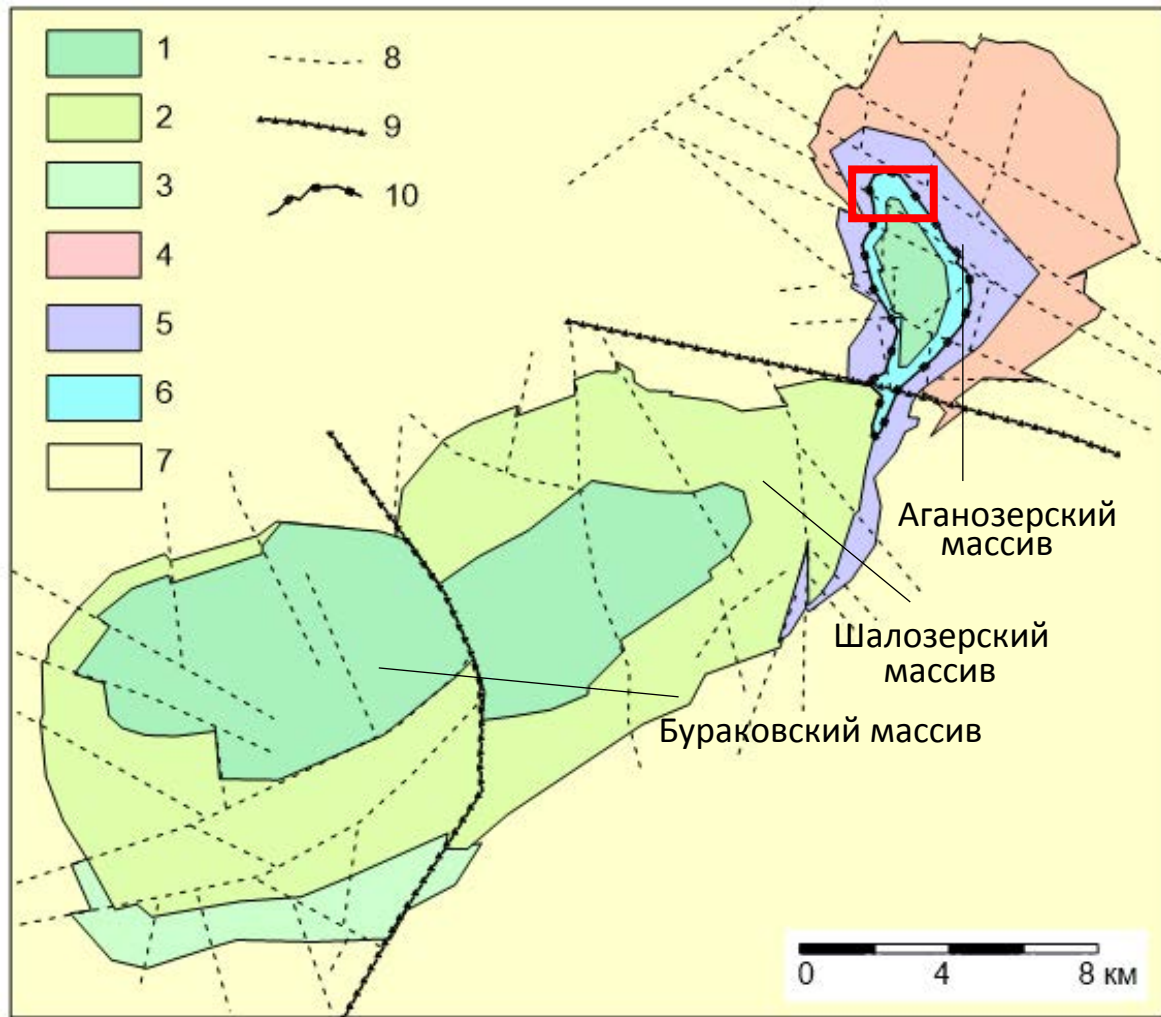


Рисунок 1.7 – Схема геологического строения Бураковской расслоенной интрузии (по [Иващенко и др., 2011]). 1 – феррогабброноритовая зона; 2 – зона пижонитовых габброноритов; 3 – габброноритовая зона; 4 – дуниты, в т.ч. серпентинитизированные; 5 – перидотитовая подзона; 6 – пироксенитовая зона; 7 – вмещающие массив породы: сланцы и гнейсо-сланцы рыбозерской толщи, плагиограниты, гнейсограниты, диориты водлозерского комплекса; 8 – разломы; 9 – глубинные разломы, определяющие блоковое строение интрузии; 10 – ГХГ. Красным прямоугольником выделен участок работ

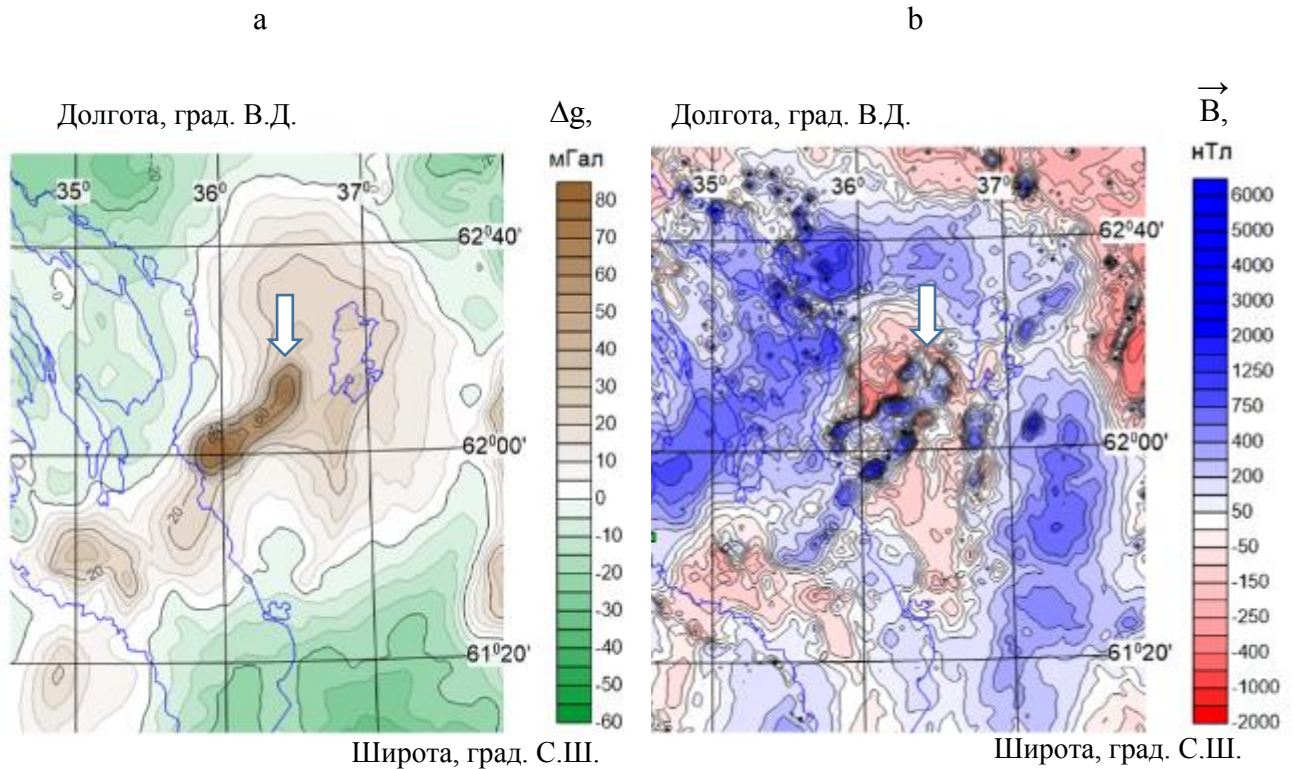


Рисунок 1.8 – Бураковская расслоенная интрузия в аномальных гравитационном (а) и магнитном (б) полях

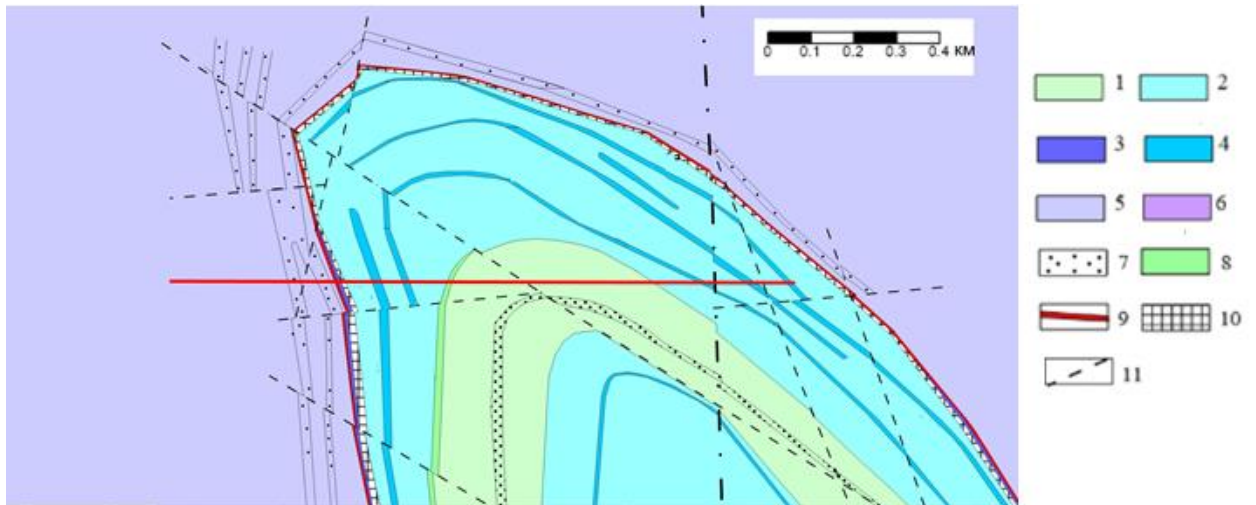


Рисунок 1.9 – Геологическое строение участка работ и профиль наблюдений (отмечен красной прямой) в пределах изучаемого блока Аганозерского массива [Вешев, 2003ф]. 1 – габбро-нориты; 2 – вебстериты; 3 – оливиновые пироксениты; 4 – клинопироксениты; 5 – перидотиты; 6 – серпентиниты по дунитам; 7 – тела повышенной намагниченности (магнетит); 8 – метасоматиты; 9 – главный хромитовый горизонт; 10 – Pt-металльный горизонт "А"; 11 – тектонические нарушения

Участок работ изучен ФГУ НПП «Геологоразведка» площадными геоэлектрохимическими наблюдениями. Исследование указанного блока Аганозерского массива непосредственно автором выполнено методом ЕП, методами изучения физико-химических свойств грунта (Еh – окислительно-восстановительный потенциал, рН – показатель кислотности среды) и геоэлектрохимии вдоль одного широтного профиля, секущего слоистость пород массива в соответствии с текущим представлением о строении участка. Шаг по профилю составил 50 м, количество пикетов – 36 (данные магниторазведки ограничены 28 пикетами) (рисунок 1.9).

### **1.3 Сводная и конкретизированные физико-геологические модели объектов исследования**

Физико-геологические модели объектов исследования представлены в двух вариантах – сводная, геометризованная (общая для всех трех объектов, упоминаемых в работе) и конкретизированные, где отмечаются особенности отдельных объектов. Принципиальные моменты излагаются однократно для сводной модели, но предполагаются общими для участков работ на Аганозерском, Качканарском и Светлоборском массивах.

Рассмотрим наиболее общую ситуацию (рисунок 1.10, а). Вмещающие горные породы 1 в физико-химическом отношении являются ионным проводником и представляют собой наиболее широкий класс пород, отличающийся тем, что твердая матрица пород есть диэлектрик, а проводимость обеспечивается перемещением ионов в поровой жидкости. Это основные, ультраосновные породы, преимущественно слагающие рассматриваемые массивы, породы их коры выветривания; и ледниковые или более поздние четвертичные отложения, представленные песчано-глинистой толщей 2. Породы массивов содержат протяженные по глубине (вдоль слоистости, зональности, тектонических нарушений) области 3, обогащенные магнетитом (концентрация магнетита (или титаномагнетита) – более 5 весовых % (достигает 85 вес. %)) [Телегин, 2009ф, Бабкина и др., 2016]). Кроме того, магнетит является постоянно встречающимся аксессуарным

минералом основных и ультраосновных массивов, а также слагает обогащенные зоны различной геометрии – пластообразные, клиновидные залежи, жилы, вкрапления, скопления в виде прожилков и волокнистые образования. Обогащенные магнетитом зоны характерны также для кор выветривания ультраосновных массивов [Рыжкова и др, 2009], где магнетит является продуктом разложения оливина наряду с серпентином. Обогащенные магнетитом зоны могут быть пологопадающими либо субвертикальными, протяженными на глубины десятков – первых сотен метров. При содержании магнетита более 5 %, обогащенная магнетитом зона может являться электронным проводником [Семенов, 1980, Рысс, 1983]. В случае значительной протяженности по глубине, обогащенная магнетитом зона пересекает область уменьшения концентрации имеющего атмосферное происхождение растворенного в подземных водах газообразного кислорода. Размеры области могут несколько колебаться во времени из-за переменного пополнения в верхней части разреза грунтовых вод метеорными водами, богатыми атмосферным кислородом. Наиболее контрастная зона изменения ОВП поровых вод связана с переходом от зоны аэрации к зоне насыщения порового пространства грунтовыми водами. Однако и ниже по разрезу – в зоне насыщения – будет наблюдаться изменение окислительно-восстановительных свойств в связи с проникновением посредством диффузии растворенного газообразного кислорода в подземные воды. Дополнительно, по ослабленным зонам может наблюдаться конвективный перенос кислорода с большей скоростью. Окисление электронного проводника, происходящее в верхней части тела, приведет к формированию естественного гальванического элемента (ЕГЭ) - источника электрического поля, величина которого связана со значением перепада концентрации

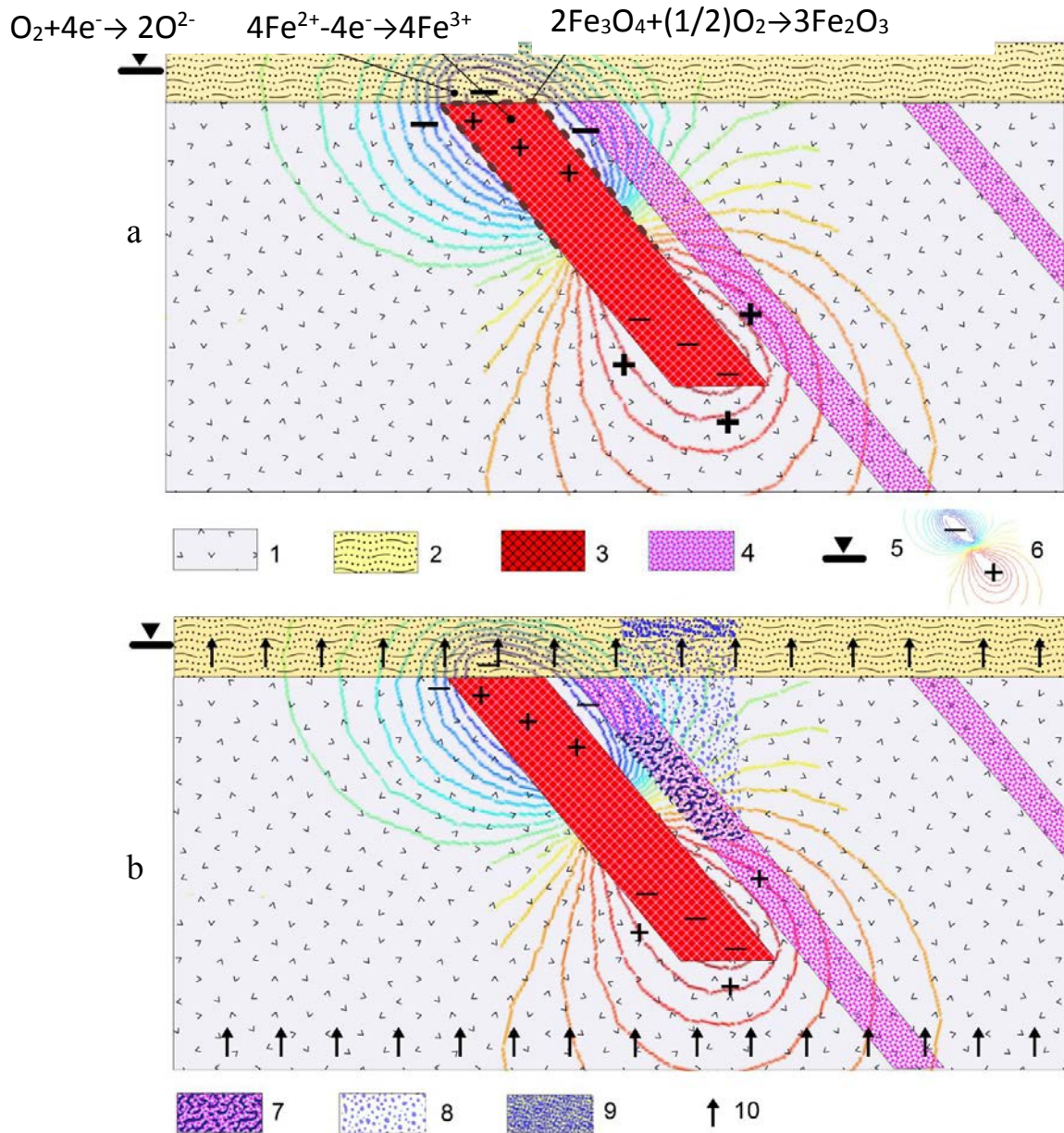


Рисунок 1.10 – Сводная физико-геологическая модель объектов исследования, представленная в виде двух стадий: формирование ЕП (а) и возникновение и перемещение п.ф. ЭПГ (б). Условные обозначения: 1 – вмещающие горные породы, 2 – перекрывающие отложения, 3 – рудное электропроводящее тело, 4 – платиноносные зоны, 5 – уровень подземных вод, 6 – ЕГЭ, 7 – новообразованные подвижные формы платиноидов, 8 – струйный ореол рассеяния подвижных форм платиноидов, 9 – зона повышенных концентраций вторично-закрепленных форм металлов, фиксируемая методами геоэлектрохимии, 10 – направление перемещения подвижных форм преимущественно с потоком плохорастворимых газов (водород, азот, метан)

кислорода по протяжению тела, с УЭС пород, и т. д. В верхней части электронного проводника складывается окислительная обстановка, а в нижней – восстановительная. Окисление вещества представляет собой уход электронов из кристаллической решетки электропроводящего тела, и к избытку положительного электрического заряда в нем. Положительный заряд притягивает отрицательно заряженные ионы, и в верхней части тела на внешней стороне контакта накапливается отрицательный заряд, тогда как на внутренней – положительный, противоположная ситуация соответствует нижней части магнетитсодержащего тела. Форма источника – естественного гальванического элемента – соответствует форме тела, обогащенного магнетитом, но этот источник почти всегда можно представить в виде наклонного (либо вертикального) диполя, отрицательный полюс которого обращен к поверхности. Диполь 6 – (источник естественного электрического поля окислительно-восстановительного происхождения – ЕП ОВП) образует вокруг себя электрическое поле, которое может вызывать переход платиноидов в растворенную форму 7 (рисунок 1.10, б) в составе комплексных ионов в случае, если в область влияния поля попадают участки платинометалльной минерализации 4. Указанные процессы проявятся на поверхности в виде следующих аномалий:

- отрицательная аномалия ЕП над верхней кромкой магнетитсодержащего тела,
- отрицательная аномалия ОВП над верхней кромкой магнетитсодержащего тела, образованная в результате расхода кислорода на поддержание реакции окисления магнетита,
- положительная аномалия изменения магнитной восприимчивости при обжиге, сформированная над верхней кромкой магнетитсодержащего тела в результате роста отношения доли окисленных компонент горных породах,
- положительная аномалия концентрации вторично-закреплённых форм нахождения платиноидов над частью платиноносной зоны, подверженной влиянию токов ЕП.

Есть мнение [Свешников и др., 1963, Свешников, 1967, Нюссик, и др., 1981], что под влиянием ЕП ОВП может наблюдаться дальняя миграция

заряженных частиц в поровой жидкости в области, где электрический ток достаточно силен – в окрестностях источника. При этом процесс движения будет однонаправленным, и при длительном квазистационарном влиянии ЕП заряды одного знака (например, катионы металлов) формируются в анодной области, перемещаются к границе рудного тела магнетита со средой в катодной области и осаждаются там в новообразованных минералах, накапливаясь и создавая зоны вторичного обогащения [Сенчина и др., 2012]. Из работ А.С. Семенова [Семенов, 1980] и Г.Б. Свешникова [Свешников и др., 1963] следует, что естественный гальванический элемент (источник ЕП ОВП) с момента возникновения двух полюсов у проводника всегда обуславливает массоперенос (электроны - по проводнику, ионы - во вмещающей среде). Однако, как отмечено в некоторых источниках [<http://splanet.ru>], эта модель в природных условиях предполагается не работоспособной т.к. препятствием развитию миграционных процессов является незначительная пропускная способность порового пространства во вмещающих породах. Тем не менее, если согласиться с утверждением о незначительной пропускной способности порового пространства вмещающих пород, окажется, что это в равной степени будет влиять на все процессы перемещения элементов в растворе – и в составе струйных ореолов рассеяния при естественной ионной флотации, и под действием конвективных процессов, и т.д. Полностью исключать в связи с этим миграционные процессы не корректно. Однако в большей части объема породы скорость перемещения элементов на ДЭС микроскопических пузырьков плохорастворимых газов окажется намного больше скорости движения заряженных частиц под действием непосредственно ЕП.

Таким образом, можно предположить, что перемещение платиноидов в растворенной форме осуществляется преимущественно в составе струйного ореола рассеяния 8 по механизму ионной флотации на пузырьках плохорастворимых газов, поднимающихся из недр под действием разности давлений (показано стрелками 10 на рисунке 1.10). Вблизи поверхности, в зоне аэрации, пузырьки сливаются с газовой фазой пор, а подвижные формы

ЭПГ остаются у контакта зоны аэрации и насыщенной в данный момент водой зоны. Дальнейший подъем до горизонтов, изучаемых геоэлектрохимическими методами, возможен под действием капиллярного поднятия и испарения влаги с фиксацией подвижных форм на железомарганцевых соединениях, органических либо глинистых частицах.

Данные об УЭС горных пород трех рассматриваемых массивов (А, К, С, таблица 1.2), позволяют с учетом условий формирования аномалий ЕП и концентраций подвижных форм элементов, грубо представить разрез единой моделью (рисунок 1.10).

Таблица 1.2

Удельное электрическое сопротивление пород и минералов, слагающих изучаемые участки массивов (по справочнику: Петрофизика, Дортман, 1992)

Положение горной породы в рассматриваемой модели	Горные породы и минералы	УЭС, Ом*м	Участок, где представлены указанные породы <sup>1</sup>
Вмещающая порода или ее слагаемые	Пироксенит	$10^7-10^{10}$	К, А, С
	Дунит	$10^6-10^8$	К, А, С
	Габбро - норит	$5 \cdot 10^3-10^7$	А
	Вебстерит	$10^7-10^{10}$	А
	Перидотит	$10^5-10^7$	А
	Серпентинит	$10^2-10^5$	А
Перекрывающие отложения	Суглинок, супесь	$3 \cdot 10^2-10^4$	А
Рудное вещество, источник аномалии ЕП	Магнетит	$10^{-4}-10^{-2}$	А, С
	Титаномагнетит	$10^{-4}-10^{-2}$	К
Акцессорные минералы вмещающих пород	Хромит	$3 \cdot 10^2$	А, С
	Пирит	$10^{-3}-10^{-1}$	А

Для рассмотренного участка Качканарского массива характерна низкая изученность, зафиксированы только жилы титаномагнетита в пироксенитах, выходящие практически к поверхности. Для всего профиля средняя мощность рыхлых отложений составляет 0.5 м, максимальная – около

<sup>1</sup> А – изученный участок Аганозерского массива, К – Качканарского, С – Светлоборского массива

полутора метров. Электронные проводники представлены телами, содержащими жильный титаномагнетит (частично, тела с содержанием 60-85 весовых % [Бабкина и др., 2016]). Значительная и мало меняющаяся у поверхности мощность жил позволили предположить их существенную протяженность по глубине. Данные бурения для изученного участка отсутствуют. Уровень грунтовых вод для данной части массива предполагается на глубине около 3 – 4 м.

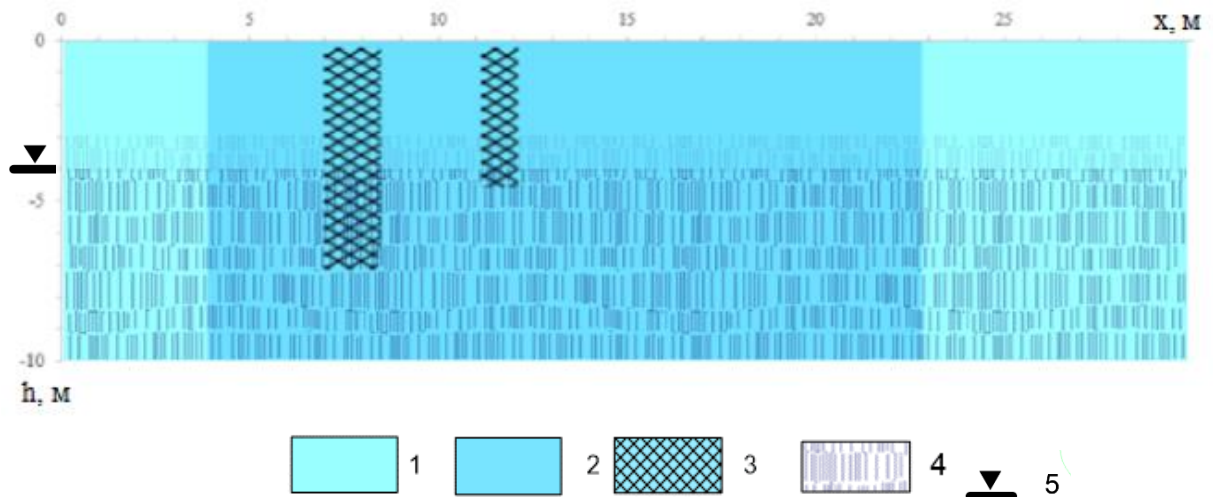


Рисунок 1.11 – Физико-геологическая модель участка наблюдений Качканарского массива. 1 – пироксениты, 2 – рудные (титаномагнетит) пироксениты, 3 – жилы титаномагнетита, 4 – зона насыщения порового пространства подземными водами, 5 – уровень подземных вод

Конкретизированная модель для изученных участков Светлобрского массива отличается от обобщенной модели малой мощностью и протяженностью тел повышенной проводимости и намагниченности, – тонковолокнистыми проводящими сетями, сложенными магнетитом (тонкие прожилки магнетита зафиксированы в стенке горной выработки – канавы). Вмещающие оруденение породы представлены дунитами, осложненными дайками пироксенитового состава. Тонкая кора выветривания и почвенный горизонт покрывают кристаллические породы массива. Уровень грунтовых вод, как граница с контрастными по ОВП свойствами, расположен на глубине 0.5 – 3 м. Профиль 1 участка «б» содержит интервал с

платиноносностью  $>0.2$  г/т Pt в пределах пикетов № 11 – 16 (22 – 32 м) в мелко- и тонкозернистых дунитах. Профиль 2 участка «б» предварительно не изучен и представляется перспективным.

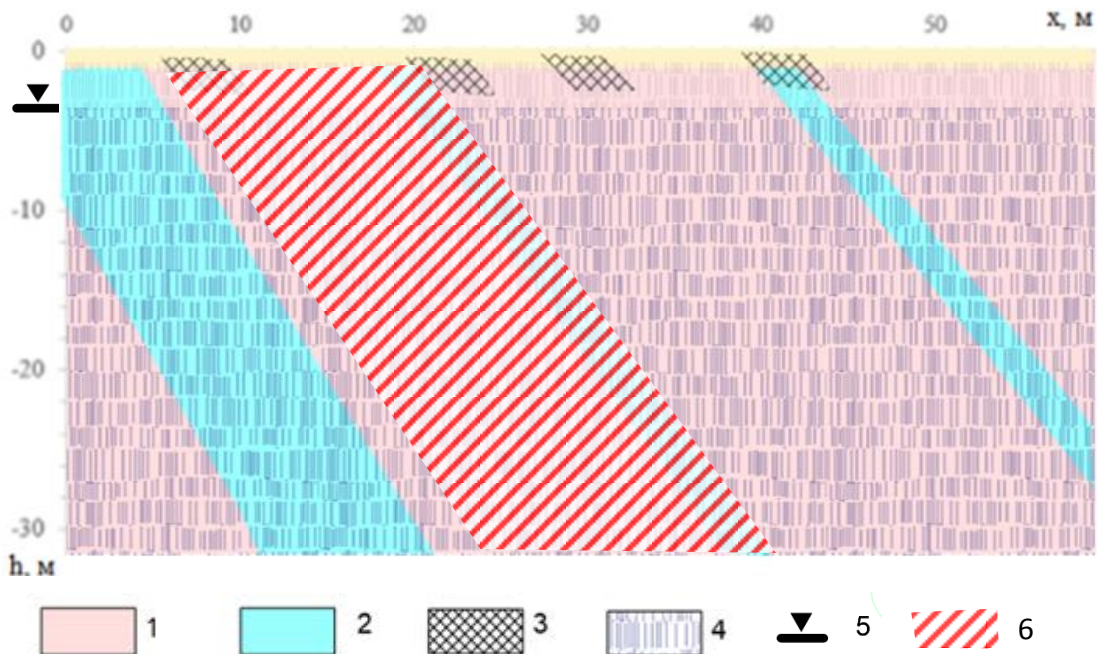


Рисунок 1.12 – Физико-геологическая модель участка наблюдений «а»

Светлоборского массива. 1 – тонко- и мелкозернистые дуниты; 2 – пироксениты; 3 – тонковолокнистые сети, выполненные магнетитом; 4- зона насыщения порового пространства грунтовыми водами, 5 – уровень подземных вод, 6 – известная по данным бороздового опробования платиноносная зона ( $>0.2$  г/т Pt)

Конкретизированная модель для изученного фрагмента Аганозерского массива отличается от обобщенной модели тем, что тела повышенной намагниченности, обогащенные магнетитом более, чем на 20 % [Фролов и др., 2013], залегают достаточно полого, но протягиваются на глубины более 200 м. Вмещающие оруденение породы представлены перидотитами и вебстеритами. Рыхлые отложения почти сплошным чехлом покрывают территорию массива и представлены преимущественно суглинками и супесями слоем около 5, иногда 10 м. Уровень грунтовых вод, как граница с контрастными по ОВП свойствами, расположен на глубине 0.5 – 5 м (не показан на рисунке 1.13).

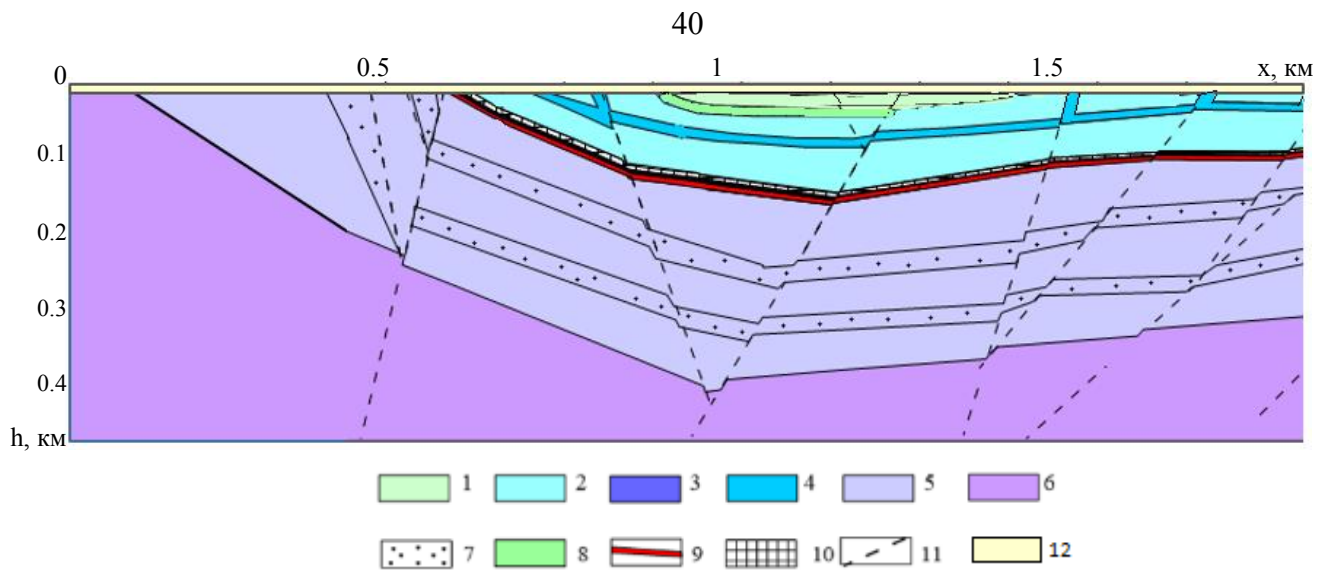


Рисунок 1.13 – Физико-геологическая модель участка наблюдений Аганозерского массива (по [Вешев, 2003ф]).

1 – габбро-нориты; 2 – вебстериты; 3 – оливиновые пироксениты; 4 – клинопироксениты; 5 – перидотиты; 6 – серпентиниты по дунитам; 7 – тела повышенной намагниченности (магнетит); 8 – метасоматиты; 9 – главный хромитовый горизонт; 10 – Pt-металльный горизонт "А"; 11 – тектонические нарушения, 12 – перекрывающие кристаллические породы массива ледниковые отложения

**Выводы к главе 1.** Имеются предпосылки для формирования аномалий потенциала естественного электрического поля (ЕП) в пределах изученных и других ультраосновных массивов в связи с неравномерным по глубине окислением электропроводящих тел, которые представлены преимущественно обогащенными магнетитом геологическими образованиями (магнетитсодержащие дайки, горизонты, ожелезненные тектонические нарушения).

## Глава 2 ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОКИСЛИТЕЛЬНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

### 2.1 Физико-химические условия формирования естественного электрического поля

В пределах рассматриваемых массивов наибольшую роль среди электрохимических взаимодействий играют окислительно-восстановительные процессы, протекающие в пределах верхних десятков метров разреза на контакте протяженных по вертикали магнетитсодержащих (более 5-10 %) рудных тел и вмещающих пород.

Магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) представляет собой смесь оксидов  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Это полупроводник n-типа со сверхстехиометрическим избытком металла в решетке, обладающий значительной долей электронной (а также дырочной) проводимости [Мекаева, 2009, Комаров, 1994]. Контакт электронного и ионного проводника (вмещающая среда) в условиях градиента окислительно-восстановительных свойств может формировать аномалии естественного электрического поля.

Над многими месторождениями магнетитовых железных руд установлено наличие аномалий ЕП. В частности, в Ангарской провинции главная залежь Нерюндинского месторождения отмечена отрицательной аномалией ЕП интенсивностью 200 – 250 мВ [Семенов, 1980]. Как утверждает В. А. Комаров [Комаров, 1994]: «магнетитовые залежи ведут себя как инертные электроды. Их электродный потенциал определяется содержанием кислорода в растворах. ЭДС ЕП достигает 500...600 мВ». Именно, А. В. Щербаковым (Электроразведка: справочник геофизика, 1979). установлена корреляционная зависимость между окислительно-восстановительным потенциалом ( $E_h$ ) природных вод и концентрацией растворенного кислорода в них (рисунок 2.1). На примере Зырянского полиметаллического месторождения показана прямая зависимость изменения

по глубине скачка потенциала на границе рудного тела (рисунок 2.2 кривая I) от изменения окислительно-восстановительного потенциала Eh подземных вод (рисунок 2.2, кривая II). Скачок потенциала на границе рудного тела с электронной проводимостью и ионопроводящей среды формирует катодную зону поля ЕП в верхней его части и анодную – в нижней. Анализ данных кривых позволяет получить приближенную эмпирическую зависимость скачка потенциала на границе рудного тела от концентрации растворенного кислорода.

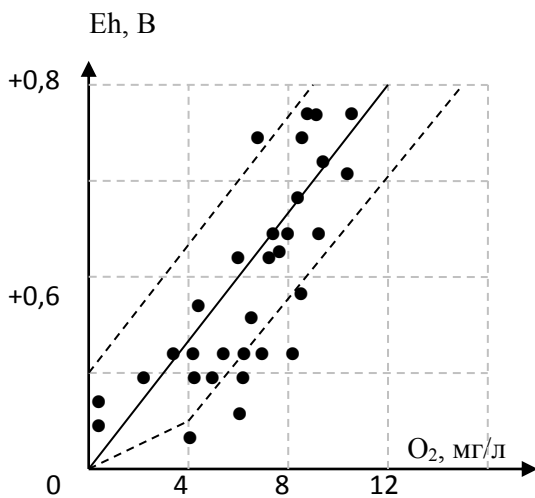


Рисунок 2.1 – Зависимость окислительно - восстановительного потенциала Eh подземных вод от концентрации кислорода ( $O_2$ ) в них. (по А. В. Щербакову из книги: Электроразведка: Справочник геофизика, 1979)

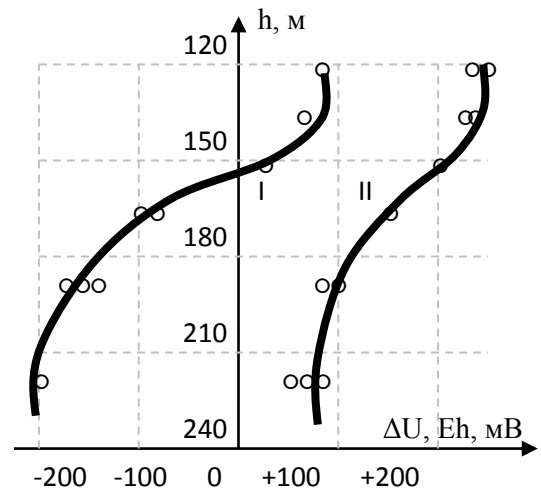


Рисунок 2.2 – Изменение скачка потенциала на границе рудного тела  $\Delta U$  (I) и окислительно-восстановительного потенциала Eh (II) в зависимости от глубины h (по Е. А. Сергееву [Комаров, 1994])

Зависимость, связывающая концентрацию растворенного кислорода и скачок потенциала на границе рудного тела - линейная, и определяется формулой  $\Delta U \approx \alpha \cdot C_{O_2} + \beta$ . Здесь  $C_{O_2}$  - концентрация растворенного кислорода, (мг/л),  $\Delta U$  - скачок потенциала на границе рудного тела, мВ,  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты, в частном случае, равные  $\alpha = 133.2 \frac{мВ \cdot л}{мг}$ ,  $\beta = -200 мВ$ .

Окисление магнетита ( $2Fe_3O_4 + (1/2)O_2 \rightarrow 3Fe_2O_3$ ) приводит к переходу окислов железа в более устойчивую форму - слабомагнитные оксиды и оксигидроксиды железа – гематит, лепидокрокит, гётит, гидрогётит,

ферригидрид [Лютоев, 2014], в зависимости от условий протекания процесса. Источниками аномалий ЕП ОВП могут являться и другие минералы – электронные проводники: большинство сульфидов (борнит, ковеллин, пирротин, пентландит, халькопирит, пирит, кобальтин, арсенопирит), графит, шунгит, пиролюзит, антрацит [Семенов, 1980, Рысс, 1963, Рысс и др., 1966, Рысс, 1973]. Для образования естественного электрического поля указанных минералов также необходимо, чтобы минералы имели непрерывную электрическую связь между собой [Семенов, 1980] и располагались в зоне изменения окислительно-восстановительных свойств поровых растворов. Вкрапленные руды не характеризуются непрерывной электрической связью между зернами минералов – электронных проводников, однако имеются свидетельства о наличии интенсивных аномалий ЕП на месторождениях сульфидных руд вкрапленного типа [Hamilton, 2007].

Кроме ЕП окислительно - восстановительного происхождения, значительной амплитуды могут достигать (обычно слабоинтенсивные) аномалии ЕП, связанные с фильтрационными процессами. Так, в работе [Квон и др., 2015] показано, что интенсивные аномалии потенциала ЕП могут иметь электрокинетическую природу и достигать в горных условиях амплитуды свыше 1200 мВ. Примеры такого рода полей, обнаруженные в различных странах мира, можно объяснить условиями высокогорья, слабо минерализованными водами, стекающими в слое рыхлых осадков, залегающих на коренных скальных породах при отсутствии электронных проводников [Квон и др., 2015]. Рассматривать ЕП электрокинетического происхождения в данной работе не имеет смысла ввиду несоответствия условий высокогорным.

Диффузионно-абсорбционные потенциалы не рассматриваются из-за малой минерализации поровой жидкости, в связи с чем не формируются высокоинтенсивные аномалии ЕП даже в области контакта пород с различной пористостью.

## 2.2 Физико-математическое моделирование формирования естественного электрического поля окислительно-восстановительного происхождения

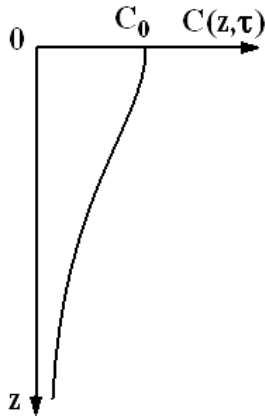


Рисунок 2.3 – Вид графика изменения концентрации растворенного кислорода  $C(z, \tau)$  с глубиной  $z$

На рассмотренных подробнее в главе 1 месторождениях протяженные по вертикали электропроводящие объекты с непрерывной электрической связью представлены магнетитсодержащими телами. Окисление магнетита атмосферным кислородом, проникающим вглубь разреза, приводит к формированию естественных электрических полей окислительно-восстановительного происхождения (ЕП ОВП). Таким образом, для определения ЕП электропроводящих магнетитсодержащих рудных тел необходимо рассчитать изменение концентрации растворенного в подземных водах кислорода по глубине.

При распространении растворенного газообразного кислорода путем диффузии от дневной поверхности вниз вдоль оси  $z$  (рисунок 2.3) и наличии реакции окисления пород второго порядка, концентрация растворенного кислорода  $C(z, \tau)$ , где  $\tau$  – время, при нулевом начальном значении концентрации

$$C \Big|_{\tau=0} = 0,$$

подчиняется нелинейному интегральному уравнению [Путиков, 2009; Путиков и др., 2013]:

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^{\tau} \left\{ \int_0^{\tau} \frac{e^{-\frac{(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{-\frac{(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}}}{\sqrt{\tau-\xi}} C(z', \xi) e^{-\beta \int_0^{\xi} C(z', \eta) d\eta} d\xi \right\} dz', \quad (2.1)$$

где  $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$  - интеграл вероятности,  $C_0$  - концентрация растворенного кислорода у дневной поверхности (при  $z=0$ ),  $q$  - концентрация окисленной формы окисляемой части твердой фазы (минерала),  $q_{\max}$  - максимально возможная концентрация окисленной формы твердой фазы,  $\beta$  - постоянная кинетики гетерогенной реакции окисления магнетита,  $D$  - коэффициент диффузии растворенного кислорода в пористых горных породах.

Концентрацию окисленной формы  $q$  окисляемой части твердой фазы (например, гематита при окислении магнетита) можно затем найти из соотношения [Путиков, 2009]:

$$q = q_{\max} \left( 1 - e^{-\beta \int_0^{\tau} C(z, \eta) d\eta} \right). \quad (2.2)$$

Тестирование решения выполнено на примере Буруктальского массива, где также присутствуют протяженные по вертикали магнетитсодержащие тела (рисунок 2.4). Кроме того, в коре выветривания массива подробно изучено распределение по вертикали концентраций окисленной (гематита, гетита) и неокисленной форм магнетита. Это позволяет использовать указанные данные для анализа адекватности рассматриваемой физико-математической модели.

Будем решать нелинейное интегральное уравнение (2.1) методом последовательных приближений. Положим, что нулевое приближение концентрации  $C^{(0)}$  соответствует начальной (нулевой) концентрации:

$$C^{(0)} = 0. \quad (2.3)$$

Подставляя выражение (2.3) в правую часть уравнения (2.2), находим первое приближение концентрации растворенного кислорода  $C^{(1)}$ :

$$C^{(1)} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] \quad (2.4)$$

Формула (2.4) соответствует распределению концентрации кислорода в горных породах при отсутствии реакции окисления (наиболее быстрое продвижение фронта кислорода вглубь пород).

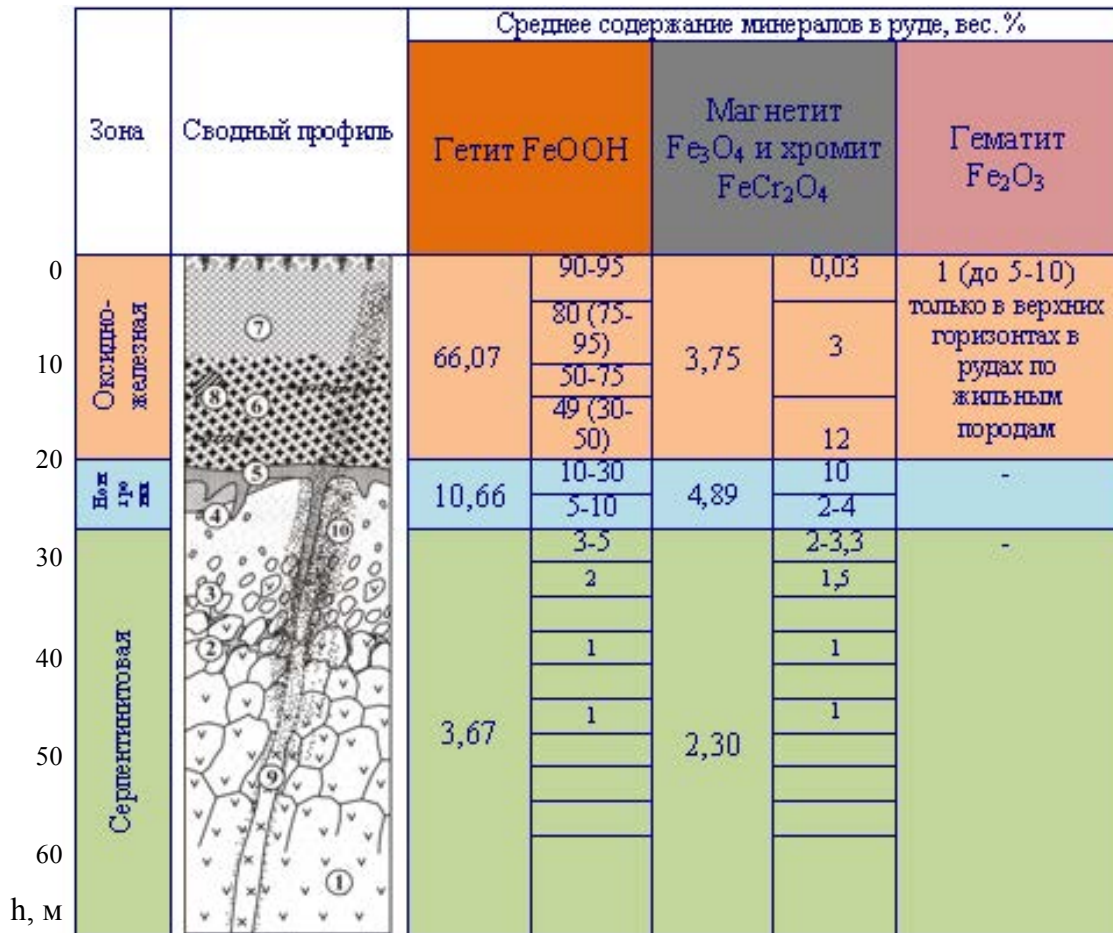


Рисунок 2.4 – Вертикальный профиль природных типов руд Буруктальского месторождения в интервале глубин от 0 до 70 метров [Рыжкова и др, 2009].

Условные обозначения: 1 – серпентинизированные ультрамафиты (перидотиты и дуниты); 2 – зона карбонатизированных серпентинитов; 3 – зона лизардитовых серпентинитов; 4 – зона нонтронитовых руд; 5 – кварц-магнетитовые руды; 6 – кварц-гётитовые руды (структурные охры); 7 – кварц-гётитовые руды (бесструктурные охры); 8 – оксидно-марганцевые руды; 9 – дайки; 10 – хлоритовые руды

Второе приближение концентрации  $C^{(2)}$  получим, подставляя  $C^{(1)}$  в правую часть формулы (2.1):

$$C^{(2)} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\infty \int_0^\tau \frac{\left[ e^{\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}} \right]}{\sqrt{\tau-\xi}} C^{(1)}(z', \xi) e^{-\beta \int_0^\xi C^{(1)}(z, \eta) d\eta} d\xi dz'. \quad (2.5)$$

Полагая приближенно

$$C^{(1)} \approx C_0, \quad (2.6)$$

что, как видно из формулы (2.4), справедливо при

$$\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \ll 1, \quad (2.7)$$

получаем из (2.5):

$$C^{(2)} \approx C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max} C_0}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\infty \int_0^\tau \frac{\left[ e^{\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}} \right]}{\sqrt{\tau-\xi}} e^{-\beta C_0 \xi} d\xi dz'. \quad (2.8)$$

Меняя порядок интегрирования в правой части формулы (2.8), получим

$$C^{(2)} \approx C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max} C_0}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\tau \int_0^\infty \frac{\left[ e^{\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}} \right]}{\sqrt{\tau-\xi}} dz' \left\{ \frac{e^{-\beta C_0 \xi}}{\sqrt{\tau-\xi}} d\xi \right\}. \quad (2.9)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{2\sqrt{D(\tau-\xi)}} \int_0^\infty \left[ e^{\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}} \right] dz' = \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D(\tau-\xi)}} \right), \quad (2.10)$$

находим

$$C^{(2)} \approx C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \beta q_{\max} C_0 \int_0^{\tau} e^{-\beta C_0 \xi} \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D(\tau-\xi)}} \right) d\xi \quad (2.11)$$

или

$$\frac{C^{(2)}}{C_0} \approx \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \beta q_{\max} \int_0^{\tau} e^{-\beta C_0 \xi} \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D(\tau-\xi)}} \right) d\xi. \quad (2.12)$$

По формуле (2.12) в программе Matlab 6.5 рассчитано распределение относительной концентрации растворенного кислорода как функции глубины  $z$  для различных значений времени  $\tau$ . Для сравнения при тех же значениях  $\tau$  рассчитано  $C^{(1)}/C_0$  по формуле (2.4) – без учета процесса окисления.

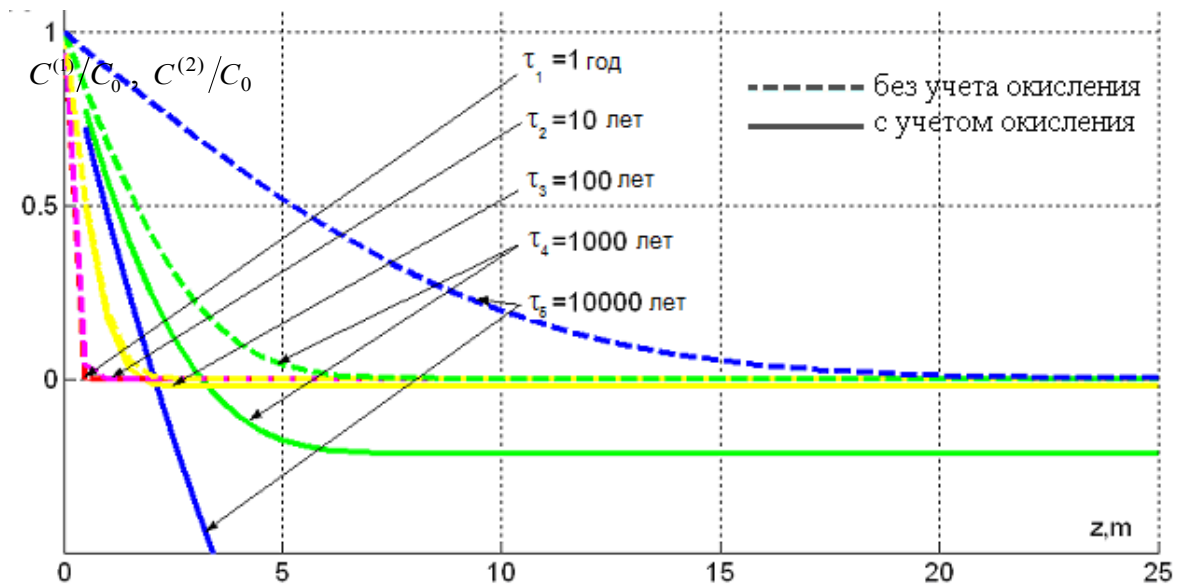


Рисунок 2.5 – Графики зависимости относительной концентрации растворенного кислорода от глубины  $z$  для различных значений времени  $\tau$ .

Принятые при расчете значения параметров:  $C_0 = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $D = 1 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;

$$q_{\max} = 36 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \beta = 2 \cdot 10^{-13} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}}$$

Как видно из рисунка 2.5, при больших значениях глубины  $z$  концентрация кислорода, рассчитанная по формуле (2.12), может принимать отрицательные значения, что не имеет физического смысла. Этот эффект обусловлен слишком грубым приближением для  $C^{(1)}$ , описываемым формулой (2.6).

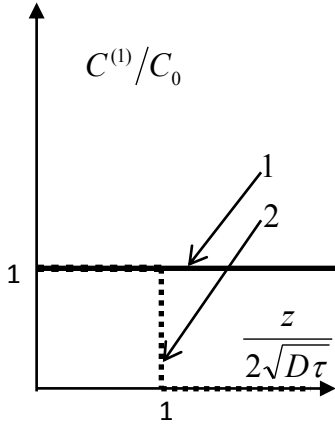


Рисунок 2.6 – Приближенная зависимость  $C^{(1)}/C_0 = [C^{(1)}/C_0](z, \tau)$ ,

1 – по формуле (2.6),

2 – по соотношению (2.13)

Первое приближение концентрации кислорода  $C^{(1)}$  можно более точно (с выполнением граничных условий) описать не формулой (2.6), а ступенчатой функцией, т. е. положить приближенно (рисунок 2.6, кривая 2):

$$C^{(1)} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] \approx \begin{cases} C_0, & 0 \leq \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \leq 1; \\ 0, & 1 < \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} < \infty. \end{cases} \quad (2.13)$$

Меняя порядок интегрирования в правой части формулы (2.5) и подставляя туда выражение (2.13), получим

$$C^{(2)} \approx C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max} C_0}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\tau \int_0^{2\sqrt{D\xi}} \left[ \frac{e^{-\frac{(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{-\frac{(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}}}{\sqrt{\tau-\xi}} e^{-\beta C_0 \left( \xi - \frac{z'^2}{4D} \right) \eta^* \left( \xi - \frac{z'^2}{4D} \right)} dz' \right] d\xi, \quad (2.14)$$

где  $\eta^*(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0; \end{cases}$  – единичная функция.

Учитывая, что в выражении (2.14)  $z' \leq 2\sqrt{D\xi}$ , его можно переписать в виде

$$C^{(2)}/C_0 \approx \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^\tau \frac{e^{-\beta C_0 \xi}}{\sqrt{\tau-\xi}} \left\{ \int_0^{2\sqrt{D\xi}} e^{\frac{\beta C_0 z'^2}{4D}} \left[ e^{-\frac{(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}} - e^{-\frac{(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}} \right] dz' \right\} d\xi. \quad (2.15)$$

Выполняя некоторые преобразования, из (2.15) получим

$$C^{(2)}/C_0 \approx \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right) \right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^{\tau} \frac{e^{-\left[\beta C_0 \xi + \frac{z^2}{4D(\tau-\xi)}\right]}}{\sqrt{\tau-\xi}} \left[ \int_0^{2\sqrt{D\xi}} e^{az'^2} [e^{bz'} - e^{-bz'}] dz' \right] d\xi, \quad (2.16)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{4D} \left( \beta C_0 - \frac{1}{\tau - \xi} \right), \quad (2.17)$$

$$b = \frac{z}{2D(\tau - \xi)}. \quad (2.18)$$

Аналогично, по формуле (2.16) в программе Matlab 6.5 рассчитано распределение относительной концентрации растворенного кислорода как функции глубины  $z$  для различных значений времени  $\tau$  - сплошная линия (рисунок 2.7). Для сравнения для тех же значений  $\tau$  рассчитано  $C^{(1)}/C_0$  по формуле (2.4) – распределение концентрации кислорода без учета процесса окисления – штриховая линия (рисунок 2.7).

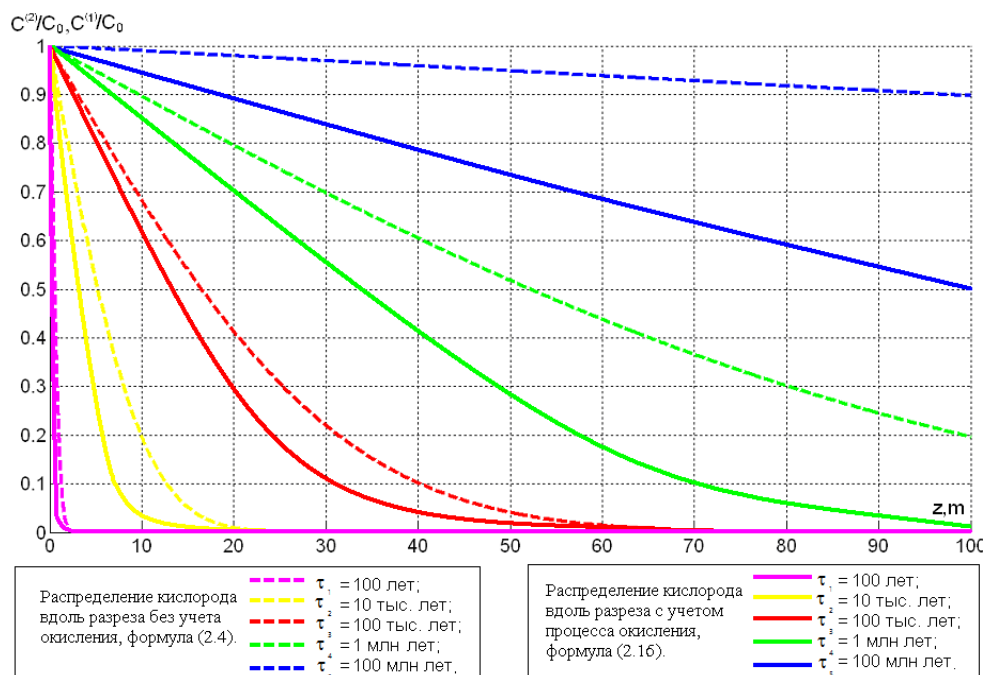


Рисунок 2.7 – Графики зависимостей (2.16) и (2.4) при параметрах:

$$C_0 = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad q_{\max} = 36 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad D = 1 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad \beta = 2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}}$$

Подставляя в формулу (2.2) второе приближение концентрации растворенного кислорода, определяемое формулой (2.16), находим

относительную концентрацию окисленной части магнетита, представленной гётитом и гематитом (рисунок 2.8, кривая 1). Эта теоретическая кривая 1 удовлетворительно совпадает с экспериментальной кривой 2, полученной по данным рисунка 2.4.

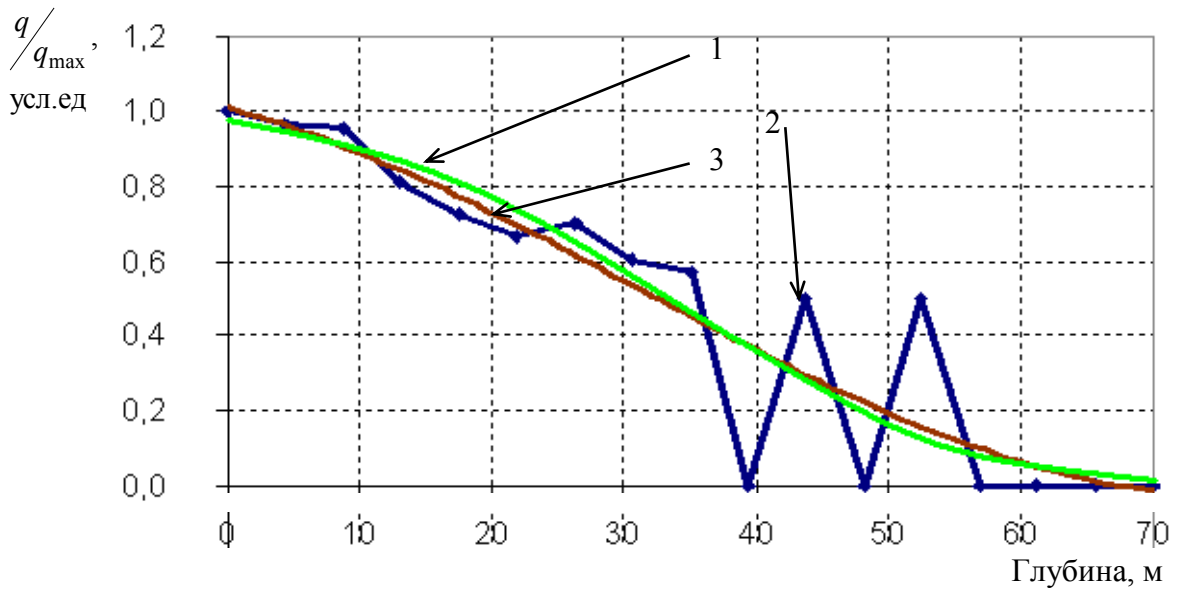


Рисунок 2.8 – Теоретическая (кривая 1, формула (2.2) при  $\tau = 10^5$  лет,

$\beta = 7 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}}$ ) и экспериментальные (2 – не сглаженная, 3 – сглаженная)

зависимости относительной концентрации окисленной фазы магнетита от глубины

Как видно из рисунков 2.7 и 2.8, при наличии близвертикально падающих магнетитсодержащих тел, протягивающихся до глубин более 50 метров, вполне возможно формирование естественного электрического поля (ЕП) значительной интенсивности. Если принять во внимание указанный ранее эмпирический коэффициент, связывающий концентрацию растворенного кислорода и скачок потенциала на границе рудного тела и вмещающих пород находим, что при данных условиях должен наблюдаться ЭДС ЕГЭ около 250 мВ.

Таким образом, обоснован механизм формирования ЕП в приповерхностных частях интрузии, сложенных ультраосновными горными породами с протяженными по глубине магнетитсодержащими телами. Методом последовательных приближений получена численная оценка решения

нелинейного интегрального уравнения распределения концентрации кислорода по глубине с учетом диффузии и необратимой реакции окисления 2-го порядка. Показано удовлетворительное совпадение теоретической и экспериментальной кривых распределения окисленных форм магнетита по глубине при значении постоянной кинетики реакции окисления магнетита  $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \frac{M^3}{K^2 \cdot c}$ .

### **2.3 Интерпретация данных измерений естественных электрических полей**

Для подтверждения факта наличия аномалий ЕП, связанных с окислением магнетита и титаномагнетита, на изученных массивах проведены профильные полевые исследования методом ЕП, а также решена задача подбора геометрических параметров аномалеобразующих электропроводящих тел [Дмитриев, 2012]. Измерения выполнены с помощью неполяризующихся электродов и мультиметра, содержащего милливольтметр с высоким входным сопротивлением (10 МОм) по рекомендованной инструкцией по электроразведке (1984 г.) методике. Для изученных методом ЕП участков выполнен подбор параметров источников ЕП, на рисунках 2.9 – 2.11 (а) показаны графики модельных и наблюдаемых значений потенциала естественного электрического поля. Подбор параметров не характеризуется высокой достоверностью из-за достаточно редкой сети наблюдений. Рисунки 2.9 – 2.11 (б) демонстрируют установленные параметры электронных проводников на упрощенных разрезах, соответствующих изучаемым профилям Качканарского, Светлоборского и Аганозерского массивов. Расчетное максимальное изменение скачка потенциала на границе рудного тела и вмещающей среды указано на разрезах в круглых скобках (в милливольтгах).

#### **Качканарский массив**

Результаты изучения методом ЕП профиля на Качканарском массиве показали наличие отрицательных аномалий амплитудой около -40 и -70 мВ. Измерения на всех точках являлись стабильными по времени, кроме точек

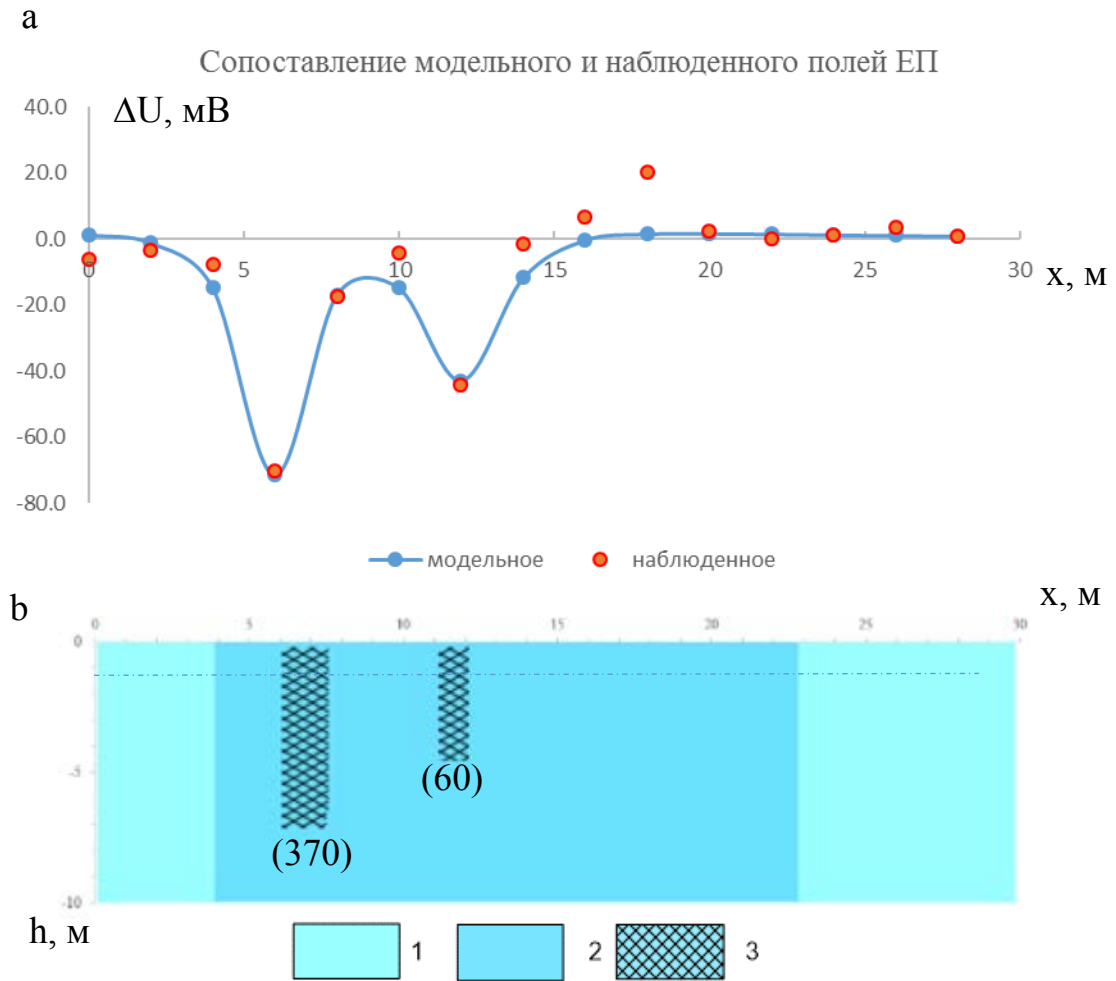


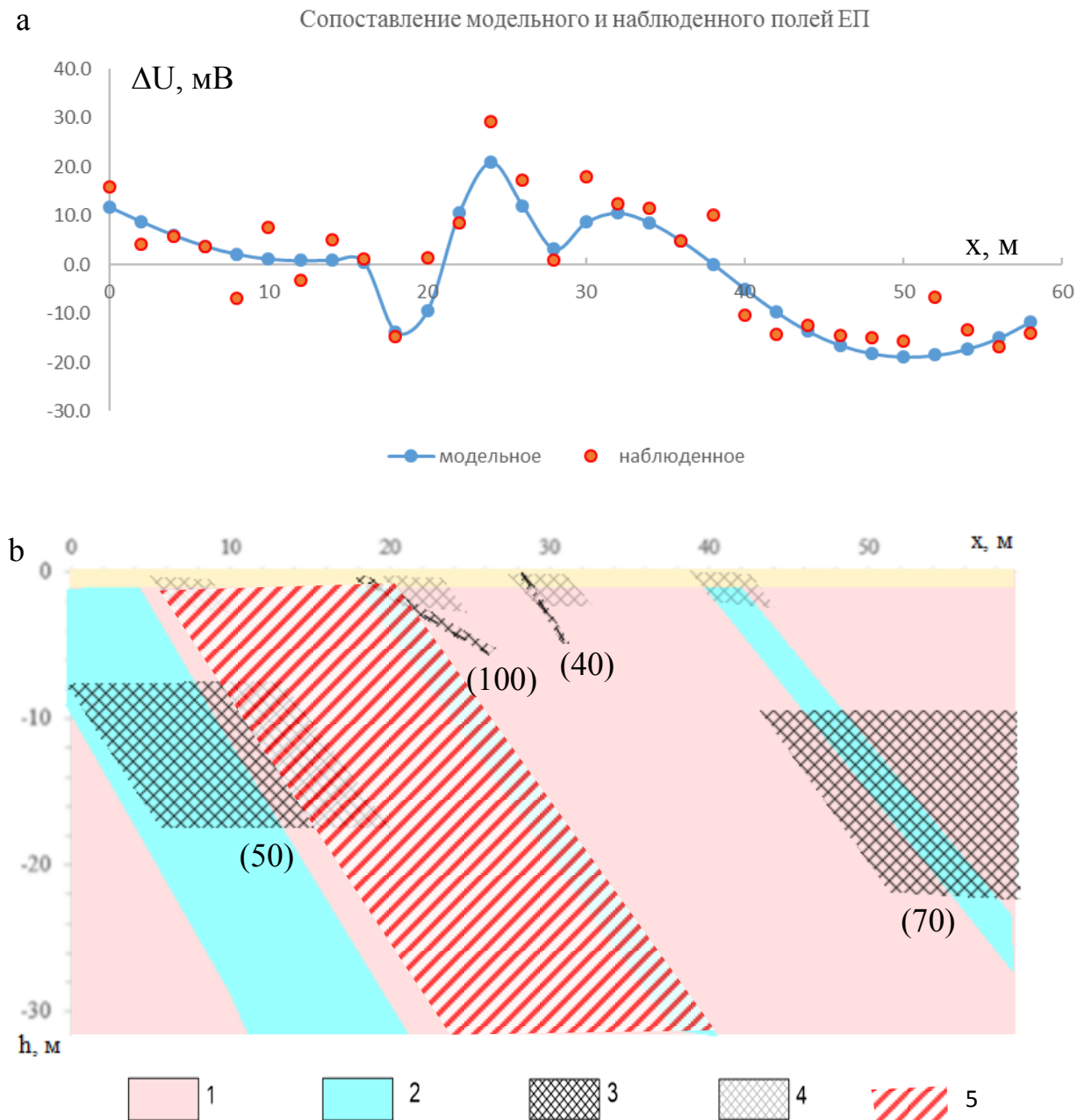
Рисунок 2.9 – График потенциала естественного электрического поля (а) и схематический разрез (б), отражающий установленные параметры электронных проводников в пределах Качканарского массива.

1 — пироксениты, 2 – рудные пироксениты, 3 – жилы титаномагнетита

отрицательных экстремумов ЕП, где сказывалось влияние теллурических токов, наводимых в рудах титаномагнетита и наблюдались секундные вариации средней амплитудой 20 мВ, однако минимальное зафиксированное значение достигало -165 мВ на 4-м пикете. Рудные тела выделены по данным изучения с поверхности, измерения ЕП подтвердили предположение формирования ЕГЭ в связи с окислением жильных тел титаномагнетита. Верхняя кромка тел установлена на глубине 0,1 м. Величина протяженности по падению отрицательного полюса ЕГЭ (катодной части ЕГЭ) составила 1.2

и 1.1 м для выделенных магнетитсодержащих тел, что может соответствовать положению УГВ на участке в момент исследований.

### Светлоборский массив



Измерения на Светлоборском массиве на участке «а» проведены вдоль разведочной канавы на дневной поверхности. В профиле канавы зафиксированы прожилки магнетита. Кроме того, результат рассмотрения ЕП показал наличие двух более широких аномалий, связанных с более глубокими телами, обогащёнными магнетитом. Наличие их можно связать с зоной изменений в дунитах, вызванной внедрением даек пироксенитов. Расчетная величина протяженности по падению отрицательного полюса ЕГЭ (катодной части электропроводящего тела) составила 2 м для приповерхностных объектов (в средней части разреза) и 5 м для глубже расположенных магнетитсодержащих тел, что может быть связано с изменением концентрации кислорода вглубь разреза.

### **Аганозерский массив**

Измерения ЕП проведены на исследуемом профиле Аганозерского массива с помощью неполяризующихся электродов и цифрового мультиметра. Результаты измерений позволили выявить наличие протяженной высокоамплитудной ( $> 250$  мВ) аномалии, но выйти за ее пределы не удалось. В рамках выполненной работы относительно достоверно удастся количественно интерпретировать лишь некоторые аномалии. Для локальных аномалий установлены протяженности катодных частей ЕГЭ от 20 до 200 м, ЭДС этих гальванических элементов лежит в диапазоне 60 – 400 мВ. Глубинные объекты связаны с контактом серпентинитизированных дунитов и перидотитов, к которому, вероятно, приурочены магнетитсодержащие зоны, формирующиеся при изменении ультраосновных пород (наиболее глубинный источник на рисунке 2.11 не показан). Приповерхностные источники аномалий ЕП связываются с магнетитсодержащими горизонтами массива и, возможно, с тектоническими нарушениями, которые связаны с обогащением трещиноватой зоны магнетитом.

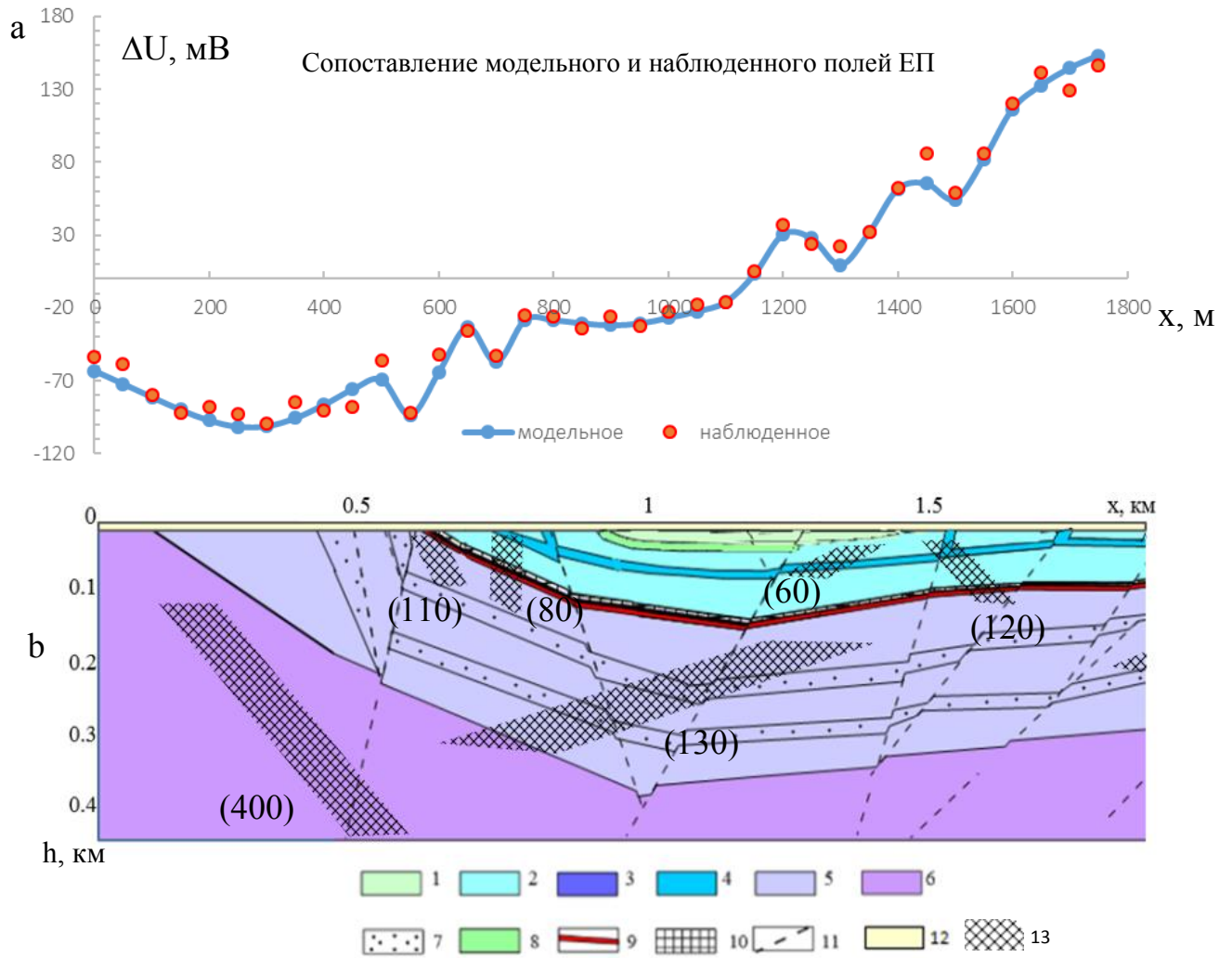


Рисунок 2.11 – График потенциала естественного электрического поля и схематический разрез, отражающий установленные параметры электронных проводников в пределах Аганозерского массива. 1 – габбро-нориты; 2 – вебстериты; 3 – оливиновые пироксениты; 4 – клинопироксениты; 5 – перидотиты; 6 – серпентиниты по дунитам; 7 – тела повышенной намагниченности (магнетит); 8 – метасоматиты; 9 – главный хромитовый горизонт; 10 – Pt-металльный горизонт "А"; 11 – тектонические нарушения, 12 – перекрывающие кристаллические породы массива ледниковые отложения.

13– ЕГЭ, выделенные по результатам моделирования ЕП

Таким образом, установлено наличие аномалий ЕП ОВП на исследуемых участках. В случае Качканарского и Светлоборского массивов титаномагнетит- и магнетитсодержащие тела непосредственно закартированы

с поверхности или зафиксированы в профиле разведочной канавы. Для Аганозерского массива проверить соответствие источников ЕП магнетитсодержащим телам представилось возможным с помощью выполнения магниторазведки [Сенчина и др., 2016], а также по результатам сопоставления с данными предшествующих исследований. Результаты моделирования ЕП хорошо сопоставимы с указанными данными.

**Выводы к главе 2.** Аномалии потенциала естественного электрического поля могут формироваться в пределах ультраосновных массивов в связи с неравномерным по глубине окислением магнетитсодержащих тел под действием растворенного газообразного кислорода. Решение нелинейного интегрального уравнения для концентрации кислорода позволяет оценить потенциал ЕП магнетитсодержащих тел. Оценка скорости окисления магнетита в природных условиях выполнена путём сопоставления теоретических и экспериментальных данных об изменении по глубине содержания в породах магнетита и продуктов окисления магнетита (гетита, гематита). Постоянная кинетики реакции окисления магнетита установлена равной:  $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$ . Полевые исследования подтверждают факт наличия источников ЕП в пределах изучаемых массивов.

### **Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА**

#### **3.1 Экспериментальное моделирование перехода элементов платиновой группы в подвижную форму**

Известно, что благородные металлы слабо вступают во взаимодействия с другими элементами [Лазаренков и др, 1996]. Впервые на пассивность благородных металлов в химических реакциях указал Фарадей в 1836 году [Фарадей, 1939 (перевод)] и связал эту особенность с появлением на поверхности металлов связанного кислорода, что прекращает или затрудняет взаимодействие между металлом и раствором. При этом, для пассивации поверхности платины достаточно воздействия кислорода воздуха. Последующие исследования подтвердили предположение Фарадея и показали, что пассивирующее воздействие оказывают образующиеся на поверхности плёнки, в основном кислородные, но могут быть плёнки гидроксидные, органической и неорганической природы и даже адсорбированные индивидуальные химические вещества [Радомский и др, 2010]. Для прекращения электрохимической реакции благородных металлов с водными растворами достаточно заблокировать активные центры металлов, располагающиеся в основном на 3 – 10 % общей площади поверхности минерала, пленкой соединений, которые легко образуются в стандартных условиях. Для активации электрохимической реакции необходимо удалить плёнку механическим, химическим или электрохимическим способом [Радомский и др, 2010]. Механическое воздействие актуально в случае россыпных месторождений, химическое – на участках современного рудообразования. Способность благородных металлов к перемещению в эпигенетических условиях была изучена ранее на примере золота Антроповой Л.В. [Антропова и др. 1980]. Концентрации золота в сорбированных формах нахождения в почвах установлены как 10 % от

валовых содержаний этого элемента и меньше. Содержания золота в подвижных (водорастворимых) формах нахождения еще на порядок меньше чем в сорбированных, т.е. составляют порядка 1 %. В водорастворимых формах нахождения золото присутствует как в виде катионов (положительно заряженных ионов), так и анионов (отрицательно заряженных ионов). При этом в отобранных образцах почв выявлено существенное преобладание золота в форме анионов. Результат исследования платиносодержащего месторождения золота показал [Мельников и др., 2007, Радомский и др., 2013], что доля платины в горных породах в ионной форме может достигать 12 %.

Для подтверждения возможности перехода под действием электрического поля металлов, в том числе платиноидов, из образцов руд в раствор в ионной форме выполнен лабораторный эксперимент. Ранее другими исследователями [Гольдберг и др. 1982, Алексеев и др., 1981] было изучено извлечение некоторых металлов (исключая платиноиды) из образцов горных пород и руд под действием электрического тока. Представленный ниже эксперимент выполнен по схожей технологии [Сенчина и др., 2013]. Использована емкость вытянутой формы длиной 90 сантиметров с 7 ячейками, отделенными друг от друга полупроницаемыми пергаментными мембранами (круглого сечения диаметром 8 см) с подкисленной дистиллированной водой (рисунок 3.1). В средней ячейке расположен образец дробленой горной породы, содержащей ЭПГ (таблица 3.1). Через электроды, помещенные в крайние ячейки, пропущен электрический ток силой 0.1 А с помощью выпрямителя электрического тока НУ3005LY.

#### Оборудование:

- источник питания – выпрямитель электрического тока НУ3005LY,
- титановый электрод («-»);
- электроды из углепластика (несколько, т.к. требовали замены) («+»);
- емкость с 6 полупроницаемыми пергаментными мембранами вытянутой формы, длиной 90 сантиметров (в данном случае

сконструирована из 7 пластиковых прозрачных бутылок – пергамент расположен в местах стыковки);

- 200 грамм дробленой (размер частиц – менее 1 мм) содержащей ЭПГ породы (таблица 3.1);
- цифровой мультиметр;
- 200 мл концентрированной азотной кислоты,
- индикаторная бумага для контроля кислотности раствора.

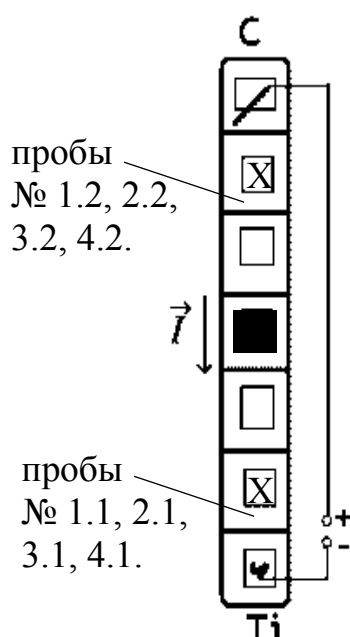


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной лабораторной установки.

С – углепластиковый электрод,

Ti – титановый электрод,

X – ячейки для отбора проб,

■ – ячейка, содержащая 200 грамм дробленой (фракция менее 1 мм) платиносодержащей горной породы.

$\downarrow I$  – направление электрического тока.

Таблица 3.1

Содержание химических элементов в исследуемом образце горной породы\*

Химический элемент	Cr	Fe	Co	Ni	Pd	Ag	Cd	Hf	Pt	Pb	U
Содержания элементов, г/т:	3500	280000	771	9800	0,05	0,16	0,6	0,26	0,01	6,0	0,66

\* по данным ООО «Институт Гипроникель», предоставившего образец.

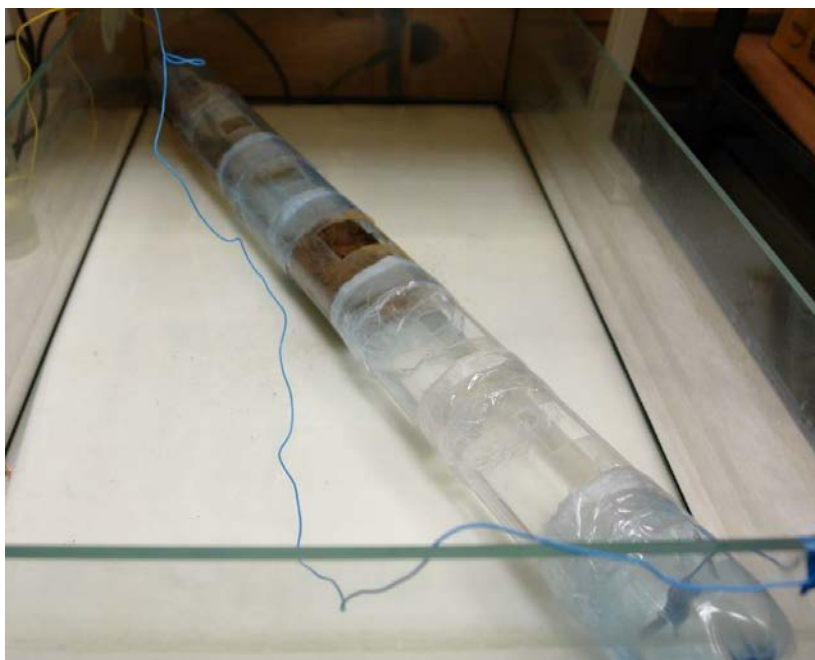


Рисунок 3.2 – Общий вид лабораторной установки

#### Краткое описание хода проведения лабораторного эксперимента

- подготовительный этап 1 – пробный кратковременный (на одни сутки) запуск установки без образца горной породы, с целью выяснения состава фонового раствора (предполагалась возможность засорения элементами, выделяющимися из применённого при конструировании установки герметика; предположение не оправдалось). Содержание платины и палладия в растворе ниже порога чувствительности анализа.
- подготовительный этап 2 – размещение образца дроблёной платиноносной породы в средней ячейке на сутки. Отобранная через сутки проба раствора №0 также не показала наличие платины и палладия в растворе.
- 0 день – начало работы установки с пропуском электрического тока через образец дробленой породы, погруженный в раствор в средней ячейке.
- 1 день – получение проб католита и анолита № 1.1, 1.2.
- 4 день – получены пробы католита и анолита № 2.1, 2.2;
- 10 день – получены пробы католита и анолита № 3.1, 3.2;

Таблица 3.2

Концентрации элементов, перешедших в раствор, в зависимости от времени и направления движения ионов

<b>τ,</b> <b>дней</b>	<b>Cr,</b> мкг/л	<b>Fe,</b> мкг/л	<b>Co,</b> мкг/л	<b>Ni,</b> мкг/л	<b>Pd<sup>1</sup>,</b> мкг/л	<b>Ag,</b> мкг/л	<b>Cd,</b> мкг/л	<b>Pt,</b> мкг/л	<b>Au,</b> мкг/л	<b>Pb,</b> мкг/л	<b>U,</b> мкг/л	<b>Cu<sup>2</sup>,</b> мкг/л	<b>Zn,</b> мкг/л
<b>0</b>	0,7	9,9	0,1	2,7	<0.01	0,23	0,16	<0,002	<0.002	9,7	0,006		
<b>1</b>	37	1371	155	805	0,02	1,51	1,20	0,020	<0.002	98	0,4		
<b>-1<sup>3</sup></b>	0	134	0,4	10	<0.01	0,02	0,20	<0,002	<0.002	1	0		
<b>4</b>	1256	32566	2007	9055	0,19	0,83	3,56	0,030	<0.002	173	11,1	3	19
<b>-4</b>	567	9669	1575	6793	0,04	1,56	3,50	0,026	<0.002	97	8	178	575
<b>10</b>	1063	19136	1883	7202	0,04	0,29	6,00	0,005	<0.002	197	24	287	389
<b>-10</b>	1567	30698	2843	11008	0,03	0,55	9,60	0,013	0,003	213	34	377	692
<b>12</b>	1489	27424	2244	8439	0,07	0,22	5,30	<0,002	<0.002	222	27	332	441
<b>-12</b>	1447	28301	2604	10167	0,03	0,53	8,20	0,017	0,003	245	34	939	603
<b>14</b>	2108	38128	2708	10046	0,07	0,19	5,10	<0,002	<0.002	242	30	329	500
<b>-14</b>	1284	24720	2290	9033	0,03	0,51	6,70	0,018	0,004	364	31	3756	550

8

<sup>1</sup> - изучено содержание только изотопа Pd-108.<sup>2</sup> - ячейки с прочерком показывают отсутствие измерений по техническим причинам.<sup>3</sup> - отрицательные значения «времени» τ (-1, и т. д.) обозначает изъятие проб католита, положительные - анолита.

- 12 день – получены пробы католита и анолита № 4.1, 4.2;
- 14 день – получены пробы № 5.1, 5.2. Отключение установки.

Анализы жидких проб католита и анолита произведены в химико-аналитической лаборатории ООО «Геоэкохим» (таблица 3.2) с помощью ICP-MS.

Произведение длительности проведения эксперимента и применяемого электрического тока является индикатором подобия в моделировании. Плотность тока  $5.2 \text{ А/м}^2$  позволила сократить время эксперимента до 15 дней против 10 тыс. лет при плотности тока  $2 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$  или 100 тыс. лет при  $2 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ .

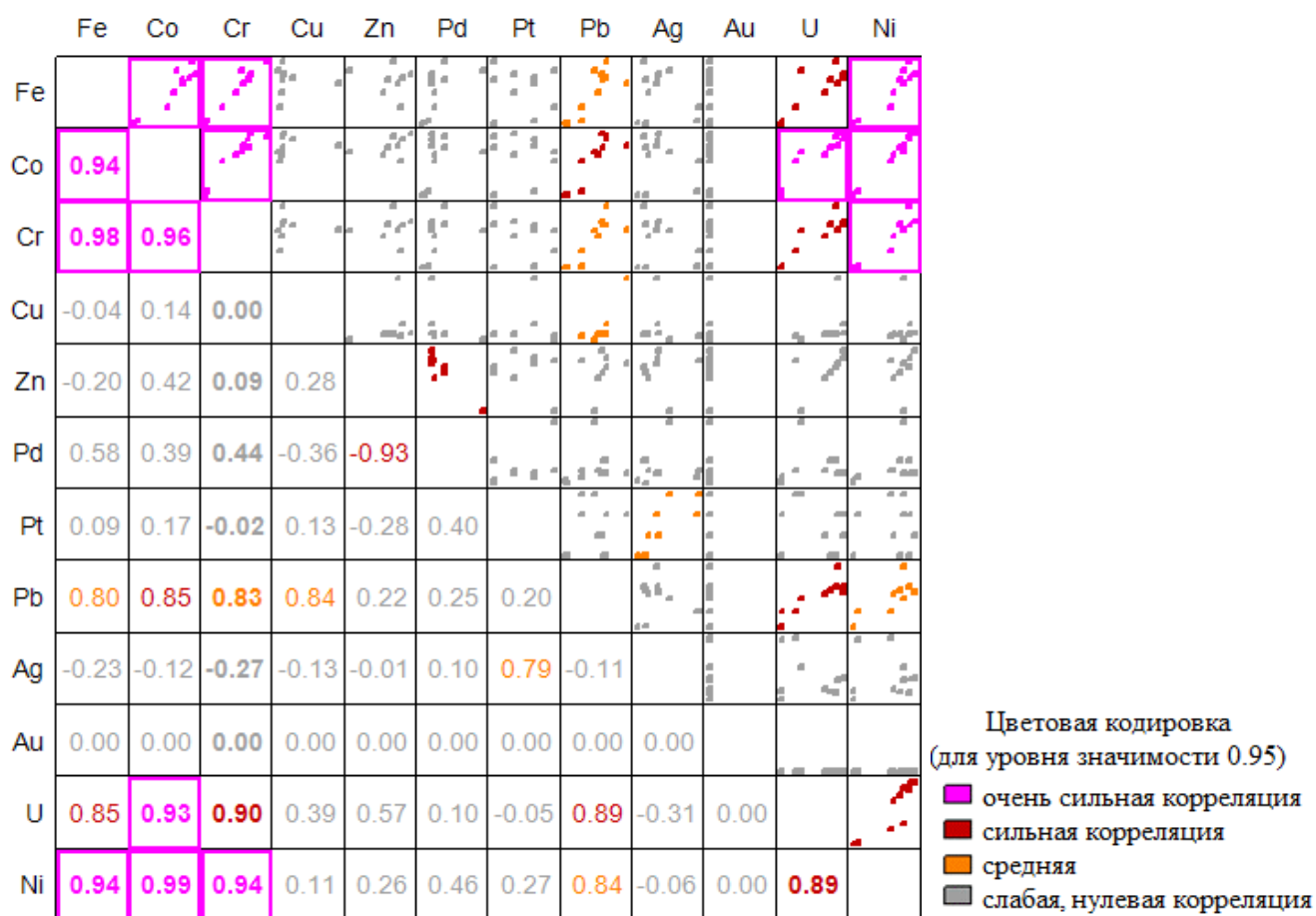


Рисунок 3.3 – Коэффициенты и кросс-плоты парной корреляции для элементов в католите и анолите, демонстрирующие группировки элементов по характеру их поведения при воздействии электрического тока на образцы горных пород

### **3.2 Основные особенности поведения различных металлов и соединений под действием электрического тока**

Рассматривая особенности извлечения других металлов из образцов горных пород под действием электрического тока [Гольдберг и др. 1982, Путиков, 2009], можно заметить, что эти особенности существенно отличаются для одних и тех же элементов при изучении различных типов пород. Возможно, что при этом сказывается каталитическое или ингибирующее воздействие одних соединений на другие, в связи с чем тонкие эффекты от перехода микроэлементов в раствор в ионной форме изменяются. Вследствие этого, выявленные особенности электрохимического извлечения элементов из горных пород одного типа нельзя полностью переносить на другие типы горных пород. Геоэлектрохимических же годографов для элементов платиновой группы (ЭПГ) – зависимостей концентрации извлеченного из горных пород в раствор металла от времени – ранее вовсе получено не было. При изучении закономерностей извлечения из образцов горных пород и перемещения различных металлов и их соединений под действием электрического тока необходимо учесть, что химические элементы с малыми кларками (в т.ч., ЭПГ) не могут быть ведущими в электрохимических системах и вынуждены мигрировать в той обстановке, которая создана ведущими элементами (железо, марганец и др.).

Данные анализа позволили выделить несколько группировок химических элементов по характеру их поведения при воздействии электрического тока. Первая и наиболее существенная по величине коэффициентов корреляции (0.94 – 0.99) группа: Fe – Co – Cr – Ni.

Несколько меньшие коэффициенты корреляции имеет группа U – Co – Cr – Pb (0.89 – 0.93). Указанные элементы склонны перемещаться под действием тока схожим с предыдущей группой образом. Изученные ЭПГ – платина и палладий – характеризуются слабой корреляцией (коэффициент парной корреляции – 0.4). Однако, для платины выявлена связь с серебром (коэффициент корреляции – 0.79). Для остальных элементов корреляция

слабая или нулевая. Для палладия значимый отрицательный коэффициент корреляции (-0.93) определен для пары с цинком (по техническим причинам, пробы изучены на содержание Zn частично), слабые положительные значения характеризуют отношения с железом (0.58), никелем (0.46), хромом (0.44), кобальтом (0.39). Слабый коэффициент корреляции палладия и меди отрицателен (-0.36) но пробы также изучены на содержание Cu частично. Содержание золота в исходной пробе очень низкое и электрохимическое извлечение для данного металла не показательно.

Рассмотрим детальней кинетику перехода некоторых элементов из закрепленной в образце горной породы формы в подвижную форму нахождения в растворе. Зависимости показаны на нескольких графиках из-за существенного различия диапазона изменения концентраций металлов, а также для демонстрации изменения текущего содержания подвижной формы и общей доли элемента, перешедшей в раствор и характеризующей суммарное извлечение металла. Извлечение в раствор железа, кобальта, никеля, хрома является ступенчатым для проб и католита и анолита. Вероятно, это характеризует извлечение металлов сначала из относительно слабозакрепленной формы нахождения их в твердой фазе образца. Следующая ступень отвечает извлечению из минеральной формы, обладающей более прочными связями с указанными металлами.

Сложность теоретического обоснования перехода ЭПГ в подвижную форму в растворе связана со свойственным для ЭПГ явлением комплексообразования. Растворимость благородных металлов в воде характеризуется нормальными стандартными окислительно-восстановительными потенциалами  $E^\circ$ . Благородные металлы обладают низкой реакционной способностью в реакциях окисления с переходом в растворимую форму и замыкают электрохимический ряд активности металлов со значениями  $E^\circ = + (0.45-1.85) \text{ В}$  [Левин, 1972]. Наличие ионов комплексообразователей, формирующихся в химически сложных природных условиях, позволяет протекать таким реакциям, которые согласно

нормальным значениям  $E^\circ$  протекать не должны [Радомский и др, 2010]. В то же время, за счет пассивирующего воздействия образующихся на поверхности плёнок различного состава, имеется и обратный эффект. Для ионных форм платины значение стандартного окислительно - восстанови-

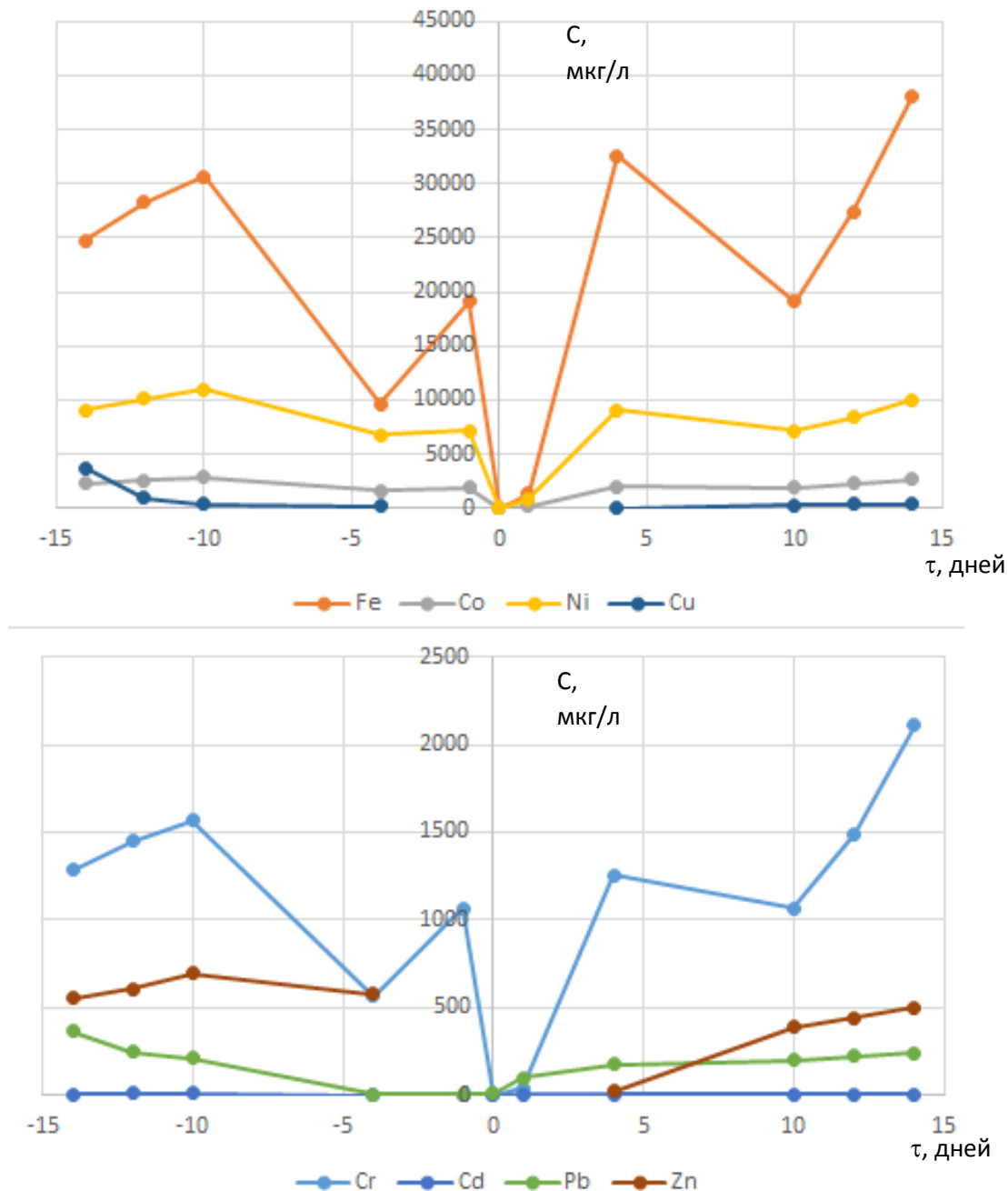


Рисунок 3.4 – Концентрации некоторых элементов, перешедших из навески раздробленной твердой горной породы в раствор под действием электрического тока. (Здесь и далее ось «отрицательных значений» времени обозначает изъятие проб католита, «положительных» - анолита)

-тельного потенциала в присутствии комплексообразователей, распространенных в геологической среде, лежит в диапазоне  $E^{\circ} = + (150 - 980)$  мВ [Радомский и др, 2013]. Тем не менее, рассмотрение экспериментальных данных является более практически применимым в случае изучения естественных условий - многокомпонентной среды. Кроме того, протекание тока вызывает изменение Eh и pH среды, что также значительно влияет на растворимость ЭПГ при неполной буферизации раствора.

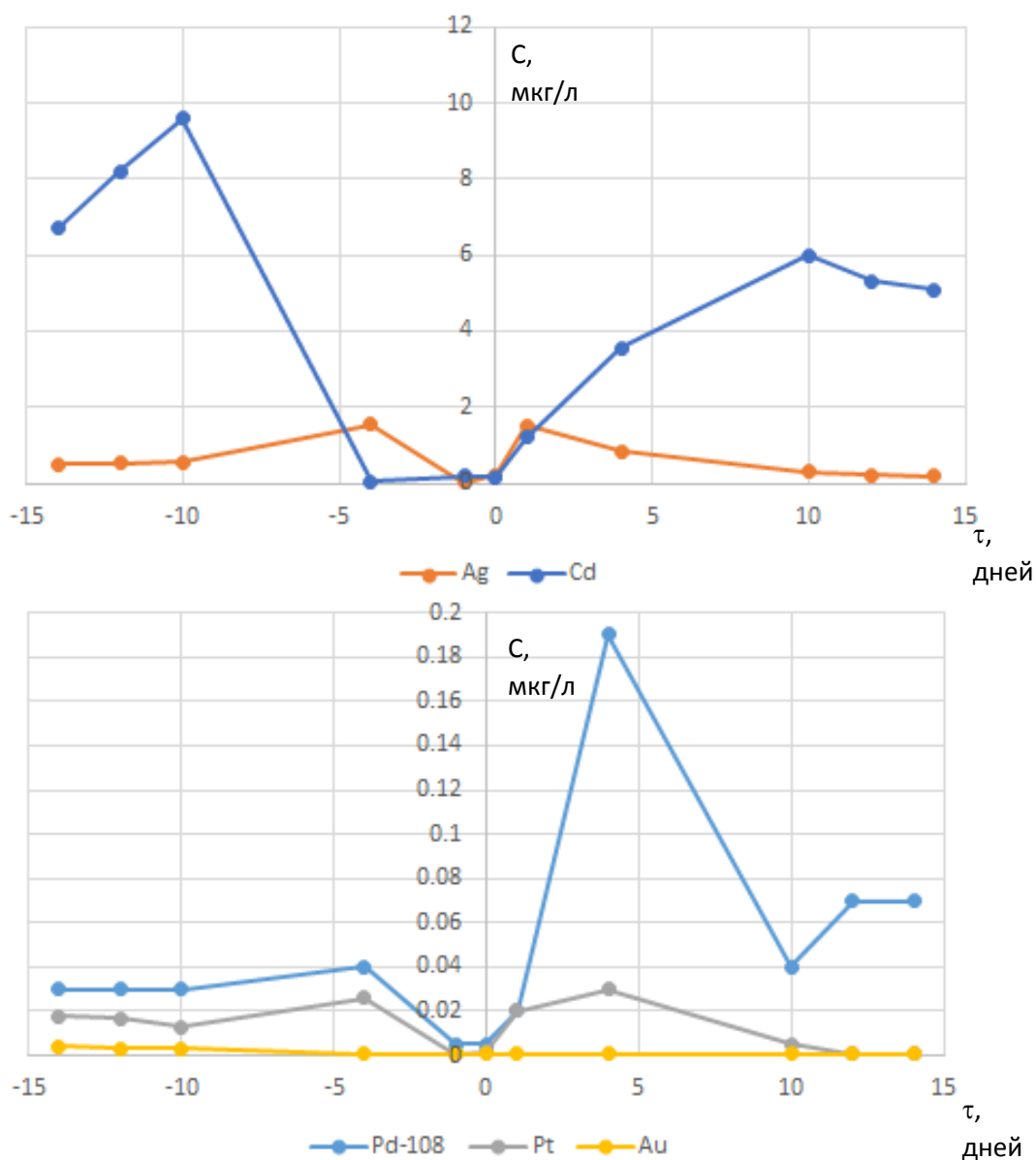


Рисунок 3.5 – Переход некоторых элементов из навески раздробленной твердой горной породы в раствор под действием электрического тока.

В результате эксперимента по извлечению платиноидов в раствор под действием электрического тока получены зависимости концентраций Pt, Pd в растворе от времени протекания тока с учетом состава пород, содержащих естественные комплексообразователи в соответствующих натурным концентрациях. Среди ЭПГ по техническим причинам изучены концентрации в растворе только платины и палладия (изотоп 108) и на графиках 3.6-3.7 продемонстрировано сравнение с серебром, золотом и кадмием.

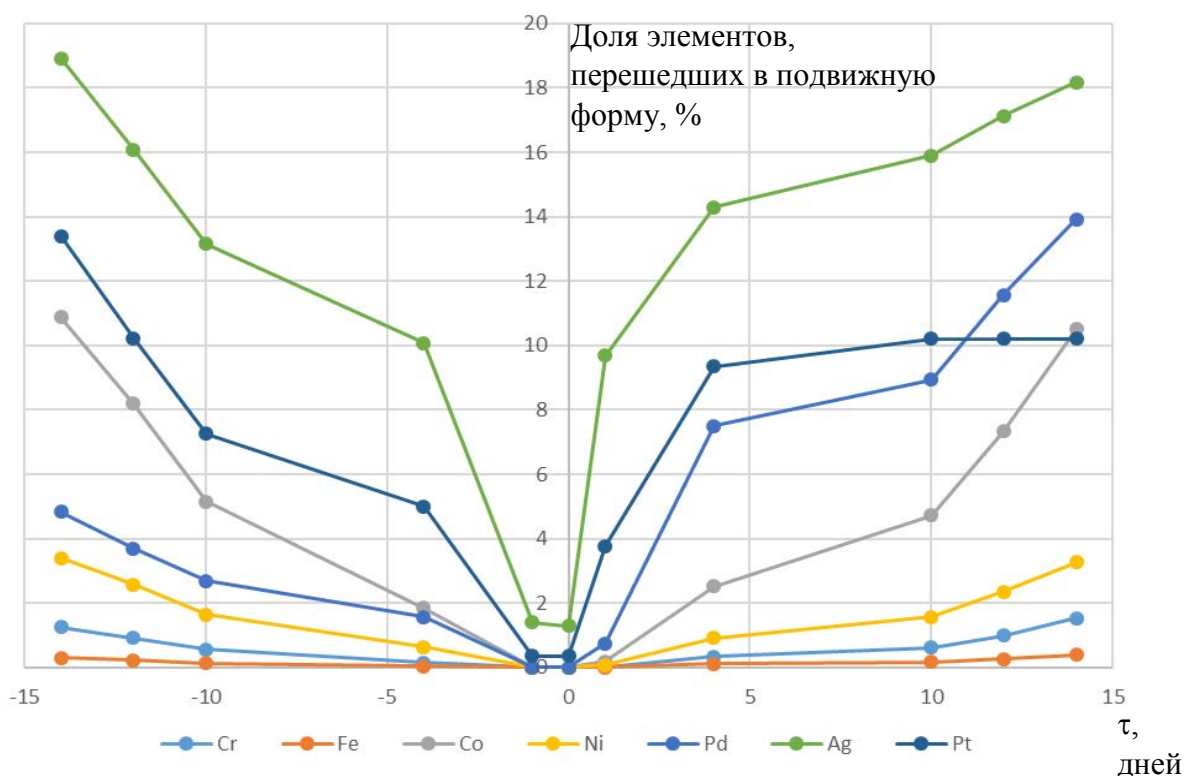


Рисунок 3.6 – Общий (интегральный) переход некоторых элементов из навески твердой раздробленной горной породы в раствор под действием электрического тока (в процентах от исходной массы в горной породе)

Результат показывает значительную долю палладия и платины, перешедших в раствор под действием электрического тока (19 и 24 %). Доля перешедших в раствор элементов определена как отношение массы вещества в растворе к массе вещества в исходной пробе. Масса элементов в растворе получена исходя из предположения о том, что в данный момент времени концентрация элемента в растворе постоянная во всем объеме католита либо

анолита. Масса элементов в образце определена как произведение содержания элемента в породе и массы образца. Таким образом, под действием ЕП может переходить в растворенную форму порядка 20 % платины и палладия, тогда как в обычных условиях – без влияния электрического тока – доля указанных металлов в растворенной форме не превышает долей процента.

Если же полагать, что первый локальный максимум концентрации элемента в растворе соответствует перемещению элемента под действием электрического тока из слабозакрепленной формы в образце в раствор с момента включения тока, можно грубо оценить значение электрической подвижности элементов. Это не входило в задачу эксперимента. Для элементов (см. рисунок 3.4 – 3.5) первый локальный максимум концентрации элемента в ячейке, отстоящей на 20 см от ячейки с образцом, соответствует времени 2-10 дней при средней напряженности поля 30 мВ/м. Приблизненные оценки электрической подвижности элементов составляют в таком случае  $1-3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , что согласуется с известным для других элементов диапазоном значений электрической подвижности.

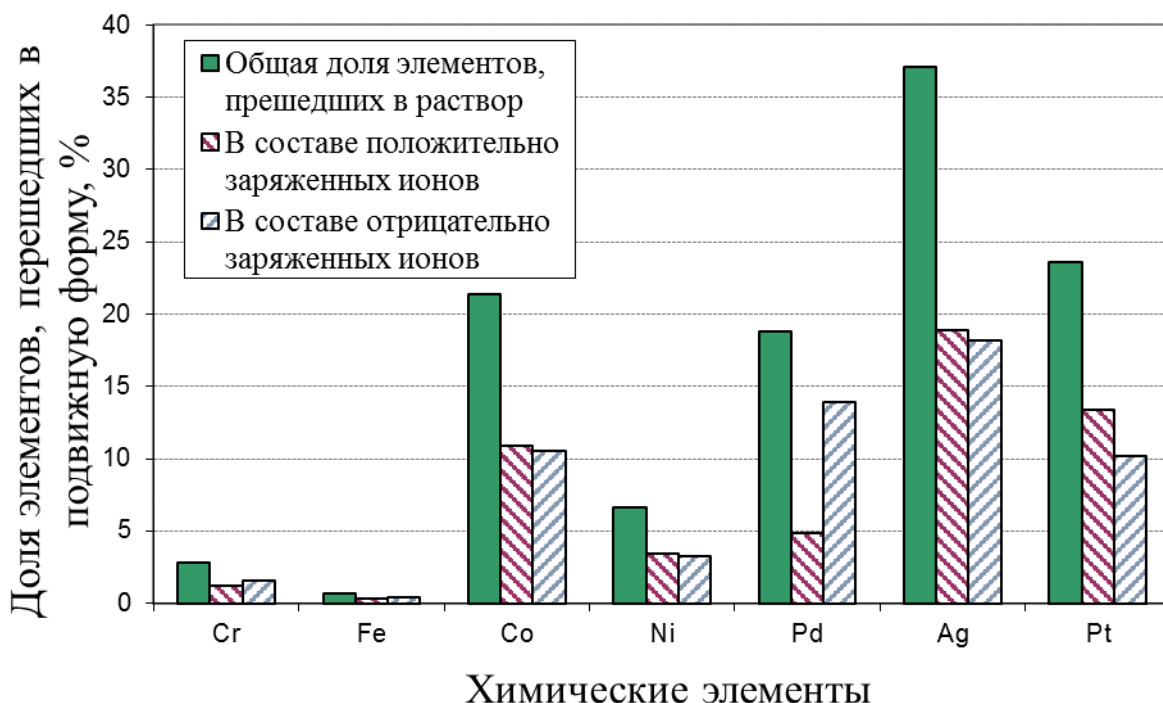


Рисунок 3.7 – Соотношение доли химических элементов, передвигающихся в составе положительно и отрицательно заряженных соединений

Моделирование процессов воздействия ЕП на платиносодержащую горную породу показало возможность перехода платиноидов из закрепленной формы в подвижную в составе комплексных ионов как положительного, так и отрицательного электрического заряда. Массовая доля палладия в анолите превышает в 2.88 раз долю палладия в католите, т.е. превалирует переход в раствор в форме аниона. Для платины в растворе незначительно (в 1.3 раза) катионная форма нахождения преобладает над анионной. Данное наблюдение может отображаться в зональности распределения подвижных форм платины и палладия в областях интенсивного влияния ЕП. Рассмотренные зависимости показывают, что при значительной интенсивности ЕП и существенной роли миграции под действием электрического тока в перемещении п.ф. ЭПГ, палладий должен формировать несколько более широкие ореолы рассеяния подвижных форм, чем платина. При формировании ореолов путем естественной ионной флотации и при единстве источника п.ф. Pd и Pt, значительной разницы в форме аномалий этих элементов наблюдаться не будет.

В стандартных условиях (без влияния ЕП) наблюдается следующий порядок растворимости ЭПГ: Pd>Pt, [Suhong et al, 2009, Радомский и др, 2010]. Результат проведенного эксперимента показывает обратный порядок при воздействии электрического тока на горную породу, содержащую ЭПГ. Равновесные концентрации благородных металлов в растворе составляют при нормальных условиях  $10^{-10}$ - $10^{-15}$  мкг/л и зависят от состава растворов (однако, возрастают на порядки при некоторых значениях концентрации гидроксил-иона), Eh, pH [Плюснина и др., 2009, Радомский и др, 2013]. В естественных условиях (в водах рек Карелии) значения содержаний платины и палладия составляют соответственно 0.001 и 0.005 мкг/л [Лазаренков и др., 1996]. При наличии ионов комплексообразователей в растворе преобладают комплексные ионы, содержание благородные металлы (M):  $[MCl_6]^{2-} > [MCl_4]^{2-} \gg [MCl_6]^{3-} > M^{n+}$  [Dubiella-Jackowska, et al. 2007].

Эффект влияния ЕП на миграцию ЭПГ может помочь объяснить некоторые результаты изучения подвижных форм элементов, в том числе, отрицательные. Так, например, геологическая служба Онтарио (Канада) провела исследование методом частичного извлечения металлов на медно-никелевом с ЭПГ месторождении [Dyer et al., 2007]. Результаты показали

значительные концентрации подвижных форм Cu, Ni и Cr. Однако, не было отмечено аномалий содержания в приповерхностных грунтах подвижных форм нахождения платиноидов. Вероятно, для данного участка не характерно наличие высокоамплитудных аномалий ЕП или других факторов, катализирующих переход ЭПГ в растворенную форму, и медь, никель, хром образовали растворенные формы, в то время как платиноиды перешли в поровый раствор в очень малых концентрациях, соответствующих равновесным без дополнительного влияния.

Результат подтверждает отмеченный ранее [Радомский и др, 2013] факт геохимической двойственности благородных металлов: с одной стороны, в ионных формах эти металлы подвижны и легко мигрируют во внешней среде, с другой стороны, в минеральной форме – устойчивы и проявляют тенденцию к накоплению.

**Выводы к главе 3.** Воздействие ЕП на минералы металлов платиновой группы заключается в преобразовании форм нахождения платиноидов в подвижные. Ориентировочно, до 20 % платины и палладия может под воздействием постоянного электрического тока из закрепленной (в твердой матрице образца горной породы) формы переходить в растворенную форму нахождения.

## **Глава 4 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ В СТРУЙНЫХ ОРЕОЛАХ РАССЕЙНИЯ**

### **4.1. Гипотезы формирования струйных ореолов рассеяния подвижных форм химических элементов**

Методы изучения ореолов повышенных концентраций подвижных форм химических элементов зародились и начали развиваться в СССР. В 90-х годах XX века повышенный интерес к этим методам начал проявляться и в других странах. В первую очередь, надо отметить Китай, США, Канаду, Австралию. Критика и усовершенствование методов шли параллельно, и отрицательные отзывы [Менчинская и др., 2013, Hoover et al., 1997, Hodges, 2005, Mokhtari et al., 2009] давали толчок к большему количеству опытных работ на новых участках. Обоснование процессов формирования ореолов повышенных концентраций подвижных форм элементов практически независимо проводили российские и зарубежные специалисты. В итоге было разработано несколько взаимосвязанных гипотез. В целом, автор склоняется к теории образования указанных ореолов посредством субвертикальных струйных ореолов рассеяния, формирующихся по механизму ионной флотации подвижных форм элементов на микроскопических пузырьках плохорастворимых газов, поднимающихся к поверхности под действием силы Архимеда и имеющих глубинное происхождение. Так как плотность пузырьков газа меньше плотности подземных вод, то пузырьки поднимаются вверх по разрезу. Микроскопический размер пузырьков позволяет проникать даже сквозь толщи водоупоров. Двойной электрический слой на контакте поверхности пузырька с вмещающей средой «зацепляет» простые и комплексные ионы и пузырек «тянет» их с собой вверх. Идея механизма формирования струйных ореолов рассеяния посредством газопузырьковой конвекции сформулирована и развита при участии научного руководителя автора диссертации. Подробности теоретического и экспериментального обоснования теории можно почерпнуть из работ руководителя научного руководителя автора - О.Ф. Путикова и других исследователей [Рысс, 1973,

Рысс и др., 1987, Путиков и др., 1994, Putikov et al., 2000, Путиков, 2009, Штокаленко и др., 2006, 2009, Марченко, 1998, 2008, Alekseev et al., 2016].

В работе [Алексеев и др., 2005ф] предложено подробное описание основных особенностей, выявляемых геоэлектрохимическими методами изучения наложенных ореолов рассеяния, по отношению к стандартной литохимической съемке, основанной на изучении валовых содержаний химических элементов. Основные выводы из рассмотренных работ можно сформулировать следующим образом.

1. Струйные ореолы рассеяния распространяются на значительные расстояния в субвертикальном направлении, что позволяет обеспечить большую глубинность исследований...
2. Аномально повышенные концентрации металлов в наложенных ореолах, как правило, приурочены к проекции концевых частей рудных тел на дневную поверхность... Форма наложенных ореолов может изменяться под действием тектонических нарушений пострудного характера...
3. Элементный состав наложенных ореолов соответствует вещественному составу руд. ...
4. Аномалиями геоэлектрохимических методов выделяются не только сами рудные объекты, но и сопряженные с ними структурно-тектонические элементы земной коры, в частности, разломы ...

Обратимся и к другим гипотезам, представленным в зарубежной литературе. Основным источником материалов по данной теме является проект, посвященный глубинной геохимии Deep-Penetrating Geochemistry project, история которого начинается с 1997 года [appliedgeochemists.org...]. В публикациях, представленных в рамках указанного проекта, указывается, что с формированием ореолов подвижных форм элементов может быть связан целый ряд причин – механический перенос со льдом, водой и ветром; перенос в растворенном виде путем диффузии, конвекции, под действием капиллярных, биологических сил, миграции в электрическом поле.

В работе [Sibson, 1975] рассмотрен эффект «сейсмической закачки» минерализованных грунтовых вод вверх – где поровые воды поднимаются выше под влиянием сжимающихся под действием микросейсм и землетрясений пор. С поровыми водами переносятся растворенные формы элементов из области, приближенной к рудам, к поверхности.

В ряде работ значимым механизмом переноса подвижных форм предполагается миграция ионов – т.е. перемещение их непосредственно под действием естественного электрического поля вблизи окисляющихся сульфидных руд [Hamilton, 2007, Matthew, 2009].

В публикациях приводятся также гипотезы формирования наложенных ореолов рассеяния под действием перекрёстной диффузии (под действием градиента концентрации другого растворенного компонента), термо- и бародиффузии [Штокаленко и др., 2009].

В ряде работ авторы связывают формирование струйных ореолов рассеяния с капиллярным подъемом и приповерхностным испарением почвенной влаги в пределах зоны аэрации [Mann, 2005].

В работах Гольдберга И.С. наблюдаемые ореолы повышенных концентраций подвижных форм элементов обоснованы движением «быстрых ионов» [Goldberg, 1988].

Механизм квазиконвекции на пузырьках плохо растворимых газов критикуется в публикациях [Mann at al., 2005] ввиду задержки пузырьков на частицах твердой фазы пород. Однако, в работе [Алексеев и др., 2005ф], оценена скорость всплывания микропузырьков. В обводненных глинах эта величина составляет порядка 1 см/год. Скорость всплывания достигает величины 1 м/год в рыхлых отложениях, сложенных пылеватыми частицами, в цементированных алевритовых породах, в карбонатных породах скрытокристаллической структуры, т.е. в самых распространенных типах осадочных пород. Лабораторные эксперименты выявили также роль вибрации в прохождении потока пузырьков через водонасыщенную проницаемую среду. Поток останавливался молекулярными силами при

отсутствии вибрации, «вытряхивающей» пузырьки из пор. В природе указанную роль выполняет сейсмический шум. Способность газовых пузырьков переносить подвижные формы химических элементов подтверждается лабораторными экспериментами О.Ф. Путикова [Алексеев и др., 2005ф, Путиков, 2009].

Для уточнения роли ЕП не только в растворении, но и в перемещении платиноидов, необходимо установить соотношение скоростей ионов, перемещающихся под действием ионной флотации и под действием миграции в электрическом поле. Ионы, зафиксированные на микропузырьках плохо растворимых газов, будут подниматься субвертикально. В соответствии с силой Архимеда и законом Стокса, выражение, описывающее скорость подъема пузырька газа в воде  $v_{и.ф.}$ , демонстрирует зависимость от радиуса пузырька  $r_0$  (при постоянстве плотности газа, плотности и вязкости жидкости) [Путиков, 2009]:

$$v_{и.ф.} = \frac{2}{9} \frac{g(\rho - \rho_0)}{\eta} r_0^2, \quad (4.1)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $9.81 \text{ м/с}^2$ ;

$\rho$  - плотность жидкости, для воды –  $10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

$\rho_0$  - плотность газа, образовавшего пузырек, для водорода (н.у.) –  $0.09 \text{ кг/м}^3$ ;

$\eta$  - вязкость жидкости, для воды при  $5^\circ\text{C}$  –  $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ .

Для прохождения пузырька сквозь породу необходимо, чтобы диаметр пузырька не превышал раскрытие микротрещин или радиус пор  $r$  горной породы. При росте величины отношения радиуса пузырьков к радиусу пор, скорость подъема пузырьков в пористой водонасыщенной среде растет до определённого максимума ( $v_{и.ф.макс} = 4.9 \cdot 10^5 \cdot r_0^2$  при  $r_0 = 0.104 \cdot r$ ) и далее падает до нуля [Путиков, 2009]. Этим обусловлен выбор диапазона значений радиуса пузырька  $r_0$  для определения численных значений скорости – от 0.01 до 1000 мкм. Минимальные значения этого параметра соответствуют тонкодисперсным глинистым породам. Породы ультраосновных массивов

характеризуются большими значениями в связи с пористостью, обеспеченной трещиноватостью.

Под действием ЕП миграция ионов происходит по направлению токовых линий. Скорость движения иона под действием миграции в электрическом поле ( $v_m$ ) пропорциональна модулю напряженности электрического поля  $E$  и коэффициенту электрической подвижности иона  $\mu$ :

$$v_m = \mu E. \quad (4.2)$$

Электрическая подвижность является индивидуальной характеристикой ионов, но для большинства катионов и анионов в водных растворах при стандартных условиях изменяется в пределах  $(4-8) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  [Огурцов, 2003]. Электрическая подвижность ионов в горных породах изучена Ю.С. Рыссом и составляет  $0.01 - 1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{ч})$  [Рысс, 1983]. Данные об электрической подвижности комплексных ионов, содержащих платиноиды, в публикациях встречены не были. Но, очевидно, эти величины не превышают указанных значений ввиду большего размера комплексного иона. Приближенные оценки указанного параметра, которые можно получить по данным эксперимента для лабораторных условий (глава 3), составляют  $(1-3) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Напряженность естественного электрического поля изменяется в широких пределах и растет с приближением к источнику. Предельным значением напряженности, которую можно использовать при расчете максимальной скорости движения иона под действием миграции в электрическом поле, примем  $1 \text{ В/м}$ .

Сопоставим графически скорости ионов, перемещающихся под действием ионной флотации и под действием миграции в электрическом поле при реально допустимых изменениях параметров: радиуса пузырьков и напряженности естественного электрического поля (показаны штриховкой на рисунке 4.1). Скорости соизмеримы в рассматриваемом диапазоне параметров. Для крайних, среди изученных, значений напряженности поля ( $0.05 \text{ В/м}$ ) и при радиусе пузырьков газа менее  $0.1 \text{ мкм}$ , скорость движения

ионов под действием миграции превышает скорость, которую приобретают ионы, перемещаясь под действием ионной флотации. Однако, для наиболее вероятных ожидаемых значений параметров,  $E = 0.001$  В/м,  $r_0 = 0.3$  мкм (показано стрелками на рисунке 4.1), скорость перемещения ионов в составе струйного ореола рассеяния на три порядка превышает скорость, приобретаемую под влиянием электрического поля.

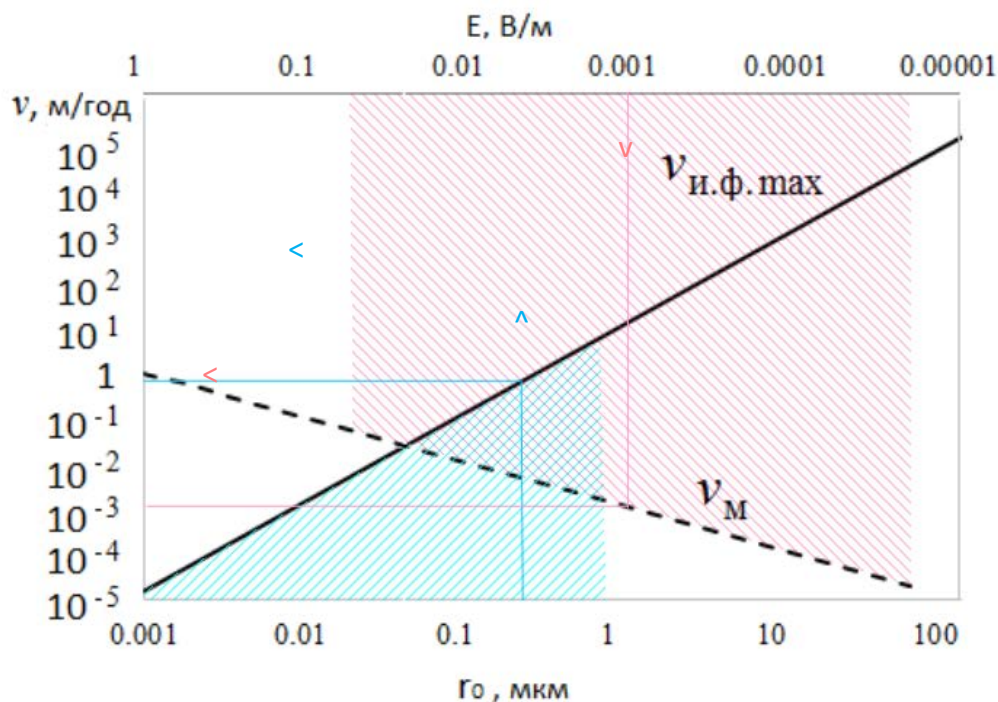


Рисунок 4.1 – Скорости ионов, перемещающихся под действием ионной флотации  $v_{и.ф. max}$  и под действием миграции в электрическом поле  $v_M$  в породах в зависимости от радиуса пузырьков газов (ось абсцисс внизу) и напряженности поля (ось абсцисс вверху) соответственно

Соответственно, влияние электрического поля на движение иона существенно лишь в локальной области вблизи мощного источника ЕП. В большинстве случаев скорость движения иона в составе пузырька намного больше, чем скорость перемещения под действием электрического поля. В результате ионы не успевают перемещаться на достаточное расстояние под действием ЕП, а фиксируются на поверхности пузырька и увлекаются в движение вверх. Только в непосредственной близости от источника ЕП (размеры этой области зависят от величины ЭДС источника, от УЭС горной

породы) преобладает перемещение ионов под действием тока и при этом возможно накопление химических элементов в некоторых областях вблизи источника. Примерные размеры указанной области можно оценить как первые метры, т.к. напряженность поля ЕП уменьшается с возрастанием расстояния от источника достаточно быстро (для точечного заряда – обратно пропорционально квадрату расстояния).

Таким образом, формирование струйных ореолов рассеяния связано с явлением природной ионной флотации, которое представляет собой захват химических элементов в подвижных формах нахождения всплывающими газовыми пузырьками и перенос ионов на поверхности раздела жидкой и газообразной фаз пузырька. На взгляд автора, данная теория успешно объясняет наблюдаемые результаты.

Теория требует наличия вблизи рудных тел соответствующих элементов в ионной форме, что в случае платиноидов является верным в узких физико-химических условиях, т.к. данные металлы испытывают весьма слабое взаимодействие с окружающей средой и при обычных условиях в растворенном виде образуются крайне малые концентрации. Указанная проблема ликвидируется, если учесть воздействие ЕП на извлечение ЭПГ из закреплённой формы в легкоподвижную.

Еще один момент требует отдельного рассмотрения – возможность распространения струйных ореолов выше уровня верхнего насыщенного водами горизонта (в зоне аэрации, где поры насыщены газовой фазой, эта зона соответствует верхней части разреза). Модель распространения подвижных форм по механизму естественной ионной флотации встречает здесь очевидные ограничения – пузырьки «сливаются» с газовой фазой и прекращают существование, оставляя подвижные формы на границе зоны аэрации и области насыщения подземными водами. В этом случае перераспределение подвижных форм возможно посредством капиллярных сил и испарения. Скорость этого перемещения соизмерима со скоростью под действием естественной ионной флотации [Mann, 2005, Умарова, 2011].

Далее продолжим рассмотрение подвижных форм элементов в струйном ореоле рассеяния в области от рудного объекта до уровня насыщения пор газовой фазой с физико-математической точки зрения, с целью количественной оценки особенностей формирования струйного ореола рассеяния в толще горных пород.

#### 4.2 Физико-математическое обоснование процессов перемещения подвижных форм химических элементов в горных породах

Распределение концентрации подвижных форм элемента –  $C$  и концентрации закрепленных в твердой фазе форм –  $q$  в случае реакции их с твердой фазой согласно уравнению необратимой реакции кинетики второго порядка [Голубев и др., 1968] подчиняется системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных вида [Путиков, 2009]:

$$\nabla^2 C - \frac{1}{D} \vec{v} \cdot \text{grad} C - \frac{\beta C (q_{\max} - q)}{D} - \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial \tau} = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = \beta C (q_{\max} - q), \quad (4.4)$$

где  $\vec{v}$  - скорость квазиконвекции подвижной формы элемента, вызванной естественной ионной флотацией его в пористых горных породах,

$D$  - коэффициент диффузии подвижной формы элемента в горных породах,

$\tau$  - время,

$\beta$  - константа кинетики необратимой гетерогенной реакции,

$q_{\max}$  - максимально возможная концентрация элемента в твердой фазе.

Введем декартову систему координат  $(x, y, z)$  с началом, расположенным на глубине залежи, и осью  $z$ , направленной вертикально вверх. Учтем, что скорость квазиконвекции  $\vec{v}$  имеет только вертикальную составляющую  $v$ .

Тогда при начальном условии

$$q \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (4.5)$$

система дифференциальных уравнений (4.3), (4.4) может быть сведена к одному нелинейному интегро-дифференциальному уравнению вида [Путиков, 2009]:

$$\nabla^2 C - \frac{v}{D} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\beta q_{\max}}{D} C e^{-\beta \int_0^{\tau} C(x, y, z, \xi) d\xi} - \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial \tau} = 0. \quad (4.6)$$

Для решения уравнения (4.6) введем новую функцию  $Y$  соотношением

$$Y = \int_0^{\tau} C(x, y, z, \xi) d\xi. \quad (4.7)$$

Тогда

$$C = \frac{\partial Y}{\partial \tau}. \quad (4.8)$$

Подставляя выражения (4.7) и (4.8) в уравнение (4.6), получаем

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\nabla^2 Y) - \frac{v}{D} \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial Y}{\partial z} \right) - \frac{\beta q_{\max}}{D} \frac{\partial Y}{\partial \tau} e^{-\beta Y} - \frac{1}{D} \frac{\partial^2 Y}{\partial \tau^2} = 0. \quad (4.9)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (e^{-\beta Y}) = -\beta e^{-\beta Y} \frac{\partial Y}{\partial \tau}, \quad (4.10)$$

уравнение (4.9) запишем в виде

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \nabla^2 Y - \frac{v}{D} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{q_{\max}}{D} e^{-\beta Y} - \frac{1}{D} \frac{\partial Y}{\partial \tau} \right] = 0. \quad (4.11)$$

Интегрируя уравнение (4.11) по  $\tau$ , находим

$$\nabla^2 Y - \frac{v}{D} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{q_{\max}}{D} e^{-\beta Y} - \frac{1}{D} \frac{\partial Y}{\partial \tau} = M; \quad (4.12)$$

где  $M$  - произвольная постоянная, не зависящая от времени  $\tau$ .

Рассмотрим одномерный случай, когда

$$C = C(z, \tau), \quad Y = Y(z, \tau).$$

Введем новые переменные

$$\begin{aligned} \eta &= z - v\tau, \\ t &= D\tau. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (4.12) примет вид

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial^2 Y}{\partial \eta^2} - M + \frac{q_{\max}}{D} e^{-\beta Y}. \quad (4.13)$$

Точное решение нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных (4.13) имеет вид [Полянин и др., 2002]:

$$Y(\eta, t) = \frac{2}{\beta} \ln \left[ \sqrt{\frac{q_{\max}}{DM}} + N e^{\left( -\sqrt{\frac{M\beta}{2}} \eta - \frac{M\beta}{2} t \right)} \right], \quad (4.14)$$

где  $N$  - произвольная постоянная.

Переходя к старым переменным, получаем

$$Y(z - v\tau, \tau) = \frac{2}{\beta} \ln \left[ \sqrt{\frac{q_{\max}}{DM}} + N e^{\left( -\sqrt{\frac{M\beta}{2}} (z - v\tau) - \frac{M\beta D}{2} \tau \right)} \right]. \quad (4.15)$$

С учетом соотношения (4.8) находим

$$C(z, \tau) = \frac{2}{\beta} \frac{N \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \left( v - D \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \right) e^{-\sqrt{\frac{M\beta}{2}} \left[ z - \left( v - D \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \right) \tau \right]}}{\sqrt{\frac{q_{\max}}{DM}} + N e^{-\sqrt{\frac{M\beta}{2}} \left[ z - \left( v - D \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \right) \tau \right]}}. \quad (4.16)$$

Как видно из выражения (4.16), распределение концентрации подвижной формы нахождения элемента описывается уравнением типа «бегущей волны» со скоростью «фронта» волны  $v_\phi$ , определяемой выражением

$$v_\phi = v - D \sqrt{\frac{M\beta}{2}}. \quad (4.17)$$

С учетом соотношения (4.17), выражение (4.16) принимает вид

$$C(z, \tau) = \frac{2N(v - v_\phi) v_\phi e^{-\sqrt{\frac{M\beta}{2}} (z - v_\phi \tau)}}{\beta D \left[ \sqrt{\frac{q_{\max}}{DM}} + N e^{-\sqrt{\frac{M\beta}{2}} (z - v_\phi \tau)} \right]}. \quad (4.18)$$

Как видно, выражение (4.18) удовлетворяет нулевому краевому условию на бесконечности

$$C \left| \begin{array}{l} \tau < \infty \\ z \rightarrow \infty \end{array} \right. \rightarrow 0. \quad (4.19)$$

Другие краевые условия примем в виде:

$$C \Big|_{\substack{z < \infty \\ \tau \rightarrow \infty}} \rightarrow C_0, \quad (4.20)$$

$$C \Big|_{(z - v_\phi \tau) = 0} = \frac{C_0}{2}, \quad (4.21)$$

где  $C_0$  - максимальная концентрация элемента в подвижной форме его нахождения,  $C_0/2$  - концентрация элемента в подвижной форме на «фронте» бегущей волны.

Подставляя выражение (4.16) в краевые условия (4.20) и (4.21), получим при условии

$$v - D\sqrt{\frac{M\beta}{2}} > 0 \quad (4.22)$$

систему алгебраических уравнений для нахождения произвольных постоянных  $M$  и  $N$ :

$$\frac{2}{\beta} \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \left( v - D\sqrt{\frac{M\beta}{2}} \right) = C_0, \quad (4.23)$$

$$\frac{2}{\beta} \frac{N \sqrt{\frac{M\beta}{2}} \left( v - D\sqrt{\frac{M\beta}{2}} \right)}{\sqrt{\frac{q_{\max}}{DM} + N}} = \frac{C_0}{2}. \quad (4.24)$$

Решая систему уравнений (4.23) - (4.25), получим

$$\sqrt{\frac{M\beta}{2}} = \frac{v}{2D} \pm \sqrt{\left( \frac{v}{2D} \right)^2 - \frac{\beta C_0}{2D}}. \quad (4.25)$$

С учетом равенства (4.17) имеем

$$v - v_\phi = D \sqrt{\frac{M\beta}{2}} = \frac{v}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{v}{2} \right)^2 - \frac{\beta C_0 D}{2}}. \quad (4.26)$$

С учетом условия, вытекающего из уравнения (4.3):

$$v_\phi \Big|_{\beta = 0} = v, \quad (4.27)$$

выбираем справа в равенстве (4.26) знак «минус», что дает

$$v - v_\phi = \frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{\beta C_0 D}{2}}. \quad (4.28)$$

Так как  $v$  и  $v_\phi$  - действительные числа, то должно выполняться неравенство:

$$\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{\beta C_0 D}{2} \geq 0 \quad (4.29)$$

или

$$v \geq \sqrt{2\beta C_0 D}. \quad (4.30)$$

С учетом указанных соотношений имеем

$$N = \frac{C_0 D \beta}{4} \sqrt{\frac{\beta D q_{\max}}{2}} \frac{1}{(v - v_\phi) \left[ (v - v_\phi) v_\phi - \frac{\beta D C_0}{4} \right]}. \quad (4.31)$$

Тогда выражение (4.18) может быть записано в виде

$$C(z, \tau) = \frac{2}{\beta D} \frac{N (v - v_\phi) v_\phi e^{-\frac{(v - v_\phi)}{D}(z - v_\phi \tau)}}{\left[ \frac{1}{(v - v_\phi)} \sqrt{\frac{\beta D q_{\max}}{2}} + N e^{-\frac{(v - v_\phi)}{D}(z - v_\phi \tau)} \right]}, \quad (4.32)$$

где значения  $v_\phi$  и  $N$  определяются выражениями (4.28) и (4.31).

При условии (4.30) скорость продвижения «фронта» волны  $v_\phi$ , как видно из (4.28), определяется выражением

$$v_\phi = \frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{\beta C_0 D}{2}}. \quad (4.33)$$

Таким образом, показано, что распределение концентрации подвижных форм элементов в струйном ореоле рассеяния (для одномерного случая) происходит аналогично движению волны с постоянной скоростью продвижения «фронта» волны повышенных концентраций. Эта скорость составляет примерно 3 км/млн.лет при указанных на рисунке 4.2 параметрах. Скорость продвижения «фронта» волны при постоянной скорости квазиконвекции зависит от комплексного параметра  $\beta C_0 D$ . Т.е. чем

интенсивнее взаимодействие элементов с вмещающими породами ( $\beta$ ), чем больше максимальная концентрация подвижной формы элемента  $C_0$  и чем выше коэффициент диффузии  $D$ , тем меньше скорость продвижения

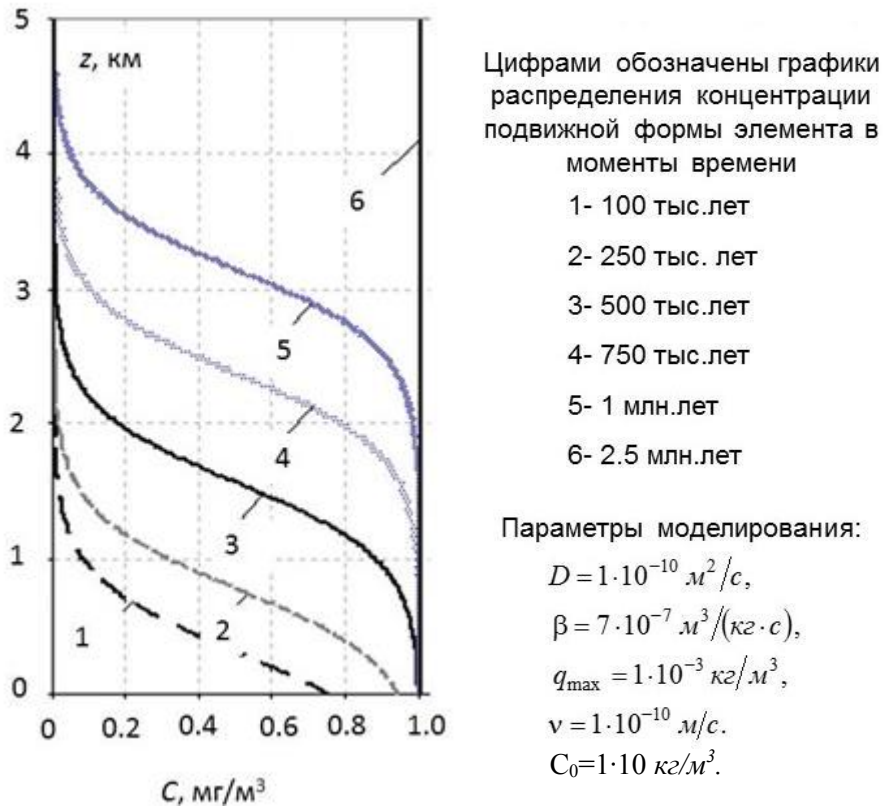


Рисунок 4.2 – Распределение концентрации подвижных форм элементов в одномерном струйном ореоле рассеяния

«фронта» ореола рассеяния. И, естественно, с ростом скорости квазиконвекции подвижной формы элемента, и вызванной естественной ионной флотацией его в пористых горных породах, возрастает и скорость движения «фронта» волны повышенных концентраций. Однако, эти скорости не равны, если отличен от нуля параметр  $\beta C_0 D$ . Данный результат получен совместно с научным руководителем и представлен в журнале Доклады академии наук [Путиков и др., 2015]. Таким образом, за 10 тысяч лет (время после отступления ледника, снесшего слой горных пород с ранее сформированными ореолами) ореол подвижных форм достигнет поверхности с глубины около 40 м и с течением времени интенсивность аномалии нарастает.

### **4.3 Известные способы регистрации ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов**

Для изучения ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов и связанных с ними вторично закрепленных форм применяют геоэлектрохимические методы (по принятой в России классификации). Т.е., геоэлектрохимические методы регистрации ореолов рассеяния основаны на изучении различных форм нахождения химических элементов в отобранных пробах. Это отличает их от литохимических методов исследования валового химического состава горных пород и почв. Согласно общей схеме, подтвержденной экспериментальными исследованиями, вблизи глубинного объекта (залежи) существует область повышенных концентраций подвижных форм химических элементов (соответствующих вещественному составу залежи, тяжелых, благородных металлов). Из этой области подвижные формы химических элементов (простые и комплексные ионы) перемещаются вверх в составе струйных ореолов рассеяния. Вблизи дневной поверхности химические элементы продолжают существовать в подвижных формах нахождения или переходят в слабозакрепленное или вторично закрепленное состояние, сорбируясь на органических комплексах, железо-марганцевых соединениях или глинистых частицах почв [Антропова, 1980]. Каждый из геоэлектрохимических методов направлен на селективный анализ определенных форм нахождения химических элементов. Именно селективный анализ позволяет обеспечить большую глубинность исследований [Алексеев и др., 2005ф].

Основоположителем геоэлектрохимических методов поисков и разведки является Н.И. Сафронов [Авторское свидетельство СССР 237287, 1971]. В 30-х годах прошлого века он предложил и позже реализовал метод частичного извлечения металлов (ЧИМ). В этом методе извлечение ионов металлов происходит под действием постоянного электрического тока в подкисленную воду, залитую в пористый сосуд, установленный в рыхлый приповерхностный

слой пород. Метод ЧИМ направлен на извлечение наиболее подвижных форм нахождения химических элементов, которые можно определить, как электроподвижные. В ходе последующего развития методик селективного анализа проб среди геоэлектрохимических методов с вещественной регистрацией сформировались метод диффузионного извлечения (МДИ), метод металлоорганических почвенных форм (МПФ), термомагнитный геохимический метод (ТМГМ), иногда к ним же причисляется МАСФ (метод анализа сверхтонкой фракции) [Патент РФ № 2330259, 2006].

Термомагнитный геохимический метод применен на участках Светлоборского, Качканарского, Аганозерского массивов. Метод основан на исследовании закономерностей распределения химических элементов, связанных с гидроокислами железа и марганца в почвах. ТМГМ был предложен в 1973 г. Н.А. Ворошиловым с соавторами, позже опробовано применение этого метода для поисков углеводородов [Патент РФ 2097796, 1997]. Основой ТМГМ является упомянутая ранее теория о дальнем перемещении химических элементов в легкоподвижных формах нахождения с последующим закреплением и накоплением на путях транспортировки и вблизи дневной поверхности при взаимодействии их с железом- и марганец-содержащими минералами (имеют много свободных химических связей, на которых могут фиксироваться ионы). В состав работ ТМГМ входят: полевой отбор проб, их магнетизирующий обжиг с выделением термомагнитной фракции с помощью магнита; анализ фракции на содержание элементов-индикаторов и измерение магнитной восприимчивости пробы до и после обжига [Ворошилов и др., 1987; Ворошилов и др., 1966].

Применение данного метода в целях выявления подвижных форм платиноидов наиболее обосновано, судя по данным публикаций. Из литературных данных видно, что распределение ЭПГ по разрезу полимодально и действительно имеет пик в области повышенных концентраций оксидов и гидроксидов железа и марганца наряду с пиком

содержаний ЭПГ в собственных минералах [Malte et al., 2015]. Кроме того, успешные примеры применения метода ТМГМ при поисках ЭПГ проведены в ФГУНПП «Геологоразведка», группой компаний «Теллур Северо-Запад», ЗАО «Северо-западная геофизическая компания» и др. и описаны в отчетах и публикациях [Блинов и др., 2003, Марченко и др., 2004ф, Вешев, 2003ф, Junge et al., 2015].

МДИ направлен на извлечение химических элементов в сорбированных формах нахождения в пробах. Извлечение металлов из сорбированных форм нахождения выполняют с использованием процессов десорбции в слабый раствор кислоты и диффузии под действием градиента концентрации [Алексеев и др., 1989]. Метод опробован при поиске ЭПГ на Аганозерском, Панском, и других массивах.

Метод МПФ, предложенный в 1971 г. Л.В. Антроповой, заключается в определении концентрации элементов, взаимодействующих с природными фульво- и гуминовыми кислотами почв. Извлечение органических кислот из отобранных проб производится под воздействием водного раствора пирофосфата натрия.

Метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ) [Патент РФ № 2330259, 2009] (ВСЕГЕИ) состоит в анализе выделенной из проб сверхтонкой (глинистой, микроминеральной) фракции с размером частиц  $< 5-10$  мкм.

Метод «Геопочва-Газ» (ИМГРЭ, 1995) является одной из модификаций атмохимических методов и направлен на выявление наложенных солевых и газовых ореолов в почвенном горизонте, перекрывающем ледниковые отложения (ориентирован на использование на территории Карелии и на других участках с погребённым оруденением).

За рубежом методы изучения ореолов повышенных концентраций подвижных форм отдельно не выделяют под общим названием «геоэлектрохимические методы». Однако существуют методы изучения изменившихся под действием глубинных источников физико-химических

свойств приповерхностных отложений [Govett, 1976, Hamilton et al., 2004] и подвижных и вторично-закреплённых форм нахождения элементов [Hamilton 1998, Колонских, 2009, Mark, 2012, Mann et al., 1997, Mann, 2010]:

-метод NAMEG (NANoscale METals in EarthGas – наноразмерные металлы в земных газах), где используют анализ газовой составляющей верхнего слоя рыхлых отложений (Китай);

- метод MOMEО (MOBile forms of METals in Overburden – мобильные формы металлов в рыхлом покрове), в котором используют извлечение из почвенных проб различных групп мобильных форм нахождения элементов: водорастворимых, элементоорганических, адсорбированных форм и ионно-обменного комплекса (Китай);

- метод MMI (MOBile Metal Ions – мобильные ионы металлов), в котором используют выделение и анализ мобильных ионов металлов из проб рыхлого покрова (Австралия, Канада и др.).

Также в рамках проекта Deep-Penetrating Geochemistry project [appliedgeochemists.org...] проведены детальные исследования множества модификаций геохимических методов, целью которых было также выявление откликов от глубинных рудных объектов. Для большинства методик протестированы разные глубины отбора проб – от почвенного горизонта, до более глубоких. Для модификаций методов названия не указаны, однако перечислить их необходимо [Cameron, 1999, 2004, appliedgeochemists.org,]:

- анализ раствора, сформировавшегося после погружения проб в деионизированную воду (извлечение воднорастворимых форм),
- анализ раствора, сформировавшегося после погружения проб в раствор пирофосфата натрия (извлечение органически-связанного материала проб),
- анализ раствора, сформировавшегося после погружения проб в раствор цитрата аммония (извлечение адсорбированных элементов),

- анализ раствора, сформировавшегося после погружения проб в горячий или холодный гидроксилламин (раствор с соляной кислотой) (извлечение элементов, включенных в соединения железа и марганца),
- анализ раствора, сформировавшегося после погружения проб в энзимный (ферментный) растворитель (изучаются соединения с галогенами),
- изучение подвижных форм элементов с помощью биогеохимии, где, например, рассматриваются процессы подъема элементов от глубоких корней к кроне деревьев [Suhong at al., 2009, Лазаренков и др., 1996].

С помощью рассмотренных выше методов можно выявлять не только наложенные, но и остаточные сорбционно-солевые литохимические ореолы (если таковые проявлены). В этих ореолах за счет химического выветривания и окисления рудных минералов индикаторные элементы переходят в новые формы нахождения: солевые (сульфаты, карбонаты и другие новообразованные минералы, в том числе водорастворимые), сорбированные органическим веществом, гидроокислами железа и марганца, глинистыми частицами [Алексеев и др., 2005ф]. Это является помехой для обнаружения глубинных источников подвижных форм нахождения элементов и, соответственно, глубокозалегающих и перекрытых рудных тел.

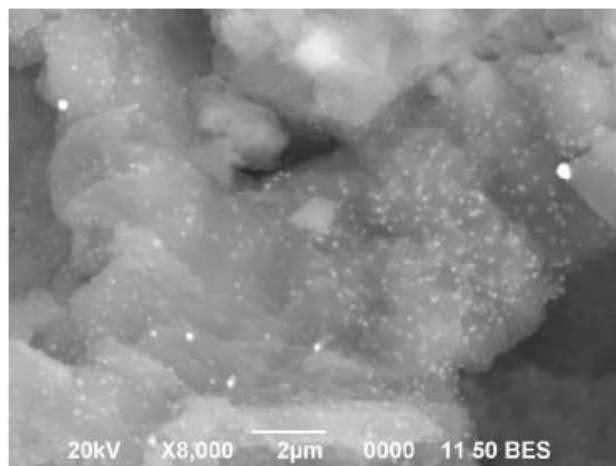


Рисунок 4.3 – Фрагмент поверхности торфа с сорбированными наночастицами палладия [Радомская и др, 2014]

Формы, в которых платиноиды сорбируются на различных частицах, автором не изучены, однако по данным публикаций [Радомская и др, 2014] известно, что при взаимодействии палладия с торфом происходит восстановление ионных форм до элементного состояния. Взаимодействие гуминовых кислот с палладием в растворенной форме останавливается на стадии сорбции. Механизм, предположительно – ионный обмен с последующим внедрением атомов функциональных групп сорбента во внутреннюю сферу комплексных соединений металла [Радомская и др, 2014]. Вероятно, аналогичный механизм обуславливает вторичное закрепление подвижных форм ЭПГ на других естественных сорбентах.

Возникает вопрос: «Чем вызвано существование множества различных методов изучения ореолов подвижных форм элементов?». Ответ заключается в следующем. Применение комплекса нескольких таких методов позволяет повышать достоверность конечного результата. Реализация различных способов имеет разную эффективность в тех или иных ландшафтных, геологических условиях. Кроме того, методы, в основном, базируются на изучении слабозакрепленных форм металлов, в том числе благородных, на различных компонентах – органических соединениях, глинистых частицах, железо-марганцевых соединениях [Радомский и др., 2005, 2006]. Соответственно, изучение ореолов группой методов даёт более полное представление о распределении как подвижных форм элементов, так и сорбированных на разных частицах почв. В зависимости от физико-химических условий у дневной поверхности, могут преобладать подвижные или вторично-закрепленные на различных частицах формы элементов. Известно [Gertsch at al. 2011, Радомский, 2015, Макарова, 2004], что преобладание подвижной или сорбированной формы платины является очень чувствительным к колебаниям достаточно изменчивых окислительно-восстановительных свойств среды. Также наблюдается сильная зависимость концентрации подвижных форм платиновых металлов от физико-химических свойств почв (рН - Eh, содержания органического вещества), которые могут

повлиять на растворение - сорбцию ЭПГ [Suhong at al., 2009]. Следовательно, самое полноценное представление о струйном ореоле рассеяния можно получить при комплексном исследовании различных форм нахождения ЭПГ (кроме закрепленных минеральных форм, более ассоциирующихся с остаточными ореолами).

**Выводы к главе 4.** Платиноиды в составе комплексных ионов перемещаются к поверхности преимущественно под действием естественной ионной флотации. Скорость переноса в одномерном струйном ореоле рассеяния определяется решением системы нелинейных дифференциальных уравнений для концентрации подвижных форм нахождения элементов (при условии постоянства воздействия ЕП, ореол п.ф. ЭПГ достигнет поверхности с глубины около 40 м за время порядка 10 тысяч лет, и с течением времени интенсивность аномалии будет нарастать). Вторично-закреплённые формы нахождения, сформировавшиеся у поверхности из подвижных форм, могут обнаруживаться различными методами геоэлектрохимии с вещественной регистрацией.

## Глава 5 СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ СТРУЙНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ – АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗУЕМОЙ ФРАКЦИИ

### 5.1 Принцип работы поляризационного сепаратора

Автором предложен способ регистрации ореолов рассеяния вторично-закрепленных форм нахождения элементов еще одним геоэлектрохимическим методом. Метод заключается в изучении распределения вторично-закрепленных форм нахождения элементов в поляризуемой фракции рыхлых отложений [Сенчина и др., 2013]. Выделение поляризуемой части твердой фракции основано на помещении сухой пробы или пробы естественной влажности с частицами размером менее 1 мм под действие электростатического поля высокой напряженности. Этим достигается эффект силового притягивающего воздействия данного поля на частицы горной породы, которые способны в различной степени поляризоваться под действием сильного электрического поля. В результате



Рисунок 5.1 – Общий вид поляризационного сепаратора (a, b) и фото пластины с притянутыми к электродам частицами пробы (c)

происходит разделение твердых частиц пробы на поляризуемую и неполяризуемую фракции и определяется концентрация химических

элементов в каждой фракции независимо. Критериями обогащения проб вторично-закрепленными формами нахождения элементов являются относительно повышенные содержания их в поляризуемой фракции.

Метод анализа поляризуемой фракции включает этап дополнительной физико-химической обработки проб (по сравнению с классическим литохимическим опробованием вторичных ореолов), что осуществляется посредством прибора, на который в данный момент идет оформление патента (в 2015 году подана заявка на регистрацию нового способа поиска и устройства для его осуществления №2015147830). Аналогичные приемы выделения некоторой фракции из исходной пробы применены в методиках МАСФ [Соколов и др., 2013], ТМГМ [Ворошилов и др., 1987] и других методах геоэлектрохимии. Реализация способа предлагается с помощью мобильного устройства – поляризационного сепаратора (рисунок 5.1). Принцип работы поляризационного сепаратора основан на различиях взаимодействия частиц пробы с приложенным к ним электрическим полем, возникающих за счет разной поляризуемости частиц пробы. Поле высокого градиента потенциала формируется на «рабочей пластине», притягивающей легко поляризуемые частицы пробы, составляющие поляризуемую фракцию – предположительно, обогащенную вторично-закрепленными формами нахождения элементов в связи с возможностью сорбции ими заряженных частиц.

Для работы с прибором измельченную пробу породы размещают на плоской поверхности, далее к ней подносят пластину поляризатора с электродами, включают напряжение и выдерживают несколько секунд. После этого пластину поднимают, часть измельченной пробы притягивается к пластине и остается на ней. Затем напряжение выключают, притянутые полем частицы пробы отделяются от пластины, их собирают в отдельном пробосборнике для дальнейшего химического анализа.

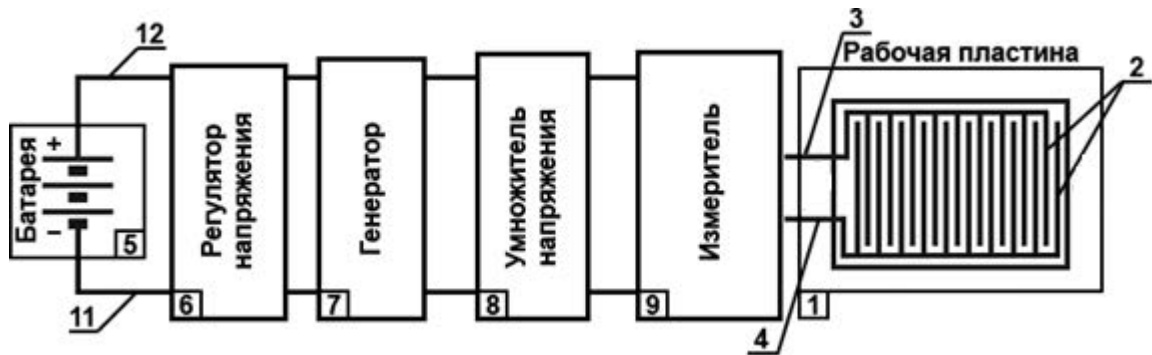


Рисунок 5.2 – Блок-схема поляризационного сепаратора. Пояснения в тексте

На рисунке 5.2 показана блок - схема поляризационного сепаратора. Поляризационный сепаратор представляет собой рабочую пластину 1 из фольгированного медью текстолита, на одной стороне которой методом травления получены полоски меди 2. Полоски меди образуют систему электродов из двух ветвей 3 и 4 из взаимопроникающих, не пересекающихся между собой полос. Полосы чередуются, образуя плоскую решетку, при этом каждая из указанных ветвей решетки подключена (через проводники 11 и 12) к противоположным полюсам регулируемого источника высокого напряжения 5. Система электродов на рабочей пластине покрыта пленкой из диэлектрического материала 10 (см. также рисунок 5.3). Суть работы прибора заключается в следующем. Постоянное электрическое напряжение от умножителя напряжения 8 (подключенного к источнику 5 и генератору 7) подается на электроды 2 рабочей пластины. В результате на поверхности пластины поляризатора формируется высокоградиентное электрическое поле, способное поляризовать частицы, попавшие в область его действия в соответствии с рисунком 5.3, в результате чего наведенный на частицах горной породы заряд будет притягивать частицу к электроду пластины противоположного знака по принципу Кулона взаимодействия заряженных частиц. Если частицы изначально имеют электрический заряд, они также будут притягиваться, но не к области наибольшего градиента поля, а к полюсам противоположного заряда. Применение регулятора напряжения 6

обеспечивает большой диапазон возможных постоянных напряжений, регулируемых в диапазоне от первых сотен вольт до 1 кВ.

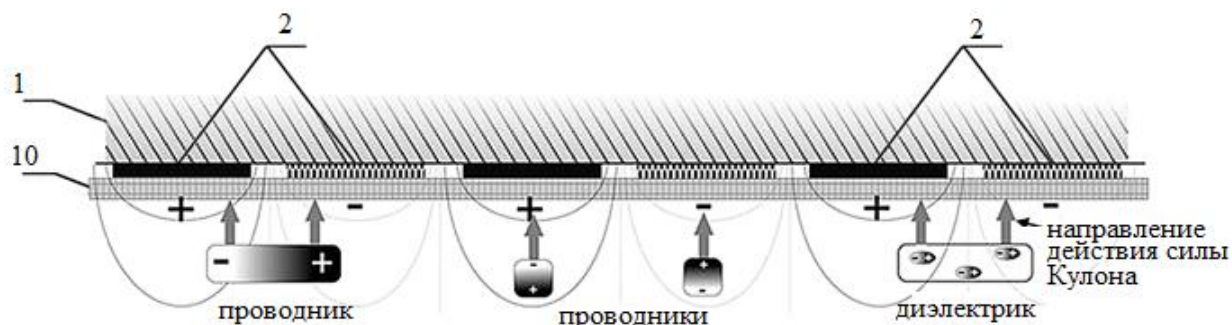


Рисунок 5.3 – Схема действия притягивающей пластины сепаратора (в сечении)

На рисунке 5.3 показаны варианты взаимодействия частиц породы с полем пластины сепаратора, зависящие от вещественного состава и геометрии частиц. Сепарация происходит по параметру подвижности, обусловленной наличием поляризующего электрического поля. Поляризуемость – способность частиц приобретать дипольный момент в электрическом поле. Появление дипольного момента обусловлено смещением электронов (электронная поляризуемость) и атомных ядер (атомная поляризуемость) под действием электрического поля. В результате различается поверхностная и объемная поляризуемость. Такой наведенный (индуцированный) дипольный момент исчезает при выключении поля. Свойства, характеризующие подвижность частицы в электрическом поле, зависят также от размеров и формы частиц. Например, очень мелкие, а также удлиненные частицы легче испытывают в данном случае поляризацию и притягиваются. Слишком тяжелые, крупные частицы не фиксируются на пластине, а остаются в кювете с исходной пробой - для них конкурирующая сила тяжести превышает пондеромоторную силу. В целом, выделенная на пленке фракция более интенсивно взаимодействует с электрическим полем, чем оставшаяся.

Благодаря системе регулирования высокого напряжения, подаваемого на электроды, возможно выделение не только двух групп частиц – условно

«поляризующихся» и «нет», – а целого ряда групп с постепенно изменяющейся в выбранных диапазонах поляризуемостью для более детального анализа. Также возможен подбор оптимального напряжения для различных проб, например, для проб с очень малым количеством поляризуемых частиц. В этом случае для набора минимальной навески сепарированной фракции, необходимой для дальнейшего химического анализа, следует применять более высокое напряжение. Однако, в пределах изучения проб одного участка работ, выясненную экспериментально оптимальную величину напряжения не следует менять.

## 5.2 Характеристика воздействия на образцы горных пород пондеромоторных сил электрического поля

Силовое воздействие на заряд пропорционально градиенту потенциала электрического поля. Общий вид распределения потенциала в межэлектродном пространстве на поверхности пластины представлен в виде изолиний на рисунке 5.4. Результат получен численно, при задании краевых условий на контуре электродов.

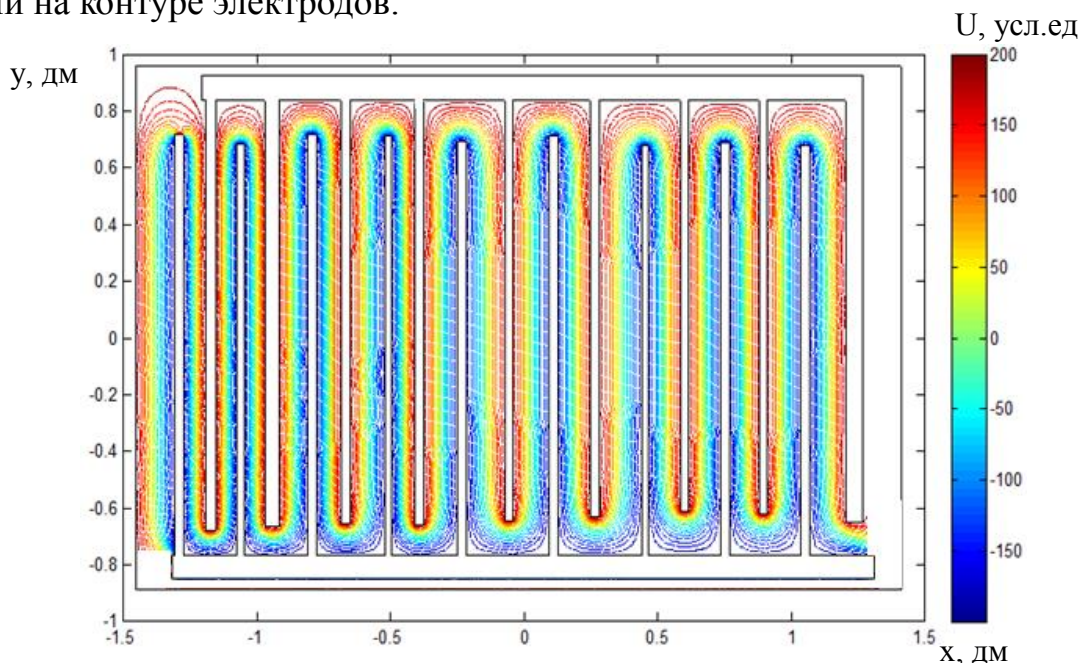


Рисунок 5.4 – Расчетное распределение потенциала на поверхности пластины, (расчет произведен в Matlab, Pdetool (Partial Differential Equations Toolbox))

Распределение заряда по поверхности полосы, играющей роль электрода, не однородно и в сечении имеет максимум у края заряженной полосы (рисунок 5.5). Пондеромоторные силы также имеют наибольшую величину у края полосы, что наблюдается в некоторых случаях при работе сепаратора в виде максимального концентрирования частиц у края полос.

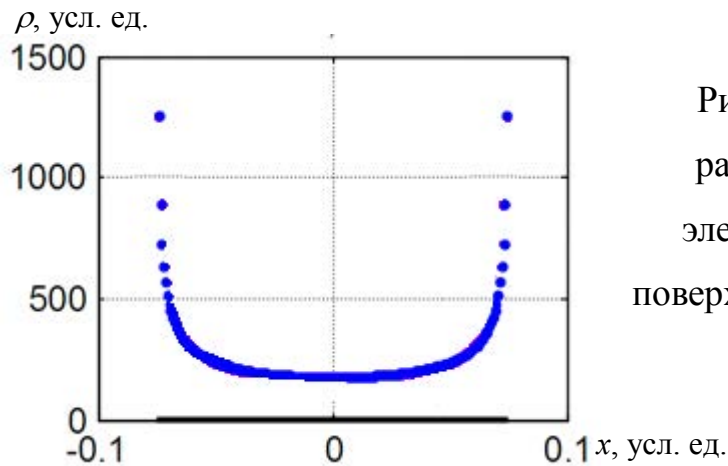


Рисунок 5.5 – Общий вид распределения плотности электрических зарядов  $\rho$  на поверхности заряженной полосы.

[Хмельник, 2011]

Гранулометрический анализ пробы до сепарации и анализ поляризуемой фракции показали увеличение содержания частиц размером менее 5 мкм после проведения обработки пробы сепаратором. Грубый гранулометрический анализ выполнен автором прямым счетным методом – методом оптической микроскопии.

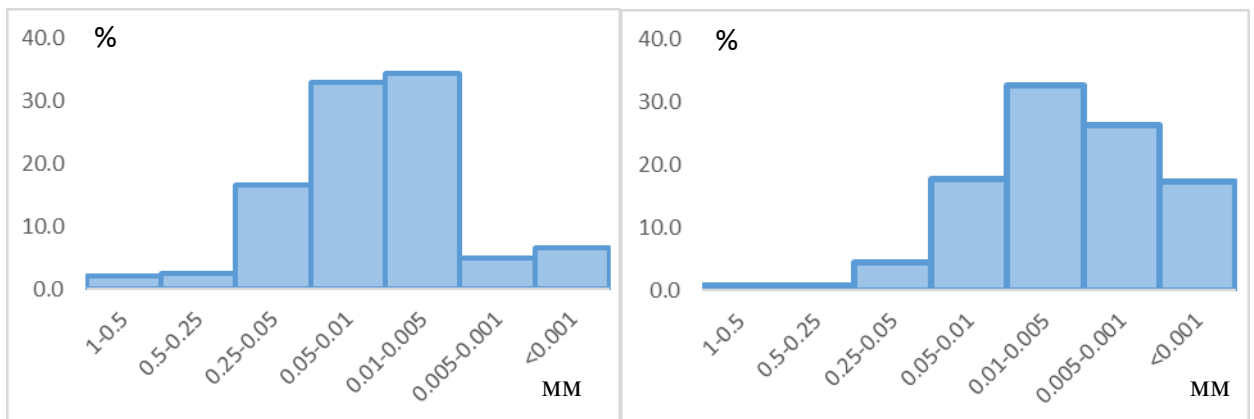


Рисунок 5.6 – Результаты гранулометрического анализа проб до (слева) и после (справа) сепарации. Доля частиц, указанных на горизонтальной оси размеров, представлена как весовое процентное содержание в общей массе анализируемой пробы

### 5.3 Результаты экспериментальных исследований

В качестве опытной проверки работы сепаратора выполнен ряд экспериментов. В виде оцениваемого критерия предложено рассматривать коэффициенты накопления химических элементов-спутников и индикаторов оруденения (в виду направленности данной работы – платинометалльного оруденения, но применение методики пока не специализировано под конкретные химические элементы). Расчетный коэффициент накопления  $K_n$  получен как отношение величины концентрации металлов после сепарации к величине концентрации металлов в не сепарированной (исходной) пробе. В качестве тестовых проб использованы ситованные (размер ячейки сита – 1 мм) сухие пробы рыхлых отложений, отобранные на Светлоборском массиве.

Таблица 5.1

Содержание некоторых элементов в пробах до и после сепарации и соответствующие коэффициенты накопления  $K_n$

	Fe, %	Cr, г/т	Zn, г/т	Cu, г/т	Sr, г/т	Mn, г/т	Ni, г/т	Ti, г/т	Co, г/т
проба 1 – исходная	13.77	1611.9	104.5	57.5	96.2	3096.6	1257.6	2458.1	206
проба 1 – сепари- рованная	13.92	1423.6	97.2	60.3	80.8	3252.5	1406.4	2165.2	265.4
проба 2 – исходная	11.15	3222.3	70.5	45.4	15	1923	4934.2	350.8	261.1
проба 2 – сепари- рованная	20.84	6338.3	141.9	86.3	34.8	4249.6	9076.3	494.4	456.8
$K_n$ для 1 пробы, усл. ед.	1.01	0.88	0.9	1.05	0.84	1.05	1.12	0.88	1.29
$K_n$ для 2 пробы, усл. ед.	1.87	1.97	2.01	1.90	2.32	2.21	1.84	1.41	1.75

Анализ выполнен рентген – радиометрическим методом, аналитик Томский И.В.,

ООО «Полевая геофизика»

Проба 1 относится к зоне вне области платинометалльного оруденения, проба 2 – к участку в пределах платиноносной зоны (таблица 5.1). Анализ выполнен без определения содержаний ЭПГ, поэтому здесь предлагается

оценить  $K_n$  для элементов, сопутствующих платинометалльному оруденению. Следует отметить при этом, что геохимическим критерием платиноносности на территории Светлоборского массива является (в ряду изученных в данном случае элементов) повышенное содержание Zn и Cu. [Теремецкая и др., 2002, Пилюгин, 2014]. Для указанных элементов выявлен рост  $K_n$  с переходом от нерудной зоны к платиноносной. Однако, в связи с существенным отличием в содержании вторично-закрепленных форм других элементов в пробах 1 и 2, остается вероятность влияния на полученный результат не близости платиноносной зоны, а других причин. Так, известна приуроченность аномальных концентраций подвижных форм железа и марганца к разломам, что имеет место в указанном случае.

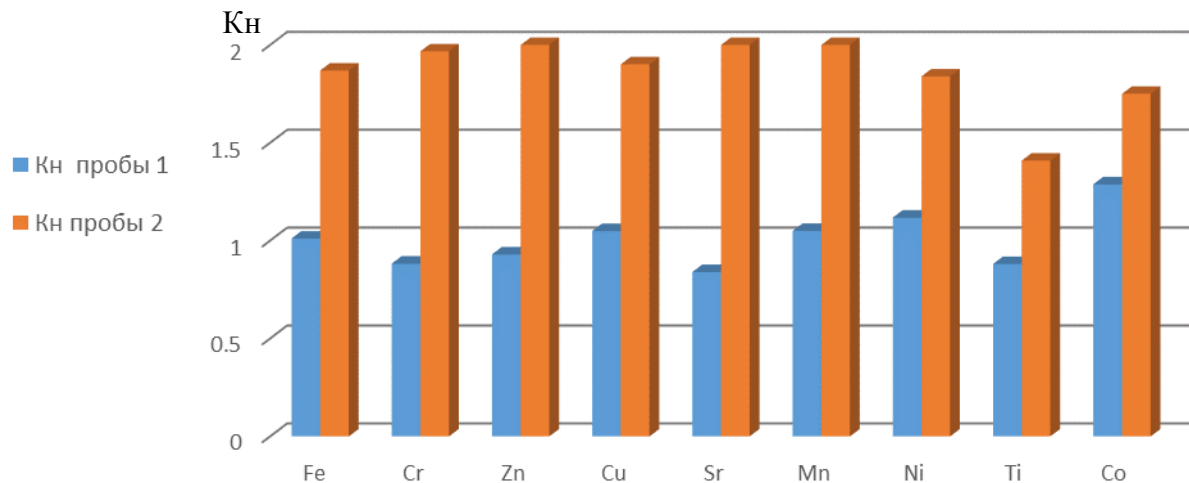


Рисунок 5.7 – Гистограмма поэлементного распределения коэффициентов накопления для проб 1 и 2 (усл. ед)

Профиль, на котором впервые выполнены работы методом АПФ, расположен на Аганозерском массиве. Отбор проб проведен из подпочвенного горизонта, сложенного песчано-глинистыми ледниковыми отложениями. Пробы высушены, просеяны через сито с ячейкой размером 1 мм. Далее пробы обработаны поляризационным сепаратором по описанной методике, выделенная поляризуемая фракция и исходная проба направлены на химический анализ. Результаты анализов приведены в приложении Г. Рисунок 5.8 показывает соответствие многокомпонентных аномалий

концентраций в. з. ф. элементов выходам к подошве ледниковых отложений отдельных горных пород и, частично, элементов тектоники.

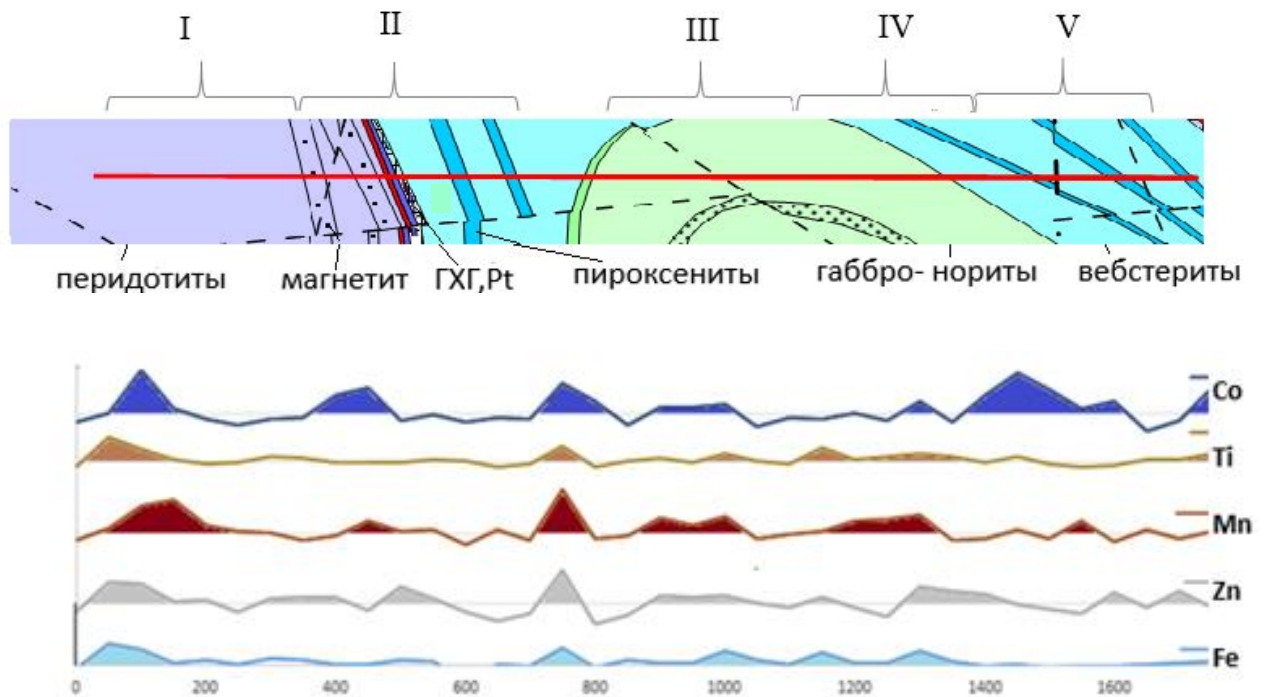


Рисунок 5.8 – Распределение стандартизированных концентраций элементов в поляризуемой фракции вдоль изучаемого профиля Аганозерского массива. Номерами I – V отмечены наборы проб, соответствующие комбинированным пробам для анализа на содержание благородных металлов (условные обозначения см. на рисунке 1.9)

Анализ содержания ряда благородных металлов в поляризуемой фракции выполнен для 5 комбинированных проб Аганозерского массива. Ввиду малости навески поляризуемой фракции пробы, для анализа на платиноиды пришлось объединить несколько проб по территориальному принципу. Предположено, что платина и сорбирующие платину компоненты более чувствительны к действию электрического поля, чем другие элементы [Афанасьев и др., 2010].

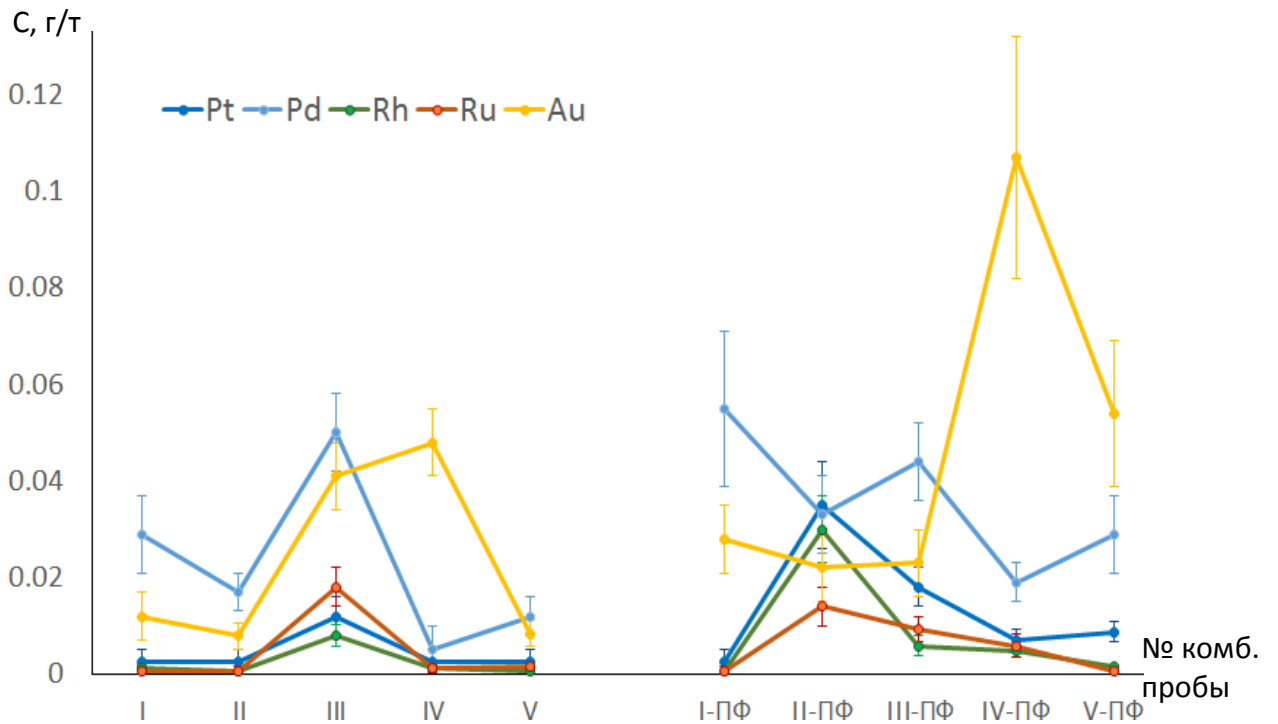


Рисунок 5.9 – Содержание платины, палладия, родия, рутения, золота в исходных комбинированных пробах (I–V) и в их поляризуемой фракции (I-ПФ – V-ПФ) с демонстрацией погрешности метода анализа

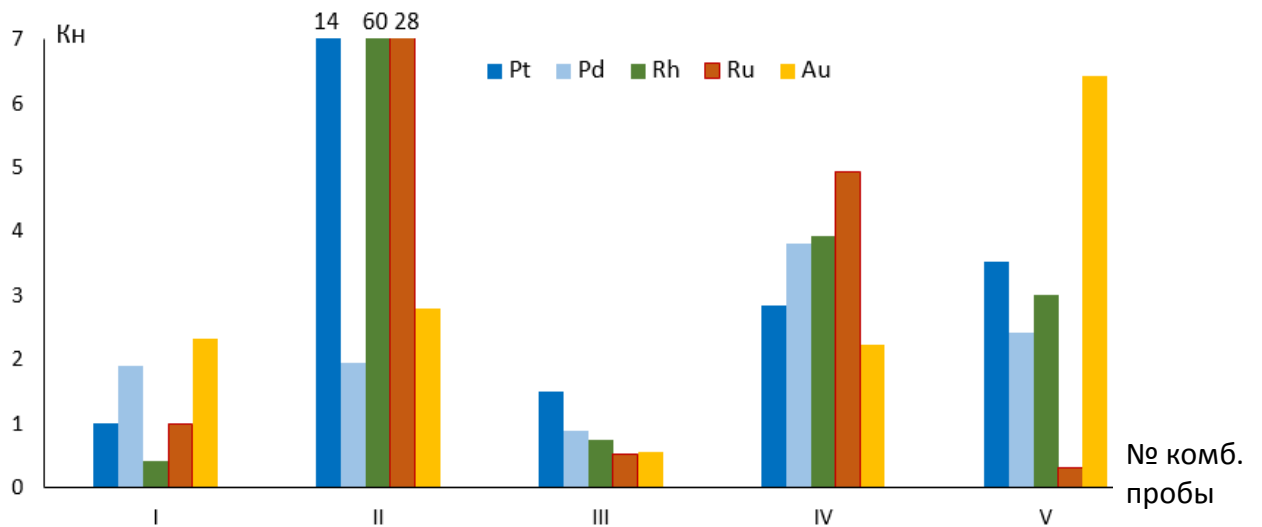


Рисунок 5.10 – Коэффициенты накопления (усл.ед) платины, палладия, родия, рутения, золота в поляризуемой фракции комбинированных проб по отношению к валовому содержанию. Для пробы II величина пиков показана числовыми значениями

Гистограммы распределения коэффициентов накопления благородных металлов в поляризуемой фракции показывают приуроченность пиков  $K_n$  к

проекциям выхода к подошве ледниковых отложений перспективных зон разреза. Для большинства проб и элементов коэффициенты накопления больше единицы, т.е. содержание элементов в поляризуемой фракции превышает содержание их в исходной пробе. Наибольшие значения коэффициентов накопления, зафиксированные на точке II и показанные вне масштаба на рисунке 5.10, соответствуют интервалу 400 – 800 м на профиле, где проявлены отрицательная аномалия ЕП и имеются геологические предпосылки для нахождения платиноидной минерализации. Пробы I и III отвечают менее перспективным частям разреза и отмечаются наименьшими значениями коэффициентов накопления. Пробы IV и V характеризуются аномальными значениями  $K_n$ , однако существенно менее интенсивными, нежели проба II (исключая Ru для пробы V). На рисунке 5.10 намечаются взаимосвязи между элементами по поведению в поляризуемой фракции: Pd-Au и Pt-Rh-Ru.

**Выводы к главе 5.** Предложенный автором метод анализа поляризуемой фракции (АПФ) может быть использован в качестве способа изучения вторично-закрепленных форм нахождения элементов. Для подтверждения эффективности метода требуется продолжение опытных исследований.

## **Глава 6 КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СТРУЙНЫХ ОРЕЛОВ РАССЕЙНИЯ ПРИ ПОИСКАХ УЧАСТКОВ ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ**

Совместное применение геоэлектрохимических и геофизических методов при поисках глубокозалегающих или погребенных участков платинометалльной минерализации представляется более эффективным по сравнению с отдельной реализацией указанных методов. Исследователи [Блинов и др., 2003, Марченко и др., 2004ф, Parkkinen, 2003, Поликарпов и др., 2005, Сергеев и др., 2005ф, Сергеев и др., 2009] использовали при поисках платиноносных зон косвенные геофизические методы, дополняя их геоэлектрохимическими методами в качестве прямых в рамках выполнения научно-производственных работ. Как правило, в числе геофизических методов применены магниторазведка, электроразведка методом вызванной поляризации, либо методы изучения удельного электрического сопротивления горных пород (точечное зондирование, электропрофилирование, вертикальное электрическое зондирование в различных модификациях). В большинстве случаев данные методы нацелены на выявление областей сульфидизации и связанных с ними платиноносных зон. Ряд производственных работ нацелен на определение эффективности применения собственно ГЭХ методов изучения вторично-закрепленных форм платиноидов [Алексеев, 2002ф, Вешев, 2003ф, Kéiko et al, 2004] при поисках месторождений ЭПГ. Примеров проведения геоэлектрохимических работ в целях поисков месторождений ЭПГ множество (рисунок 6.1); аномалии, полученные на массивах Горы Генеральской, Южная Сопча, Панском, Вуручуайавенч заверены бурением с выявлением проявлений платинометалльной минерализации. В рассмотренных автором примерах проведение и интерпретация данных геофизических методов и геоэлектрохимии выполнена независимо, далее проводилось сопоставление полученных аномальных зон. В представленной работе предлагается при проектировании поисковых ГЭХ исследований на платиноиды рассматривать в первую очередь участки, перспективные на наличие ореолов вторично-

закрепленных форм ЭПГ, а именно, отличающиеся аномалиями естественного электрического поля или сопутствующими изменениями физико-химических свойств почв, отличающимися пониженными значениями  $E_h$ , повышенными величинами рН или ростом магнитной восприимчивости при обжиге.

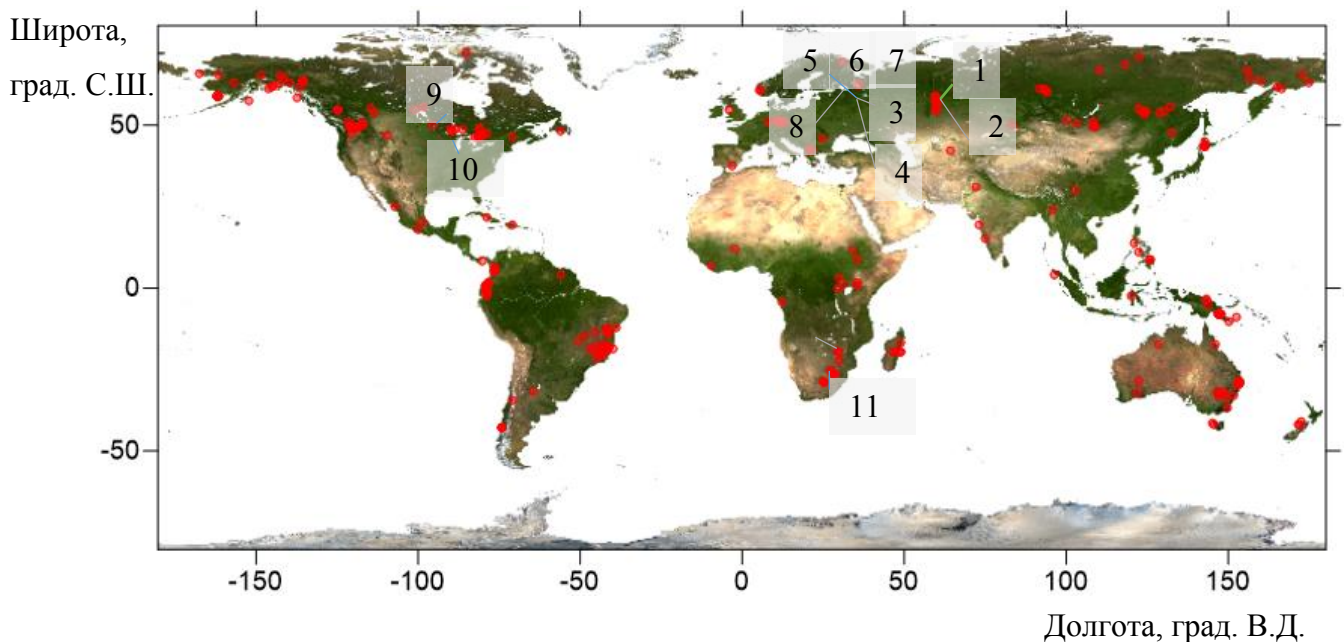


Рисунок 6.1 – Крупные платиноносные массивы мира и массивы, на которых выполнены исследования с помощью методов регистрации ореолов рассеяния подвижных или вторично-закреплённых форм ЭПГ:  
1 – Качканарский, 2 – Светлоборский, 3 – Аганозерский, 4 – Бураковский, 5 – массив Горы Генеральской, 6 – Южная Сопча, 7 – Панский, 8 – Вуручуайавенч, 9 – Лэгрис-лэйк, 10 – Лак дез Илль, 11 – Бушвельд

Применение ГЭХ методов совместно с геофизическими исследованиями проведено автором на платиноносных массивах Урала (Качканарский, Светлоборский) и Карелии (Аганозерский) с целью проверки гипотезы взаимосвязи ЕП и ореолов рассеяния подвижных форм платиноидов. Геологическое строение участков кратко изложено в главе 1. Исследования включили в себя работы методом ЕП, геоэлектрохимические исследования с вещественной регистрацией (ТМГМ, МДИ, предложенный

автором метод АПФ), а также способы изучения физико-химических свойств почв (рН, Eh, магнитная восприимчивость до и после обжига). Все работы выполнены в летний период 2013-2016 годов. Дополнительно применено исследование магнитного поля для установления соответствия аномалий ЕП магнетитсодержащим телам на участке погребенного оруденения, где нет возможности непосредственно закартировать положение электронных проводников.

В пределах изученного профиля Качканарского массива проведен отбор проб из богатого гидроокислами железа и марганца горизонта для выделения вторичных «струйных» ореолов рассеяния в соответствии с рекомендованной методикой ТМГМ [Алексеев и др., 2005ф]. Участок «а» Светлоборского массива изучен методом диффузионного извлечения металлов в лабораторном варианте МДИ, участок «б» изучен также методом ТМГМ. На участке, расположенном на Аганозерском массиве, были отобраны пробы для метода АПФ, а ранее были выполнены работы МДИ и ТМГМ сотрудниками ФГУ НПП «Геологоразведка». Физико-химическая подготовка проб ТМГМ и АПФ проведена автором в лаборатории ФГУ НПП «Геологоразведка» и в Горном университете, аналитические работы с применением химических методов, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Ag, Au) и рентген-радиометрического анализа (Fe, Cr, Zn, Cu, Br, Sr, Mn, Ni, Ti, Co, Zr, Ba) выполнены аттестованными на выполнение данных работ учреждениями: Испытательным аналитическим центром ООО «Институт Гипроникель», ООО «Геоэкохим», ООО «Полевая геофизика». Графики содержания в.з.ф. платиноидов приведены в условных величинах без потери общего смысла, так как являются результатами различных методов обогащения проб или вторично-закрепленными компонентами и концентрации в абсолютных значениях не могут быть сопоставимы между собой для разных методов или разных участков.

Вблизи источников аномалий ЕП формируются предпосылки для образования ореолов повышенных концентраций подвижных и вторично закрепленных форм нахождения ЭПГ. Эти же области отмечаются на рисунках 6.2 – 6.6 особенностями физико-химических свойств – Eh, pH, магнитной восприимчивости до и после обжига, – характеризующими расход кислорода на поддержание реакции окисления; но в разной степени осложненными «помехами», связанными с поверхностными условиями. Тем не менее, результаты наблюдения ореолов вторично-закрепленных форм нахождения платины являются трудно интерпретируемыми, т.к., вероятно, могут представлять периферийные аномалии относительно проекции рудных тел на поверхность, как и в случае с рудами других металлов [Алексеев и др., 1989]. Кроме того, на формирование ореолов повышенных концентраций вторично-закрепленных форм оказано многофакторное влияние окружающей геологической среды. Обратим внимание на то, что не обязательно должна наблюдаться корреляция ЕП и содержания в.з.ф. ЭПГ, а возможен их сдвиг относительно друг друга в соответствии с рисунком 1.10.

Таблица 6.1

## Состав работ

Исследуемый массив, участок	Количество точек наблюдения (т.н.) методом ЕП	Количество проб и примененный метод ГЭХ*	Шаг проведения исследований, м
Качканарский массив	15	15, ТМГМ	2
Светлоборский массив, участок «а»	30	30, МДИ	2
Светлоборский массив, участок «б», профиль 1	-	20, ТМГМ	2
Светлоборский массив, участок «б», профиль 2	-	20, ТМГМ	10
Аганозерский массив**	36	36, АПФ	50

\*Результаты химических анализов приведены в приложениях А-Г.

\*\*На Аганозерском массиве дополнительно выполнены магниторазведочные работы объемом 28 т.н. Методами регистрации pH, Eh изучено 36 т.н. Также привлечены данные площадных исследований ТМГМ, выполненные ФГУ НПП «Геологоразведка» [Вешев и др., 2003ф].

Результаты химических анализов всех проб (кроме результатов контрольных наблюдений для дубликатов проб) приведены в приложениях

А-Г, ниже представлены аддитивные показатели стандартизированных значений палладия, платины, родия и рутения.

### 6.1 Результаты исследований на Качканарском массиве

Результаты измерения  $\Delta U_{\text{ЕП}}$  показаны на рисунке 6.2, где также представлено содержание вторично-закреплённых форм нахождения ЭПГ (более полные результаты представлены в таблицах в Приложении А и в ряде публикаций [Сенчина, 2013, 2014, 2015]). Жильные тела титаномагнетита,

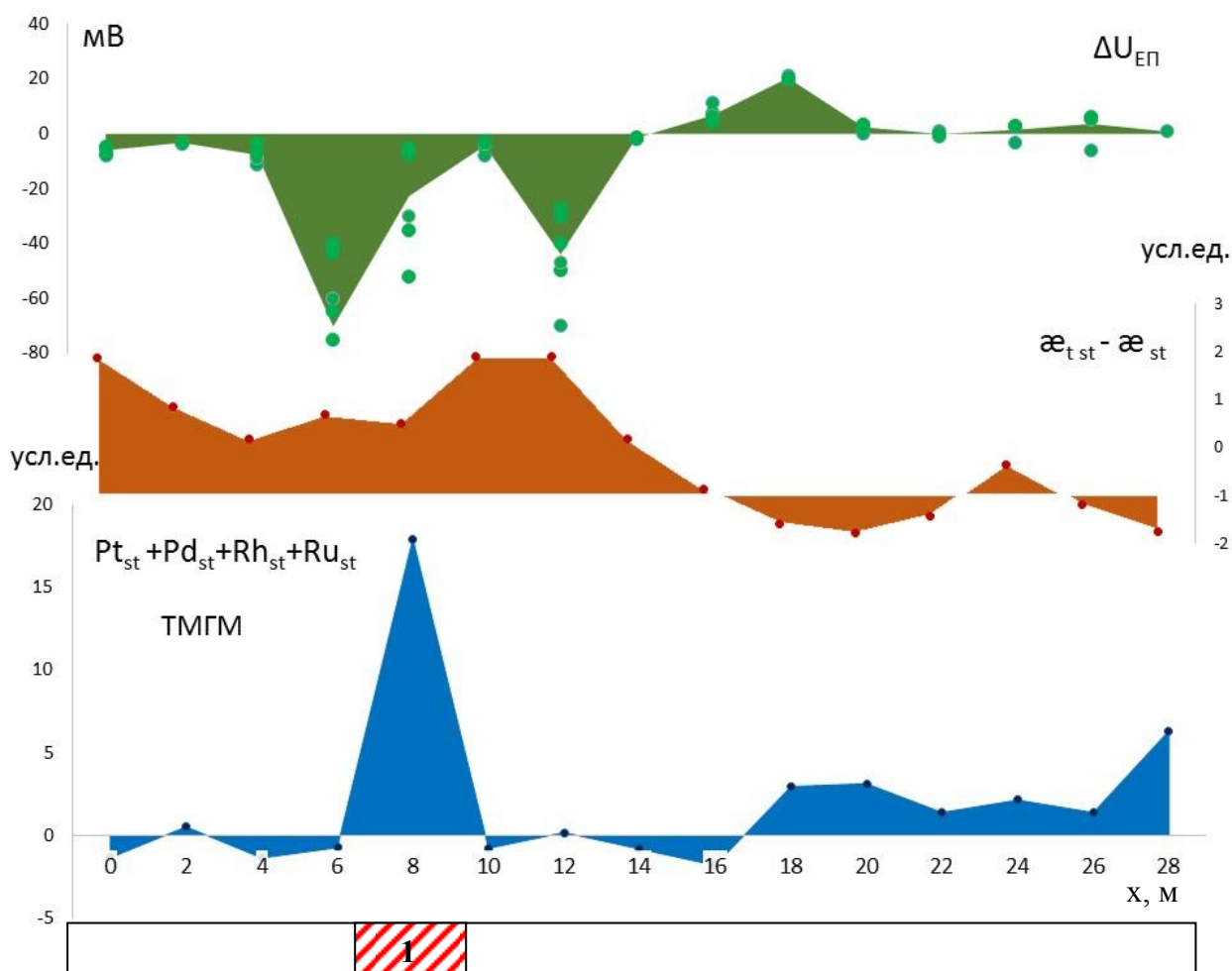


Рисунок 6.2 – Сравнение результатов ЕП (по нескольким измерениям), разностей стандартизированных значений  $\alpha_t$  и  $\alpha_{st}$ ; стандартизированных концентраций вторично-закреплённых форм ЭПГ на профиле Качканарского массива (см. рисунок в гл. 1). 1 – аномалия (преимущественно платино-палладиевая), требующая заверки

выделенные непосредственно по наблюдениям с поверхности вблизи исследуемого профиля, сформировали высокоамплитудные аномалии ЕП,

вызвавшее локальное повышение концентраций подвижных и затем вторично-закреплённых форм нахождения платины и палладия. Эта же часть разреза охарактеризована повышенными значениями магнитной восприимчивости после обжига ( $\alpha_i$ ). Близость тел с высокой электропроводностью вызвала вариации наблюдаемых значений ЕП, вероятно, ввиду наведенных теллурических токов в телах жильного магнетита. На графике области, залитые зеленым цветом соответствуют осредненным во времени значениям потенциала ЕП, точки показывают отдельные измерения. Одна точка характеризует рост концентраций ЭПГ в магнитной фракции, но эти значения позволяет считать точку аномальной.

## 6.2 Результаты исследований на Светлоборском массиве

Для участков «а» и «б», локализованных в пределах Светлоборского массива (рисунок 1.5, 1.6), значения повышенных стандартизированных значений в.з.ф. платиноидов обнаруживаются в пределах отрицательных аномалий ЕП или положительных аномалий разности стандартизированных значений магнитной восприимчивости после обжига и до обжига. Аномалии ЕП, изученные на участке «а», являются малоамплитудными и связаны с источником, представленным сетью прожилок магнетита. Повышение концентрации вторично-закреплённых форм нахождения платины соответствует участкам распространения относительно низких значений  $\Delta U_{ЕП}$ .

На участке «б» работы методом ЕП не проведены, но обнаруживается корреляция содержания вторично-закреплённых форм ЭПГ с областями максимального роста магнитной восприимчивости после обжига по отношению к этому параметру до обжига. Это означает большое количество минералов железа, находящихся в окисленной форме и косвенно свидетельствует о процессах формирования естественных электрических полей. Ранее уже было предложено использование аномалий магнитной восприимчивости до и после обжига в качестве поискового критерия для обнаружения рудных тел различного состава [Миллер и др., 1955,

Ворошилов и др., 1966]. Вероятно, применение данной методики при поисках месторождений ЭПГ может быть, как показывают рисунок 6.4, 6.5, высоко эффективным. Результат получен для Светлоборского массива, отличающегося проблематичным выделением платиноносных зон по данным геофизических методов ввиду расположения не меняющих физических свойств горных пород платиноносных зон непосредственно в дунитах, и требует расширения опытных работ в данном направлении.

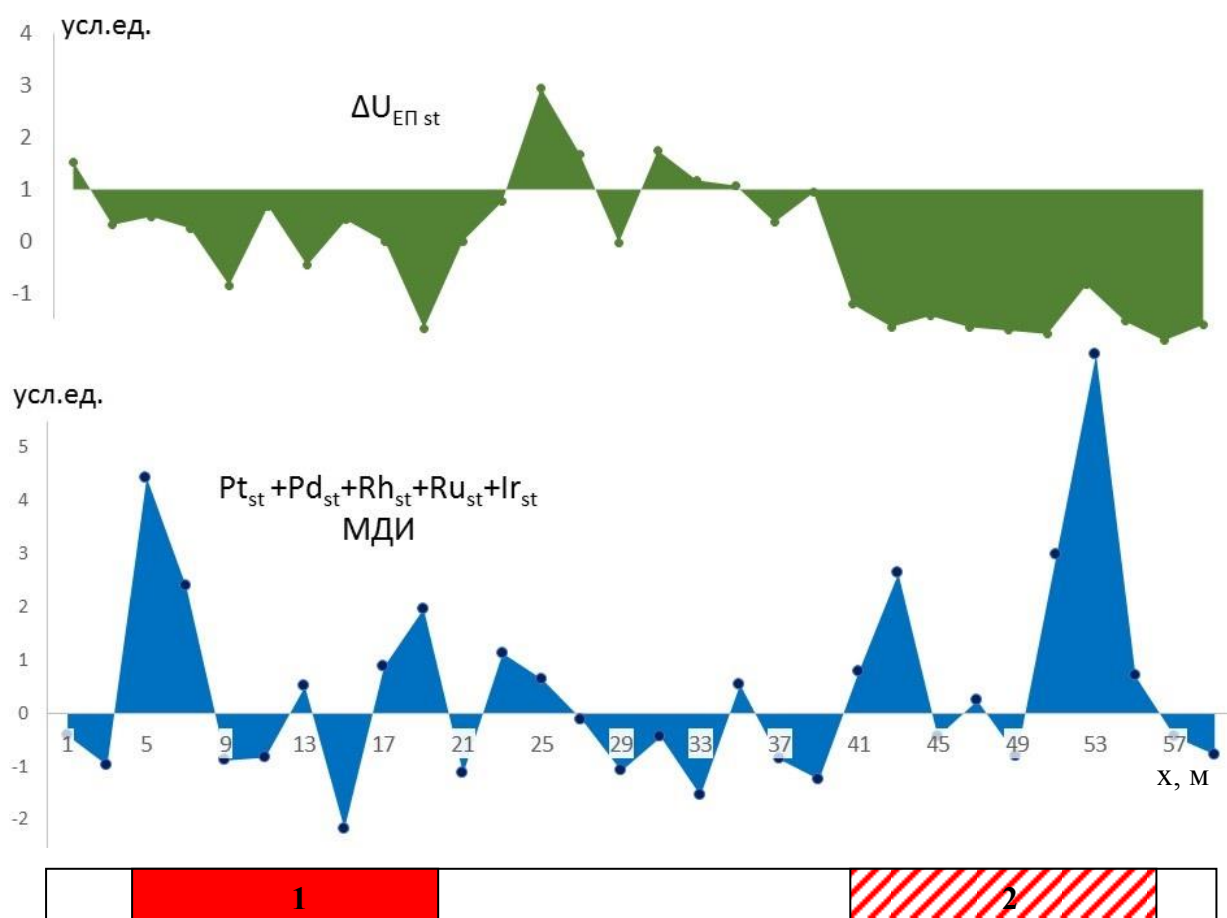


Рисунок 6.3 – Результаты изучения ЭП и стандартизированных концентраций вторично-закрепленных форм ЭПГ (по данным МДИ) на профиле участка «а» Светлоборского массива. 1- известная по данным борздового опробования платиноносная зона ( $>0.2$  г/т), 2 - участок вероятного наличия платиноносной зоны ниже уровня, вскрытого канавой

На участке «а» Светлоборского массива над известной платиноносной зоной (интервал 5 – 19 м) выявлено периферийное повышение концентраций

ЭПГ во вторично-закрепленных формах (рисунок 6.3). Данная область профиля характеризуется малоамплитудной отрицательной аномалией ЕП. Аналогичной конфигурации фрагмент разреза выделен в интервале 41 – 53 м, однако в профиле канавы платиноносных зон не обнаружено и есть вероятность выявления проявления платинометалльной минерализации глубже, в связи с чем требуется доизучение данного интервала бурением.

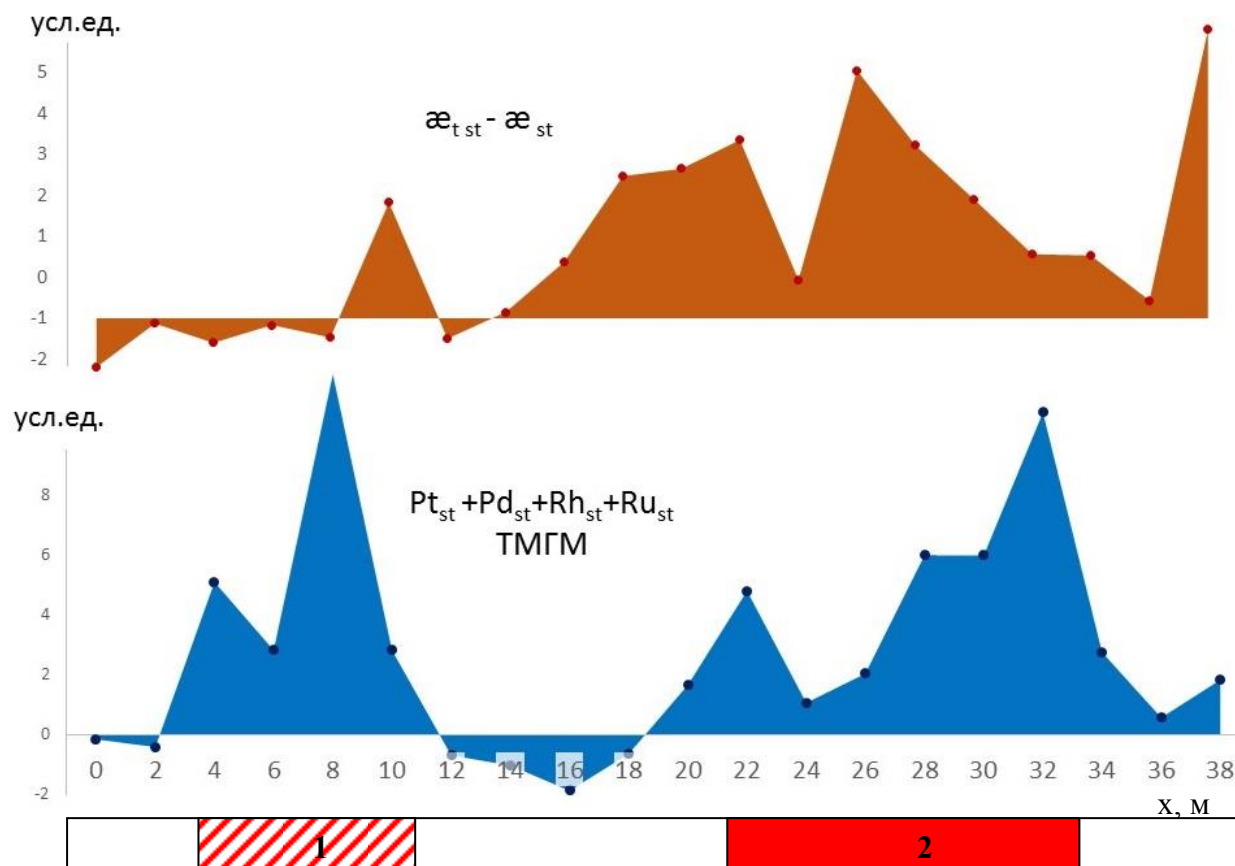


Рисунок 6.4 – Результаты изучения стандартизированных концентраций вторично-закреплённых форм ЭПГ (по данным ТМГМ) и разностей стандартизированных значений  $\text{æ}_t$  и  $\text{æ}$  на профиле 1 участка «б» Светлоборского массива. 1- участок вероятного наличия платиноносной зоны ниже уровня, вскрытого канавой, 2 - известная по данным бороздового опробования платиноносная зона ( $>0.2$  г/т)

Профиль 1 участка «б» пересекает зону с известной платиноносностью в интервале 22 – 32 м и характеризуется наличием периферийных аномалий по сумме стандартизированных значений изученных концентраций

платиноидов. Эта область отличается интенсивной аномалией прироста магнитной восприимчивости при обжиге, что может быть связано с наличием протяженного по глубине ЕГЭ со значительной ЭДС. Вероятно, частичное влияние этого же источника ЕП привело к формированию аномалий повышенных концентраций в.з.ф. платиноидов в интервале 4 – 10 м и свидетельствует о наличии оруденения ниже уровня, вскрытого канавой, вдоль которой был проложен профиль.

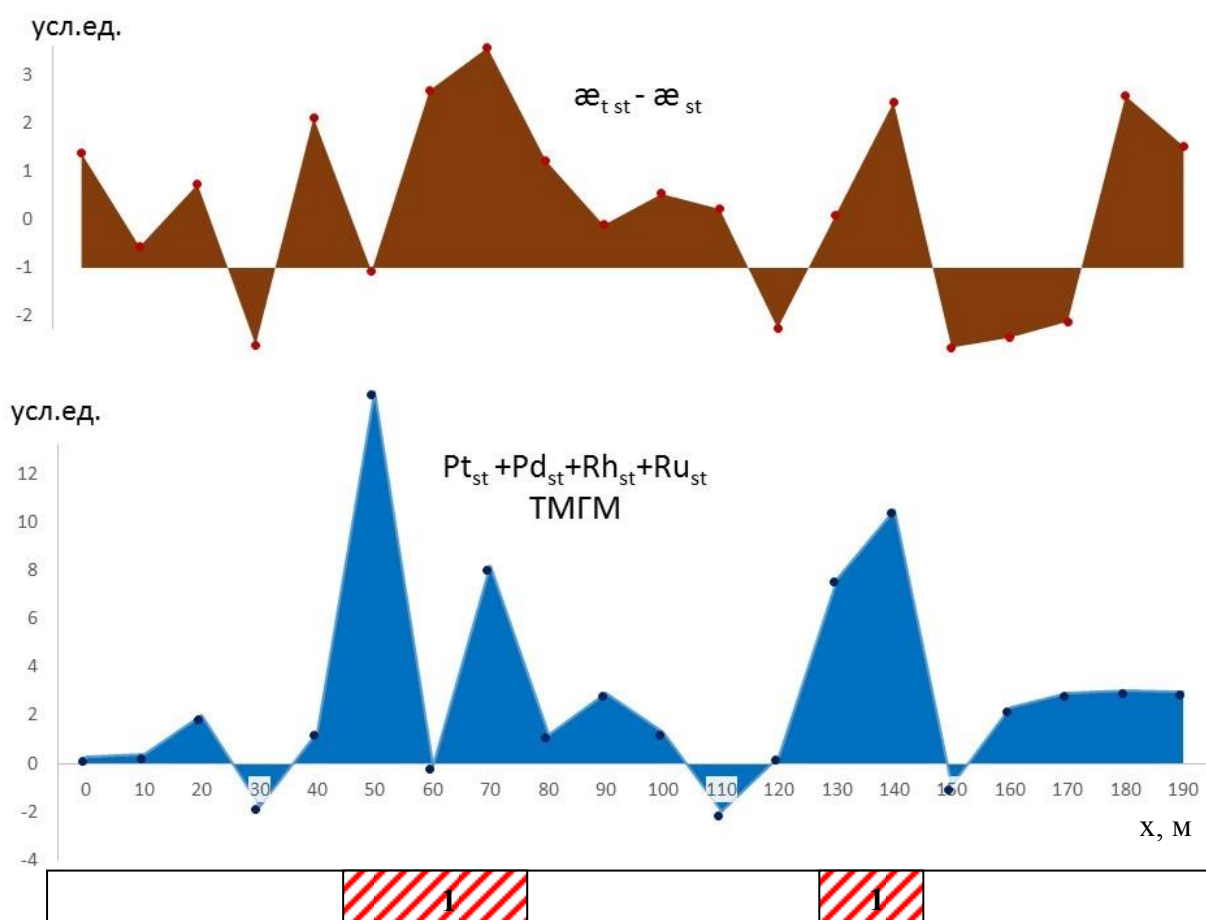


Рисунок 6.5 – Результаты изучения стандартизированных концентраций вторично-закреплённых форм нахождения ЭПГ (по данным ТМГМ), разностей стандартизированных значений  $\chi_t$  и  $\chi$  на профиле 2 участка «б» Светлоборского массива. 1 - участки вероятного наличия платинометалльной минерализации, где требуется доизучение выделенных зон горными выработками

Профиль 2 участка «б» Светлоборского массива расположен в перспективной зоне, не изученной ранее горными выработками, но пересекающей узкую аномалию концентрации платины по данным литогеохимии масштаба 1:10000. Получено два интервала с наиболее высокими перспективами обнаружения участков платинометалльной минерализации по данным изучения в.з.ф. ЭПГ. Рекомендуется прохождение поверхностных горных выработок, а при отсутствии пересечения зоны платинометалльной минерализации, бурение в выделенных на рисунке 6.5 интервалах [Сенчина и др., 2015, Путиков и др., 2017].

### **6.3 Результаты исследований на Аганозерском массиве**

Для более полного анализа результатов профильных работ на Аганозерском массиве произведено сопоставление с результатами площадных работ методом ТМГМ, полученными сотрудниками ФГУ НПП (в настоящее время преобразовано в АО) «Геологоразведка» в рамках выполнения производственных работ [Вешев и др., 2003 ф]. Результаты не противоречат выкладкам, сформулированным в представленной работе.

Для изученного участка Аганозерского массива характерно перекрытие коренных пород массива толщей осложняющих поиски ледниковых отложений. Положение источников аномалий ЕП (протяженных по глубине зон, обогащенных магнетитом) выявлено по поданным моделирования по результатам ЕП и магниторазведки. Аномалии концентрации платины в почве по данным АПФ и ТМГМ (по [Вешев, 2003 ф]) локализованы в областях минимума  $E_h$  (рисунок 6.6, 6.7), связанных с областями более интенсивного окисления минералов. Для соответствующих участков профиля характерно понижение значений ОВП, незначительное повышение кислотности и повышенные значения модуля горизонтальной компоненты напряженности естественного электрического поля, характеризующей плотность электрического тока, формирующегося у поверхности под действием ЕП (аномалия потенциала ЕП для данного участка является обширной, высокоамплитудной, но за пределы аномалии выйти не удалось;

оттого кривая потенциала ЕП не показательна и на результирующих графиках не приведена). Измерение ОВП (Еh) выполнено в чаше с навеской пробы грунта (70 г) из подпочвенного слоя, залитого дистиллированной водой (150 мл). Измерения рН проведены почвенным измерителем кислотности непосредственно в грунте. Данная методика применима в рассматриваемых условиях, в отдельных же случаях методика изучения физико-химических свойств может существенно усложняться [Бычков, 2009] и способы измерения должны рассматриваться дополнительно.

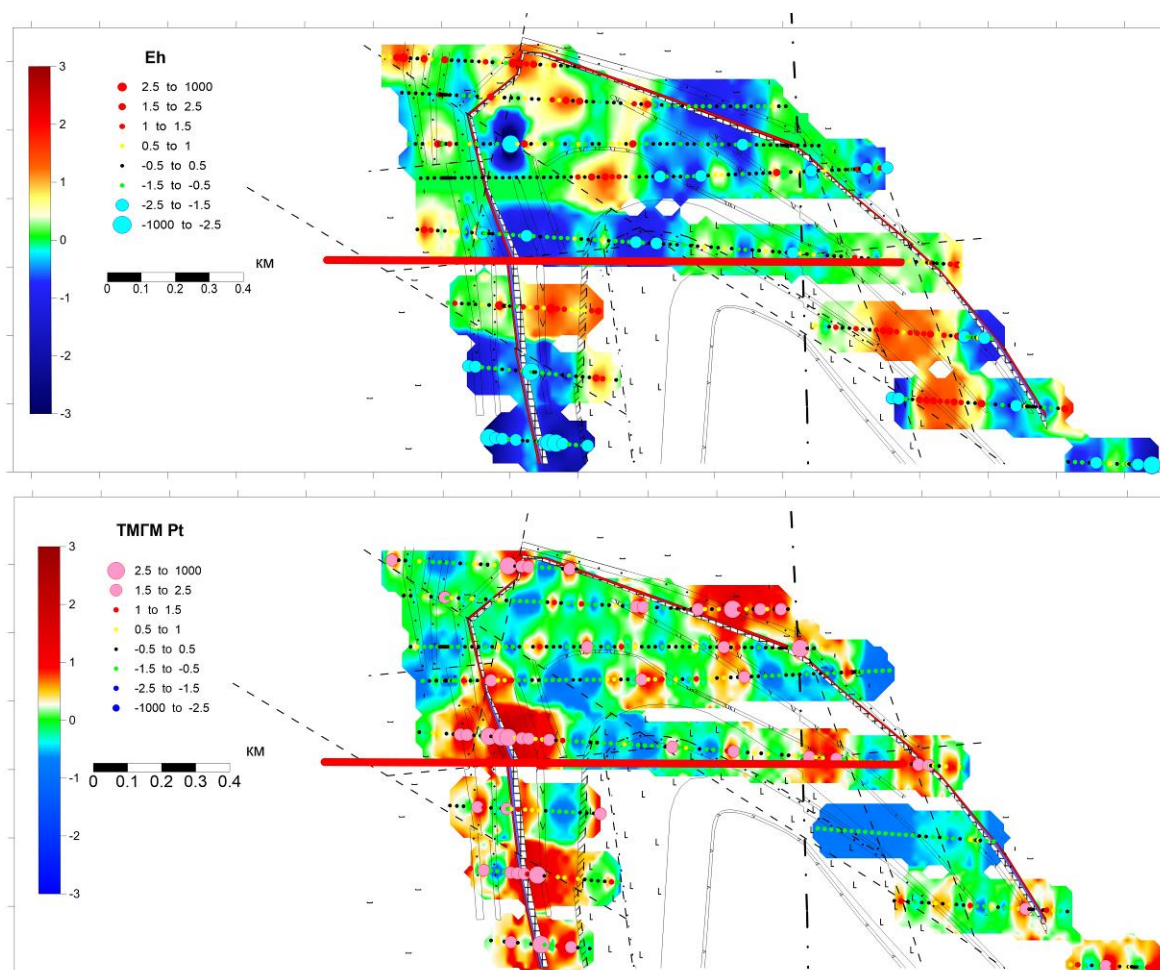


Рисунок 6.6 – Карты распределения Eh и концентрации платины по данным ТМГМ в пределах изучаемого участка Аганозерского массива (по данным [Вешев, 2003 ф]). Красной линией отмечен профиль, изученный автором

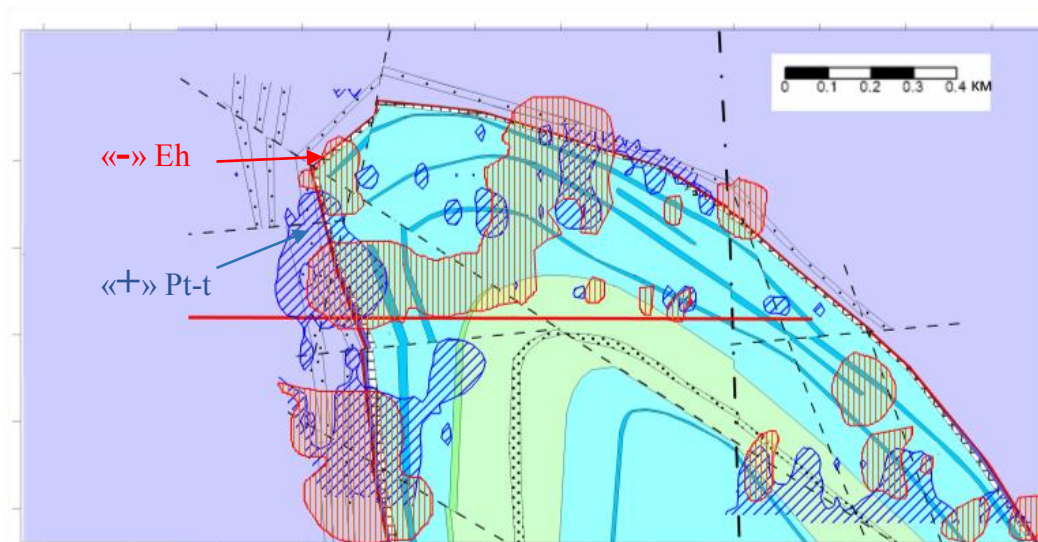


Рисунок 6.7 – Сопоставление отрицательных аномалий Eh и положительных аномалий концентрации платины по данным ТМГМ (Pt-t) (по данным [Вешев, 2003 ф]). Пояснение к схеме геологического строения, использованной в качестве «подложки», имеется на рисунке 1.9

Тем не менее, получены точечные высокоамплитудные аномалии, связанные с очевидной заболоченностью местности на трех точках наблюдения, которые приняты за помехи и удалены при осреднении. Результирующая кривая ОВП позволяет выделить 2 отрицательные аномалии (450-750, 1250-1450 м на рисунке 6.8), соответствующие относительно восстановительной обстановке. На графике изменения рН также выделены как аномалии повышенной кислотности три точки с локальной заболоченностью. Эти точки как помехи удалены при осреднении в скользящем окне по 3 точкам. В результате выяснено, что кислотность среды на профиле близка к нейтральной-слабокислой. Сглаженная кривая рН имеет максимумы, коррелирующие с минимумами Eh. Окислительно-восстановительный потенциал в сочетании с рН влияет на валентное состояние элементов переменной валентности. Результаты селективного извлечения подвижных форм также могут быть смещены под влиянием таких изменений [Hamilton, 2007]. С проблемой определения концентраций подвижных форм элементов

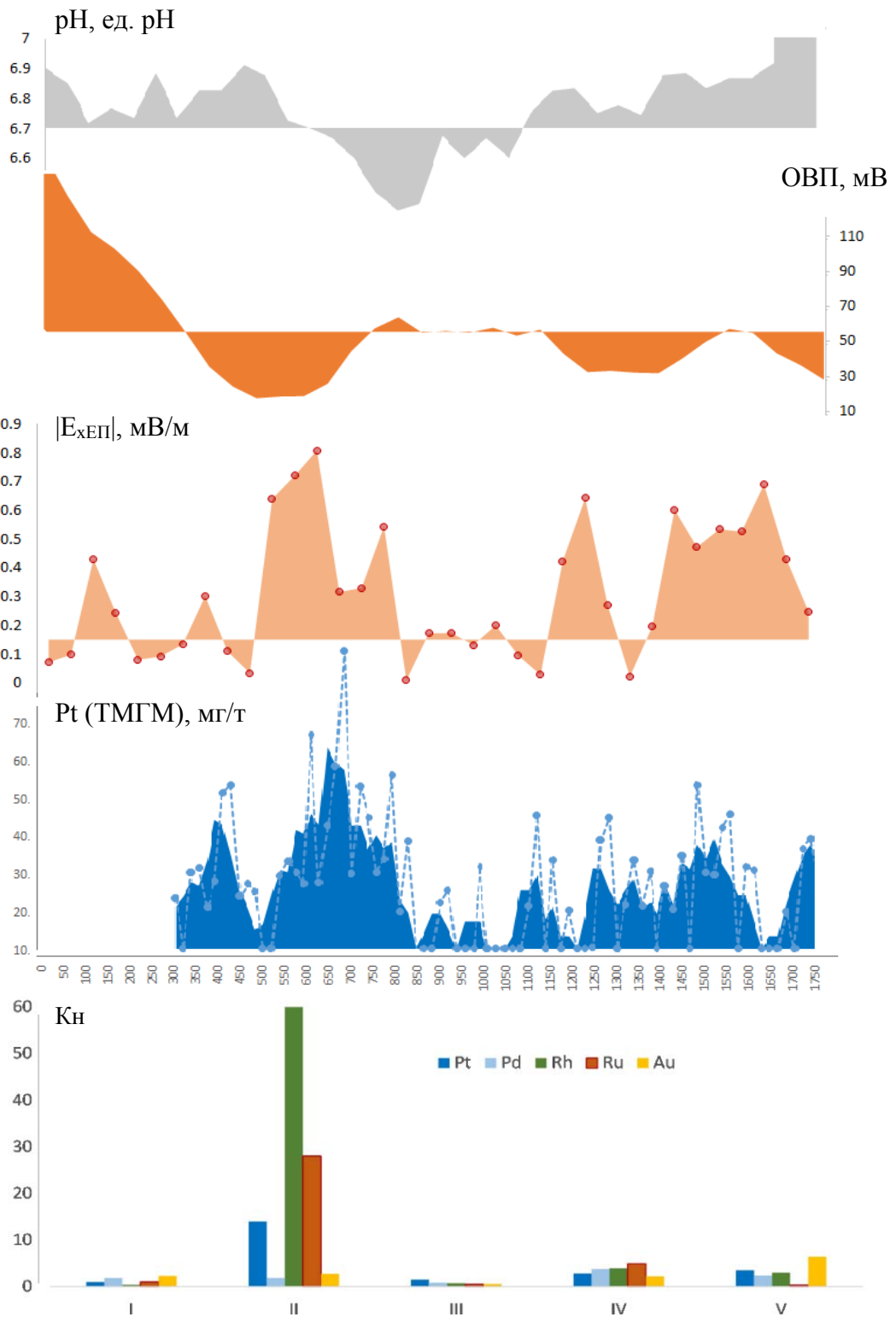


Рисунок 6.8 – Результаты исследований профиля Аганозерского массива – сглаженные значения рН, ОБП, модуль горизонтальной компоненты напряженности ЕП, концентрации платины в магнитной фракции по данным ТМГМ (по данным [Вешев, 2003 ф]) (залита область с осредненными по 3 точкам величинами) и значения коэффициентов накопления платиноидов в поляризуемой фракции комбинированных проб. Вблизи пикета  $x=600$  м расположена скважина, которая пересекла на глубине 28–36 м проявление платинометалльной минерализации:  $Pt+Pd > 0.2$  г/т

при различных условиях (зоторфованность и связанные с этим изменения физико-химических свойств) сталкивались исследователи и ранее: было предложено [Макарова, 2004] для данного участка применять нормировку содержаний подвижных форм на коэффициент отношения магнитных восприимчивостей после и до обжига. При работах в штате Онтарио, США [Hamilton, 2007] был применен алгоритм, в котором пробы, отобранные в зоторфованных участках, обрабатываются как отдельный массив данных. Автором не были применены приемы искусственного выравнивания аномалий концентраций в з. ф. элементов, т.к., по мнению автора, с такими участками иногда связана повышенная миграционная способность ЭПГ, а не только более интенсивная их сорбция.

По итогам работ на указанных участках, области повышенных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ (в поляризуемой фракции и по данным ТМГМ), соответствуют (с некоторым сдвигом в соответствии с моделью на рисунке 1.10) локальным экстремумам значений физико-химических свойств грунта и расположены в пределах аномалии ЕП интенсивностью около 300 мВ, осложненной несколькими локальными аномалиями. Сдвиг также может быть обусловлен несовпадением т.н. автора с точками опробования ТМГМ (профиль и точки опробования ТМГМ показаны на рисунке 6.6). Хорошая сопоставимость концентраций платины в магнитной фракции и модуля горизонтальной компоненты напряженности естественного электрического поля показана на рисунке 6.8. Величина  $|E_{хЕП}|$  характеризует плотность электрического тока, формирующегося у поверхности под действием ЕП, и максимумы этих значений обуславливают рост доли платиноидов, перешедших из минеральной формы в подвижную и затем во вторично-закрепленную форму нахождения.

#### **6.4 Обобщение результатов исследований**

Многочисленные успешные примеры применения геоэлектрохимических методов или способов изучения ореолов подвижных форм

элементов показывают их эффективность при поисках участков платинометалльного оруденения. Это позволяет сделать вывод о том, что подвижные формы платиноидов в большинстве случаев формируются в естественных условиях в ощутимых современными методами анализа концентрациях. Известная инертность платиноидов не имеет места в геологической среде, но формирование аномалий подвижных и вторично-закрепленных форм ЭПГ является более сложным процессом, нежели представлялось.

В процессе обобщения результатов предпринята попытка выявить скрытые закономерности с помощью метода главных компонент. Наряду с результатами опробования, сюда же были включены значения потенциала ЕП и магнитной восприимчивости до и после обжига, хотя автор понимает, что в данном случае это не в полной мере корректная процедура.

Основные закономерности соответствуют представлениям о геохимии изученных элементов. Наиболее значительными факторными нагрузками ЭПГ характеризуются в IV ГК (главной компоненте), отвечающей 7 % дисперсии распределения. Здесь же выделяется, хоть и в меньшей степени, магнитная восприимчивость, потенциал ЕП, содержание хрома до и после обжига. Однако величина изменения магнитной восприимчивости при обжиге не замечена в связи с платиноидами, ближе всего к этому параметру на дендрограмме корреляций компонентов находятся в.з.ф. цинка, хрома, брома. Известно, что обогащенные оксидами и гидроксидами железа почвы обладают значительной бромфиксирующей способностью [Перминова и др., 2017], подтверждения избирательности относительно других компонентов автор в публикациях не обнаружила. Для меди и титана селективный анализ не изменил принципиально корреляционных закономерностей.

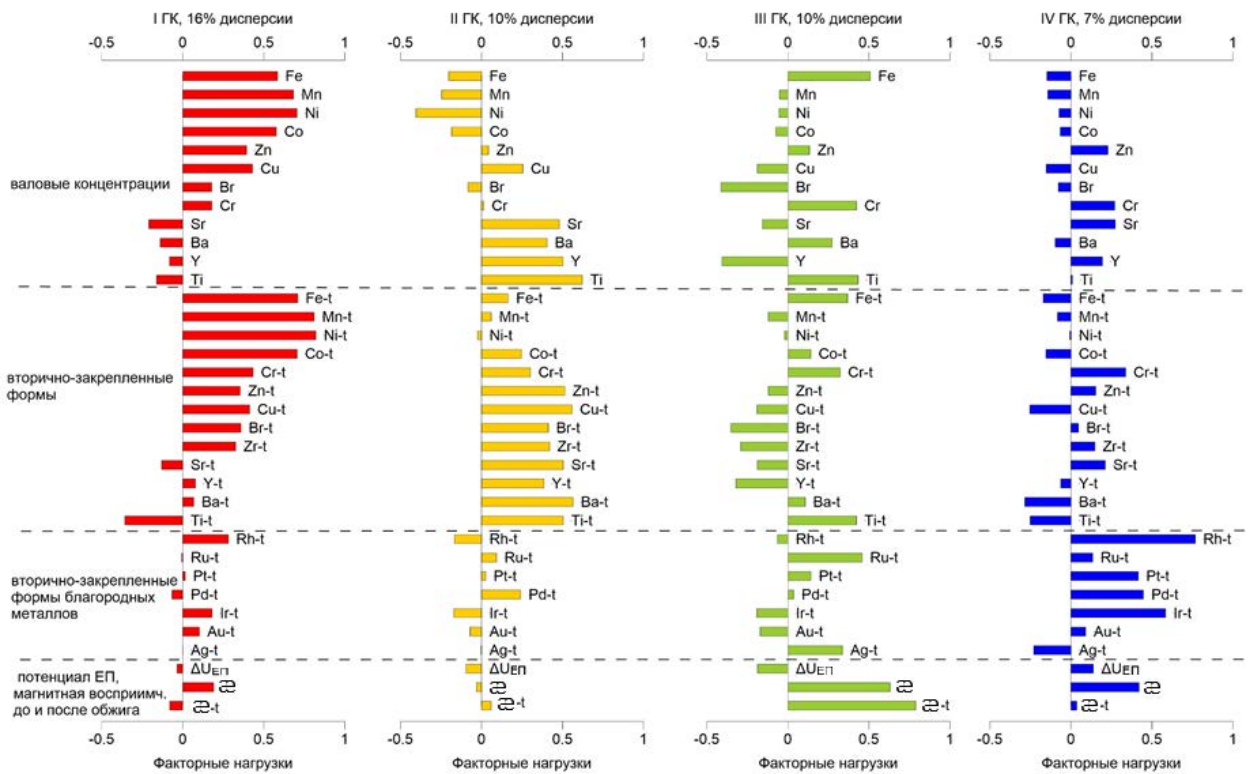


Рисунок 6.9 – Результаты расчета четырех главных компонент распределения валовых концентраций, концентраций в.з.ф. нахождения элементов (помечены индексом -t), физико-химических свойств и потенциала ЕП.

Расчеты проведены в авторской программе М.Б. Штокаленко

В.з.ф. иридия и родия, и в меньшей степени платины и палладия, закономерно образуют парные ветви на дендрограмме (рисунок 6.10), - для данных элементов ранее установлено схожее поведение в геохимических системах [Лазаренков и др, 1996]. Расчет дендрограммы корреляций изученных компонентов показал взаимосвязь модуля исследованной составляющей напряженности поля ЕП с концентрациями ряда благородных металлов: золота, рутения, серебра, обнаруженных во вторично-закрепленных формах. Однако это не является обязательным следствием рассмотренных ранее закономерностей, т.к., как было упомянуто, аномалии могут быть смещены друг относительно друга.

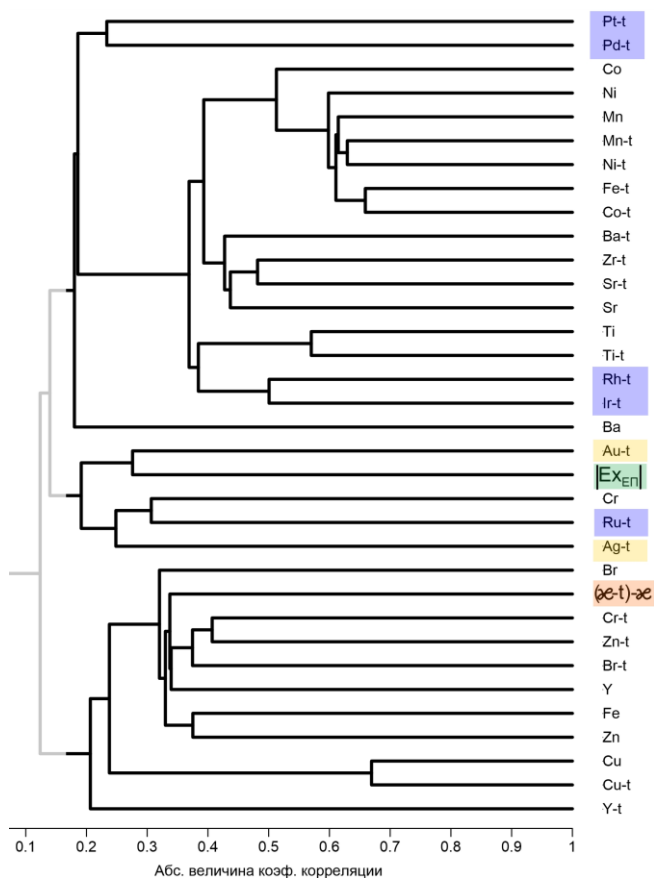


Рисунок 6.10 – Дендрограмма корреляций компонентов в изученных пробах. Бледные линии показывают связи с низкой значимостью. Цветом выделены компоненты, обсуждаемые в работе

По итогам исследований на участках Качканарского, Светлоборского, Аганозерского массивов, автором расширена

фактологическая база проблемы формирования вторичных ореолов рассеяния подвижных форм элементов платиновой группы.

Предложена способ поисков участков погребенной платинометалльной минерализации, последовательно включающая:

- исследования методом естественного электрического поля (ЕП) или исследование связанных физико-химических свойств грунта;
- регистрацию аномалий повышенной концентрации подвижных и вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов геоэлектрохимическими методами на участках, прилегающих к высокоамплитудным отрицательным аномалиям ЕП.

Способ имеет очевидное ограничение – возможность выявления участков платинометалльной минерализации, локализованных только в области воздействия естественных электрических полей. Размеры области влияния ЕП протяженного по вертикали электронного проводника, находящегося в ионопроводящей среде и окисляющегося со стороны

поступления кислорода, зависит от размера проводника, но, как правило, составляет первые десятки метров. Анализ данных литературных источников показывает, что для основных и ультраосновных массивов, с которыми связано большинство коренных месторождений платиноидов, характерно практически повсеместное наличие минералов – электронных проводников, способных формировать аномалии ЕП окислительно – восстановительного происхождения.

**Выводы к главе 6.** Проведенные полевые наблюдения позволяют отметить расположение областей повышенных концентраций в.з.ф. ЭПГ вблизи аномалий ЕП или участков изменений физико-химических свойств пород, сопутствующих ЕП. Регистрация струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами позволяет обнаруживать зоны платиноидной минерализации, включая перекрытые (расположенные на глубинах первых десятков, возможно, сотен метров), при условии воздействия на платиноносные зоны «катализатора» формирования п.ф. – естественного электрического поля. Области такого воздействия рационально выявлять до проектирования геоэлектрохимических исследований (относительно дорогостоящих) и проводить опробование в перспективных на нахождение в.з.ф. ЭПГ интервалах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является результатом самостоятельной работы аспиранта. Некоторые научные проблемы, рассмотренные в исследовании, являются дискуссионными; ряд из них таковыми и останется, вероятно, на ближайшие годы. Автор надеется на то, что диссертация может найти продолжение и развитие в дальнейших исследованиях.

Основные результаты работы:

1. Обоснована новая методика поисков участков погребенной платинометалльной минерализации, последовательно включающая:

- исследования методом естественного электрического поля (ЕП);
- регистрацию аномалий повышенной концентрации подвижных и вторично закрепленных форм нахождения платиноидов геоэлектрохимическими методами на участках, прилегающих к интенсивным отрицательным аномалиям ЕП.

2. Выполнена оценка скорости окисления магнетита в природных условиях путём сопоставления теоретических и экспериментальных данных об изменении по глубине содержания в породах магнетита и продуктов окисления магнетита (гетита, гематита). Постоянная кинетики реакции окисления магнетита установлена равной:  $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$ .

3. Разработана и сконструирована лабораторная исследовательская установка, с помощью которой подтверждено явление перехода до 20% платины и палладия из закрепленных минеральных форм в подвижные (растворенные) формы нахождения под воздействием электрического тока (модель ЕП). Моделирование процессов воздействия ЕП на платиносодержащую горную породу показало возможность перехода платиноидов из закрепленной формы в подвижную в составе комплексных ионов как положительного, так и отрицательного электрического заряда.

4. Предложен новый геоэлектрохимический способ поисков рудных месторождений, в т.ч. платиноидов, основанный на изучении концентраций

элементов – спутников и индикаторов оруденения в поляризуемой фракции, получаемой путем воздействия на пробы рыхлых отложений электростатического поля высокой напряженности. Устройство для осуществления воздействия – поляризационный сепаратор – предложено автором и сконструировано с участием автора. Материалы направлены в Федеральную службу по интеллектуальной собственности (Роспатент): подана заявка №2015147830 на регистрацию способа поисков и устройства для его осуществления.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*****Опубликованная***

1. Авторское свидетельство СССР № 237287. Способ разведки рудных месторождений. / Авторы: Ю. С. Рысс, И. С. Гольдберг, В. Д. Лысенко. 1971.
2. *Алексеев, С.Г.* Геоэлектрохимические технологии прогноза и поисков рудных и нефтяных объектов / С.Г. Алексеев, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов, Н.А. Касьянкова // Прикладная геохимия – 2002. – Вып. 3. – С. 365-382.
3. *Алексеев, С.Г.* Опыт использования наложенных ореолов рассеяния при прогнозе и поисках месторождений на закрытых территориях / С.Г. Алексеев, Н.А. Ворошилов, С.А. Вешев, М.Б. Штокаленко // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4-5. – С. 93-99.
4. *Алексеев, С.Г.* Закономерности электрохимического извлечения элементов в простейших физико-химических системах (Сообщение I) / С.Г. Алексеев, И.С. Гольдберг, А.А. Вейхер, Т.Р. Грачева, А.С. Духанин, А.В. Иванова // Сб. Методы разведочной геофизики. Исследование и применение физико-химических и геоэлектрохимических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. 1981 г. – стр. 38-48.
5. *Алексеев, С.Г.* Диффузионное извлечение подвижных форм нахождения металлов для поисков скрытого оруденения / С.Г. Алексеев, А.С. Духанин // Геохимические методы и научно-технический прогресс в геологическом изучении недр. -М.: Наука, 1989. – С.174-178.
6. *Алексеева, М.А.* О движении ионов под действием электрического тока в горных породах / М.А. Алексеева, Ю.С. Рысс //Методика и техника разведки. Сборник научных трудов № 84. Исследование и применение физико-химических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. Л., 1973. – С. 47-55.

7. *Антропова, Л.В.* Формы нахождения золота в горных породах. / Л.В. Антропова, А.З. Шуралева, Л.Ф. Фарфель // Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1980, №136. – с. 5-21.
8. *Афанасьев, В. П.* Влияние постоянного электрического поля на процесс осаждения тонких пленок платины методом ионно-плазменного распыления. / В. П. Афанасьев, Д. А. Чигирев, Н. С. Пшелко, **Н. П. Сидорова (Сенчина)** // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2010. – №6. – С. 59-65.
9. *Бабкина, А.Д.* Особенности формирования рудного титаномагнетит-ильменитового парагенезиса. Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северо-Запада России/ А.Д. Бабкина, С.В. Петров // Материалы XXVII молодёжной научной школы-конференции, посв. памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, г. Апатиты. – 2016. – С. 6-9.
10. *Баласанян, С.Ю.*, Динамическая геоэлектрика. Новосибирск, 1990. - 232 с.
11. *Блинов, К.В.* Применение модифицированного метода диффузионного извлечения элементов с плазменным масс-спектрометрическим анализом для выявления платинометальной минерализации на Кольском полуострове. / К.В. Блинов, А.Г. Марченко, С.П. Сергеев // Прикладная геохимия. Аналитические исследования. – 2003. – Вып. 4. – С. 232-241.
12. *Боярко, Г.Ю.*, Прокопчук С.И. Геохимические поиски платины (интрузив Инагли, Алданский щит) // Прикладная геохимия. Прогноз и поиски. – 2002. – Вып. 3. – С. 562-569.
13. *Бурмин, Ю.А.* (ред.) Методы поисков закрытых рудных месторождений полезных ископаемых на русской платформе: тезисы докладов. Семинаре «Геохимические, геологические и геофизические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений на Русской платформе». М.: Министерство геологии РСФСР. 1976. – 98 с.

14. *Быстров, И.Г.* Оценка влияния неоднородности титаномагнетита на обогатимость железных руд магматического генезиса. Канд. диссертация. Москва. 2014. – 117 с.
15. *Бычков, А.Ю.* Геохимическая модель современного рудообразования в кальдере Узон (Камчатка). Москва. 2009. – 124 с.
16. *Виноградова, И.В.,* Виноградов В.Н. Новые перспективные методы поисков и оценки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых. // Прикладная геохимия. Прогноз и поиски. – 2002. – Вып. 3. – С. 343-364.
17. *Воробьев А.А.* О возможности электрических разрядов в недрах Земли. Изв. Ан СССР, геол. и геоф., 1970, № 12, С. 3-14.
18. *Ворошилов, Н.А.,* Ворошилова Л.Н. Применение терромагнитного геохимического метода (ТМГМ) при поисках рудных месторождений, в сб. «Методы интерпретации результатов литохимических поисков». М.: Наука, 1987. – С. 135-141.
19. *Ворошилов, Н. А.* Поиски зон оруденения по изменению магнитной восприимчивости пород и минералов при нагревании / Н.А. Ворошилов, Н.Н. Сочеванов // Разведка и охрана недр. – 1966.- № 6. – С. 40-45.
20. *Голубев, А. И.,* Иващенко В. И. Платиноносность Карелии: сравнительный анализ с сопредельными регионами фенноскандинавского щита, прогнозная оценка, перспективы // Труды Карельского научного центра РАН. – 2012. – № 3 – С. 17-36.
21. *Голубев, В. С.* Гетерогенные процессы геохимической миграции / В.С. Голубев, Гарибянц А. А. // Изд-во «Недра», 1968 г. – 192 с.
22. *Гольдберг, И.С.* Явление дальней миграции элементов и методы поисков глубокозалегающих месторождений. Методы разведочной геофизики. Исследование геоэлектрохимических методов при поисках и разведке рудных месторождений. 1989 г. – С. 14-20.

23. *Гольдберг, И.С.* О возможной роли электрохимических процессов в образовании окисленных руд криворожского типа // Геологический журнал. – 1988. – №6. С. 11-15.
24. *Гольдберг, И.С.* Геохимический образ рудных объектов - от региональных до локальных - основа прогноза и поисков месторождений по технологии «IONEX» / И.С. Гольдберг, Г.Я. Абрамсон, В.Л. Лось, // Разведка и охрана недр. – 2013. – №8. – С. 12-16.
25. *Гольдберг, И.С.*, Электрохимическое извлечение элементов из горных пород (Сообщение 4) / И.С. Гольдберг, С.Г. Алексеев, А.А. Вейхер, Т.Р. Грачева //Сб. Методы разведочной геофизики. Исследование и применение физико-химических и геоэлектрохимических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. 1982 г. – С. 62-81.
26. *Голомолзин, В.Е.* Физико-геологическая модель месторождений "типа несогласия" - основа технологии поисков богатых комплексных урановых месторождений// Российский геофизический журнал. – 1994. – № 3-4. – С.8-16.
27. *Дмитриев, А.Н.* Метод естественного электрического поля в условиях многолетней мерзлоты Полярного Урала //Разведочная геофизика. 1975. – Вып.68. – С. 96-102.
28. *Дмитриев, А.Н.* Об электрохимических явлениях в процессе минералообразования //Советская геология. – 1981. – №6. – С. 106-113.
29. *Дмитриев, А.Н.* Расчёт электрического потенциала косоугольного параллелепипеда с помощью функции Грина //Разведочная геофизика. – 1975. – Вып. 68. – С. 103-112.
30. *Дмитриев, А.Н.* Решение прямой и обратной задач метода ЕЭП на основе уточненной модели природы естественного электрического поля // Геология и геофизика. – 2012. – т. 53. – № 6. – С. 797-812.
31. *Дмитриев, А.Н.* Экспериментальные исследования естественных ЭДС электронных проводников в мёрзлых породах / А.Н. Дмитриев, Ф.Я. Боркун // Труды ЗапСибНИГНИ. – 1974. – Вып. 74. – С. 174-178.

32. *Дурягина, А.М.* Минералого-геохимические особенности платиноносных элювиальных образований Светлоборского и Нижнетагильского массивов, Средний Урал. Автореферат канд. диссертации, 2015, СПб, – 20 стр.
33. *Земцов, В.Н.* О природе аномалий естественного электрического поля в некоторых районах Приморья // Геология и геофизика. – 1972. – № 4. – С. 78-82.
34. *Иванов, О.К.* Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. - Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1997. – 488 с.
35. *Иващенко, В.И.* Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы / В.И Иващенко, А.И. Голубев // Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 369 с.
36. *Каулио, В.М.* Эффективность метода естественного электрического поля при поисках рудопроявлений глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) / В.М. Каулио, А.А. Шагин // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. - М.:ГЕОС, 2009. – Т. 5. – 59 - 61 с.
37. *Квон, Д.А.,* Причины аномалий ЕП большой амплитуды свыше 1200 мВ в безрудных горных районах / Д.А. Квон, А.А. Рыжов, В.А. Шевнин // Инженерная геофизика 2015. Геленджик, Россия. – 2015 (EathDoc).
38. *Киселев, А.Л.* Перспективы золотоносности коры выветривания Казахстана // Геология и охрана недр. – 2003. – №1 (6). – С. 10-14.
39. *Колмаков, Ю. В.* Особенности естественной электрической поляризации пород и руд золотосульфидного месторождения «Благодатное» (Енисейский кряж). / Ю.В. Колмаков, А.М. Сазонов, Е.В. Потехина, С.И. Леонтьев, П.А. Тишин, И.Ф. Гертнер, Т.В. Полева //Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2008. № 1. – С. 103-116.
40. *Колонских, Н.С.* Особенности геохимических поисков платинометалльных проявлений на Полярном Урале и в Карело-Кольском

регионе / Н.С. Колонских, Ю.В. Макарова // Материалы VII Межрегиональной геологической конференции. 2008. – С. 224-226.

41. *Колонских, Н.С.* Особенности вещественного состава и геохимические поисковые признаки малосульфидной платинометалльной минерализации в базит-гипербазитовых массивах Карело-Кольского региона и Полярного Урала. Автореферат канд. диссертации. СПб. 2009. – 20 стр.

42. *Комаров, В.А.* Геоэлектрохимия: Учеб. пособие/ СПб. Санкт-Петербург. гос. ун-т. – 1994. – 136 с.

43. *Копылов, М.И.* Роль электрохимических барьеров в локализации оруденения и их значение для поисков месторождений полезных ископаемых (на примере месторождений Приамурья) // Тихоокеанская геология. – 2010. – т. 29. – №2. – С. 69-80.

44. *Кубракова, И.В.* Миграция платины, палладия и золота в водных системах платинометалльных месторождений / И.В. Кубракова, А.В. Фортыхин, С.Г. Лобов, И.Я. Кошечева, О.А. Тютюнник, М.В. Мироненко // Геохимия. – 2011. – № 11. – С. 1138-1152

45. *Курбакова, И.В.* Платиновые металлы в окружающей среде: содержание, определение, поведение в природных системах / И.В. Кубракова, А.В. Никулин, И.Я. Кошечева, О.А. Тютюнник // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – № 20. – С. 645-656.

46. *Лазаренков, В.Г.* Геохимия платиновых элементов: Учебное пособие / В.Г. Лазаренков, А.Г. Марченко, И.В. Таловина / Санкт-Петербургский горный ин-т. – СПб, 1996. – 93 с.

47. *Лазаренков, В.Г.* Геохимия элементов платиновой группы / В.Г. Лазаренков, И.В. Таловина - СПб.: Галарт, 2001. – 266 с.

48. *Левин, А.И.* Теоретические основы электрохимии. – М.: Metallurgia, 1972. – 544 с.

49. *Лось, В.Л.* Геохимические системы рудных объектов: примеры, модель, генетические поисковые критерии / В.Л. Лось, И.С. Гольдберг, Г.Я. Абрамсон // Геология и охрана недр. 2003. – №1 (6). – С. 24-33.
50. *Лютюев, В.П.* Механизмы преобразования слабомагнитных железосодержащих минералов (гематит, гетит) в сильномагнитные минералы (магнетит, маггемит) под влиянием внешних физико-химических факторов / В.П. Лютюев, В.И. Силаев, А.Б. Брик, А.Н. Пономаренко, Н.А. Дудченко // Минералогия техногенеза. – 2014. – №15. – С. 59-69.
51. *Макарова, Ю.В.* Вторичные литохимические ореолы и потоки рассеяния на полузакрытых и закрытых территориях и их использование при поисках рудных месторождений: на примере участков Карело-Кольского региона и Дальнего Востока. Автореферат канд. диссертации. СПб. 2008. – 20 стр.
52. *Макарова, Ю.В.* Особенности распределения хрома, никеля, меди и благородных металлов в почвах Ганинского участка (Бураковский расслоенный массив Карелии) // Записки Горного института. – 2004. – Т. 159. – ч. 2. – С. 15-18.
53. *Марченко, А.Г.* Вторичные литохимические ореолы и потоки рассеяния: классификация, главные типы, концептуальные и математические модели, количественная интерпретация с оценкой прогнозных ресурсов. // Прикладная геохимия. Вып. 8: Проблемы поисковой геохимии. Т. 1: Теория и методы. – М.: ИМГРЭ, 2008. – С. 106-118.
54. *Марченко, А.Г.* Физико-математические модели надрудных наложенных ореолов рассеяния. // Прогнозно-поисковая геохимия на рубеже XXI века. М.: ИМГРЭ. – 1998. – С.83-86.
55. *Мекаева, И.В.* Электрохимия магнетитового анода в растворе сульфата натрия / И.В. Мекаева, Б.А. Хоришко. Е.И. Виноградов, О.В. Иванова, К.Е. Румянцева, К.В. Станиславчик // Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – Вып. 12. – С 52-55.

56. *Мельников, А.В.* Платиноносность золоторудных месторождений плутоногенно-метаморфогенного класса (Верхнее Приамурье) / А.В. Мельников, С.М. Радомский, В.Д. Мельников, Моисеенко В.Г. // ДАН. – 2008. – Т. 423. – № 2. – С. 248-250.
57. *Мельников, А.В.* Новые сведения по платиноносности гидротермалитовых формаций верхнего Приамурья / А.В. Мельников, С.М. Радомский, В.Г. Моисеенко, В.Д. Мельников // ДАН. – 2007. – т. 417. – № 2. – С. 236-238.
58. *Менчинская, О.В.* Опыт методического сопровождения поисковых геохимических работ / О.В. Менчинская, Н.А. Юшко, С.В. Галюк // Разведка и охрана недр. // 2013. – №8. – С. 58-63.
59. *Миллер, С.Д.* Исследования магнитной восприимчивости рыхлых отложений для картирования и поисков / С.Д. Миллер, А.П. Соловов. // Разведка и охрана недр. // 1955. – №4. – С. 34-40.
60. *Нюссик, Я.М.* Электрохимия в геологии/ Я.М. Нюссик, И. Л. Комов – Л.: Наука, 1981. – 240 с.
61. *Огурцов, А.Н.* Лекции по физической химии: Электрохимия. Ч.4. 2003. – 19 с.
62. Патент № 2097796. 1997. Н.А. Ворошилов, С.А. Вешев, С.Г. Алексеев, В.И. Васильев, О.Ф. Кужельная. Геохимический способ поисков углеводородов. Россия.
63. Патент РФ № 2330259. 2006. Авторы: О.В. Петров, С.С. Шевченко, С.В. Соколов, А.Г. Марченко, В.Н. Топорский, Г.А. Олейникова, Ю.В. Макарова, Ф.Г. Гаева, Е.О. Петров, В.О. Халенев. Геохимический способ поисков месторождений полезных ископаемых.
64. *Перминова, Т.А.*, Бром в почвах томской области / Известия Томского политехнического университета/ Т.А. Перминова, Н.В. Барановская, Л. Бертран, Л. В. Жорняк, А.Ф. Судыко // Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 2. 36–45.

65. *Пилюгин, А.Г.* Геохимия и платиноносность хромититов Нижнетагильского и Светлоборского массивов, Средний Урал. Автореферат канд. диссертации. СПб. 2014. – 20 с.
66. *Пилюгин, А.Г.* Платиноносные жильные хромититы Светлоборского клинопироксенит-дунитового массива, Средний Урал / Пилюгин А.Г., Лазаренков В.Г., Воронцова Н.И. И. В. Таловина, А. П. Козлов, А. В. Антонов, У. Кемпе. // Записки Горного института. – 2013. – Т.200. – С. 249-257.
67. *Плюснина, Л.П.* Поведение платины в гидротермальных условиях / Л.П. Плюснина, Г.Г. Лихойдов // Вестник ДВО РАН. – 2009. – № 4. – С. 30-37.
68. *Поликарпов, В.К.* Технология прогнозно-поисковых работ на сульфидные медно-никелевые руды с металлами платиновой группы / В.К. Поликарпов, А.Л. Ронин, А.А. Елисеев, С.Н. Захаров, М.Б. Штокаленко, С.А. Козлов // Записки Горного института. – 2005. – Т. 162, – С. 42-44.
69. *Полянин, А.Д.* Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. Точные решения / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев М.: Физико-математическая литература, 2002. – 430 с.
70. *Путиков, О. Ф.* Основы теории нелинейных геоэлектрохимических методов поисков и разведки. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб. 2009. – 534 с.
71. *Путиков, О. Ф.* Условия формирования естественного электрического поля (ЕП) на месторождениях силикатного никеля кор выветривания / О.Ф. Путиков, В.Г. Лазаренков, И.В. Таловина, **Н.П. Сенчина** // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 81-86
72. *Путиков, О.Ф.* «Струйные» ореолы рассеяния над нефтегазовыми залежами в неоднородных породах / О.Ф. Путиков, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов, С. Г. Алексеев, Чжоу Цзыюн, Н.А Касьянкова. // Геофизика. – 2000. – №1. – С. 52-56.

73. *Путиков, О.Ф.* К обоснованию физико-математической модели струйных ореолов рассеяния / О.Ф. Путиков, А.С. Духанин, Н.Р. Машьянов // Российский геофизический журнал. – 1994. – № 2. – С. 5-10.
74. *Путиков, О.Ф.* Точное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных теории геоэлектрохимических методов / О.Ф. Путиков, **Н.П. Сенчина** // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 463. – № 2. – С. 213-215. (*Putikov O. F. Precise Solution of the System of Nonlinear Differential Equations in Partial Derivatives of the Theory of Geoelectrochemical Methods / O. F. Putikov and N. P. Senchina // Doklady Akademii Nauk (Doklady Earth Sciences), Volume 463, Part 2. Geochemistry, Geophysics, Oceanology, Geography. p. 726-727).*
75. *Путиков, О.Ф.,* Выявление аномальных концентраций платиноидов с применением данных геоэлектрохимии в пределах Светлоборского массива (Средний Урал) / О.Ф. Путиков, Н.П. Сенчина, И.В. Таловина, А.М. Дурягина, Ю.М. Телегин, В.С. Никифорова // Геология и геофизика, 2017 (в печати).
76. *Радомская, В.И.* Особенности аккумуляции благородных металлов растениями ландшафтов Верхнего Приамурья / В.И. Радомская, С.М. Радомский, В.Г. Моисеенко // Литосфера. – 2008. – № 3. – С. 100-113.
77. *Радомская, В.И.* Сорбционные свойства торфа и гуминовых кислот по отношению к благородным металлам / В.И. Радомская, Л.М. Павлова, Л.П. Носкова, В.Ю. Котельников, В.В. Иванов, А.В. Поселюжная // Химия растительного сырья. – 2014. – №3. – С. 279-288.
78. *Радомский, С.М.* Формы миграции благородных металлов в природной среде // Научное обозрение. – 2015. – № 2. – С. 35-40.
79. *Радомский, С.М.* Соотношения ионных и металлических форм благородных металлов на золотосеребряном месторождении Покровское (Верхнее Приамурье) / С.М. Радомский, В.И. Радомская // Горный информационно – аналитический бюллетень. 2013. № 1. – С. 128 - 134.

80. *Радомский, С.М.* Групповая сорбция благородных металлов на массовых сорбентах / С.М. Радомский, В.И. Радомская, Н.А. Бородина, Н.Н. Козлова // Геология, минералогия и геохимия благородных металлов Востока России. Новые технологии переработки благороднометалльного сырья: Сб. науч. тр. - Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2005. – С. 263 - 267.
81. *Радомский, С.М.* Сорбция благородных металлов на неспецифических сорбентах / С.М. Радомский, В.И. Радомская, В.Г. Моисеенко // Цветные металлы. – 2006. – № 9. – С. 57 - 61.
82. *Радомский, С.М.* Биогеохимия благородных металлов в компонентах ландшафта Верхнего Амура / С.М. Радомский, В.И. Радомская, Н.Н. Козлова, Н.А. Бородина // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий: Труды I Всероссийского симпозиума с межд. участием и VII Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана. – Чита. – 2006. – С. 127-131.
83. *Радомский, С.М.* Равновесные параметры процесса окисления благородных металлов / С.М. Радомский, В.И. Радомская // Естественные и технические науки. – 2010. – № 4. – С. 166-170.
84. *Рыжкова, С.О.* Никеленосные оксиды железа Буруктальского месторождения, Южный Урал/ СПГГИ(ТУ) / С.О. Рыжкова, И.В. Таловина, В.Г. Лазаренков, В.Л. Уголков, Н.И. Воронцова // Записки горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 101-111.
85. *Рысс, Ю.С.* Естественные электрические поля на рудном Алтае и их геологическое значение. - Автореферат канд. диссертации. Л., – 1963. – 17 с.
86. *Рысс, Ю.С.* Структура естественных электрических полей на рудных месторождениях и её использование при поисках и разведке полезных ископаемых / Ю.С. Рысс, А.С. Тясто // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – 1966. – Вып.2. – С. 78.
87. *Рысс, Ю.С.* О роли кислорода в образовании и существовании естественных электрических полей на рудных месторождениях и углисто-графитичтых породах. Методика и техника разведки. Сборник научных трудов

№ 84. Исследование и применение физико-химических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. Л., 1973. – С. 56-62.

88. *Рысс, Ю.С.* Геоэлектрохимические методы разведки (введение в геоэлектрохимию). ЛГУ. СПб, 1983. – 255 с.

89. *Рысс, Ю.С.* Струйная миграция вещества в образовании вторичных ореолов рассеяния/ Ю.С. Рысс, И.С. Гольдберг, С.Г. Алексеев, А.С. Духанин // ДАН. - 1987. – Т.297. – №4. – С. 956-958.

90. *Свешников, Г.Б.* Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: Недра, 1967. – 158 с.

91. *Свешников, Г.Б.* Естественное электрическое поле как фактор образования зоны вторичного обогащения на сульфидных месторождениях. / Г.Б. Свешников, Ю.С. Рысс, А.К. Аузин //Уч. зап. ЛГУ. – 1963. – № 320. – Вып. 14. – С. 98-105.

92. *Семенов, А.С.* Электроразведка методом естественного электрического поля- 3-е изд. перераб. и доп. - Л.Недра. – 1980. – 446 с.

93. *Семенов, А.С.* «Меняющиеся естественное электрическое поле» в Земле / А.С. Семенов, М.Е. Новожилова, А.В. Вешев // Вопросы рудной геофизики. – 1957. – Вып. 1. – С. 83-113.

94. *Сенчина, Н. П.* Естественное электрическое поле как механизм дифференциации рудных элементов коры выветривания // материалы XXV международной научно-практической конференции. Научно-информационный издательский центр "Институт стратегических исследований". – 2015. – С. 393-398.

95. *Сенчина, Н. П.* Перераспределение химических элементов под действием естественного электрического поля (на примере Буруктальского месторождения никеля, Южный Урал) // Научно-технические ведомости СПбГПУ», серия «Наука и образование», раздел «Математическое моделирование физических процессов». – 2013. – №2 (170). – С. 57-61.

96. **Сенчина, Н. П.** Процессы дифференциации элементов геологической среды под действием естественного электрического поля на примере Буруктальского никелевого месторождения. Тез. докл. Политехнический фестиваль для студентов и молодых ученых. 2012. – С. 123-125.
97. **Сенчина, Н. П.** Физико-химическое моделирование электрохимических процессов при формировании силикатных руд (на примере Буруктальского месторождения, Южный Урал) /Н. П. Сенчина, О. Ф. Путиков // тез. докл. XII конференция Студенческого научного Общества Геологического факультета СПбГУ: Геология в различных сферах. – 2013. – С. 98-99.
98. **Сенчина, Н. П.** Роль геоэлектрохимических процессов при формировании залежей платиноидов на месторождениях силикатного никеля / Н.П. Сенчина, О.Ф. Путиков, А.А. Миллер, С.Г. Алексеев // X Международный геофизический научно-практический семинар «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых». 2012. С. 29-32.
99. **Сенчина, Н.П.** Анализ корреляционных связей результатов измерения естественного электрического поля и содержаний химических элементов. Тез. докл. Третья молодежная Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». 2013. – Москва, ИГЕМ РАН. – С. 202-204.
100. **Сенчина, Н.П.** Анализ корреляционных связей результатов измерения естественного электрического поля и содержаний химических элементов (на примере объектов Среднего Урала) // Записки Горного института. – 2015. – Т. 212. – С. 141-145.
101. **Сенчина, Н.П.** Связь электрохимических процессов зоны гипергенеза с геохимическим образом рудного объекта. Тез. докл. Геофизические исследования Земли и ее недр. IX международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика 2013». – 2014. - СПб. – С. 57-60.

102. *Сенчина, Н.П.* Результаты геоэлектрохимических исследований перекрытого платинометального оруденения на территории Аганозерского массива Бураковского комплекса / Н.П. Сенчина, А.А. Миллер, О.Ф. Путиков // Материалы XIII Международного геофизического научно-практического семинара: Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых. 2016. С. 75-79.
103. *Сенчина, Н.П.* Выделение платиноносных зон Светлоборского дунитового массива по данным ТМГМ / Н.П. Сенчина, О.Ф. Путиков, А.М. Дурягина, И.В. Таловина // Материалы XII Международного геофизического научно-практического семинара: Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых. 2015. С. 195-198.
104. *Сергеев, С.П.* Комплексование геофизических, геохимических и геологических методов при поисках благороднометального оруденения / С.П. Сергеев, К.В. Блинов, А.Г. Марченко, В.А. Бутенко, В.О. Ильченко, А.В. Клепиков // доклад на XV геологическом съезде Республики Коми, геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России, 2009.
105. *Соколов, С.В.* Временные методические указания по проведению геохимических поисков на закрытых и полужакрытых территориях / С.В. Соколов, А.Г. Марченко, С.С. Шевченко, А.Н. Дедюхин, О.И. Олешкевич, О.Н. Симонов, А.И. Стехин, Т.Е. Теремецкая, С.С. Шевченко // СПб: ВСЕГЕИ. – 2005. – 98 с.
106. *Соколов, С.В.* Метод анализа сверхтонкой фракции: результаты, эффективность / С.В. Соколов, Ю.В. Макарова, Ю.Ю. Юрченко // Разведка и охрана недр, 2013. – № 8. – С. 54-58.
107. *Телегин, Ю.М.* Геологические особенности рудопроявлений платины Светлоборского и Каменушинского массивов Платиноносного пояса Урала / Ю.М. Телегин, Т.В. Телегина, Н.Д. Толстых // Ультрабазит-базитовые

- комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. – 2009. – Т.2. – С. 212-215.
108. *Теремецкая, Т.Е.* Геохимические поиски платинометалльного оруденения в расслоенных интрузивах. / Т.Е. Теремецкая, Л.Я. Крапива, В.Н. Логинов, В.А. Ганин // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 5. – С. 67-73.
109. *Толстых, Н.Д.* Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала / Н.Д. Толстых, Ю.М. Телегин, А.П. Козлов // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 775-793.
110. *Умарова, А.Б.* Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. – 2011 г. – 268 стр.
111. *Фарадей, М.* Избранные работы по электричеству. - М.-Л.: ГОНТИ, 1939.
112. *Федянин, С. Н.* Роль прослоев электронной проводимости в образовании месторождений урана гидрогенного типа // Тезисы Третьего международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство» – 2013. – С. 165-167.
113. *Фоминых, В.Г.* Пироксениты Качканара/ В.Г. Фоминых, П.И. Самойлов, Г.С. Максимов, В.А. Макаров – 1967. – 85 с.
114. *Френкель, Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. – 2015. – 154 с.
115. *Фролов, П.В.* Минералого-технологические исследования высокомагнезиального сырья Аганозерского комплексного объекта / П.В. Фролов, В.И. Кевлич, В.П. Ильина, Т.В. Попова, О.С. Сибелев, А.И. Савицкий, И.В. Орлов // Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2013. – Вып. 16. – С. 102-108.
116. *Хмельник, С.И.* Расчет статических электрических и магнитных полей на основе вариационного принципа, Доклады независимых авторов, – Вып. 19, 2011, – С. 214-234.

117. *Холмянский, М.А.* О характере естественного электрического поля в районах развития многолетней мерзлоты // Геофизические методы разведки в Арктике. — 1971. Вып. 6. — С. 115-121.
118. *Холмянский, М.А.* Геоэлектрохимические поисковые исследования на акватории приамальского шельфа / М.А. Холмянский, О.Ф. Путиков, **Н.П. Сенчина**, С.П. Павлов, В.М. Анохин // XII Международный геофизический научно-практический семинар: Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых 2015. С. 95-98.
119. *Чернышов, Н.М.* Где добывают платиновые металлы // Соровский образовательный журнал. — 1998. — № 5. С. 72-76.
120. *Чистяков, А.В.* Петрология раннепалеопротерозойского Бураковского комплекса, Южная Карелия / А.В. Чистяков, Е. В. Шарков // Петрология. — 2008. — Т. 16. — № 1. — С. 66-91.
121. *Штокаленко, М.Б.*, Физико-химические условия миграции метана в обводненных породах / М.Б. Штокаленко, Н.А. Ворошилов, О.Ф. Путиков // Российский геофизический журнал. — 2004. — С. 12 - 19.
122. *Штокаленко, М.Б.* Оценка параметров струйной миграции по ширине ореола вторично закрепленных форм химических элементов / М.Б. Штокаленко, О.Ф. Путиков, С.Г. Алексеев, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов // Геофизика. — №4. — 2006. — С. 55-60.
123. *Штокаленко, М.Б.* Механизмы формирования наложенных ореолов, фиксируемых геоэлектрохимическими и атмохимическими методами / М.Б. Штокаленко, С.Г. Алексеев, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов, Е.Г. Маргович, О.Ф. Путиков, // Российский геофизический журнал. — 2009. — № 47-48. — С. 33-50.
124. *Alekseev, S.G.* «Goelectrochemical Methods: Response to Criticism and Discussion of CHIM and MDI Methods Characteristics» / S.G. Alekseev, **N.P. Senchina**, S.Y. Shatkevich // 7-th International geological and geophysical

- conference and exhibition «Saint Petersburg 2016». Режим доступа: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=84256>
125. *Antropova, L.V.* New methods of regional exploration for blind mineralization: application in the USSR / L.V. Antropova, I.S. Goldberg, N.A. Voroshilov, , Ju.S. Ryss // *J. Geochem Explor.* – 1992. – v. 43. – p. 157-166.
126. *Bigalke, J.* The Geobattery model — a contribution to large scale electrochemistry / J. Bigalke, E.W. Grabner // *Electrochimica Acta.* – 1997. – v. 42, № 23-24. – p. 3443-3452.
127. *Cin-Ty Lee.* Platinum-group elements (PGE) and rhenium in marine sediments across the Cretaceous–Tertiary boundary: Constraints on Re-PGE transport in the marine environment/ Cin-Ty Lee, G. J. Wasserburg and F. T. Kyte, // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – Vol. 67. No. 4. 2003. – p. 655-670.
128. *Dubiella-Jackowska, A.* Platinum Group Elements: a challenge for environmental analytics. Review /, A. Dubiella-Jackowska, Z. Polkowska, J. Namiesnik // *Polish J. of Environ. Stud.* – 2007. – Vol. 16. – No. 3. – p. 329-345.
129. *Dyer, R. D.* Multimedia exploration strategies for PGEs: insights from the Surficial Geochemistry Case Studies Project, Lake Nipigon Region Geoscience Initiative, northwestern Ontario/ R. D. Dyer, P.J Barnett // *Canadian Journal of Earth Sciences.* – 2007. – Vol. 44. - No. 8 – p. 1169-1202.
130. *Cameron, E. M.* Deep-penetrating geochemistry, release of field and laboratory data for soils collected during Deep Penetrating Geochemistry Phase Ii Project In Abitibi, Nevada and Chile, Abitibi. – 1999. Режим доступа: <https://www.appliedgeochemists.org/index.php/component/content/article/11-members-area/95-deep-penetrating-geochemistry-phase-ii>
131. *Cameron, E. M.* Finding deeply buried deposits using geochemistry / E.M. Cameron, S. M. Hamilton, M. I. Leybourne, G. E.M. Hall & M. B. McClenaghan// *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis.* –Vol. 4 2004. – p. 7-32.

132. *Junge, M.* Distribution of platinum-group elements in pristine and near-surface ores from the Platreef, northern Bushveld Complex, South Africa, / Malte Junge, Thomas Oberthür, Dennis Kraemer// SGA Conference paper. – Nancy. – 2015.
133. *Gertsch, B.* Platinum Group Elements (PGE) Geochemistry of Brazos sections, Texas / B. Gertsch, G. Keller, T. Adatte, Z. Berner // G. Keller and T. Adatte (eds.). End-Cretaceous Mass Extinction and the Chicxulub Impact in Texas. - SEPM Special Publication 100. – 2011. – p. 227-249.
134. *Goldberg, I.S.* Vertical migration of elements from mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998. – V. 61. – p. 191-202.
135. *Gorby, Y. A.* Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms/ Y. A. Gorby, et al., // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* - 2006. – V. 103 (30). – № 11. – 358 - 363.
136. *Govett, G.J.S.* Detection of deeply buried and blind sulphide deposits by measurement of Hand conductivity of closely spaced surface soil samples // *Journal of Geochemical Exploration*. –1976. –№ 6. – p. 359-382.
137. *Hamilton, S.M.* Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden: methodologies and field investigation at Marsh Zone gold property / S. M. Hamilton, E.M. Cameron, M.B. McClenaghan and G.E.M. Hall // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. - 2004. – № 4. – p. 33-44
138. *Hamilton, S.M.* Electrochemical mass transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1998. – № 63. – p. 155-172.
139. *Hamilton, S.M.* Spontaneous potentials and electrochemical cells // *Handbook of Exploration Geochemistry*. – 2000. –Vol. 7. – p. 81-119.
140. *Hamilton, S.M.* A prospector's guide to the use of selective leach and other deep penetrating geochemical techniques in mineral exploration. Ontario Geological Survey, Open File Report 6209. – 2007. – 39 p.
141. *Hodges, G.*, Voodoo methods: dealing with the dark side of geophysics, Fugro Airborne Surveys, Toronto, Canada, SAGEEP. – 2005. –p. 315-327.

142. *Hoover, D. B.* CHIM - an electrogeochemical partial extraction method: an historical overview / Hoover D. B., Smith David B. and Leinz Reinhard W. // USGS, – 1997. - 27 p.
143. *Kéiko, H. H.* Using the High Mobility of Palladium in Surface Media in Exploration for Platinum Group Element Deposits: Evidence from the Lac des Iles Region, Northwestern Ontario / H. H Kéiko, E. M. Cameron // *Economic Geology*. – 2004. – V. 99. – p. 157-171.
144. *Kropacheva, N.S.* Geochemical characteristics and mineral composition of the PGE-sulfide mineralization in the Mountain Generalskaya massif, Kola Peninsula, North-West Russia / N.S. Kropacheva, A.G. Marchenko // 23rd International Applied Geochemistry Symposium - IAGS 2007 - Exploring our Environment. Program and Abstracts. Oviedo, Asturias, Spain, 2007. – p. 168.
145. *Legaz, A.*, Self-potential and passive seismic monitoring of hydrothermal activity: A case study at Iodine Pool, Waimangu geothermal valley, New Zealand /A. Legaz, A. Revil, P. Roux, J. Vandemeulebrouck, P. Gouédard, T. Hurst, A. Bolève // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V.179, I. 1, – 2009 – p. 11-18.
146. *Leybourne, M. I.* Hydrogeochemical and geophysical evidence for borehole oxidation of massive sulphides below the water table and generation of selfpotential anomalies /Leybourne M. I., S. M. Hamilton, C. J. Mwenifumbo, W. D. Goodfellow & D. R. Boyle // *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*. – V. 9. – 2009. – p. 39-50.
147. *Mann, A.W.* Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration, de Souza, Geological Society of London / A.W. Mann, R.D. Birrell, M.A.F. & H.A.F. Fedikow // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2005. – V. 5. – pp. 201-210.
148. *Mann, A.W.* Strong versus weak digestions: ligand-based soil extraction geochemistry, Geological Society of London // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – V. 10. – 2010. – p. 17-26.

149. *Mann, A.W.* Soil geochemical anomalies - their dynamic nature and interpretation / A.W. Mann, A.T. Mann, D.B. Humphreys, S.E. Dowling, S. Staltari, L. Myers // Minerals and Energy Research Institute of Western Australia. –1997. – Report, V.1. – 184 p.
150. *Mark, A.F.* Results of Mobile Metal Ions Process (MMI-M) Soil Geochemical Surveys on the Marble Mountain Property of Cascadero Copper Corporation / A.F. Mark, P.E. Fedikow, R.K. Bezys // Sudbury Area, Ontario, Canada. – 2012. – 40 p.
151. *Mokhtari, A.R.* Geophysical support for geochemistry in detecting deeply buried mineralization: a case study from Mandamah, Australia / A.R. Mokhtari, D.R. Cohen, S.G. Gatehouse – Explore. –2009. –N145. – p. 11-16.
152. *Parkkinen, J.* Spatial statistical and structural modeling of the Keivitsa Ni-Cu PGE deposit, northern Finland. Mineralium Deposita. –2003. –V. 38. – p. 2-21.
153. *Pumer, I. R.* New Mechanisms for the Mobilization of the Platinum Group Elements in the Supergene Zone/ I. R. Pumer., H. M. Prichard et al. (eds.) //Geo-Platinum 87. – 1987. – p. 83-92.
154. *Putikov, O.F.* Geoelectrochemistry and Stream Dispersion/ O.F. Putikov, Wen B. // Geochemical Remote Sensing of the Subsurface: Handbook of Exploration Geochemistry / Edited by M. Hale. – 2000. –Vol. 7. – №1. –p. 17-79.
155. *Revil, A.* Self-Potential Method: Theory and Applications in Environmental Geosciences / A. Revil, A. Jardani.- Hardback, 2013. – 369 p.
156. *Sato, M.* The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials /M. Sato, Mooney H. M. // Geophysics. – 1960. – v. 25. – p. 226-249.
157. *Sibson, R.H.* Seismic pumping; a hydrothermal fluid transport mechanism./ R.H. Sibson, J.M. Moore, A.H. Rankin, // J. Geol. Soc. Lond. Spec. Pub. 131– 1975. – p. 653-659.
158. *Suhong Pan.* Accumulating characteristics of platinum group elements (PGE) in urban environments/ *Suhong Pan*, Gan Zhang, Yali Sun, Paromita Chakraborty // Science of the Total Environment. – 2009. –v. 407. – p. 4248-4252.

159. *Алексеев, С.Г.* Технология работ и интерпретации данных геоэлектрохимических методов на рудных объектах (методические рекомендации) / С.Г. Алексеев, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов, О.Ф. Путиков, А.П. Савицкий, М.Б. Штокаленко. ФГУ НПП «Геологоразведка», Санкт-Петербург, 2005 г.
160. *Алексеев, С.Г.* (отв. исполнитель) Информационный отчет №2 о результатах геоэлектрохимических работ, проводимых ВИРГ-Рудгеофизика на Шалозерской площади, республики Карелия, 2002.
161. *Вешев, С.А.* (отв. исполнитель) Отчет по договору «Методическое геофизическое обеспечение и сопровождение прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ на черные, цвет редкие, благородные металлы, алмазы и неметаллы», ВИРГ Рудгеофизика (ФГУ НПП «Геологоразведка»), 2003 г.
162. *Кравцов, Б.Ф.* (гл. ред.) Исследование и применение электрохимических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. Л., ВИТР. – 1981.
163. *Марченко, А.Г.* Опыт-методические геохимические и сейсмотомографические работы в пределах участков «Вуручайвенч» и «Южносопчинский» / А.Г. Марченко, С.В. Соколов, Э.В. Табунс и др. Отчет по договору с ОАО «Кольская ГМК». СПб. ЗАО «Теллур СПб». – 2004 г.
164. *Марченко, А.Г.* Опыт комплексирования наземных геофизических и геохимических методов при поисках золоторудных месторождений. / А.Г. Марченко, К.В. Блинов, А.И. Рокитянский, К.М. Ермохин. // 88-я сессия Научно-методического совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Санкт-Петербург, ФГУНПП «Геологоразведка» (г. Санкт–Петербург), 2014. С.30-31.
165. *Сенчина, Н.П.* Физико-химическое и математическое моделирование электрохимических процессов при формировании силикатных никелевых руд (на примере Буруктальского месторождения, Южный Урал), дипл. раб., 2013г.

166. *Сергеев, С.П.* Прогнозно – поисковые комплексные геофизические работы на платино-медно-никелевые руды и золото в северной части республики Карелия. Лоухская площадь / С.П. Сергеев, К.В. Блинов, В.А. Бутенко и др. СПб, ЗАО «Теллур СПб», 2005 г.
167. *Сергеев, С.П.*, Новые достижения в геофизических и геохимических методах при поисках месторождений благородных металлов в различных геологических и ландшафтных условиях. / С.П. Сергеев, К.В. Блинов, А.Г. Марченко, К.М. Ермохин. // 79-я сессия Научно-методического совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (НМСГГТ) Минприроды России по тематике «Достижения и перспективы в области инновационных разработок для геофизических исследований в составе ГРР», Санкт–Петербург, ФГУНПП «Геологоразведка», 2011. С.22-24.
168. *Телегин, Ю.М.* (отв. исп.) Отчет о поисковых работах на платиноиды, проведенных в пределах Светлоборской площади в 2007-2009 гг., Екб., 2009 г.
169. *Шалагинов, В. В.* (ред.) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000, Издание второе, Серия Среднеуральская, Лист О-40-ХII, объяснительная записка, ГФУП "Уральская геологическая опытно-методическая экспедиция", Екатеринбург, 2001.

#### ***Интернет источники***

170. [splanet.ru/paper/r1-186107.php](http://splanet.ru/paper/r1-186107.php). Естественные электрические поля электроннопроводящих рудных и нерудных объектов на территории Полярного Урала. Краткий обзор исследований по изучению природы естественных электрических полей.
171. [appliedgeochemists.org/index.php/component/content/article/11-members-area/95-deep-penetrating-geochemistry-phase-ii](http://appliedgeochemists.org/index.php/component/content/article/11-members-area/95-deep-penetrating-geochemistry-phase-ii). Deep Penetrating Geochemistry: Phase II.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Приложение А 1 – Валовые содержания химических элементов на профиле 1 Качканарского массива

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	7.52	274	102	27	28	97	1629	94	6349	65	22	334
2	2	10.59	177	96	26	25	87	1620	47	8618	5	27	224
3	4	11.49	138	223	42	31	87	2542	42	7664	50	24	293
4	6	10.87	291	107	48	24	96	1838	35	7396	18	19	313
5	8	10.4	63	110	26	31	120	1631	37	9115	18	19	110
6	10	10.39	148	102	29	22	74	1375	38	9323	44	14	328
7	12	11.12	246	94	39	19	79	1725	35	10351	32	17	259
8	14	10.34	149	126	40	24	81	1662	40	9345	30	24	100
9	16	7.37	152	96	28	26	117	1702	39	7469	39	21	192
10	18	7.98	207	176	68	39	125	1824	40	6078	54	37	401
11	20	9.83	232	133	64	43	104	2733	63	6110	99	34	287
12	22	9.27	195	133	53	36	108	4501	60	7003	49	33	101
13	24	10	63	115	40	39	64	5396	47	6428	52	30	190
14	26	6.8	180	283	30	25	132	1477	30	5983	17	29	87
15	28	9.83	843	144	45	29	92	2374	122	5694	25	22	9

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

## Приложение А 2 – Содержания вторично-закрепленных форм химических элементов на профиле 1 Качканарского массива (по результатам ТМГМ)

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Zr	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	23.3	480	168	51	35	96	4752	86	17467	103	123	1084
2	2	29.1	218	160	51	29	80	2982	62	17989	131	110	1339
3	4	21	261	150	57	26	76	5555	67	19332	168	122	868
4	6	22.9	227	207	58	18	81	2781	74	18836	129	121	1014
5	8	16.6	275	162	40	17	108	3237	76	15235	46	125	1169
6	10	25	266	181	59	25	85	2732	80	25407	158	128	1442
7	12	28.8	369	173	54	25	61	2768	89	26296	145	69	2478
8	14	28	278	216	54	19	104	3168	93	25408	108	121	1776
9	16	17.5	373	196	57	31	100	3334	96	13922	78	123	993
10	18	18.6	436	292	106	30	109	5987	122	13163	128	132	1239
11	20	16.2	284	196	76	34	103	4831	137	11999	109	139	926
12	22	16.3	234	198	81	24	120	7482	79	12585	88	135	1079
13	24	15.5	143	168	44	41	76	8913	53	9295	46	119	835
14	26	8.9	110	130	38	20	132	2934	54	7964	28	214	342
15	28	16.1	858	236	55	34	71	7155	93	9432	110	134	740

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

**Приложение А 3 – Содержания вторично-закрепленных форм ЭПГ (по результатам ТМГМ), магнитная восприимчивость после обжига и осредненный потенциал естественного электрического поля на профиле 1 Качканарского массива**

№	x	Ru	Rh	Pd	Ag	Ir	Pt	Au	$\alpha_t$	$\Delta U_{EP}$
	м	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	$10^{-5}$ ед.СИ	мВ
1	0	0.003	0.003	0.063	0.40	<0.001	0.002	0.006	10.4	-6
2	2	0.006	0.004	0.073	7.8	<0.001	0.006	0.030	15.4	-3.25
3	4	0.003	0.004	0.054	0.57	<0.001	0.002	0.015	11.4	-7.7
4	6	0.004	0.003	0.060	0.86	<0.001	0.005	0.004	14.4	-70.3
5	8	0.003	0.003	4.5	0.23	<0.001	0.29	0.041	13.4	-17.5
6	10	0.004	0.003	0.072	0.41	<0.001	0.003	0.008	21.4	-4.3
7	12	0.005	0.003	0.12	2.0	<0.001	0.011	0.004	21.4	-44.0
8	14	0.004	0.004	0.066	0.63	<0.001	0.002	0.034	11.4	-1.5
9	16	0.002	0.004	0.037	0.20	<0.001	0.003	0.045	5.4	6.7
10	18	0.004	0.006	0.056	0.38	<0.001	0.004	0.009	1.2	20.4
11	20	0.002	0.006	0.11	0.45	0.002	0.008	0.010	0.0	2.4
12	22	0.003	0.005	0.074	0.32	<0.001	0.004	0.007	2.1	-0.05
13	24	0.003	0.004	0.10	0.30	0.002	0.003	0.015	8.4	1.45
14	26	0.001	0.004	0.074	0.19	0.002	0.006	0.048	3.4	3.7
15	28	0.002	0.005	0.13	1.3	0.003	0.014	0.038	0.2	0.8

Примечание: Анализ выполнен МС с ИСП, хим. методами, ООО «Институт Гипроникель», Испытательный аналитический центр. Исполнители: Беляков А.А, Великая Т.И., Красотина Л.Б.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Приложение Б 1 – Валовые содержания химических элементов участка «а» Светлоборского массива

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	1	8.8	1176	79	55	17	102	2184	491	3745	124	14	283
2	3	11.1	2674	88	20	15	66	2133	576	3401	89	12	300
3	5	9.1	2604	102	73	25	152	1755	513	4812	112	20	193
4	7	12.0	1466	85	56	15	56	2395	956	1782	142	14	266
5	9	10.2	1517	79	34	22	100	2013	518	3230	103	9	513
6	11	11.3	1064	77	35	16	138	2173	605	3492	140	13	276
7	13	10.2	271	81	216	21	209	1633	493	3642	84	13	251
8	15	10.2	839	241	70	23	177	1637	478	3825	134	10	218
9	17	9.6	1443	70	42	16	182	2009	605	2049	107	12	247
10	19	6.5	1080	85	34	24	309	1393	435	4175	82	23	195
11	21	10.1	1003	85	48	19	71	2214	913	1693	163	14	393
12	23	8.5	651	61	47	29	90	1797	912	1675	154	15	155
13	25	9.0	1020	73	55	22	189	1893	714	2490	78	12	407
14	27	9.4	2617	67	26	21	65	2383	621	2267	162	13	66
15	29	9.9	1777	79	27	22	40	2378	649	1444	148	8	135
16	31	10.5	600	70	24	30	37	2857	977	777	134	13	205
17	33	11.6	2644	77	28	28	60	3127	924	2196	251	15	107
18	35	8.2	890	58	28	30	84	2007	870	2007	126	16	153
19	37	10.2	1775	75	17	21	62	1975	667	2276	162	8	139
20	39	12.9	2768	398	26	28	40	2865	900	1899	218	8	38
21	41	10.7	1585	114	24	23	84	2251	591	3408	105	14	100
22	43	9.4	1305	100	39	20	43	2177	807	1371	134	8	129
23	45	10.4	1395	73	87	21	171	2338	549	3553	204	11	223

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
24	47	8.0	1046	77	46	24	80	2034	579	2076	126	9	210
25	49	12.0	764	245	28	26	34	2312	893	560	164	5	100
26	51	7.8	1589	98	37	22	53	1805	642	2136	128	6	135
27	53	10.3	1379	85	54	20	104	1907	555	2090	111	12	330
28	55	9.5	1098	216	70	20	112	1963	568	2624	128	9	268
29	57	10.1	2092	96	44	23	68	2035	721	2537	131	9	140
30	59	10.4	1811	89	30	21	49	2747	880	1621	119	5	225

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

### Приложение Б 2. Содержания вторично-закрепленных форм некоторых химических элементов участка «а» Светлоборского массива

№	x	Cd	Mo	Zr	Cu
	м	г/т	г/т	г/т	г/т
1	1	0.12	0.15	4.8	49
2	3	0.11	0.27	4	23
3	5	0.115	0.18	6.8	52
4	7	0.09	0.22	5.2	41
5	9	0.1	0.22	4	33
6	11	0.08	0.12	4.8	36
7	13	0.095	0.14	9	153
8	15	0.094	0.13	4	58
9	17	0.094	0.12	5	38
10	19	0.125	0.22	10	32
11	21	0.105	0.15	5	39
12	23	0.06	0.135	6	38
13	25	0.061	0.09	6	42
14	27	0.09	0.165	4	29
15	29	0.07	0.15	2	27

№	x	Cd	Mo	Zr	Cu
	м	г/т	г/т	г/т	г/т
16	31	0.047	0.15	3	25
17	33	0.08	0.18	4	25
18	35	0.07	0.15	4	25
19	37	0.08	0.19	2	22
20	39	0.08	0.15	4	26
21	41	0.123	0.21	3	24
22	43	0.073	0.15	5.9	29
23	45	0.081	0.12	5.5	51
24	47	0.09	0.17	5.8	32
25	49	0.081	0.21	3	17
26	51	0.084	0.25	6	21
27	53	0.118	0.175	11	53
28	55	0.076	0.125	6	46
29	57	0.065	0.155	4	25
30	59	0.062	0.15	3	27

Примечание: ООО «Геоэкохим», аналитик Вешев А.С.

### Приложение Б 3 – Содержания подвижных форм ЭПГ (по результатам МДИ), и потенциал естественного электрического поля участка «а» Светлоборского массива

№	x	Pt	Pd	Au	$\Delta U_{\text{ЕП}}$
	м	мг/т	мг/т	мг/т	мВ
1	1	0.02	0.018	0.002	15.80
2	3	0.05	0.013	0.002	4.26
3	5	0.9	0.025	0.003	5.80
4	7	0.22	0.017	0.002	3.63
5	9	0.08	0.012	0.0018	-6.78
6	11	0.03	0.015	0.0015	7.67
7	13	0.01	0.024	0.0018	-3.13
8	15	0.01	0.009	0.0012	5.17
9	17	0.1	0.021	0.001	1.22

№	x	Pt	Pd	Au	ЕП
	м	мг/т	мг/т	мг/т	мВ
10	19	0.08	0.028	0.0012	-14.64
11	21	0.02	0.014	0.003	1.32
12	23	0.03	0.026	0.0013	8.48
13	25	0.034	0.023	0.004	29.33
14	27	0.03	0.019	0.0012	17.22
15	29	0.1	0.01	0.0011	1.03
16	31	0.2	0.0098	0.001	17.87
17	33	0.05	0.017	0.0011	12.43
18	35	0.08	0.02	0.005	11.45

№	х	Pt	Pd	Au	ЕП
	м	мг/т	мг/т	мг/т	мВ
19	37	0.13	0.01	0.0125	4.75
20	39	0.08	0.017	0.002	10.16
21	41	0.25	0.015	0.001	-10.24
22	43	0.44	0.02	0.001	-14.37
23	45	0.05	0.016	0.0045	-12.35
24	47	0.03	0.021	0.0005	-14.41

№	х	Pt	Pd	Au	ЕП
	м	мг/т	мг/т	мг/т	мВ
25	49	0.05	0.014	0.0006	-15.04
26	51	0.2	0.029	0.001	-15.66
27	53	0.81	0.038	0.0025	-6.73
28	55	0.1	0.02	0.002	-13.37
29	57	0.09	0.014	0.0015	-16.84
30	59	0.02	0.016	0.001	-13.98

Примечание: ООО «Геоэкохим», аналитик Вешев А.С.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Приложение В 1 – Валовые содержания химических элементов профиля 1 участка «б» Светлоборского массива

№	х	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Zr	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	9.9	1842	94	55	21	92	1879	803	4131	149	130	407
2	2	7.1	1795	76	23	22	103	926	470	4669	32	139	366
3	4	7.9	941	84	34	20	117	1245	672	4199	96	115	28
4	6	8.3	1317	84	27	20	121	1464	548	4708	106	147	390
5	8	11.8	1777	89	45	20	68	3198	1321	3296	202	30	178
6	10	14.1	4622	106	26	28	57	2779	883	4931	180	59	336
7	12	12.3	4659	97	35	22	86	2674	911	5104	149	50	209
8	14	12.7	1688	89	88	22	56	2618	845	4213	174	21	123
9	16	12.7	1038	90	74	19	99	2215	758	5085	131	26	571
10	18	12.9	3791	87	27	20	44	2619	1135	3250	168	28	277
11	20	13.4	4999	92	17	21	83	2398	1016	4467	143	50	338
12	22	15.4	6111	91	85	16	144	2398	764	5634	108	52	424
13	24	12.6	4125	82	32	18	72	3052	1149	3585	147	32	284
14	26	14.9	4519	89	76	19	236	2303	893	5985	181	20	449
15	28	13.0	4486	117	27	19	94	2311	681	5508	155	35	644
16	30	14.2	8216	103	42	17	67	2301	969	4962	202	68	437
17	32	13.0	4766	90	46	14	85	2651	1189	4180	209	52	93
18	34	13.7	10198	109	40	16	94	2989	1141	5543	207	70	671
19	36	12.1	3468	100	43	14	76	2596	1061	4122	161	57	315
20	38	12.8	4980	108	18	17	67	2448	798	4788	146	56	346

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

### Приложение В 2. Содержания вторично-закрепленных форм химических элементов на профиле 1 участка «б» Светлоборского массива

№	х	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	8.1	877	129	41	27	106	1096	561	2772	44	24	51
2	2	6.34	1504	132	36	25	138	686	417	3827	51	30	66
3	4	7.32	851	71	34	26	120	946	585	3974	104	27	99

№	х	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
4	6	6.41	1587	74	25	21	133	975	435	4081	68	18	65
5	8	8.76	1187	70	32	21	62	2131	1057	2274	175	17	13
6	10	10.03	3669	74	31	21	98	2016	738	3854	194	13	100
7	12	7.1	1577	68	29	20	225	1419	684	3347	94	16	100
8	14	10.23	944	80	90	21	91	1803	556	4555	125	10	49
9	16	10.94	1596	76	42	21	109	2179	665	4233	123	11	207
10	18	10.31	2850	219	17	27	56	1977	1021	2200	182	7	100
11	20	10.06	3869	105	18	17	91	1842	834	3081	146	10	63
12	22	10.6	2457	97	74	24	242	1765	625	3963	102	9	30
13	24	8.12	1069	66	38	20	86	1752	914	2466	95	15	100
14	26	9.67	1752	71	74	20	262	1526	756	4125	118	13	206
15	28	9.73	2981	92	21	20	128	1547	592	4190	133	19	33
16	30	8.61	2096	81	19	21	81	1315	694	3287	109	15	115
17	32	8.32	1680	69	25	22	114	1619	854	2805	110	14	121
18	34	6.92	2627	73	18	21	120	1171	594	3605	84	18	107
19	36	7.69	1429	63	26	18	89	1645	798	2972	107	22	59
20	38	9.81	4061	90	16	17	85	1997	739	4177	119	15	100

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

Приложение В 3 – Содержания вторично-закрепленных форм ЭПГ (по результатам ТМГМ), магнитная восприимчивость до обжига –  $\alpha$ , после обжига –  $\alpha_t$  на профиле 1 участка «б» Светоборского массива

№	х	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	$\alpha$	$\alpha_t$
	м	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	$10^{-5}$ ед.СИ	$10^{-5}$ ед.СИ
1	0	<0.0001	0.0019	0.013	0.0034	0.09	0.012	1.2	3.5
2	2	0.0014	0.0023	0.001	0.0084	0.074	0.014	2	5.3
3	4	0.003	0.0042	0.017	0.0095	0.41	0.011	1.5	4.8
4	6	0.0018	0.0023	0.001	0.038	0.24	0.0063	1.5	6.2
5	8	0.0061	0.0076	0.011	0.252	0.087	0.015	2.2	3.8
6	10	0.0042	0.0051	0.001	0.032	0.108	0.033	5.4	7.9
7	12	0.0042	0.0024	0.001	0.005	0.028	0.015	2.4	3.3
8	14	0.0027	0.0018	0.001	0.0021	0.058	0.014	2.4	5.4
9	16	0.0001	0.0013	0.001	0.005	0.056	0.012	3.8	6.5
10	18	0.0035	0.0034	0.001	0.022	0.048	0.016	4.4	12
11	20	0.0089	0.0043	0.001	0.012	0.068	0.0039	3.7	14
12	22	0.0073	0.0051	0.001	0.0079	0.33	0.0055	5.8	12
13	24	0.0059	0.0038	0.001	0.0041	0.093	0.019	3	6.7
14	26	0.0048	0.0034	0.001	0.0083	0.178	0.015	8	13
15	28	0.0056	0.007	0.001	0.02	0.31	0.007	5.1	13
16	30	0.0081	0.0069	0.001	0.011	0.32	0.074	4	11
17	32	0.0084	0.007	0.121	0.0055	0.108	0.101	3.5	7.7
18	34	0.0085	0.0044	0.032	0.0051	0.061	0.037	3.3	8
19	36	0.0028	0.0025	0.001	0.0032	0.034	0.011	2.7	5.7

№	x	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	æ	æ <sub>t</sub>
	м	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	10 <sup>-5</sup> ед.СИ	10 <sup>-5</sup> ед.СИ
20	38	0.0065	0.0033	0.001	0.0037	0.061	0.0074	7.1	18

Примечание: Анализ выполнен МС с ИСП, хим. методами, ООО «Институт Гипроникель», Испытательный аналитический центр. Исполнители: Беляков А.А., Великая Т.И., Красотина Л.Б.

#### Приложение В 4 – Валовые содержания химических элементов профиля 2 участка «б» Светлоборского массива

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Zr	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	8.9	3830	95	24	18	157	1511	808	5116	79	96	145
2	10	8.5	2573	88	24	14	145	1159	731	4890	85	122	594
3	20	9.3	3811	73	29	26	237	1471	719	4902	94	85	533
4	30	8.2	1841	129	34	25	227	2669	592	5282	78	108	362
5	40	8.2	4301	127	26	16	148	1948	594	6390	77	136	127
6	50	9.2	3361	95	25	22	117	1908	966	4470	156	97	280
7	60	9.7	3319	94	27	13	140	1416	764	4966	140	134	339
8	70	12.4	7616	117	20	20	173	1945	885	5454	69	32	380
9	80	11.5	6408	136	38	27	167	1537	869	5225	143	74	486
10	90	8.3	7530	121	29	23	309	1753	473	6959	51	114	580
11	100	7.1	3068	96	25	12	168	1277	455	6015	38	186	458
12	110	9.2	9293	133	35	22	272	1802	529	7357	96	116	732
13	120	6.5	2422	101	27	27	158	1740	521	6288	40	225	697
14	130	8.5	2879	116	33	18	154	1266	633	5449	82	112	393
15	140	9.3	12982	196	20	17	173	2075	461	7347	82	121	408
16	150	11.5	3293	125	58	25	170	2797	1223	3827	202	67	238
17	160	9.8	2753	94	58	23	129	2388	1246	4090	156	83	238
18	170	10.0	6628	150	39	29	184	2022	827	7244	60	133	583
19	180	11.7	7003	124	32	27	81	2304	1104	3872	138	28	526
20	190	10.5	1545	97	42	21	124	1628	696	5076	96	111	329

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

#### Приложение В 5 – Содержания вторично-закрепленных форм нахождения химических элементов профиля 2 участка «б» Светлоборского массива

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	7	5192	93	20	24	162	1445	692	3991	88	24	28
2	10	6.5	3039	97	19	21	185	1107	619	4012	93	22	180
3	20	7.4	3807	93	21	27	274	1421	670	4077	62	22	100
4	30	6.3	1552	99	34	22	256	1683	472	4309	95	27	161
5	40	5.4	2832	104	23	21	171	1040	485	4636	48	24	100
6	50	8.8	6390	110	22	20	145	2054	1057	3425	144	24	55
7	60	7.4	3399	91	14	22	204	1238	670	3738	71	20	148
8	70	7.6	3370	95	23	22	284	1075	748	4222	70	18	31
9	80	6.9	2359	97	30	18	228	1032	626	3636	68	16	69
10	90	5.8	4062	74	32	19	407	1168	325	5489	45	22	303

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Br	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Ba
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
11	100	5.9	4892	110	29	29	247	1258	377	5526	55	25	100
12	110	6.1	4577	102	28	26	382	1165	327	5803	68	18	100
13	120	5.9	2425	103	31	25	209	1372	485	5994	53	44	426
14	130	6.9	2335	109	25	28	199	1170	559	4130	91	25	131
15	140	5.4	4619	102	18	25	231	1198	359	4792	51	18	109
16	150	9.8	3201	111	47	27	210	2392	987	3332	176	24	120
17	160	7.6	1999	73	49	28	188	1867	979	3366	196	18	275
18	170	5.7	2331	113	21	29	233	1094	555	5163	80	23	49
19	180	9.9	3459	94	23	23	96	2320	1127	2838	187	13	100
20	190	9	1494	78	45	26	175	1576	611	4465	130	22	136

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

Приложение В 6 – Содержания вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ (по результатам ТМГМ), магнитная восприимчивость до обжига –  $\alpha$ , после обжига –  $\alpha_t$  на профиле 2 участка «б» Светлоборского массива

№	x	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	$\alpha$	$\alpha_t$
	м	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	10 <sup>-5</sup> ед.СИ	10 <sup>-5</sup> ед.СИ
1	0	0.0001	0.0043	0.019	0.0047	0.039	0.025	2.9	6.5
2	10	0.0001	0.0034	0.013	0.0066	0.092	0.028	1.8	6.1
3	20	0.0001	0.0048	0.023	0.0068	0.085	0.035	2.8	5.6
4	30	0.0001	0.0029	0.012	0.0031	0.024	0.168	1.7	2.6
5	40	0.0014	0.0036	0.013	0.0054	0.02	0.06	3.1	7.3
6	50	0.0012	0.0072	0.056	0.065	0.055	0.047	2.3	3.7
7	60	0.0001	0.0039	0.001	0.0061	0.091	0.016	2.6	9.8
8	70	0.0028	0.0064	0.012	0.007	0.201	0.021	3.1	10
9	80	0.0022	0.0036	0.001	0.0029	0.021	0.017	2.5	7.4
10	90	0.0027	0.004	0.001	0.0086	0.036	0.02	2.4	4.9
11	100	0.0011	0.0025	0.032	0.0039	0.054	0.0095	2.4	6.1
12	110	0.0001	0.0027	0.001	0.0059	0.054	0.05	2.3	5.4
13	120	0.0026	0.0021	0.001	0.0024	0.019	0.03	1.3	4.4
14	130	0.005	0.0062	0.053	0.009	0.054	0.031	2.6	5
15	140	0.0023	0.0066	0.037	0.011	0.22	0.021	4.1	5.4
16	150	0.0001	0.0032	0.001	0.0029	0.099	0.09	1.7	2.5
17	160	0.0001	0.0032	0.001	0.0059	0.26	0.051	1.9	2.3
18	170	0.0024	0.0039	0.001	0.0065	0.065	0.051	1.7	3.5
19	180	0.0048	0.0047	0.001	0.0025	0.059	0.052	3.7	6.4
20	190	0.0001	0.0041	0.07	0.0019	0.046	0.036	3.1	6.2

Примечание: Анализ выполнен МС с ИСП, хим. методами, ООО «Институт Гипроникель», Испытательный аналитический центр. Исполнители: Беляков А.А, Великая Т.И., Красотина Л.Б.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Приложение Г 1 – Валовые содержания химических элементов на профиле в пределах Аганозерского массива

№	x	Fe	Cr	Zn	Cu	Rb	As	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Zr
	м	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
1	0	1.7	24	23	2	47	6	249	212	8	1931	15	13	19
2	50	2.2	60	65	8	63	10	224	371	27	3042	27	17	72
3	100	2.6	7	38	18	89	12	261	636	25	2724	11	20	160
4	150	1.9	72	43	14	92	13	242	207	17	2937	12	14	107
5	200	2.5	49	48	14	85	10	260	555	16	3415	24	16	167
6	250	2.2	38	51	8	68	11	245	223	20	2821	27	8	88
7	300	2.2	43	45	14	72	9	221	330	17	3242	20	12	137
8	350	0.6	72	21	9	64	4	247	236	3	2733	13	13	118
9	400	2.7	52	43	18	69	5	233	445	20	2910	14	8	67
10	450	2.4	25	49	12	83	13	261	422	23	3355	13	19	171
11	500	2.4	58	36	10	62	11	269	408	27	4260	23	25	136
12	550	1.7	22	30	8	64	7	259	208	9	3391	14	21	100
13	600	2.2	88	32	12	64	7	261	284	19	2468	22	12	57
14	650	0.8	53	28	4	69	10	257	91	2	3465	14	12	163
15	700	2.2	65	41	18	75	14	254	331	16	2832	30	13	105
16	750	1.2	79	40	12	83	17	275	154	7	2683	14	19	172
17	800	2.3	19	256	21	69	6	262	366	11	2986	9	16	55
18	850	2.5	89	50	2	72	5	271	251	13	3278	19	22	113
19	900	4.5	68	44	11	90	10	242	315	35	4035	15	21	152
20	950	1.7	45	25	2	70	13	250	167	21	2970	13	16	126
21	1000	1.8	83	38	15	97	13	442	870	15	5040	30	24	255
22	1050	0.6	51	27	7	58	3	271	143	3	2467	18	18	118
23	1100	1.4	95	24	4	75	16	264	176	12	3284	16	11	121
24	1150	0.5	21	26	2	59	6	201	165	5	2376	17	21	133
25	1200	1.1	62	15	5	69	7	227	97	7	3232	13	19	187
26	1250	1.9	56	52	10	97	11	257	184	21	2919	18	21	115
27	1300	1.8	87	28	14	70	23	248	148	10	3633	21	20	158
28	1350	2.6	67	35	15	82	5	203	503	19	2591	20	3	33
29	1400	0.9	25	14	7	93	10	259	153	6	2710	9	5	120
30	1450	1.5	79	42	11	100	3	255	175	19	2896	3	17	157
31	1500	2.2	45	44	11	81	6	255	235	14	2957	12	12	107
32	1550	0.6	59	29	3	59	9	236	64	1	2596	9	8	163
33	1600	0.8	32	28	7	60	4	249	184	2	2994	11	15	85
34	1650	3.2	56	62	11	74	13	259	289	20	3363	13	19	125
35	1700	3.2	94	44	9	72	11	268	275	13	3369	14	14	119
36	1750	2.5	44	46	19	72	10	240	302	24	2713	8	13	91
37	1800	2.4	63	21	16	75	13	228	183	4	3309	3	13	143

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

Приложение Г 2 – Содержание химических элементов в поляризуемой фракции на профиле в пределах Аганозерского массива

№	х	Fe	Cr	Zn	Cu	Rb	As	Sr	Mn	Ni	Ti	Co	Y	Zr
	м	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г	г/г
1	0	1.4	70	15	7	52	3	255	145	8	1513	10	3	7
2	50	4.2	102	122	32	134	24	344	435	58	6123	28	49	279
3	100	4.2	65	72	22	121	26	300	1364	39	4215	30	39	267
4	150	2.1	74	48	20	91	10	245	491	25	3139	14	15	173
5	200	3.0	76	57	17	98	15	262	738	31	3105	19	24	169
6	250	2.2	96	35	6	75	5	276	238	15	2689	13	23	174
7	300	2.8	78	56	14	99	25	296	340	18	3962	15	29	253
8	350	0.7	30	28	12	92	10	328	161	3	3068	11	23	206
9	400	2.7	67	56	18	78	16	243	386	21	2702	25	16	61
10	450	2.5	105	36	20	88	14	243	648	17	3162	27	25	126
11	500	2.9	90	61	19	68	30	301	427	34	4122	17	18	125
12	550	2.0	95	36	7	80	6	309	241	19	3569	13	12	142
13	600	0.7	52	21	8	63	10	268	137	8	2510	14	14	117
14	650	0.8	24	8	10	78	15	336	105	7	2733	12	23	147
15	700	2.1	74	25	20	71	8	298	232	15	2585	23	7	70
16	750	2.1	133	96	42	131	32	372	433	26	4473	31	39	377
17	800	2.0	57	48	14	63	3	254	283	20	2304	14	3	35
18	850	3.0	30	28	12	84	11	277	225	17	3326	9	15	137
19	900	5.1	121	58	30	103	17	267	519	48	4520	19	33	200
20	950	1.9	75	33	9	91	14	312	223	17	2865	16	21	176
21	1000	2.9	75	51	20	118	34	473	1485	15	6786	41	32	388
22	1050	0.7	28	29	16	73	10	316	105	13	2582	9	23	172
23	1100	1.4	77	21	13	80	3	287	165	15	3017	13	25	204
24	1150	0.8	43	35	9	90	13	323	175	14	3820	13	38	351
25	1200	1.2	21	13	3	76	13	263	148	3	3436	14	22	304
26	1250	2.0	63	26	16	115	6	299	290	24	3580	12	23	211
27	1300	2.9	125	49	25	95	29	322	258	27	4796	31	36	341
28	1350	3.1	62	54	37	103	11	271	342	35	3049	13	23	147
29	1400	0.9	42	19	5	99	11	286	112	6	2609	15	19	114
30	1450	1.6	61	42	6	105	12	261	193	24	3436	9	20	193
31	1500	2.1	75	34	11	71	8	247	178	21	2706	24	7	141
32	1550	0.6	19	18	3	63	6	256	95	4	2004	12	12	107
33	1600	0.8	46	41	9	80	7	278	114	11	2428	16	13	137
34	1650	3.4	62	51	8	88	11	281	332	33	3663	3	21	142
35	1700	3.6	113	68	13	89	16	273	199	20	3727	10	20	150
36	1750	2.9	49	39	25	94	13	270	317	24	3658	16	12	147
37	1800	0.7	43	25	8	74	9	290	121	4	3113	13	13	165

Примечание: РРА, лаборатория ООО "Полевая Геофизика", аналитик Томский И.В.

**Приложение Г 3 – Потенциал естественного электрического поля на профиле  
в пределах Аганозерского массива**

№	х	ЕП	№	х	ЕП	№	х	ЕП
	м	мВ		м	мВ		м	мВ
1	0	-53.6	13	600	-51.8	25	1200	37.25
2	50	-58.5	14	650	-36	26	1250	23.65
3	100	-80	15	700	-52.5	27	1300	22.55
4	150	-92.2	16	750	-25.3	28	1350	32.35
5	200	-88.2	17	800	-25.75	29	1400	62.45
6	250	-92.8	18	850	-34.35	30	1450	86.05
7	300	-99.5	19	900	-25.65	31	1500	59.35
8	350	-84.4	20	950	-32.25	32	1550	85.65
9	400	-89.9	21	1000	-22.25	33	1600	120.15
10	450	-88.2	22	1050	-17.45	34	1650	141.7
11	500	-56.2	23	1100	-16.05	35	1700	129.4
12	550	-92.2	24	1150	5.15	36	1750	146.2

**Приложение Г 4 – Содержание магнитная восприимчивость до обжига – æ,  
после обжига – æ<sub>t</sub> форм платиноидов и золота (по результатам АПФ) на  
профиле в пределах Аганозерского массива**

№	Pt	Pd	Rh	Ru	Au	Os	Ir
	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
Массовая доля элемента, погрешность анализа для исходных проб (до выделения поляризуемой фракции)							
1	<0.005	0.029 ±0.008	0.0012 ±0.0006	<0.0010	0.012 ±0.005	<0.010	<0.0010
2	<0.005	0.017 ±0.004	<0.0010	<0.0010	0.0079 ±0.0027	<0.010	<0.0010
3	0.012 ±0.004	0.05 ±0.008	0.0080 ±0.0021	0.018	0.041 ±0.007	<0.010	<0.0010
4	<0.005	<0.010	0.0012 ±0.0006	0.0012	0.048 ±0.007	<0.010	<0.0010
5	<0.005	0.012 ±0.004	<0.0010	0.0016	0.0084 ±0.0027	<0.010	<0.0010
Массовая доля элемента, погрешность анализа для проб поляризуемой фракции							
1-ПФ	<0.005	0.055 ±0.016	<0.0010	<0.0010	0.028 ±0.0027	<0.010	<0.0010
2-ПФ	0.035 ±0.009	0.033 ±0.008	0.03 ±0.007	0.014	0.022 ±0.007	<0.010	<0.0010
3-ПФ	0.018 ±0.004	0.044 ±0.008	0.0059 ±0.0021	0.0092	0.023 ±0.007	<0.010	<0.0010
4-ПФ	0.0071 ±0.0022	0.019 ±0.004	0.0047 ±0.0012	0.0059	0.107 ±0.025	<0.010	<0.0010
5-ПФ	0.0088 ±0.0022	0.029 ±0.008	0.0015 ±0.0006	<0.0010	0.054 ±0.0015	<0.010	<0.0010

Примечание: Масс-спектрометрия с ИСП, атомно-абсорбционная спектрометрия;  
ИАЦ ООО «Гипроникель»; исполнители: Беляков А.А., Соловьев П.К., Великая Т.И.,  
Белянинова С.И., Красотина Л.Б.