

На правах рукописи

СЕНЧИНА Наталия Петровна



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

*Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические
методы поисков полезных ископаемых*

АВТОРЕФЕРАТ

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

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, профессор
Путиков Олег Федорович

Официальные оппоненты:

Ермохин Константин Михайлович,

доктор технических наук, Санкт - Петербургский филиал ФГБУН "Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук", ведущий научный сотрудник.

Соколов Сергей Валерьевич,

доктор геолого - минералогических наук, ФГБУ "Всероссийский научно - исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского", заведующий отделом региональной геохимии.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Санкт - Петербургский государственный университет".

Защита диссертации состоится 28 июня 2017 года в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2017 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



Кирьякова
Ирина Геннадьевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В связи с постепенным исчерпанием основных россыпных месторождений платиноидов несколько десятилетий назад стало актуальным изучение массивов, перспективных на коренное платиноидное оруденение.

В современных условиях, когда изучено большинство легкооткрываемых месторождений, эта задача усложняется, так как традиционно использовавшиеся ранее геохимические методы позволяют изучать объекты, которые располагаются у поверхности в пределах первых метров по глубине, и 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 элементов платиновой группы (ЭПГ) во вмещающих породах не меняют их физических свойств настолько, чтобы это отражалось в наблюдаемых на поверхности физических полях. Исключение составляют некоторые рудно-формационные группы, для которых характерна тесная пространственная взаимосвязь ЭПГ и минералов, которые дают контрастные аномалии по результатам электро-, магнито-, гравиразведочных работ. Однако, и в этом случае не всегда наблюдается прямая зависимость концентраций элементов платиновой группы от наличия и характеристик сульфидных, хромитовых, титаномагнетитовых рудных тел, в результате чего могут быть пропущены перспективные на собственно платиноиды участки.

Геоэлектрохимические способы изучения ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов сочетают свойства глубинных геофизических и прямых геохимических способов изучения геологической среды.

Геоэлектрохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых применяются в России и за рубежом, наращивается фактологическая база исследований ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов. При поисках глубинных залежей большинства типов рудных и горючих полезных ископаемых, применение геоэлектрохимических методов является надежно обоснованным, эффективность их подтверждается практическими примерами (исследовано Ю.С. Рыссом, В.А. Комаровым,

О.Ф. Путиковым, И.С. Гольдбергом, С.А. Вешевым, С.Г. Алексеевым, В.А. Ворошиловым, М.Б. Штокаленко, А.Г. Марченко, Я.М. Нюссиком, Л.В. Антроповой, К.М. Ермохиным, И.Л. Комовым, S.M. Hamilton, E.M. Cameron, A.W. Mann, G.J.S. Govett, A.F. Mark, A.R. Mokhtari и др.).

Научно-исследовательские и поисково-разведочные работы, включающие регистрацию ореолов рассеяния подвижных и вторично-закрепленных форм нахождения металлов платиновой группы, помимо некоторых перечисленных ученых, выполнялись К.В. Блиновым, С.П. Сергеевым, А.С. Духаниным, С.В. Соколовым, С.М. Радомским, В.И. Радомской, И.В. Кубраковой, О.А. Тютюнник, И.Я. Кошечевой, М.В. Мироненко, А.В. Кузовенковым, Н.Т. Oberthür, Н. Н. Kéiko, M. Junge, I.R. Pumer, P.A. Wiluams; подобные вопросы затронуты в диссертационных исследованиях Ю.В. Макаровой, Н.С. Колонских. Появляется все больше информации, позволяющей сделать заключение о процессах перераспределения подвижных форм нахождения платиноидов, однако, изученность указанной тематики следует назвать скорее единичной, нежели полноценной.

Для наиболее эффективного применения геоэлектрохимии необходимо учитывать факторы, влияющие на преобразование платиноидов из минеральной формы нахождения в растворенную (в представленной работе предлагается оценить влияние на этот процесс естественных электрических полей). Важно учитывать механизм переноса сформированных подвижных компонентов с глубины расположения рудных тел к поверхности. Должно приниматься во внимание распределение вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов по типам частиц почвенного разреза, на которых возможна фиксация подвижных форм вблизи поверхности земли.

Как правило, оставляемые ранее за границами выполнения работ вопросы – механизм формирования подвижных форм нахождения благородных металлов, процесс перемещения их к верхней части разреза, возможные новые способы выявления аномалий – являются предметом настоящей работы. Задача детального рассмотрения особенностей процесса формирования изучаемых геоэлектрохимическими методами ореолов рассеяния платиноидов актуальна для разработки и обоснования рационального комплекса работ, предназначенного для поисков участков коренной платиноидной минерализации (в том числе глубокозалегающих, на закрытых и полужакрытых территориях).

Расширение перспектив освоения месторождений платиноидов способствует обеспечению стабильности сырьевой базы данных стратегических 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 (протекания электрического тока, естественной ионной флотации и т.д.);

- исследовать возможные подходы к изучению подвижных и вторично-закреплённых форм нахождения платиноидов, в том числе новую методику разрабатываемого автором способа анализа поляризуемой фракции (АПФ) и предложить обоснованный алгоритм поисков перекрытых зон платиноидной минерализации по геофизическим и геохимическим данным.

Фактический материал и методы исследования

В основу работы положен фактический материал в виде результатов изучения проб горных пород, собранных автором самостоятельно в 2013 - 2016 годах на Светлоборском платиноносном массиве (Средний Урал), Качканарском массиве (Средний Урал), Аганозерском массиве Бураковского комплекса (Южная Карелия). Экспериментальные и аналитические исследования проведены в лабораториях Горного университета, ООО «Институт Гипроникель», АО «Геологоразведка», ООО «Геоэкохим», ООО "Полевая геофизика", частично, при участии автора. Изучено более 260 проб, в том числе, на наличие подвижных форм нахождения платиноидов и других металлов высокочувствительным методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Автором применены также геофизические методы

(метод естественного электрического поля, магниторазведка), выполнено измерение физико-химических параметров почв – окислительно-восстановительного потенциала (Eh), показателя кислотности (pH), магнитной восприимчивости до (α) и после обжига (α_t). Реализованы физико-химическое и физико-математическое моделирование, проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных, выполнен статистический анализ результатов химических исследований. В работе использованы материалы ФГУ НПП «Геологоразведка» (с 15.02.2017 г. АО "Геологоразведка"), группы компаний «Теллур Северо-Запад», ЗАО «Урал-металлы платиновой группы», ООО «Северо-Западная Геофизическая Компания».

Личный вклад автора заключается в построении физико-химической модели и участии в разработке физико-математической модели изучаемых явлений, которые позволили обосновать новый методический подход к поискам участков платиноидной минерализации; кроме того:

- 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 в частных производных для распределения концентрации подвижных форм нахождения элементов в струйном ореоле рассеяния (для одномерного случая);

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

- проведены геофизические и геохимические опытно-методические исследования, включающие отбор проб горных пород в пределах Аганозерского, Светлоборского и Качканарского массивов и подготовку их для анализа, с учетом чего обоснован рациональный комплекс поисковых работ;

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

Научная новизна:

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.

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

3. Предложен новый методический подход и алгоритм исследований, включающий изучение естественного электрического поля и регистрацию струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами, позволяющий более эффективно обнаруживать участки коренной платиноидной минерализации, включая перекрытые.

Защищаемые положения:

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 флоатации 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 и реализация работы

Обоснован алгоритм поисков глубинных зон платиноидной минерализации на основе комплексирования методов исследования естественного электрического поля, физико-химических свойств горных пород и регистрации струйных ореолов рассеяния геоэлектро-

химическими методами изучения вторично-закрепленных форм нахождения металлов. 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 специальностей 21.05.03 «Технология геологической разведки» и 21.05.02 «Прикладная геология».

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается завершенными теоретическими разработками, соответствием их результатов данным лабораторных экспериментов и наблюдений в естественных условиях; представительностью и надежностью исходных материалов, сопровождаемых контрольными исследованиями; применением современных химико-аналитических методов изучения вещества; непротиворечивостью выводов автора и предшественников.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы обсуждены на заседаниях кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых в 2012 – 2017 г.г. Результаты работы оценены Комитетом по науке и высшей школе Санкт-Петербурга как заслуживающие гранта (диплом ПСП № 15647, 2.11.2015), также автор был удостоен стипендии президента РФ с 1.09.15 по 31.08.16. Отдельные результаты исследований доложены и получили нейтральную либо положительную оценку на следующих научных конференциях: Политехнический фестиваль для студентов и молодых ученых (2012), XIII конференция Студенческого научного общества геологического факультета СПбГУ (2013), Третья молодежная школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», ИГЕМ РАН (2013), IX международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика - 2013», международный семинар «Применение современных электроразведочных технологий при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых» (2015, 2016), 7-th 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, 3 статьи представляют основные результаты диссертационного исследования в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России (страница 20).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения; содержит 154 страницы, включая 56 рисунков, 6 таблиц, 4 табличных приложения. Список использованных источников содержит 171 наименование. Во **введении** определены цель и задачи исследования; дается описание текущего состояния геоэлектрохимического направления, находящегося на стыке геохимических и геофизических методов исследований; в частности, в сфере поисков ЭПГ. В **первой главе** описываются электрохимические процессы, протекающие на разных масштабных уровнях в пределах рассматриваемых платиноносных массивов – Светлоборского (Средний Урал), Качканарского (Средний Урал), Аганозерского (Южная Карелия) и других. Предлагаются сводная и конкретизированные физико-геологические модели формирования аномалий естественного электрического поля и повышенных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения металлов платиновой группы. Во **второй главе** обоснованы предпосылки для формирования аномалий естественного электрического поля (ЕП) окислительно-восстановительного происхождения (естественного гальванического элемента): изменение концентрации кислорода в подземных водах с глубиной вдоль протяженного электропроводящего тела (магнетит-содержащего), контактирующего с ионопроводящей средой. Показаны результаты изучения аномалий ЕП в полевых условиях. **Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию процесса перехода платиноидов из минеральной формы нахождения в подвижную под действием электрического тока, который может быть вызван в горных породах естественными электрическими полями. В **четвертой главе** предложено точное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных теории геоэлектрохимических методов (в одномерном случае), позволяющее проследить во времени и пространстве процесс распространения подвижных форм нахождения элементов в струйном ореоле рассеяния. Рассматриваются существующие гипотезы формирования ореолов повышенных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения химических элементов и способы их регистрации. **Пятая глава** содержит

обоснование предложения и первые экспериментальные результаты опробования способа поисков полезных ископаемых путем анализа поляризуемой фракции рыхлых отложений. **Шестая глава** посвящена анализу данных полевых исследований, включающему оценку измеренных электрических полей, физико-химических свойств почв (изменение которых сопутствует формированию ЕП) и распределения концентраций вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов на рассмотренных участках платиноносных массивов. Предлагается новый методический подход к поискам глубокозалегающих платиноносных зон, заключающийся в комплексировании изучения ЕП и регистрации струйных ореолов рассеяния геоэлектрохимическими методами. В **заключении** приведены главные результаты работы. Четыре **приложения** содержат данные химических анализов проб, отобранных автором на изученных участках платиноносных массивов, а также результаты изучения ЕП и физико-химических свойств пород, изменение которых сопутствует формированию естественных гальванических элементов.

Благодарности. Диссертационное исследование выполнено 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» С.Г. Алексееву и М.Б. Штокаленко за помощь в сборе диссертационных материалов и постоянную заинтересованность в представляемой автором работе. Благодарность хочется выразить также А.А. Миллеру, И.В. Таловиной, В.Г. Лазаренкову, Ю.М. Телегину, А.Д. Кузовенкову, К.В. Блинову, Е.Ю. Ермолину 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.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Примеры применения геоэлектрохимических методов при поисках месторождений платиноидов показывают наличие аномалий вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ над зонами коренного платиноидного оруденения, соответствие аномалий которым в ряде случаев подтверждено результатами бурения. Наличие подвижных

форм нахождения элементов в окружающих области платиноидной минерализации горных породах является необходимым условием для формирования приповерхностных ореолов повышенных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ. Однако платиноиды химически устойчивы – указанные благородные металлы испытывают весьма слабое взаимодействие с окружающей средой и при обычных условиях в растворенном виде находятся крайне малые их концентрации (вплоть до не фиксируемых современными методами химико-аналитических исследований).

В минеральной форме платиноиды проявляют тенденцию к накоплению, при этом в мелкодисперсных и ионных формах эти металлы подвижны. Для активации реакций и преобразования прочносвязанных минеральных форм в подвижные ионные необходимо воздействовать на минералы платиновых металлов механическим, химическим, электрохимическим способом. Судя по существованию аномалий платиноидов над глубокозалегающими и погребенными платиноносными зонами, некоторые факторы, действующие на глубинах первых сотен метров, приводят к переходу платиноидов в растворенную форму нахождения из закрепленной. Для участков коренной платиноидной минерализации такими факторами не могут являться механическое истирание (возможное для россыпей) или воздействие резко изменчивых значений кислотности среды (что наиболее вероятно при современном гидротермальном рудообразовании). Однако в таких условиях вероятно существование естественных электрических полей, вызывающих протекание электрического тока в горных породах и сопутствующие электрохимические реакции (модель представлена на рисунке 1 вклейки).

Указанные поля могут быть связаны с практически повсеместным наличием в ультрамафит – мафитовых массивах обогащенных магнетитом зон различной конфигурации и протяженности (обозначим их как «магнетитсодержащие тела» – геологические тела, сложенные магнетитом не менее, чем на 10 %, обладающие непрерывной электронной проводимостью и представленные массивными телами, жилами или прожилками магнетита либо титаномагнетита, ожелезненными дайками, тектоническими нарушениями, обогащенными магнетитом «карманами» коры выветривания). Обоснование первого защищаемого положения, посвященное обсуждению предпосылок к возникновению подвижных форм нахождения ЭПГ, приводит к

описанию условий формирования интенсивных естественных электрических полей окислительно-восстановительного происхождения на платиноносных массивах.

1. Рядом исследователей установлено наличие аномалий ЕП окислительно-восстановительного происхождения интенсивностью порядка первых сотен милливольт над рудными телами магнетита. Выявлена корреляционная зависимость между скачком потенциала на границе рудного тела и вмещающей среды и концентрацией растворенного кислорода в окружающих подземных водах – эта связь линейная и эмпирически выражается зависимостью $\Delta U = C_{O_2} \cdot 133(\text{мВ} \cdot \text{л})/\text{мг} - 200\text{мВ}$ где C_{O_2} – концентрация растворенного кислорода, в мг/л, ΔU - скачок потенциала на границе рудного тела в мВ. При этом в верхней части рудного тела образуется катодная зона поля ЕП, а в нижней – анодная. Окисление магнетита: $2\text{Fe}_3\text{O}_4 + (\frac{1}{2})\text{O}_2 \rightarrow 3\text{Fe}_2\text{O}_3$, приводит к переходу соединений железа в более устойчивую форму – слабомагнитные оксиды и оксигидроксиды – гематит, гётит, гидрогётит и другие в зависимости от особенностей протекания процесса. Для теоретического определения ЕП электропроводящего рудного тела необходимо рассчитать изменение концентрации растворенного в подземных водах кислорода по глубине с учетом диффузии и необратимой реакции окисления. Изучение распределения по глубине разреза концентрации растворенного газообразного кислорода выполнено путем решения нелинейного интегрального уравнения методом последовательных приближений, ход решения представлен в диссертации. Полученное распределение C_{O_2} позволяет определить в зависимости от глубины соотношение магнетита и окисленных его форм (гематит и др.) и использовать это соотношение для сопоставления с данными минералогического анализа. Для этого рассмотрены данные с Буруктальского массива, где в пределах коры выветривания ультрамафитов распространены протягивающиеся на глубину клиновидные зоны, обогащенные магнетитом и для данного месторождения по данным публикаций известны закономерности изменения с глубиной концентраций магнетита и минералов, представляющих окисленную форму магнетита, что позволяет оценить достоверность предлагаемых расчетов. Графическое сопоставление теоретических и экспериментальных результатов (рисунок 2 вклейки) позволило подтвердить справедливость

полученного решения и получить значение параметра скорости окисления магнетита в естественном залегании: $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$.

Выяснено, что для магнетитсодержащих тел, протягивающихся без разрыва электрической связи между электропроводящими минералами (с содержанием магнетита более 10 %) до глубин более 30 метров, возможно формирование естественного электрического поля значительной интенсивности с электродвижущей силой естественного гальванического элемента около 250 мВ. Отрицательные аномалии ЕП с электродвижущей силой источников такого порядка величины и сопутствующие изменения физико-химических свойств обнаружены в результате полевых работ на рассмотренных массивах.

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. В связи с необходимостью подтверждения возможности перехода платиноидов под действием электрического поля из закрепленной формы образцов руд в раствор в ионной форме выполнен лабораторный эксперимент. Ранее другими исследователями был изучен процесс извлечения некоторых металлов (исключая платиноиды) из образцов горных пород и руд под действием электрического тока и их опыт использован в поставленном автором эксперименте. Сложность теоретического обоснования перехода элементов платиновой группы (ЭПГ) в подвижную форму в растворе связана со свойственным для ЭПГ явлением комплексообразования, усиливающимся в многокомпонентной геологической среде.

В эксперименте использована емкость круглого сечения (диаметром 8 см) вытянутой формы (длиной 90 см) с ячейками, отделенными друг от друга полупроницаемыми пергаментными мембранами, содержащими подкисленную азотной кислотой дистиллированную воду (рисунок 3 вклейки). В средней ячейке расположен образец платиносодержащей горной породы. Через электроды, помещенные в крайние ячейки, пропущен в течение 2 недель электрический ток силой 0,1 А. Регулярно из ячеек, не контактирующих непосредственно с содержащей образец ячейкой, отбирались пробы раствора, и их высокоточный химический анализ показал рост с течением времени

эксперимента содержания платины и палладия (отсутствующий при исследовании без подключения электрического тока), а также других металлов.

Результат в виде геоэлектрохимических годографов представлен на рисунке 4 вклейки, где полуось «отрицательных значений» времени обозначает изъятие проб католита, «положительных» – анолита. График показывает значимость доли палладия и платины, перешедших в раствор под действием электрического тока (для суммы значений для проб католита и анолита – 19 и 24%). Изменение концентрации элементов в растворе является ступенчатым, что характеризует извлечение металлов сначала из относительно слабозакрепленных форм нахождения. Аналогичные по общему виду ступенчатые зависимости ранее получены исследователями для других металлов. Значение доли платины, перешедшей в растворенную форму, соответствует по порядку величины обнаруженным в естественных условиях: ионные формы платины в концентрациях до 0,086 г/т имеются на участках благороднометалльного сульфидного оруденения, что составляет около 11% от валового содержания по данным публикаций.

Моделирование процессов воздействия ЕП на содержащую ЭПГ горную породу показало возможность перехода платиноидов из закрепленной формы нахождения в подвижную в составе комплексных ионов как положительного, так и отрицательного электрического заряда. Массовая доля палладия в анолите превышает в 2.88 раза долю палладия в католите, т.е. превалирует переход в раствор в форме аниона. Для платины в растворе катионная форма нахождения незначительно преобладает над анионной. Данное наблюдение может отображаться в зональности распределения подвижных и вторично-закрепленных форм нахождения платины и палладия вблизи источников ЕП.

Заметим, что влияние электрического поля на движение ионов существенно лишь в локальной области вблизи интенсивного источника ЕП. В остальной части разреза перемещение подвижных форм нахождения элементов обусловлено механизмом естественной ионной флотации (обоснованным ранее при участии научного руководителя автора). Скорость движения иона в составе пузырька газа намного больше, чем скорость перемещения под действием электрического поля, в результате ионы не перемещаются под действием ЕП на достаточное расстояние, а фиксируются на двойном электрическом слое у поверхности пузырька и увлекаются в движение

вверх под действием разности давлений. Таким образом, формирование ореолов рассеяния подвижных форм 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 (квазиконвекция). Выше уровня насыщения пор горных пород разреза подземными водами перенос осуществляется посредством капиллярных сил и испарения.

Оценка скорости перемещения элементов в струйном ореоле рассеяния выполнена путем точного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для концентрации подвижных форм нахождения элемента, описывающих их диффузию и квазиконвекцию. Распределение концентрации подвижных форм нахождения элемента (C) и концентрации закрепленных в твердой фазе форм (q) в случае реакции их согласно уравнению кинетики необратимой реакции второго порядка, подчиняется системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных вида:

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

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = \beta C (q_{\max} - q), \quad (2)$$

где \vec{v} – скорость квазиконвекции подвижной формы нахождения элемента, вызванной естественной ионной флотацией в горных породах (определяется в соответствии с силой Архимеда и законом Стокса), D – коэффициент диффузии подвижной формы нахождения элемента в горных породах, β – константа кинетики необратимой гетерогенной реакции, q_{\max} – максимально возможная концентрация элемента в твердой фазе, τ – время.

В одномерном случае, для концентрации подвижных форм как функции z (расстояние по вертикали вверх от поверхности «рудного» тела), получено решение:

$$C(z, \tau) = \frac{2}{\beta D} \frac{N(v - v_\phi) v_\phi e^{-\frac{(v - v_\phi)}{D}(z - v_\phi \tau)}}{\left[\frac{1}{(v - v_\phi)} \sqrt{\frac{\beta D q_{\max}}{2}} + N e^{-\frac{(v - v_\phi)}{D}(z - v_\phi \tau)} \right]}, \quad (3)$$

где N – параметр, не зависящий от времени и глубины, а значение

скорости продвижения «фронта» волны повышенных концентраций подвижных форм v_ϕ определяется выражением (при $v \geq \sqrt{2\beta C_0 D}$):

$$v_\phi = \frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{\beta C_0 D}{2}}. \quad (4)$$

Таким образом, распределение концентрации подвижных форм нахождения 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 рассмотренных в работе параметрах (рисунок 5), что является значительной величиной в геологическом масштабе времени. При условии постоянства воздействия ЕП, ореол повышенных концентраций подвижных форм нахождения ЭПГ достигнет поверхности с глубины около 40 м за время порядка 10 тысяч лет, и с течением времени интенсивность аномалии будет нарастать). При наличии тектонически ослабленных зон на пути перемещения микропузырьков, это время может быть существенно сокращено. Вторично-закрепленные формы нахождения, сформировавшиеся у поверхности из подвижных форм, могут обнаруживаться различными методами геоэлектрохимии с вещественной регистрацией.

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. Применение геоэлектрохимических методов совместно с геофизическими исследованиями опробовано на платиноносных массивах Урала (Качканарский, Светлоборский) и Карелии (Аганозерский) с целью проверки гипотезы взаимосвязи ЕП и ореолов рассеяния подвижных форм нахождения платиноидов. Горные породы массивов, обобщенно, сложены дунитами, перидотитами, пироксенитами, габбро-норитами, с установленным наличием обогащенных магнетитом либо титаномагнетитом зон. Аганозерский массив осложнен наличием толщ перекрывающих интрузивные породы ледниковых отложений.

Исследования включили работы методом ЕП, геоэлектрохимии, а также способы изучения физико-химических свойств почв (рН, Eh,

параметр роста стандартизованных значений магнитной восприимчивости при обжиге: $\Delta\alpha_t = \alpha_{tst} - \alpha_{st}$, характеризующий долю окисленных форм соединений железа и марганца). Дополнительно использованы данные магниторазведки для установления соответствия аномалий ЕП магнетитсодержащим телам на закрытой территории.

Известно разнообразие методов, относящихся к геоэлектрохимическим – метод ЧИМ (частичного извлечения металлов), МДИ (метод диффузионного извлечения), и условно относящихся к геоэлектрохимическим – МПФ (метод металлоорганических почвенных форм), ТМГМ (термомагнитный геохимический метод), МАСФ (метод анализа сверхтонкой фракции) и другие. Эти методы базируются, как правило, на изучении подвижных или слабозакрепленных форм нахождения элементов на различных компонентах приповерхностных рыхлых отложений – органических соединениях, глинистых частицах, оксидах или гидроксидах железа и марганца, выделение которых из пробы происходит в процессе специализированной физико-химической обработки. В зависимости от условий у дневной поверхности, могут преобладать подвижные или вторично-закрепленные на различных частицах формы нахождения элементов, и изучение ореолов группой методов даёт более полное представление о распределении подвижных и сорбированных на разных частицах почв формах нахождения элементов. Данный факт послужил толчком для предложения способа анализа поляризуемой фракции, в котором, по идее авторов методики, выделяется часть рыхлой пробы, способная фиксировать свободные ионы за счет повышенной поляризуемости частиц.

Устройство для осуществления данного способа включает пластину с сетью электродов, формирующих электростатическое поле высокой напряженности (рисунок 6). Анализ содержания некоторых благородных металлов в поляризуемой фракции выполнен для 5 комбинированных проб Аганозерского массива (ввиду малости навески поляризуемой фракции, для анализа на платиноиды пришлось объединить ряд проб). Гистограммы распределения коэффициентов накопления (K_n) элементов в поляризуемой фракции показывают приуроченность пиков этого параметра к проекциям выхода к подошве ледниковых отложений перспективных зон разреза, обозначившихся также по росту концентраций вторично-закрепленных форм нахождения платины по данным термомагнитного геохимического метода (рисунок 8) и располагающихся в пределах воздействия интенсивной

аномалии ЕП. Наибольшие значения коэффициентов накопления, зафиксированные для пробы II, соответствуют интервалу 400 – 800 м на профиле, где проявлены отрицательные аномалии ЕП и Eh, имеются геологические предпосылки для нахождения платиноидной минерализации и результат анализа керна скважины показал наличие платиноносной зоны на глубине несколько десятков метров. Таким образом, применение метода АПФ в комплексе поисковых работ на платиноидное оруденение представляется перспективным.

Рисунки 7 – 10 подтверждают высказанное предположение том, что вблизи источников аномалий ЕП формируются предпосылки для образования ореолов подвижных форм нахождения ЭПГ. Можно отметить пространственную корреляцию расположения областей повышенных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ и 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 подвижных форм нахождения платиноидов – естественного электрического поля. Области такого воздействия рационально выявлять до проектирования геоэлектрохимических исследований и проводить опробование в перспективных нахождение вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ интервалах.

Комплексе 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.

Заключение

Диссертация, представленная настоящим авторефератом, выполнена на актуальную тему и может найти продолжение и развитие в дальнейших исследованиях, на что надеется автор.

Основные результаты работы, в дополнение к отраженным в защищаемых положениях:

1. Обоснована методика поисков участков погребенной платиноидной 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. Предложен способ теоретического определения потенциала ЕП магнетитсодержащих тел и 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 (гётита, гематита). Установлено значение скорости (постоянная кинетики) реакции окисления магнетита.

3. Разработана и сконструирована лабораторная исследовательская установка, с помощью которой подтверждено явление перехода порядка 20% платины и палладия из закрепленных минеральных форм в подвижные (растворенные) формы нахождения под воздействием электрического тока (модель ЕП) в составе комплексных ионов как положительного, так и отрицательного электрического заряда.

4. Предложено устройство для осуществления воздействия на пробы рыхлых отложений электростатического поля высокой напряженности – поляризационный сепаратор. Судя по результатам опробования методики АПФ, выделение поляризуемой фракции позволяет обогащать пробы вторично-закрепленными формами нахождения элементов, в том числе, платиноидов.

**По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:
в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:**

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 г. т. 200. С. 81-86.

Сенчина Н.П. Анализ корреляционных связей результатов измерения естественного электрического поля и содержания химических элементов (на примере объектов Среднего Урала) / Записки Горного института. 2015. т. 212. С. 141-145.

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).

в других изданиях:

Сенчина Н.П. Опыт применения поляризационного сепаратора в изучении электрических свойств пород / Н.П. Сенчина, А.А. Миллер, О.Ф. Путиков // Материалы XIII конференции СНО Геологического факультета СПбГУ. Геология в различных сферах. 2013. С. 144-145.

Сенчина Н.П. Анализ корреляционных связей результатов измерения естественного электрического поля и содержаний химических элементов (на примере объектов Среднего Урала) // Третья научная молодежная школа-конференция «Новое в познании процессов рудообразования». Москва. ИГЕМ РАН. 2013. С. 202-204.

Сенчина Н.П. Связь электрохимических процессов зоны гипергенеза с геохимическим образом рудного объекта. // Материалы IX международной научно-практической конкурс-конференции молодых специалистов «Геофизика 2013». Санкт-Петербург. 2014. С. 57-60.

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 семинара: Применение современных электроразведочных технологий при поисках МПИ. 2015. С. 195-198.

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 семинара: Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых. 2016. С. 75-79.

Подана заявка на регистрацию способа сепарации частиц пробы горной породы с помощью электрического поля, образованного высоким напряжением, и поляризационного сепаратора для его осуществления № 2015147830 / **Н.П. Сенчина**, А.А. Миллер, Н.С. Пщелко, Е.Г. Водкайло // (заявка находится в стадии «экспертизы по существу» с мая 2016 г).

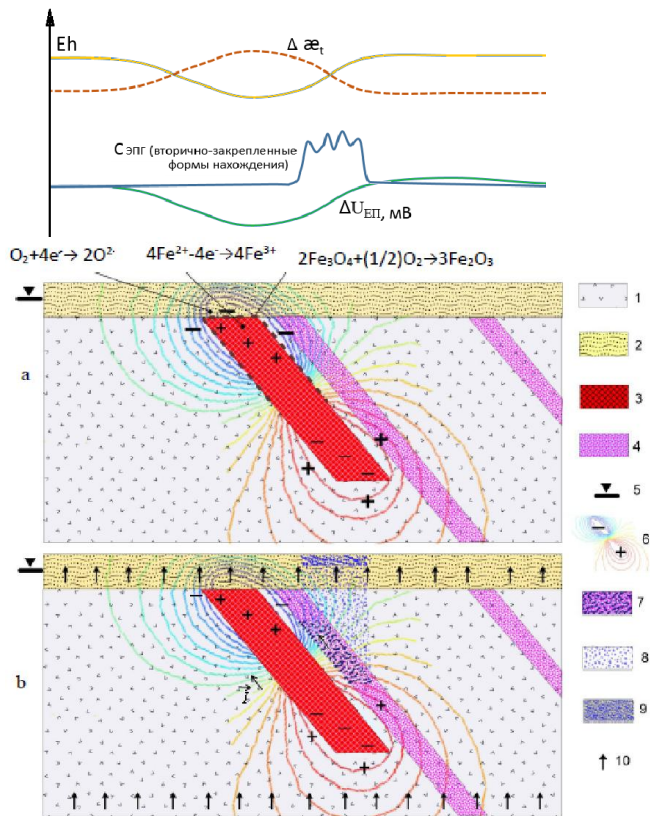


Рисунок 1 – Сводная физико-геологическая модель объектов исследования, представленная в виде двух стадий: формирование ЕП (а) и возникновение и перемещение подвижных форм нахождения ЭПГ (б). 1 – вмещающие горные породы, 2 – перекрывающие отложения, 3 – «магнетит-содержащее тело», 4 – платиноносные зоны, 5 – уровень подземных вод, 6 – естественный гальванический элемент, 7 – подвижные формы нахождения платиноидов в виде комплексов ионов, 8 – струнный ореол рассеяния подвижных форм нахождения платиноидов, 9 – зона повышенных концентраций новообразованных вторично-закрепленных форм нахождения платиноидов, фиксируемая методами геоэлектрохимии, 10 – направление перемещения ионов, преимущественно в ходе естественной ионной флотации с потоком плохорастворимых газов (водород, азот, метан). \vec{I} – направление протекания электрического тока. Графики соответствуют ожидаемым условным изменениям значений потенциалов Eh и ЕП, параметра роста магнитной восприимчивости при обжиге (ΔaE_1), концентрации вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ

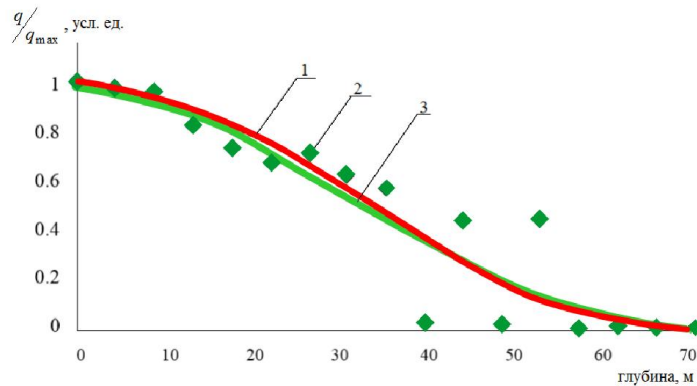


Рисунок 2 – Теоретическая (кривая 1) и экспериментальные (2 – не сглаженная, 3 – сглаженная) зависимости относительной концентрации окисленной формы магнетита от глубины

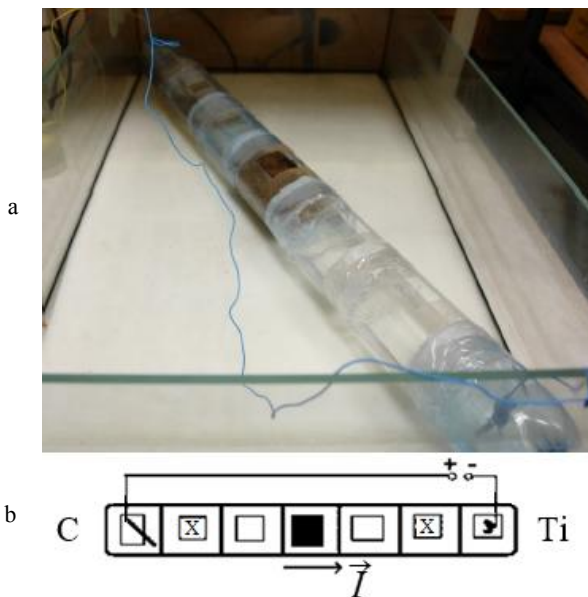


Рисунок 3 – Общий вид (а) и схема (б) экспериментальной лабораторной установки. С – углепластиковый электрод, Ti – титановый электрод, X – ячейки для отбора проб, ■ – ячейка, содержащая 200 грамм дробленой (фракция менее 1 мм) платиносодержащей горной породы, \vec{I} – направление протекания электрического тока

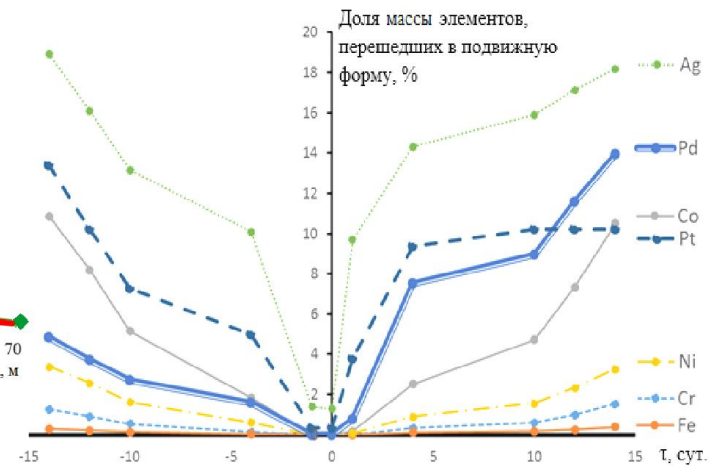


Рисунок 4 – Геоэлектрохимические годографы элементов (доля массы элементов, перешедших из навески твердой горной породы в раствор под действием электрического тока в процентах от исходной массы в образце горной породы). Полуось «отрицательных значений» времени обозначает изъятие проб католита, «положительных» – анолита

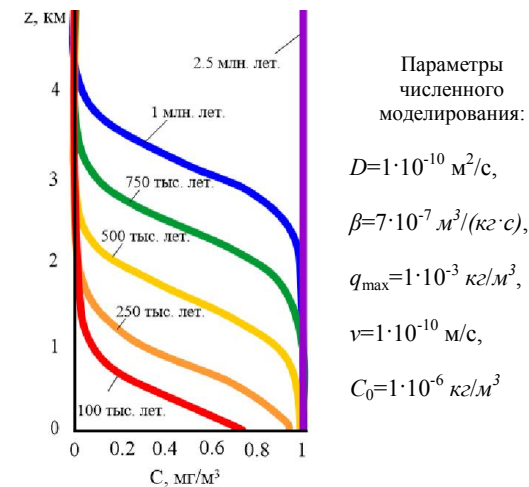


Рисунок 5 – Распределение концентрации подвижных форм нахождения элементов в одномерном струйном ореоле рассеяния с течением времени

Параметры численного моделирования:
 $D=1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\beta=7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$,
 $q_{\text{max}}=1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$,
 $\nu=1 \cdot 10^{-10} \text{ м}/\text{с}$,
 $C_0=1 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$

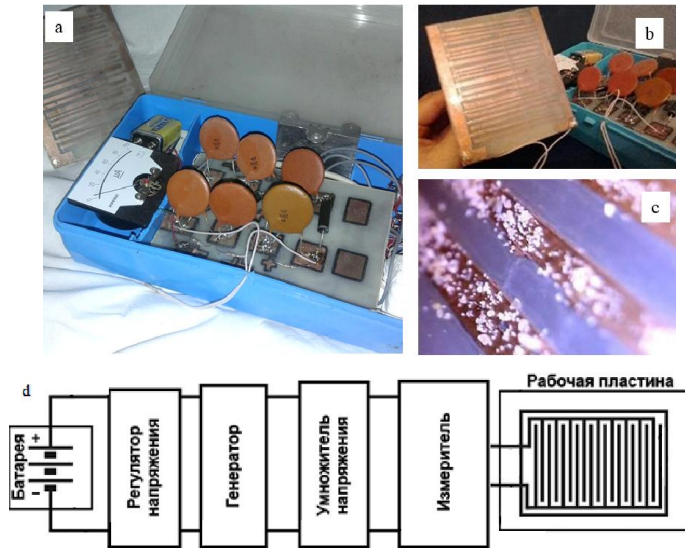


Рисунок 6 – Общий вид поляризационного сепаратора (а, б), фото пластины с притянутыми к электродам частицами пробы (с) и схема устройства прибора (д)

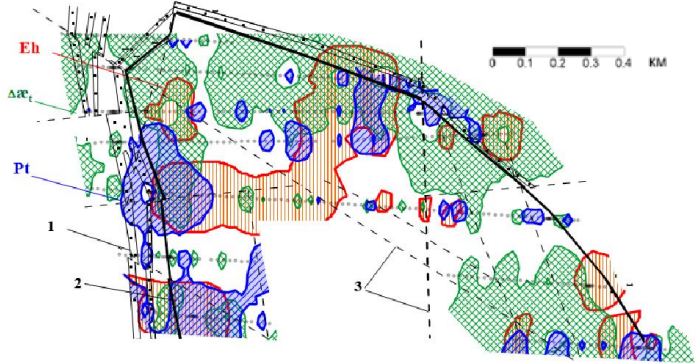


Рисунок 7 – Сопоставление отрицательных аномалий Eh, положительных аномалий концентрации платины по данным ТМГМ (Pt) и положительных аномалий роста магнитной восприимчивости при обжиге (получено автором по данным исследований, выполненных на Аганозерском массиве ФГУ НПП «Геологоразведка» (отв. исп. Вешев С.А.)). Аномалии концентрации вторично-закрепленных форм нахождения платины сближены с областями понижения Eh и повышения доли окисленных форм соединений железа и марганца. 1 – магнетитосодержащие тела, 2 – главный хромитовый горизонт, ассоциирующийся с платиноидной минерализацией, 3 – тектонические нарушения

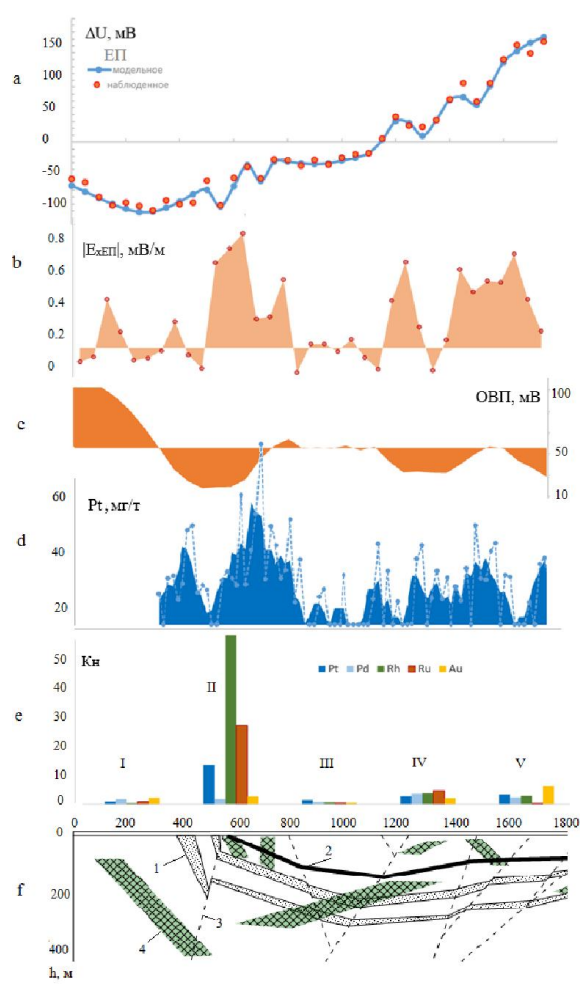


Рисунок 8 – Результаты изучения потенциала (а) и модуля напряженности (б) ЕП, Eh почв (с), концентраций вторично-закрепленных форм нахождения платины по данным ТМГМ, в том числе с осреднением (график с заливкой) (д) на профиле Аганозерского массива. Коэффициенты накопления (усл.ед) платины, палладия, родия, рутения, золота в поляризуемой фракции (I-V) комбинированных проб по отношению к валовому содержанию (е). Схематическое строение изученного профиля (f). 1 – «магнетитосодержащие тела», 2 – главный хромитовый горизонт, ассоциирующийся с платиноидной минерализацией, 3 – тектонические нарушения, 4 – естественные гальванические элементы, установленные по данным ЕП. d, f – с использованием материалов ФГУ НПП «Геологоразведка»

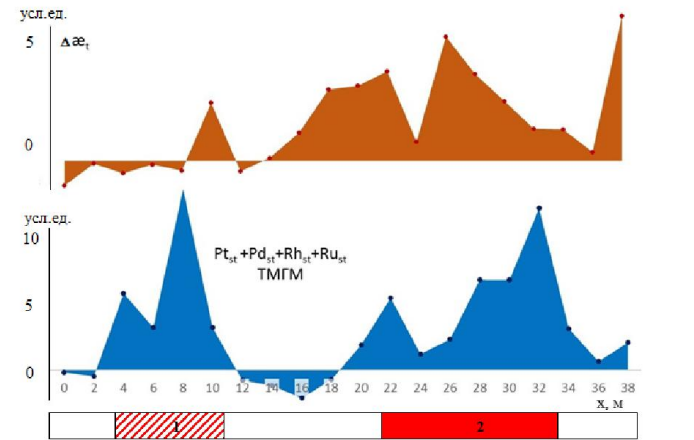


Рисунок 9 – Сопоставление разности стандартизованных значений a_1 и a_2 , стандартизованных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ на профиле Светлоборского массива. 1 – фрагмент профиля, перспективный на наличие глубже расположенной зоны платинометалльной минерализации, 2 – фрагмент профиля, на котором зафиксировано наличие зоны платинометалльной минерализации по данным бороздowego опробования

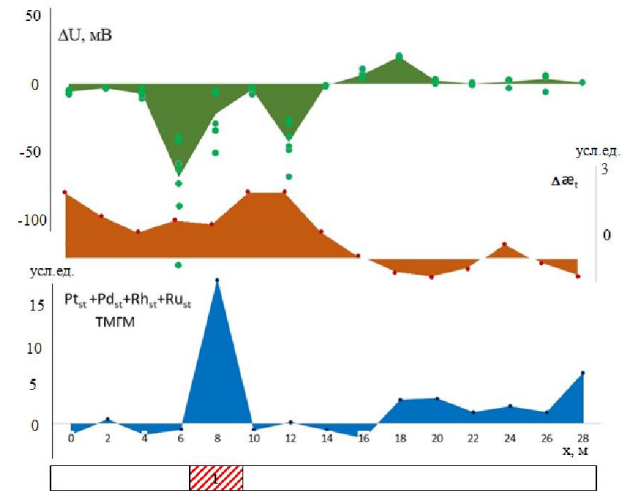


Рисунок 10 – Сопоставление результатов изучения потенциала ЕП, разности стандартизованных значений a_1 и a_2 , стандартизованных концентраций вторично-закрепленных форм нахождения ЭПГ на профиле Качканарского массива. 1 – фрагмент профиля, перспективный на наличие зоны платиноидной минерализации