

Ворошилов Н.А., Алексеев С.Г., Щтокаленко М.Б. Поиски рудных месторождений по наложенным ореолам рассеяния// Российский геофизический журнал, 2016, № 55-56, с. 10-39.

Аннотация

Геоэлектрoхимические методы поисков рудных месторождений успешно применялись в 1980х гг. на месторождениях различных типов в различных районах мира, как в ходе опытно-методических работ, так и производственных. Эти методы, основанные на выделении и анализе подвижных форм химических элементов, характеризуются глубиной исследований до 1 км, высокой геологической и экономической эффективностью, особенно в закрытых и полужакрытых районах. Примеры использования геоэлектрoхимических методов и условия их применения изложены в статье с систематизацией по видам руд. С середины 1990х гг. геоэлектрoхимические методы в комплексе с геофизическими не менее успешно применяются при поисках месторождений углеводородов, способствуя выявлению новых залежей на глубинах до 6 км. В настоящее время, в связи с резким изменением цен на нефть, целесообразно возродить практику поисков рудного сырья геоэлектрoхимическими методами.

В апреле 2013 г. по инициативе агентства «Роснедра», Минприроды РФ и Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ФГУП «ИМГРЭ») организована и проведена VI Всероссийская научно-практическая конференция по прикладной геохимии «Интерпретация и оценка разноранговых рудогенных геохимических аномалий в сложных ландшафтно-геологических условиях». В специальном выпуске журнала «Разведка и охрана недр» (август 2013 г.) опубликованы ключевые доклады Конференции, краткие сообщения по остальным докладам представлены в сборнике материалов Конференции. Основная цель проведения Конференции состояла в повышении эффективности и результативности прогнозных и поисковых геохимических работ в сложных геолого-минерогенических и ландшафтных обстановках. В основополагающих докладах от Роснедр и ФГУП «ИМГРЭ» [18,13] к числу сложных обстановок отнесены прежде всего полужакрытые (27% территории России) и закрытые площади (43% территории России). Первые представляют собой денудационные плато и равнины с мощным чехлом (10-20 м) автохтонных отложений и аккумулятивно-денудационные равнины с аллохтонными отложениями мощностью до 30 м, вторые - аккумулятивные и аккумулятивно-пластовые равнины (платформы) 2-3-ярусного строения с мощным (более 30 м) чехлом аллохтонных отложений.

Применяемые в настоящее время при прогнозных и поисковых работах традиционные геохимические методы (по первичным, вторичным ореолам и потокам рассеяния) в условиях закрытых и значительной части полужакрытых территорий неэффективны. Объясняется это малой глубиной методов.

Вопрос о прогнозно-поисковых геохимических работах на полужакрытых и закрытых территориях в принципе был поставлен еще при подготовке Инструкции по геохимическим методам поисков рудных месторождений в 1983 году [17]. Тогда впервые было введено и закреплено понятие наложенных ореолов рассеяния. **Было отмечено, что наложенные ореолы характерны для условий аккумулятивно-денудационных равнин с покровом дальнепринесенных отложений ограниченной мощности (2-10 м), редко до 50-100 м.** Предполагалось, что они простираются с поверхности на глубину до рудного тела, могут быть смещены за счет переноса элементов фильтрующимися водами. При наличии на глубине горизонта аллохтонных отложений большой мощности, в котором ореол не прослеживается по вертикали, наложенный ореол назывался оторванным. Считалось, что в образовании наложенных ореолов рассеяния преобладают солевые формы миграции – капиллярный подъем и диффузия растворов в сочетании с

обменными реакциями, гидратацией ионов, сорбционным закреплением, испарительной и биогенной аккумуляцией элементов.

Несмотря на явно недостаточную изученность наложенных ореолов рассеяния в Инструкции декларировано важнейшее их значение для эффективного проведения наземных (поверхностных) литохимических поисков в закрытых и полужакрытых районах. Из других методов, применение которых Инструкцией рекомендуется для прогнозно-поисковых работ в трудных условиях (на закрытых территориях), рассмотрены гидрохимические и атмохимические, как самые глубокие из всех традиционных геохимических методов. Каждому из вышеназванных двух методов посвящены отдельные разделы документа. Методу поисков по наложенным ореолам рассеяния повезло меньше. Дело в том, что при традиционном валовом анализе геохимических проб наложенные ореолы практически не выявляются. По мере увеличения мощности перекрывающих отложений даже крупные перекрытые месторождения способны создавать только весьма слабые наложенные ореолы рассеяния. В общем случае слабые наложенные ореолы маскируются геохимическим фоном тех же самых элементов, которые являются индикаторами искомого месторождения. Поэтому для выявления наложенных ореолов в пробах из перекрывающих отложений начали производить частично-фазовый анализ различных вытяжек. Однако и здесь возникли свои сложности. Поскольку содержания элементов-индикаторов в различных вытяжках значительно ниже, чем в валовых пробах, выяснилось, что используемые в те годы методы экспрессного спектрального анализа (как количественного, так и, особенно, полуколичественного) не обладали достаточными пределами обнаружения и точности. Для надежного выявления наложенных ореолов рассеяния на практике приходилось в каждом случае подбирать и разрабатывать специальные методики концентрирования извлекаемых в вытяжки элементов и удовлетворительные методы их последующего аналитического определения. Перечисленные трудности, а также недостаточная апробация новых разработок, не позволили авторам Инструкции [17] рекомендовать метод прогноза и поисков по наложенным ореолам рассеяния к практическому применению. Чтобы привлечь внимание научных и инженерно-технических работников геологических организаций, проводящих геологопоисковые и разведочные работы, к геохимическому методу поисков по наложенным ореолам рассеяния, в приложениях к Инструкции, в качестве примера, кратко приведены состав и последовательность работ при поисках перекрытого оруденения (по материалам Антроповой Л.В., Несвижской Н.И. и Саета Ю.Е.).

В уже цитируемой выше статье [13] сделан обзор значительного количества исследований и опытно-методических работ по гидрогеохимическим, атмохимическим методам и наложенным ореолам рассеяния за период 1960-1990 гг. Поскольку обзор является предельно кратким, имеется смысл в какой-то мере дополнить его по имеющимся в нашем распоряжении материалам. Особенно интересным представляется период с 1983 по 1990 гг., от времени выхода в свет Инструкции [17] до момента распада СССР. Это было время последнего подъема геохимических работ в нашей стране. С одной стороны, широкое внедрение в геологоразведочные работы традиционных геохимических методов поисков по ореолам и потокам рассеяния, производство которых было регламентировано, с другой стороны – продолжение разработок по методу поисков по наложенным ореолам рассеяния, их апробация и начало внедрения в производственный процесс.

В 1989 г. по инициативе профессора Ленинградского горного института заведующего кафедрой радиоактивных и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Квятковского Е.М. было проведено обобщение имеющихся разработок для поисков глубокозалегающих и перекрытых рудных месторождений [14]. К рассмотрению было выбрано 13 методов разных авторов. Оценка применимости методов для поисков глубокозалегающего и перекрытого оруденения

проводилась на основании физико-химической сущности методов, их производительности и стоимости.

Как уже отмечалось, формирование наложенных ореолов рассеяния включает в себя несколько природных процессов. Прежде всего, это процесс гипергенного преобразования глубинных рудных объектов, растворения исходного рудного вещества и перехода химических элементов в подвижное растворенное и газообразное состояние. Затем процессы дальней миграции элементов в подвижных формах нахождения, преимущественно к дневной поверхности, при этом некоторые из элементов теряют подвижность, закрепляясь на путях миграции в виде вторичных минералов, другие продолжают перемещаться. В наибольшей мере процесс закрепления и накопления подвижных форм проявляется вблизи дневной поверхности, при резкой смене физико-химической обстановки среды. Все перечисленные процессы порождают весьма многообразные формы нахождения химических элементов в рассматриваемой природной системе.

Анализ рассмотренных в статье [14] методов показал, что для большинства методов характерно извлечение химических элементов не в одной, а в нескольких формах нахождения. Так методы сорбционно-солевые, частично-фазовый, почвенно-гидрохимический (кислотный) реализуют извлечение из геохимических проб примерно одного и того же набора групп форм нахождения элементов. Обычно он включает карбонатные, сульфатные (сульфидные), окисные, ферримарганцевые, металлоорганические, сорбированные и воднорастворимые формы нахождения. Нередко суммарные содержания элементов в перечисленных формах нахождения (в пересчете на навеску пробы) приближаются к их валовому содержанию. Получаемая в этих случаях поисковая информация немногим отличается от валового геохимического опробования, геологическая эффективность использования названных методов низкая.

Наиболее избирательными по спектру форм нахождения элементов признаны метод частичного извлечения металлов (ЧИМ), метод поисков по металлоорганическим почвенным формам нахождения (МПФ), термомагнитный геохимический метод (ТМГМ). Метод частичного извлечения металлов (ЧИМ) основан на перемещении вещества (ионов) в поле электрического тока и накоплении их в специальных электродах. МПФ основан на исследовании закономерностей распределения химических элементов, связанных с гумусом почв, главным образом с фульво- и гуминовыми кислотами. ТМГМ основан на исследовании закономерностей распределения химических элементов, связанных с гидроокислами железа и марганца в почвах (или с железом и марганцем содержащими минералами в горных породах). К описываемой группе примыкают метод диффузионного извлечения металлов (МДИ) и метод искусственных сорбентов. Оба они ориентированы на исследование сорбированных форм нахождения химических элементов.

Другие из числа рассмотренных методов по своей селективности занимают промежуточное положение между двумя выше охарактеризованными группами.

В статье [14] для каждого из методов приведены также способ экстракции и извлекаемые формы нахождения элементов, способ и глубина отбора геохимических проб, приведены сведения о производительности и стоимости полевых и лабораторных аналитических работ, а также об уровне внедрения методов в практику геологоразведочных работ.

Важным достоинством методов принято считать их нормирование. В условиях селективного извлечения элементов-индикаторов из проб простого нормирования на вес или объем отбираемых проб недостаточно. Лучше других нормирован метод ЧИМ. Поскольку извлечение элементов проводится под воздействием электрического поля, оно нормируется по его напряженности. В МПФ из почвенных проб выделяются далеко не все количество содержащихся в них металлоорганических соединений, а только их часть. При этом в получаемом экстракте анализируется концентрация углерода. Концентрации элементов-индикаторов в экстракте нормируются по углероду. Обычно представляются

они в относительных процентах, по которым судят, что на участках над глубокозалегающими месторождениями элементы-индикаторы, достигая в легкоподвижных формах дневную поверхность, накапливаются в гумусе почв в больших количествах, нежели на участках, не имеющих месторождений. В ТМГМ четко определены условия магнетизирующего обжига (время, температура) и последующей термомагнитной сепарации прокаленных проб (магнитная индукция используемого поля). В состав работ ТМГМ входит измерение значений магнитной восприимчивости геохимических проб до и после их магнетизирующего обжига. В купе полученные данные позволяют судить о распределении в исследуемых пробах железа в различных валентностях (двух- и трехвалентном состояниях). Таким образом, имеется принципиальная возможность нормировать получаемые данные ТМГМ по железу. В других методах нормирование не предусмотрено.

С целью оценки степени внедрения методов в практику геологоразведочных работ в статье [14] использованы данные публикаций представителей производства (статьи, тезисы, выступления и производственные отчеты) за пять лет, предшествующих ее опубликования. Выяснилось, что реально использовались, хотя и в небольших объемах, метод ЧИМ, МПФ, ТМГМ и МДИ, ограниченно использовались ССМ (сорбционно-солевой по моренным отложениям (Н.Ф. Майоров, ЛГИ), ПГК (почвенно-гидрохимический кислотный (Г.А. Вострокнутов, ПГО «Уралгеология»), ЧФА (частично-фазовый анализ (Ю.Е. Сагет, Н.И. Несвижская, ИМГРЭ), ИС (метод искусственных сорбентов (К.И. Лукашев, В.К. Лукашев, ИГиГФАН БССР).

Из анализа перечисленных методов сделан вывод, что наибольшей геологической эффективностью выявления глубокозалегающих рудных объектов в соответствии с обозначенными критериями обладают метод ЧИМ, МПФ, ТМГМ. МДИ и метод искусственных сорбентов. Наиболее эффективным представляется метод ЧИМ, поскольку в нем извлекаются электроподвижные формы нахождения элементов, в которых они непосредственно мигрируют от глубинных объектов к дневной поверхности.

Применимость новых методов обусловлена не только их принципиальными возможностями, но также и организационно-техническими и экономическими особенностями. Так, широкое применение метода ЧИМ при мелкомасштабных съемках на больших площадях сдерживается его высокой стоимостью. Кроме того, для применения метода ЧИМ требуются специальные аппаратура и снаряжение. Еще в советские времена была выпущена малая серия станций ЧИМ-10, в настоящее время она не производится. Применение МПФ ограничено в пустынных, частично, в полупустынных районах, в ландшафтах которых представительный горизонт почв с достаточным количеством гумусового материала отсутствует.

Таким образом, уже в конце 90-х годов были рассмотрены, возможно, не в полной мере, методы поисков глубокозалегающих и перекрытых рудных месторождений по наложенным ореолам рассеяния. На основании анализа сущности методов, их производительности, стоимости применимости была определена группа новых геохимических методов, наиболее эффективных при прогнозе и поисках рудных месторождений на полужакрытых и закрытых территориях.

В послеперестроечный период, уже в России, в связи с резким сокращением финансирования на геологоразведочные работы, развитие научных исследований и опытно-методических разработок по рассматриваемому направлению приостановилось, но не было прекращено. В последнее десятилетие интерес к проблеме поисков на закрытых территориях и повышению эффективности геохимических методов заметно возрождается, доказательством тому может служить организация и проведение VI Всероссийской научно-практической конференции по прикладной геохимии. Положительную роль в этом деле сыграл начавшийся переход аналитической службы на использование высокочувствительных прецизионных методов анализа геохимических проб (ICP ES, ICP MS, AAS и др.).

По финансовым причинам авторы обозначенных разработок не смогли принять участия в проведенной конференции и потому полученные и накопленные ими данные не нашли отражения в ее материалах. Целесообразно восполнить этот пробел. Это необходимо еще и потому, что в статье Менчинской О.В. с соавторами [21], без какого-либо анализа и обоснования, геоэлектрoхимические технологии упомянуты лишь как «авторские методические разработки, периодически попадающие в производственные работы». К таким разработкам отнесены метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ), ТМГМ, МДИ, ИСК, и др. По мнению авторов статьи [21] «при всех потенциальных возможностях эти методы объединяет отсутствие интерпретационной базы. Методы не проходили апробацию на эталонных объектах твердых полезных ископаемых. Для них не разработаны ни методика интерпретации полученных аномалий, ни технология оценки прогнозного ресурсного потенциала, отсутствуют переходные коэффициенты». Поэтому перечисленные методы «не рекомендуются к применению» при проведении производственных работ.

Инновационная технология геохимических поисков методом анализа сверхтонкой фракции геохимических проб (разработка ФГУП «ВСЕГЕИ») подробно, с практическими примерами ее реализации в различных регионах РФ, представлена в статье Соколова С.В. и Юрченко Ю.Ю. [26], напечатанной по соседству со статьей Менчинской О.В. с соавторами [21]. Поэтому сосредоточим внимание на других методах, из «не рекомендуемых к применению». Это, главным образом, упомянутые выше разработки ФГУНПП «Геологоразведка». Они основаны на изучении узких различных групп форм нахождения химических элементов в отобранных пробах, что отличает их от традиционных литохимических методов исследования валового химического состава горных пород и почв. Новые методы нацелены на регистрацию подвижных форм нахождения, в которых химические элементы-индикаторы выделяются из глубинного объекта, мигрируют на значительные расстояния и накапливаются вблизи дневной поверхности. Такая миграция может происходить в форме простых и комплексных ионов. Вблизи дневной поверхности эти элементы, продолжая существовать в подвижных формах нахождения, частично переходят во вторично закрепленное состояние, сорбируясь на органических комплексах, железисто-марганцевых гидроокислах или глинистых частицах почв. Каждый предлагаемых геоэлектрoхимических методов направлен на селективный анализ определенных форм нахождения химических элементов. Именно селективный анализ позволяет обеспечить глубинность исследований.

Среди геоэлектрoхимических методов, разработанных и внедренных в практику геологических исследований за последние 20 лет, можно назвать следующие:

- Метод поисков по металлоорганическим почвенным формам (МПФ), основан на исследовании закономерностей распределения химических элементов, связанных с гумусом почв, главным образом с фульво- и гуминовыми кислотами [3,4];
- Терромагнитный геохимический метод поисков (ТМГМ), основан на исследованиях химических элементов, связанных с гидроокислами железа и марганца в почвах [5,11, 12];
- Метод диффузионного извлечения металлов (полевой МДИ и лабораторный МДИ-л варианты), основан на извлечении из горных пород и почв химических элементов под действием диффузионных процессов [23].

При проведении геоэлектрoхимических опытно-методических и производственных поисковых работ на рудных месторождениях разнообразных типов были установлены некоторые особенности выявляемых геоэлектрoхимическими методами наложенных ореолов рассеяния, по отношению к стандартной литохимической съемке [1,2,6,8]. Эти особенности определяют условия применения геоэлектрoхимических методов и заключаются в следующем:

1. Поисковыми показателями геоэлектрoхимических методов поисков являются наличие в наложенных ореолах рассеяния аномальных концентраций

основных рудных элементов и их спутников, характерных для каждого конкретного типа месторождений. Ореолы распространяются на значительные расстояния в субвертикальном направлении, что позволяет обеспечить глубинность исследований.

2. Аномально повышенные концентрации металлов в наложенных ореолах, как правило, приурочены к проекции концевых частей рудных тел на дневную поверхность. При субвертикальном залегании рудных тел аномалии приурочены к проекции головных частей рудных тел.

3. Линейные размеры наложенных ореолов (например, их ширина, площадь, протяженность и т.п.) превосходят таковые для самих рудных тел (их проекций на дневную поверхность).

4. Элементный состав наложенных ореолов соответствует вещественному составу руд.

5. Аномалиями геоэлектрoхимических методов выделяются не только сами рудные объекты, но и сопряженные с ними структурно-тектонические элементы земной коры, в частности зоны разломов.

6. Наложённые ореолы по данным геоэлектрoхимических методов наблюдаются не только над коренными, но и над россыпными месторождениями, например, золота и олова.

7. Геоэлектрoхимические методы позволяют выделять наложенные ореолы в различных ландшафтных обстановках от зон вечной мерзлоты до полупустынь и пустынь.

Особого рассмотрения заслуживает вопрос о технологии оценки прогнозного ресурсного потенциала исследуемых площадей и конкретных поисковых объектов по данным работ традиционными геохимическими методами и методами прогноза и поисков по наложенным ореолам рассеяния. В цитированной выше статье [21] высказано соображение, что «применение формул, коэффициентов соответствия, используемых при расчете ресурсного потенциала, в частности для остаточных ореолов, многократно апробируемых на эталонных площадях, для наложенных (солевых) ореолов неправомерны». Проблема действительно серьезная, попробуем разобраться подробнее.

Прежде всего, отметим, что такое замечание вполне можно отнести и к другим геохимическим методам прогноза и поисков, например, атмохимическим, биогеохимическим, гидрогеохимическим. Однако их никто не запрещал, они рекомендованы к применению существующей еще Инструкцией [3]. Далее, на эталонных площадях «коэффициенты соответствия» не апробируются, а с той или другой мерой надежности устанавливаются. Поэтому всегда остается вопрос насколько правомерно использовать такие коэффициенты при работах на новых малоизученных площадях в отличных геолого-структурных и геоморфологических условиях. Имеются справедливые нарекания на необоснованность и некоторых других параметров расчета прогнозных ресурсов по геохимическим данным. К числу их можно отнести такие как глубина подвески, поправка на долю забалансовых руд [18], поправка на уровень эрозионного среза и другие. Кроме того, каких-либо сопоставительных данных рассчитанных по геохимическим съемкам ресурсных потенциалов перспективных площадей (также как и запасов полезных ископаемых в рудных телах) с результатами последующих геологоразведочных работ ни в научной литературе, ни в производственном опыте почти не имеется. На практике, как правило, ресурсные потенциалы перспективных площадей и отдельных геологических объектов оцениваются не только по геохимическим данным, а обязательно по результатам комплексного геолого-структурного, геофизического и геохимического их изучения. В отдельных случаях вклад геофизических методов трудно переоценить. Так, электроразведочные методы, в частности метод вызванной поляризации, позволяют для рудных объектов с ионной проводимостью добиться

удовлетворительного определения их пространственного расположения, формы, глубины и других элементов залегания, необходимых для подсчета запасов.

Обращаясь снова к прогнозу и поискам по наложенным ореолам рассеяния, необходимо иметь в виду, что новые методы, в условиях закрытых территорий, где искомые объекты перекрыты или глубоко залегают и где традиционная геохимия бессильна, несут нам важную новую информацию о наличии на глубине рудного объекта - источника выявленной аномалии. Важную роль имеют форма и размеры выявляемых наложенных ореолов рассеяния. В плане они обычно увязываются с проекцией рудных тел на дневную поверхность. Форма ореолов обычно определяется морфологией рудных тел, в ряде случаев по ней можно судить об условиях залегания рудных тел. Площади наложенных ореолов напрямую увязываются с масштабностью оруденения, чем больше размеры ореола, тем крупнее выявляемый рудный объект. По элементному составу ореолов – набору элементов-индикаторов, по контрастности и соотношениям концентраций – устанавливается тип и вероятный минеральный состав оруденения, а при наличии вертикальной зональности оруденения уровень его эрозионного среза. Все перечисленное позволяет с достаточной надежностью судить о ресурсном потенциале обнаруживаемого рудного объекта. В целом вопрос об оценке потенциала еще далеко не разработан, однако определенные перспективы намечаются.

Современные аналитические методы (AAS, ICP ES, ICP-MS) позволяют при необходимости существенно расширить круг анализируемых химических элементов, которые принимают участие в формировании наложенных ореолов. Так, наряду с микроэлементами, появляется возможность анализировать с достаточной точностью макроэлементы (K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, S, P, Br, Sr, Ba и др.), которые несут информацию не только о самом рудном объекте, но и о вмещающих гидротермально измененных породах. Например, для оловорудных месторождений Дальнего Востока (Комсомольский район) установлены интересные особенности распределения натрия и калия [7]. На устойчивом геохимическом фоне натрия во вмещающих оловорудные тела породах (юрские алевролиты – 1,73% и песчаники – 2,32%, меловые кварцевые порфиры и их туфы – 2,1%) четко выявляются зоны его выноса. Последние окаймляют рудные тела, имеют форму опрокинутого конуса. Наименьший вынос натрия зафиксирован для прикорневой части оловорудных тел. По их восстанию объем проработанных пород увеличивается. Зона выноса натрия достигает максимального размера в пределах верхних частей рудных тел. В центральных частях оловорудных зон концентрации натрия нередко падают до первых сотых процента, в значительной их части и на флангах не превышают значений 0,1-0,3%. Установлено, что количество вынесенного натрия линейно увеличивается по восстанию оловорудных тел. Другие элементы (K, Fe) также претерпевают перераспределение в околорудных измененных породах, но оно более сложное, по сравнению с натрием. Например, для калия наблюдается тенденция накопления его в зальбандах рудных зон [28]. Аналогичная описанной картина наблюдается и на золоторудных месторождениях Дальнего Востока. Анализ рассмотренных и других имеющихся примеров показывает, что перераспределение макроэлементов тесно связано с процессом рудообразования и масштабами оруденения. Кроме того, по градиентам концентраций вынесенных и переотложенных элементов появляется возможность оценивать протяженность оруденения на глубину.

Весьма полезную для оценки ресурсов исследуемых объектов информацию несут методы изучения физико-химических параметров опробуемых почв, таких как pH, Eh, магнитная восприимчивость почв до и после их магнетизирующего обжига.

В недавней статье [24], посвященной ионно-потенциометрическому методу выявления наложенных ореолов рассеяния при поисках погребенных и слепо-погребенных золоторудных месторождений в равнинных слаборасчлененных районах Западной Украины и Казахстана, сообщается, что измерение концентраций некоторых водорастворимых компонентов (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- и др.) может производиться

непосредственно в поле. Установлено, что по этим компонентам над погребенными золоторудными телами выявляются аномалии при мощности перекрывающего аллохтона в десятки метров. Наиболее контрастные наложенные ореолы рассеяния выявлены для иона аммония. Интересной особенностью иона аммония, по мнению авторов, является прямая корреляция его с продуктивностью отложившегося золота.

Выше отмечалось, что работы по наложенным ореолам целесообразно проводить в комплексе с общепринятыми геологическими и геофизическими методами. Последние включают магнитную и гравиметрическую съемки, а также электроразведку и сейсморазведку. Магниторазведка и гравиразведка широко используются при составлении структурно-тектонической схемы исследуемой перспективной площади (выявлении разломов и тектонических зон разного порядка, отдельных намагниченных и плотностных геологических тел). Методы электроразведки по наблюдениям кажущегося сопротивления и дифференциальной поляризуемости пород позволяют уточнить геологическое строение площадей и выявить расположение рудовмещающих зон, а в ряде случаев и самих рудных объектов. Физико-геологическое обоснование возможностей рудной сейсморазведки представлено в работах Караева Н.А. и Рабиновича Г.Я. В них приведены скоростные модели геологических разрезов многих рудных районов, описаны методики применения и интерпретации данных различных сейсмоакустических методов. Даны примеры применения сейсморазведки при решении различных геологических задач.

Конечно же, только комплексирование геохимических (по наложенным ореолам) и геофизических (включая современные разработки) методов позволит при прогнозе и поисках рудных месторождений на закрытых территориях продвинуть проблему количественной характеристики выявляемых геологических объектов. В качестве положительного примера использования комплексирования могут служить электроразведочные методы. Некоторые из них достаточно широко использовались при поисках и оценке руд, обладающих электронной проводимостью. К ним относятся методы естественного электрического поля (ЕП), электрического заряда, вызванной поляризации (ВП) и контактный способ поляризационных кривых (КСПК).

На стадии оценки рудопроявлений (при наличии рудного пересечения скважиной или горной выработкой), особенно на стадии разведки месторождений для количественной характеристики изучаемого объекта наиболее эффективен метод КСПК. Результаты опытных и производственных работ на полиметаллических и медно-колчеданных месторождениях Алтая, Узбекистана, Южного Урала и Кольского полуострова показали удовлетворительное соответствие определения состава и масштаба рудных тел, полученными КСПК, с данными буровых работ [25]. Отметим, что для проведения полевых наблюдений методом КСПК во второй половине XX века была создана серийно выпускаемая Мытищинским приборостроительным заводом станция КСПК-1. Станция была размещена на трех автомобилях. На одном находился дизель-электрический агрегат, обеспечивающий станцию энергией, на другом – преобразовательная, управляющая и измерительная аппаратура. На третьем автомобиле находилась лебедка с кабелем и подъемник, позволяющие опускать и поднимать снаряд КСПК в скважинах. Мощность станции 300 кВт, максимальный ток 250 А, глубина исследований 1000 м. При оценке промышленного потенциала, выявленного по наложенным ореолам рассеяния перспективного по геологическим соображениям рудопоявления при наличии на нем хотя бы одного рудного пересечения, целесообразным представляется следующий цикл работ: бурение новой скважины – увязка методом КСПК полученного рудного пересечения с рудным интервалом опорной скважины и уточнение размеров и состава объекта – геофизические исследования скважин методами радиопросвечивания, заряда и другими для характеристики геометрических особенностей рудного образования в межскважинном пространстве – построение уточненных по полученной информации размеров и проекций рудного тела, уточнение места и направления следующих скважин – бурение новой скважины. Остается только

сожалеть, что в связи с перестройкой эти эффективные, хотя и затратные, работы были прекращены.

Учитывая сложность и чрезвычайную важность оценки ресурсов и даже запасов рудных компонентов скрытых и глубокозалегающих геологических объектов, выявляемых по наложенным ореолам рассеяния, отметим следующее. Если на сегодняшний день и не имеется еще надежно отлаженной методики такой оценки, направления, по которым следует двигаться дальше, и возможный успех решения такой задачи просматриваются.

Геоэлектрoхимические методы позволяют вести поисковые работы на широкий круг полезных ископаемых: полиметаллы, медь и никель, редкие и благородные металлы, в том числе в россыпях, радиоактивные элементы, алмазы, бокситы, хромиты. Они прошли производственное опробование при поисковых работах различной детальности на полезные ископаемые разных типов. Поисковые работы с применением геоэлектрoхимических методов ставятся на площадях, где традиционная геохимия не эффективна - на территориях с двух- и трехъярусным строением (платформы и перекрытые предгорные прогибы) или при поисках глубокозалегающих слабо проявленных с поверхности месторождений. Как показал опыт, геоэлектрoхимические съемки могут успешно проводиться в разнообразных ландшафтно-климатических условиях, на суше, на шельфе и в транзитных зонах морей и океанов. Широкое апробирование геоэлектрoхимических методов в России и в странах СНГ привлекло к ним внимание зарубежных исследователей. По научным публикациям авторов методов они реализованы в Китае, Индии и США. При содействии фирмы «Синтрекс» и других горнорудных компаний работы методами ЧИМ, МПФ и ТМГМ проводились, при непосредственном участии российских специалистов, в Канаде, Австралии, Вьетнаме, Финляндии, Ирландии и Тунисе. Организация и проведение опытных тестовых и производственных работ геоэлектрoхимическими методами, а также публикации авторов новых разработок за рубежом [29,30] в какой-то мере стимулировали исследования различных форм нахождения основных рудных элементов и их спутников, разработку и внедрение в практику поисков скрытого оруденения методик селективной экстракции. В работе [19] в числе таковых методик упомянуты NAMEG (изучение металлов в газовой фазе) и MOMEO (изучение металлов с использованием селективной химической экстракции). В своей обширной статье [31] и в докладе на 19-м Международном симпозиуме по прикладной геохимии (Ванкувер, Канада) глава аналитического подразделения Геологической службы Канады Гвенди Е.М. Холл, обобщив печатные материалы по методам селективной экстракции элементов-спутников рудных месторождений из геохимических проб со ссылками и на наши публикации (правда, только на зарубежные), отметила, что основным фактором, способствующим широкому внедрению новых методов в практику геохимических поисков, стало широкое использование в аналитике современных методов спектрального многоэлементного анализа с возбуждением атомов в индуктивно-связанной плазме (ICP-ES), в особенности с использованием масс-спектрометрии (ICP-MS).

Из работ на постсоветском пространстве стоит упомянуть организацию и проведение геохимических прогнозно-поисковых работ в Лениногорском и Зыряновском рудных районах Рудного Алтая [20]. На рубеже XX и XXI столетий, когда в Казахстане устоялись принципы рыночной экономики и прошел своего рода «самогипноз» по поводу огромных запасов всех видов минерального сырья, выяснилось, что по многим для республики ключевым видам полезных ископаемых рентабельных запасов осталось на 15-20 лет. Такое предкризисное состояние сложилось из-за невосполнения отработанных запасов руд открытием новых объектов. В 2004 г. для развития своей минерально-сырьевой базы АО «Казцинк» приняло решение о производстве новых геологоразведочных работ [26]. В период подготовки была сформирована концепция поисков новых колчеданно-полиметаллических объектов на Рудном Алтае. В качестве основных в

технологии выбраны геохимические поиски, включающие картирование полей валовых концентраций элементов в породах и полей концентрации подвижных форм элементов (метод МПФ) в почвах. Они комплексировались с дешифрированием космоснимков и наблюдениями магнитометрии и аэрогамма-спектрометрии. Завершали концепцию современные компьютерные технологии количественного прогнозирования полезных ископаемых на основе комплексной информации. Цель работ: выявление новых колчеданно-полиметаллических рудных объектов. Временные рамки работ: 2005-2015 гг. Заметим, что Зырянский и Лениногорский районы, как и весь Рудный Алтай, в геологическом отношении довольно хорошо изучены и опойскаваны. Поэтому здесь можно рассчитывать только на выявление скрытых колчеданно-полиметаллических объектов (глубоко залегающих и (или) перекрытых рыхлыми отложениями). Именно на их открытие и сформирована новая комплексная технология поисков. Подобный опыт работ наших южных соседей вызывают несомненный интерес.

Теория наложенных ореолов, особенно в части геологической интерпретации данных, находится в стадии развития. На сегодняшний день в результате теоретических расчетов и лабораторных экспериментов предложен квазиконвективный механизм переноса химических элементов в подвижных формах нахождения пузырьками природных газов. Построены физико-математические модели струйных ореолов над рудными телами, адекватно описывающие наблюдаемые геоэлектрoхимические аномалии [1]. Рассчитанные скорости миграции элементов-индикаторов значительно превышают таковые для процессов диффузии веществ в горных породах [32]. Полученные данные не ограничивают возможность формирования наложенных ореолов рассеяния при нахождении геологических объектов на глубинах до 5-10 км и более. Размеры и форма геоэлектрoхимических аномалий позволяют определять размеры и контуры (в виде вертикальной проекции на дневную поверхность) глубинных геологических объектов, с которыми они связаны. На примере математических моделей струйных ореолов рассеяния показано, что основными параметрами, определяющими форму струйных ореолов, являются: глубина залежи, время формирования ореола, коэффициент поглощения подвижных форм твердой фазой горных пород и др. [32].

Опыт широкого многолетнего производственного применения геоэлектрoхимических методов при разномасштабных поисках месторождений твердых полезных ископаемых на закрытых территориях, да и на любых других площадях, где использование традиционных литохимических методов по той или другой причине успеха не имеет, показал их удовлетворительную геологическую и экономическую эффективность. Геологическая эффективность обеспечивается получением качественно новой, уникальной информации о вещественном составе рудных объектов, их морфологии, положении в плане. Особенно эффективно использование геоэлектрoхимических методов на закрытых территориях при поиске и оценке глубокозалегающих руд в условиях, когда другие геохимические методы малоэффективны. Экономическая эффективность работ обеспечивается за счет сокращения и более целесообразного использования необходимого для изучения участков объема дорогостоящих геофизических и буровых работ и сокращения сроков поиска и оценки месторождений. При этом геоэлектрoхимические методы могут использоваться как опережающие на новых малоизученных участках с целью оценки их минерагенических перспектив, а также в комплексе с другими геофизическими исследованиями для разбраковки геофизических аномалий. Применение геоэлектрoхимических методов в ряде случаев привело к открытию новых рудных объектов.

Ниже на конкретных примерах рассмотрены некоторые результаты геоэлектрoхимических работ по поискам рудных месторождений.

Полиметаллические месторождения. Основные объемы геоэлектрoхимических поисковых работ относятся к рудным районам Алтая и Казахстана. Здесь широко

представлены полиметаллические рудные тела, не выходящие на поверхность кристаллических пород, выклиниваясь по восстанию на глубинах до 300-400 метров от поверхности, и часто перекрытые глинистыми слабопроницаемыми дальнеприносными рыхлыми отложениями мощностью до 100-150 метров. Традиционная литогеохимия, геологически и экономически выгодная при работах в открытых районах, при поисках подобных геологических объектов неэффективна. Пример уверенного прослеживания с поверхности методом МПФ полиметаллической залежи, падающей под острым углом, приведен на рисунке 1. По данным МПФ непосредственно над рудной залежью и заключающей ее рудовмещающей толщей осадочных пород, перекрытых глинистыми рыхлыми отложениями (до 100 метров), наблюдаются достаточно интенсивные (в 3-5 раз превышающие местный геохимический фон) и широкие (до 200 метров) аномалии свинца, меди и железа.

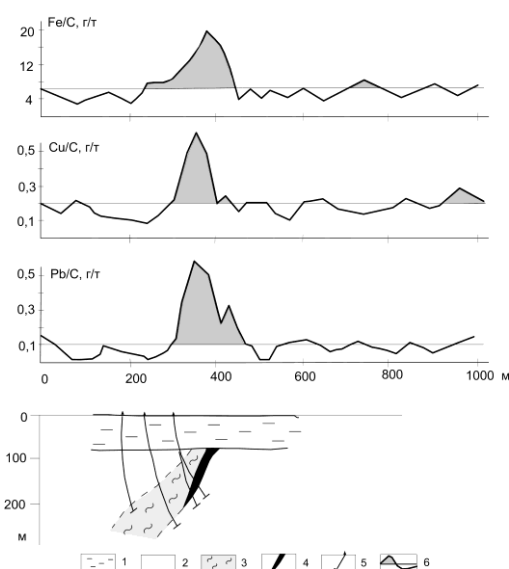


Рис. 1. Результаты наблюдений МПФ над перекрытой полиметаллической залежью Рудного Алтая

1 - перекрывающие рыхлые отложения; 2 - осадочные породы; 3 - рудовмещающая толща; 4 - рудная залежь; 5 - буровые скважины; 6 – графики содержаний элементов в пробах выше и ниже фонового уровня

На следующем рисунке 2 приводятся результаты работ ТМГМ на Рудном Алтае. В районе работ полиметаллические месторождения локализованы в дислоцированных вулканогенно-осадочных породах среднего и верхнего девона и перекрыты рыхлыми мезокайнозойскими отложениями мощностью от 80 до 300 метров. На месторождении Захаровское (рисунок 2-I) перекрытая рудная залежь фиксируется аномалиями ТМГМ по меди, свинцу и цинку. Характерна локальность аномалий. На спокойном, ровном фоне выделяются четкие аномалии содержаний элементов непосредственно над верхними частями рудных тел. Участок с пониженной концентрацией металлов между двумя рудными телами на их выходе на поверхность фундамента коренных пород находит отражение в уменьшении концентраций меди и свинца в концентратах ТМГМ. На месторождении Рубцовское (рисунок 2-II) получена несколько другая картина. Прежде всего, увеличилось количество элементов, образующих аномалии ТМГМ. К меди, цинку и свинцу прибавились молибден и серебро, что соответствует различию в вещественном составе рудных тел месторождений. На месторождении Рубцовское локальные аномалии химических элементов отмечаются не только над выходом рудной залежи, но и над глубокозалегающей ее частью. Кроме того, не все элементы-индикаторы проявляют себя одинаково. Так, существенные аномальные концентрации меди отмечаются только над

глубокозалегающей частью залежи, а повышенные концентрации молибдена характерны для всей залежи.

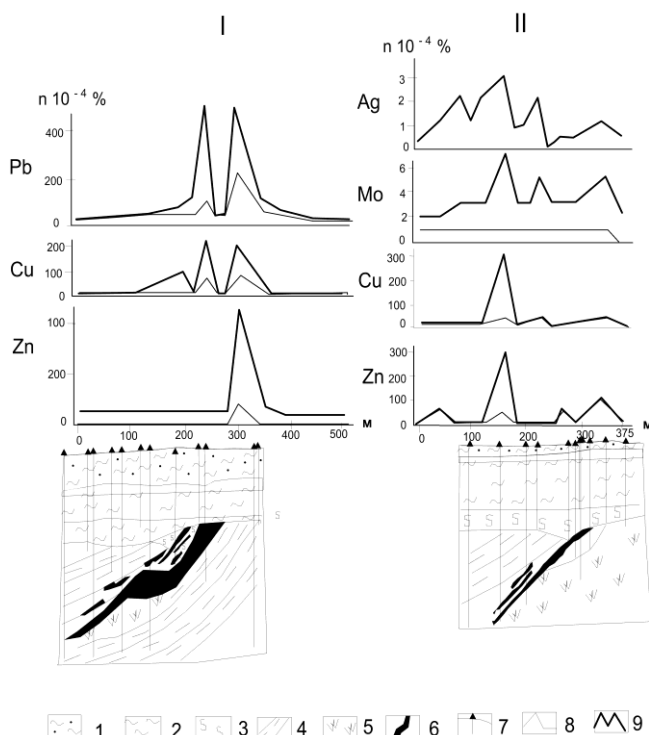


Рис. 2. Результаты ТМГМ на перекрытых полиметаллических месторождениях Рудного Алтая (I и II)

1 - лессовидные суглинки; 2 - глины; 3 - кора выветривания; 4 – алевролиты; 5 - кварциты; 6 - рудные залежи; 7 - буровые скважины. Графики распределения элементов: в валовых пробах – 8; в термомагнитных фракциях - 9

На рисунке 3 приведены результаты наблюдений ТМГМ над полиметаллическим (существенно цинковым) месторождением Австралии. Здесь глубокозалегающее субвертикальное рудное тело (верхняя кромка его располагается на глубине 350 метров от дневной поверхности) четко фиксируется контрастными аномалиями цинка и кадмия. Аномалия свинца здесь значительно слабее. Вмещающие породы представлены переслаивающимися малопроницаемыми аргиллитами и сланцами. Кроме того, на участке месторождения развита кора выветривания мощностью до 50 метров.

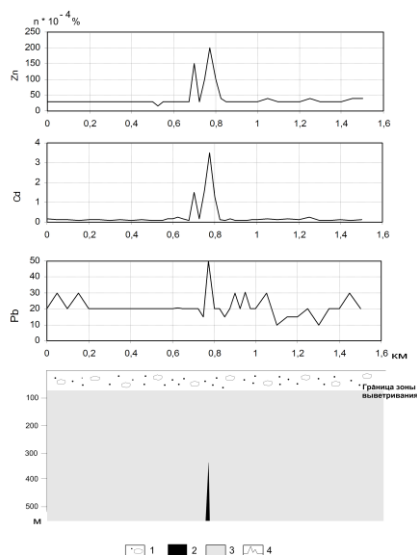


Рис. 3. Результаты наблюдений ТМГМ. Полиметаллическое месторождение Австралии:

1 - зона выветривания; 2 - зона минерализации; 3 - вмещающие породы; 4 – графики содержаний элементов

Размер (площадь) и форма наложенных ореолов рассеяния глубокозалегающих и перекрытых полиметаллических месторождений обычно тесно увязываются с размерами и морфологией рудных тел. Для крутопадающих жильных тел характерна линейно-вытянутая форма наложенных ореолов рассеяния. Вид подобного типа наложенных ореолов в плане демонстрируется на рисунке 4, на котором приведен фрагмент геохимической карты с наложенными ореолами рассеяния свинца по данным МПФ (сеть 250 x 50 метров) на фланге полиметаллического месторождения Юбилейное на Рудном Алтае. Первая же скважина, пробуренная здесь в пределах наиболее выразительного ореола в западной части участка, вскрыла полиметаллические руды на глубине 350 метров. Традиционная литохимическая съемка в условиях закрытости района работ (мощность дальнепринесных рыхлых отложений составляет на участке более 100 метров) успеха не имела.

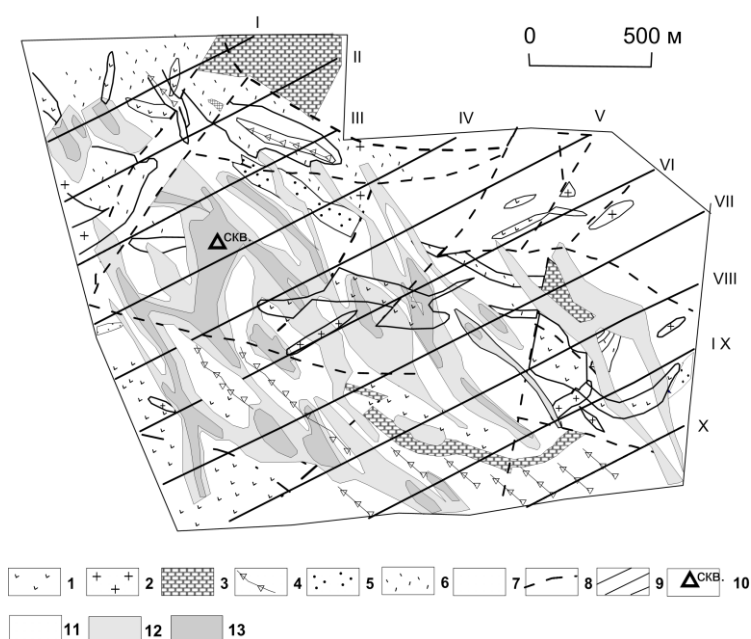


Рис. 4. Наложенные ореолы МПФ над полиметаллическим месторождением Рудного Алтая в плане:

1 - диабазовые порфириды; 2 - диоритовые порфириды; 3 - известняки; 4 - алевролиты; 5 - песчаники; 6 - лавы и конгломераты; 7 - туфопесчаники; 8 - тектонические нарушения; 9 - профили геоэлектрохимического опробования; 10 – скважина; содержания Рb/C, 10^{-1} %: 11 - <4; 12 – 4-8; 13 - >8

Для рудных тел пологого залегания форма и строение аномалий усложняются, наложенные ореолы в этих случаях в значительной степени контролируются тектоникой на участке месторождения. В случаях пологозалегающих рудных залежей изометрической формы наложенные ореолы рассеяния элементов-спутников нередко приобретают кольцообразную форму, при этом положение кольца пространственно увязывается с проекцией контура рудной залежи на дневную поверхность. Примером такого ореола могут служить результаты геоэлектрохимических наблюдений на крупном полиметаллическом месторождении Канады, где пологозалегающая залежь перекрыта моренными глинистыми отложениями мощностью до 50 м. По результатам МПФ и ТМГМ здесь наблюдаются очень контрастные кольцевые аномалии по многим элементам. Как можно видеть по приведенному разрезу, эти аномалии увязываются с краями залежи (аномалии типа "заячьи уши", рисунок 5).

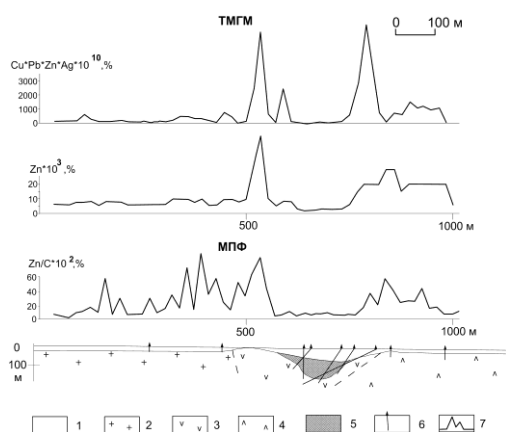


Рис. 5. Результаты наблюдений геоэлектрохимическими методами на полиметаллическом месторождении в Канаде:

1 - рыхлые отложения; 2 - граниты; 3 - базальты; 4 - туфы; 5 - рудная залежь; 6 - скважины; 7 – графики содержаний элементов и значений мультипликативных показателей

По-другому выглядят геоэлектрохимические аномалии, наблюдаемые на одном из крупнейших колчеданно-полиметаллических месторождений в Австралии, расположенном в рудном районе Мак-Артур-Ривер (Северные территории). Мощный продуктивный горизонт, залегающий на глубине более 1000 м в центральной части разреза (рисунок 6), воздымается на западе до глубины 100 - 150 м от дневной поверхности. Его продолжение в восточном направлении еще не изучено (нет буровых скважин).

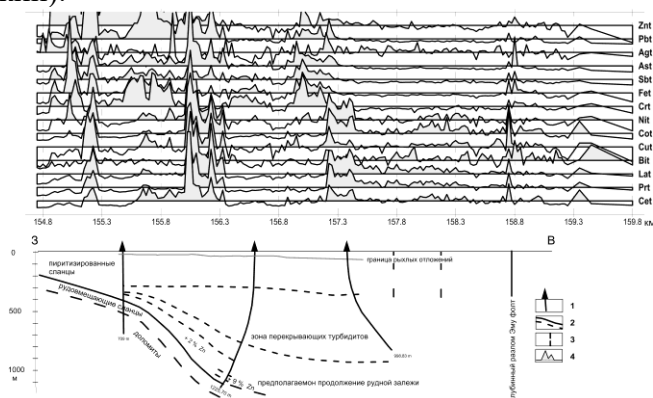


Рис. 6. Результаты геоэлектрохимических наблюдений методом ТМГМ на крупном полиметаллическом месторождении Австралии:

1 – скважины; 2 – геологические границы; 3 – тектонические нарушения; 4 - графики содержаний элементов

На рисунке 6 приведены некоторые результаты ТМГМ съемки по профилю на месторождении с определением в термомагнитных фракциях проб широкого круга элементов (анализ ICP MS позволил получить определение около 70 элементов). В наложенных ореолах рассеяния, выявленных на поверхности над продуктивной залежью, обнаруживается зональность распределения элементов-спутников. На западе профиля, на участке приближения рудовмещающей толщи к поверхности, в ореолах преобладают высокие концентрации Zn, Pb, Ag и As, концентрации же других элементов, таких как Ni, Co и Cu, значительно ниже, а элементы редкоземельной группы и редкие металлы образуют лишь очень локальные аномалии. По мере погружения продуктивной толщи (в восточном направлении) роль элементов первой группы заметно снижается, аномалии элементов двух других упомянутых выше групп элементов увеличиваются по ширине и интенсивности. Следующая группа аномалий относится к участку (пикеты 156.9 - 157.5), в

пределах которого положение залежи на глубине не изучено. Для этого участка характерен полный набор рассмотренных элементов. Аномалии разных элементов имеют примерно одинаковую интенсивность, для некоторых элементов они смещены пространственно. В целом этот участок профиля во многом сходен по аномальности с участком над глубокозалегающей рудой и представляется перспективным. Заслуживает интерес тип геоэлектрохимической аномалии, связанной с крупным рудоконтролирующим разломом, расположенным в восточной части профиля. Для нее характерен своеобразный спектр микроэлементов и локальность по ширине.

Из приведенного примера следует, что при детальном анализе наблюдаемого геоэлектрохимического поля, в особенности при использовании современного многоэлементного анализа концентратов отобранных проб, представляется вполне реальным рассматривать наличие геохимической зональности как результата проявления многоэтапности и многостадийности рудообразования в качестве поискового критерия уникальных месторождений.

Медно-никелевые месторождения. Значительное число крупных и уникальных медно-никелевых месторождений располагается в арктических и субарктических областях (Россия, Канада). Наличие мощных моренных отложений, широко проявленная заболоченность, глубокое залегание рудоносных залежей, развитие вечной мерзлоты практически сводят на нет поисково-оценочные возможности традиционных геохимических методов.

Так медно-никелевые залежи Кольского полуострова залегают неглубоко от поверхности, но они перекрыты моренными отложениями мощностью до 20 м и более. Последнее обстоятельство весьма существенно ограничивает применение в практике поисков обычной литохимической съемки с поверхности из-за низкой ее эффективности. Опытно-методические работы показали, что перекрытые мореной медно-никелевые руды Печенги легко прослеживаются при опробовании почв различными геоэлектрохимическими методами. На рисунке 7 приведены аномалии МДИ, ЧИМ и МПФ по основным продуктивным элементам залежей (Ni, Cu и Co). Для сравнения на графике МПФ показано распределение по профилю валового содержания меди (данные традиционной литохимии), на котором отсутствуют аномальные зоны над рудными телами. Данные анализов концентратов проб МПФ, ТМГМ, МДИ и ЧИМ на другие элементы, обычно сопутствующие медно-никелевому оруденению, показали аналогичную картину распределения.

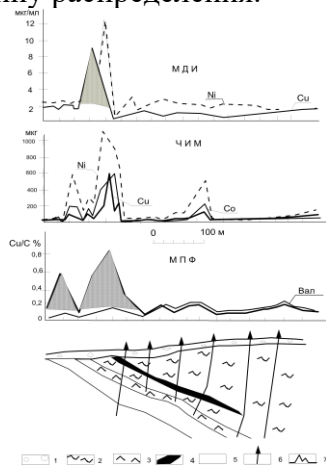


Рис. 7. Результаты геоэлектрохимических наблюдений на участке Мирона (Кольский полуостров):

1 - морена; 2 - серпентинизированные перидотиты; 3 - габбро-диабазы; 4 - рудная залежь; 5 - филлиты с прослоями алевролитов; 6 – скважины; 7 – графики содержаний элементов

В отличие от Печенги, в Норильском рудном районе медно-никелевые тела залегают на глубинах до 1 км. По данным традиционной литохимической съемки по рыхлым отложениям глубокозалегающие медно-никелевые залежи района с поверхности не фиксируются (рисунок 8, нижние кривые для Ni и Cu).

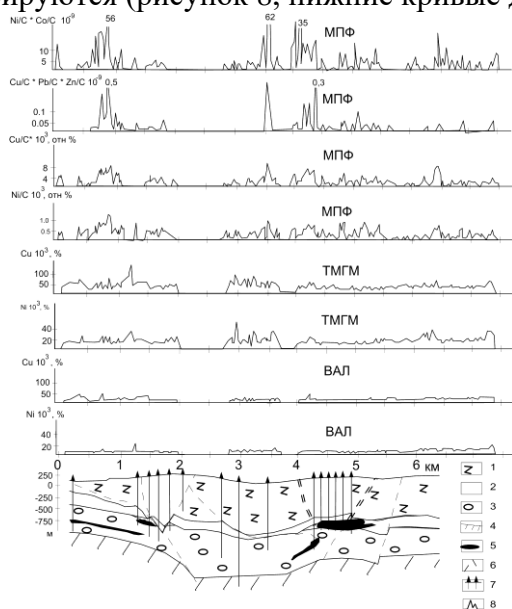


Рис. 8. Результаты геоэлектрохимических наблюдений (МПФ, ТМГМ) на медно-никелевом месторождении Норильского района:

1 – триас нерасчленённый; 2 – пермь; 3 – девон нерасчленённый; 4 – силур; 5 - рудные тела; 6 – тектонические нарушения; 7 – скважины; 8 – графики содержаний элементов

По данным ТМГМ и МПФ выяснилось, что, несмотря на большие глубины залегания, рудные залежи сопровождаются на поверхности наложенными ореолами рассеяния Ni, Cu, Co, Pb, Zn и других металлов. Ореолы имеют значительную ширину, что позволяет выявлять их по достаточно редкой сети опробования. Это представляется важным при проведении работ по оценке перспектив новых больших территорий в трудных условиях заполярной тундры.

Положительные результаты применения геоэлектрохимических методов получены на участках перекрытых мореной медно-никелевых месторождений на севере Канады, где поиски рудных тел с поверхности особенно затруднены из-за сильной заболоченности местности (рисунок 9).

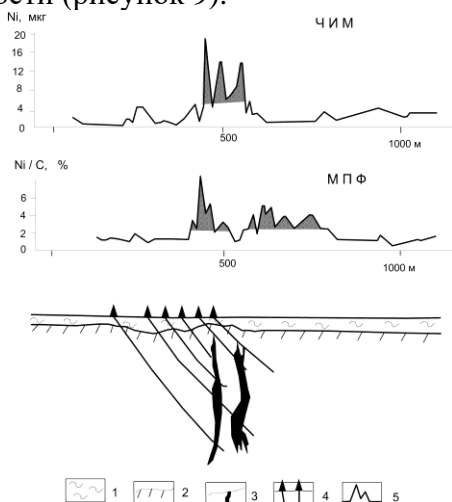


Рис. 9. Результаты геоэлектрохимических наблюдений на медно-никелевом месторождении на севере Канады:

1 - моренные отложения; 2 - коренные породы; 3 - рудная залежь; 4 - скважины; 5 – графики содержаний элементов

Примеры уверенного прослеживания с поверхности МПФ медно-никелевых залежей в плане имеются для условий центрального района Европейской части России (Воронежский массив). Здесь кристаллические основные и ультраосновные породы, включающие медно-никелевые залежи, перекрыты дальнепринесенными отложениями мощностью от 50 до 140 м и более. Несмотря на это, известные на участке залежи уверенно фиксируются с поверхности по распределению меди и никеля в пробах МПФ (рисунок 10). Данные традиционной литохимической съемки никакой информации о медно-никелевых залежах на опробованных площадях не несут.

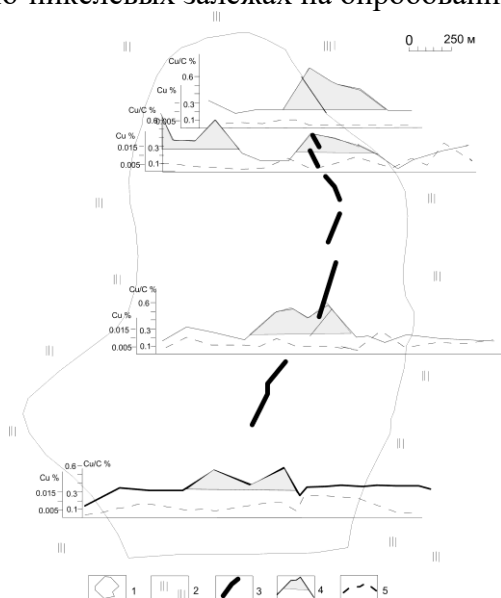


Рис. 10. Результаты работ МПФ на месторождении Нижний Мамон Воронежского кристаллического массива:

1 - контур основных и ультраосновных пород; 2 - вмещающие сланцы; 3 - рудная залежь; 4, 5 - графики распределения меди по профилям в пробах МПФ и в валовых пробах

Меднорудные месторождения. В эту группу объединены медно-колчеданные, медно-порфировые месторождения и месторождения меди в медистых песчаниках. Для всех исследованных объектов характерно глубокое залегание рудных залежей, наличие мощных перекрывающих пород, представленных дальнеприносными отложениями или корами выветривания. В поисковом отношении они являются трудными геологическими объектами, традиционные геохимические методы мало эффективны. Ограничимся только примерами изучения медно-колчеданных месторождений. Рудные тела медно-колчеданного месторождения в Казахстане залегают в толще туфопесчаников на глубине 250 метров (рисунок 11). Они не выходят на поверхность фундамента коренных пород, перекрытого мезокайнозойскими песчано-глинистыми отложениями, мощность которых в пределах изучаемого профиля составляет около 200 метров. Несмотря на столь значительную глубину залегания, рудоносные залежи четко фиксируются с поверхности аномалиями ТМГМ по меди, свинцу и цинку.

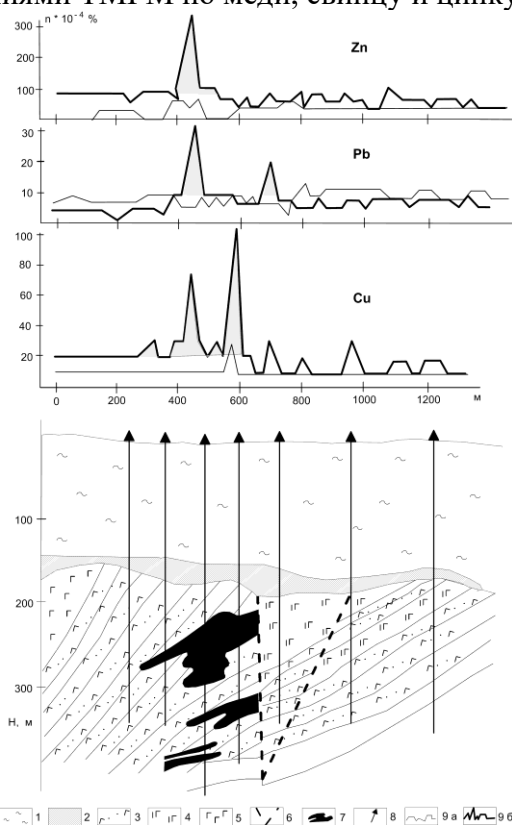


Рис. 11. Результаты наблюдений ТМГМ на медноколчеданном месторождении в Казахстане:

1 - рыхлые отложения; 2 - кора выветривания; 3-5 - вмещающие породы; 6 - тектонические нарушения; 7 - меднорудные залежи; 8 - буровые скважины; 9 - графики распределения элементов в валовых пробах (а) и в их термомагнитных фракциях (б)

Следующий пример относится к медно-колчеданному (с золотом) месторождению в пределах комплекса углеродистых флишевых образований трога Маунт-Айза, фиксирующего восточную окраину Северо-Австралийской плиты. К западу этот комплекс сменяется мощной толщей вулканогенно-карбонатно-глинисто-терригенных отложений трога Баттен, в которых располагается группа колчеданно-полиметаллических месторождений Мак-Артур-Ривер, в их числе названное выше (рисунок 12). На геологическом разрезе по одному из опробованных на месторождении профилей (рисунок 12) можно видеть, что рудные залежи его выходят на уровень среза кристаллических пород и сверху перекрыты рыхлыми отложениями, мощность которых колеблется от 50 до 100 метров. Последнее обстоятельство свело на нет попытку использовать для прослеживания рудоносных залежей традиционные геохимические методы и определило

необходимость применения для этих целей геоэлектрохимических методов. Из приведенного разреза также видно, что сначала, если следовать от поверхности на глубину, рудные залежи падают довольно круто. Затем восточное рудное тело выполаживается и залегает почти горизонтально.

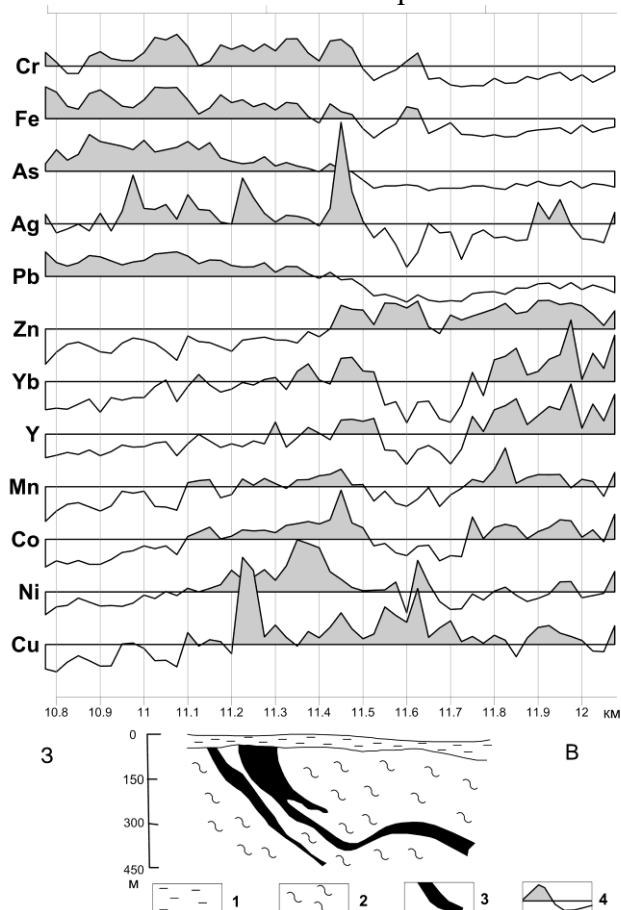


Рис. 12. Результаты наблюдений ТМГМ на медно-колчеданном (с золотом) месторождении в Австралии:

1 - перекрывающие породы; 2 - рудовмещающие породы; 3 - рудная залежь; 4 – графики содержаний элементов в термомангнитных фракциях проб выше и ниже фонового уровня

На восточном фланге рудная залежь не оконтурена. Полученные геоэлектрохимические данные позволяют не только зафиксировать с поверхности перекрытые медно-колчеданные руды месторождения и оценить местоположение залежей, но и, благодаря проявлению минеральной вертикальной зональности оруденения, весьма характерной для крупных и уникальных рудных месторождений австралийского континента, определить вероятное падение рудных тел месторождения и оценить различные по глубине уровни их верхнерудных и нижнерудных частей. Из рис. 12. следует, что выходящая на эрозионный срез кристаллических пород верхняя часть рудной залежи проявляется в наложенных ореолах рассеяния, главным образом, повышенными концентрациями свинца, серебра, мышьяка и железа. По мере падения рудного тела и его выполаживания элементная ассоциация ореола меняется, в ней все большую роль начинают играть медь, никель, кобальт, цинк, марганец и группа редкоземельных элементов. Нижняя, возможно, еще не вскрытая бурением часть рудной залежи на востоке фиксируется ореолами рассеяния главным образом цинка и редких земель и, в меньшей мере, марганца, кобальта и меди.

Оловорудные и другие редкометалльные месторождения. Большой объем опытно-производственных работ методами ЧИМ, ТМГМ и МПФ проведен на оловосульфидных, оловополиметаллических и редкометалльных месторождениях Дальнего Востока и Приморья. Известно, что в Комсомольском оловорудном районе промышленное

сульфидно-касситеритовое оруденение, приурочено к протяженным меридиональным минерализованным зонам, пересекающим почти весь район. Работы ТМГМ показали возможность надежно прослеживать эти зоны при самых неблагоприятных условиях поисков. Для района характерно обширное развитие грубообломочных осыпей (курумов), глубокое залегание промышленных оловорудных тел, при котором характерные для них первичные ореолы рассеяния не достигают дневной поверхности, иногда перекрытие оловоносных зон излившимися пострудными базальтами. Особенности трудности при выявлении и прослеживании оловоносных зон в районе возникают при продвижении поисковых работ в сторону северных флангов Комсомольского оловорудного района. Здесь хребт Мяо-Чан выполаживается, поэтому оловоносные зоны ныряют под плотные глинистые малопроницаемые отложения, полностью, сводя на нет поисковые возможности широко применяемой здесь традиционной литохимии уже при мощности этих отложений более 5-10 метров. МПФ и ТМГМ и в этих случаях зарекомендовали себя положительно. На рисунке 13 приведен пример успешного выявления ТМГМ скрытой оловорудной жилы, залегающей в меловых эффузивных породах Комсомольского района. Скрытое рудное тело с поверхности традиционными геохимическими съемками не фиксируется. По данным ТМГМ выявлен наложенный ореол рассеяния с аномальными концентрациями олова и сопутствующих ему в рудах свинца, серебра, мышьяка и сурьмы. Ореол хорошо увязывается со скрытым рудным телом. Результаты съемки ТМГМ, проведенной на многих детальных участках, позволили оценить перспективы флангов нескольких известных оловорудных месторождений района и привели к открытию новых оловоносных зон.

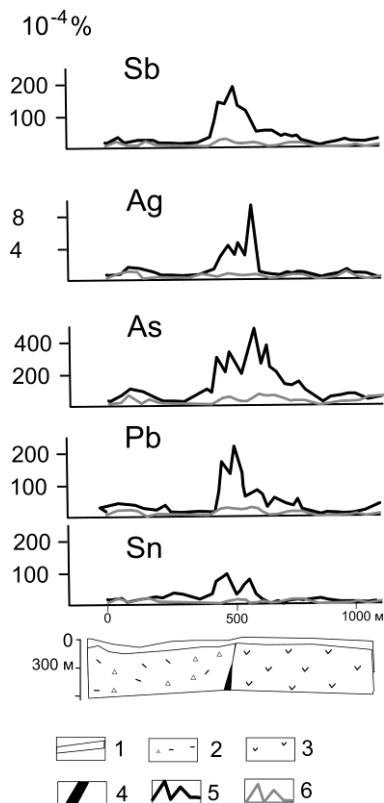


Рис. 13. Результаты наблюдений ТМГМ на участке скрытого сульфидно-касситеритового оруденения:

1 - рыхлые отложения; 2 - брекчии; 3 - меловые эффузивы; 4 - сульфидно-касситеритовая руда; 5 и 6 – графики распределения концентраций металлов ТМГМ и валовых содержаний соответственно

Значительные объемы производственных работ ТМГМ при поисках скрытого оловянного оруденения были проведены в Приморье. Здесь по данным съемки ТМГМ в масштабе 1: 25000 была надежно отбракована как значительная неперспективная часть

обследованной территории, а на аномальных участках, выделенных по комплексу геофизических и геоэлектрохимических работ, последующим бурением было выявлено промышленное оруденение. На рисунке 14 представлены результаты ТМГМ, использованного в комплексе с геофизическими методами для изучения восточного фланга Арсеньевского оловорудного месторождения в Приморском крае. Выявленные аномалии олова и свинца совпадают с участками интенсивного окварцевания и зоной трещиноватости, характеризующимися знакопеременным магнитным полем и электропроводящими, поляризующимися структурами на глубине. Первые же буровые скважины (скважина 10) на этом участке на глубине около 400 метров от поверхности вскрыли промышленное оруденение. Аналогичные работы на флангах месторождения Верхнее завершили также положительным результатом.

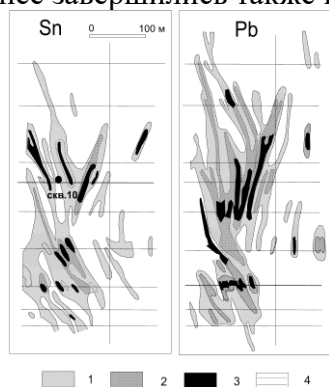


Рис. 14. Результаты наблюдений ТМГМ на фланге оловорудного месторождения Приморья:

концентрации элементов в терромагнитных фракциях проб, 10^{-4} %:

1 – Sn < 15, Pb < 30; 2 – 15 < Sn < 30, 30 < Pb < 90; 3 – Sn > 30, Pb > 90;

4 – профили опробования; скв. 10 - скважина; вскрывшая руду

Возможности ТМГМ были исследованы при поисках в Приморье своеобразных шеелит-скарново-грейзеновых вольфрамовых месторождений. Среди используемых поисковых критериев месторождений этого типа доминируют косвенные геофизические и геологические. Так, рудоконтролирующими породами рудных тел являются линзы известняков, горизонты спилитов и туфогенных пород. Основные рудные тела приурочены к провесам кровли гранитного массива или крутым его склонам. Поисковым признаком являются также зоны гидротермально измененных пород, особенно зоны скарнирования, грейзенизации. Локальные рудные залежи фиксируются положительными локальными аномалиями гравитационного поля, зонами пониженного сопротивления, знакопеременными аномалиями магнитного поля. Вместе с тем проведенные в пределах участка месторождения литогеохимические работы выявили их низкую эффективность. В силу специфики описываемых вольфрамовых месторождений (низкие концентрации элементов, сопутствующих вольфраму в рудах; специфическая локализация богатых вольфрамовых руд; своеобразная морфология рудных тел) слабопроявленные на поверхности и глубокозалегающие рудные тела плохо фиксируются вторичными ореолами и потоками рассеяния. Проведение же поисков по первичным ореолам рассеяния экономически не оправдывается, так как из-за плохой обнаженности коренных пород в районе они требуют проходки большого количества горных выработок (шурфов и канав). Высокое содержание в рудах и в зонах гидротермально измененных пород сульфидных минералов (таких как пирит и пирротин), интенсивно развитая зона окисления (руды вблизи дневной поверхности представлены охристыми скоплениями лимонитов и гетита с шеелитом) оказались благоприятными предпосылками к использованию ТМГМ. Действительно, как окисленные, так и первичные руды месторождения при обжиге хорошо магнетизируются и полностью идут в терромагнитную фракцию. По данным ТМГМ все изученные вольфрамовые залежи, в том

числе и слепые, хорошо фиксируются с поверхности наложенными ореолами вольфрама, мышьяка, меди и серебра. Для ореолов, связанных с верхнерудными частями вольфрамового оруденения, характерно наличие в терромагнитных фракциях проб повышенных содержаний свинца, серебра и молибдена. Индикаторами нижних частей рудных тел могут служить висмут, кобальт и никель. Вольфрамовое оруденение рассматриваемого типа уверенно фиксируется по результатам ТМГМ протяженными (первые километры) и интенсивными потоками рассеяния вольфрама, мышьяка и меди при опробовании аллювиальных отложений [9].

Месторождения золота. Известно, что прямые литохимические поиски месторождений золота с дневной поверхности затруднены из-за низкого кларка золота в земной коре в целом, а в рыхлых отложениях в особенности. Кроме того, золото, обладая большой химической инертностью из-за аномально высокого ионизационного потенциала, встречается в природе преимущественно в самородном состоянии и находится как в дисперсном виде, так и в виде крупных золотин. Низкая твердость золота способствует его истиранию и интенсивному рассеянию в процессах дезинтеграции горных пород при выветривании и формирования рыхлого покрова. С другой стороны, большой объемный вес обуславливает гравитационное обогащение золота. Все эти отличия приводят к крайне неравномерному распределению золота в рыхлых отложениях и затрудняют выявление и интерпретацию литохимических ореолов и потоков рассеяния золота. Отсюда становится понятной востребованность к использованию в практике новых, более геологически эффективных методов поисков месторождений золота.

Производственный опыт применения геоэлектрохимических методов поисков на месторождениях золота различных типов и в разных ландшафтно-климатических обстановках показал, что:

- наложенные ореолы золота и сопутствующих ему элементов наблюдаются непосредственно над глубокозалегающим рудным объектом и имеют максимум над его центральной, наиболее продуктивной частью. Часто даже на крутых склонах не наблюдается смещения ореолов подвижных форм. Иногда аномальными концентрациями золота отмечается не только проекция золоторудного тела на дневную поверхность, но и проекция зоны разлома, контролирующей золотую минерализацию, как это получено при проведении работ методом ЧИМ в Узбекистане (рисунок 15);

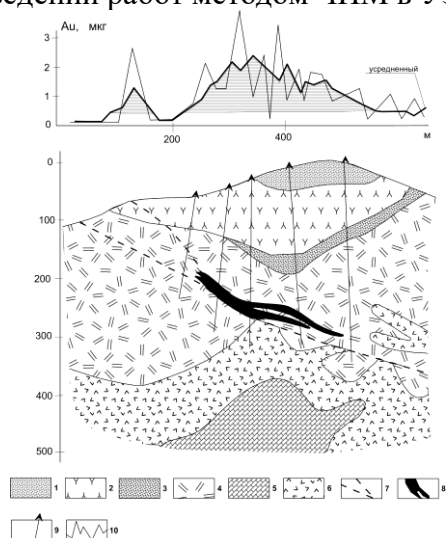


Рис. 15. Результаты наблюдений ЧИМ на золоторудном месторождении Узбекистана: 1 - лессы; 2 - туфы; 3 - гравелиты; 4 - порфиры; 5 - известняк; 6 – гранодиорит--порфиры; 7 - тектонические нарушения; 8 - рудные тела; 9 – скважины; 10 - графики содержаний золота

- комплексирование нескольких геоэлектрохимических методов повышает надежность поисков благородных металлов в условиях сложного геологического строения опробуемых площадей. В ряде случаев, когда представительный для данного метода горизонт почв отсутствует, имеется возможность заменить этот метод на другой, более эффективный применительно к конкретным ландшафтным условиям.

Таким образом, удается обнаруживать наложенные ореолы в различных геохимических ландшафтах, при этом мощные слои малопроницаемых глин, ледниковые отложения и вечная мерзлота не препятствуют их образованию. Так, например, метод ЧИМ успешно зарекомендовал себя в Якутии при поисках золоторудных объектов в условиях вечной мерзлоты (рисунок 16).

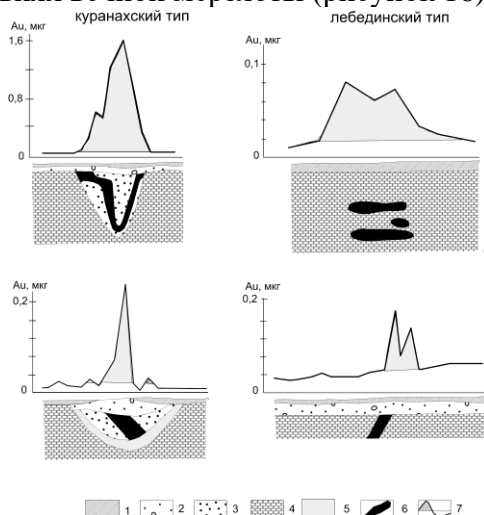


Рис. 16. Результаты наблюдений методом ЧИМ на золоторудных месторождениях Якутии: 1 - почвенный слой; 2- рыхлые отложения; 3 - юрские терригенные отложения; 4 - карбонатные породы нижнего кембрия; 5 - кора выветривания; 6 - золоторудные тела; 7 – графики содержаний золота выше и ниже фонового уровня

В пределах Алданского щита, в зоне развития нижнекембрийских карбонатных отложений, известны две группы месторождений: Куранахского и Лебединского типов. Месторождения первой группы представляют собой песчано-глинистый материал с обломками кварц-пиритовых и кварц-гематитовых метасоматических золотоносных брекчий, переотложенный в карстовые брекчий. Рудовмещающие отложения практически лишены сульфидов, что предопределило отсутствие различий в физических свойствах вмещающих пород и руд, а, соответственно, и ограничило использование для локализации золоторудных тел геофизических методов. Повсеместное распространение рыхлых отложений мощностью до 50 м свело на нет и возможности литохимической съемки. Трудными объектами для поисков оказались и мелкие золоторудные жилы и залежи кварц-полисульфидного типа. Здесь традиционные поиски осложнялись наличием перекрывающих кембрийских карбонатных пород мощностью до 40 м.

В связи с повышением интереса к месторождениям золото-серебряного типа, характерным для регионального Тихоокеанского пояса, усилилось внимание вопросам их поисков. Учитывая крайне неравномерное распределение золота в рыхлых отложениях, что затрудняет выявление и интерпретацию литохимических ореолов рассеяния, представляется полезным использование в качестве поисковых признаков золоторудных тел элементов - спутников. Это, прежде всего, серебро; в повышенных концентрациях в рудах встречаются мышьяк (до 0,2%), свинец и цинк (до 0,01%), молибден и сурьма. Однако оказалось, что небольшие по протяженности и мощности золотоносные зоны рассматриваемого типа при невысоких концентрациях элементов-спутников обычными литохимическими методами выявляются слабо. По данным анализа термомагнитных

фракций почвенных проб, золотоносные малосульфидные зоны обследованных участков уверенно фиксируются аномальными концентрациями серебра, молибдена, мышьяка, сурьмы, свинца и других элементов, сопутствующих золоту [10]. Сопоставление концентраций элементов-спутников в терромагнитных фракциях почвенных проб с данными валовых анализов бороздовых проб из канав, вскрывших золотоносные зоны в коренном залегании, показало, что геохимический спектр минерализации, устанавливаемый ТМГМ, полностью соответствует таковому для зон в коренном залегании при выходе их на уровень эрозионного среза.

На одном из месторождений на Северо-Востоке РФ штокверковые золоторудные тела, представленные серией круто - и наклонно падающих, ветвящихся и пересекающихся золотосеребряных жил, перекрыты сверху пострудными эффузивами, включающими напластования липаритов, андезитов и фельзитов, общей мощностью до 200 м. Ситуация с геохимическими поисками здесь еще более усложнена широким развитием грубообломочных осыпей, типичных для ландшафтов Северо-Востока. Результаты наблюдений ТМГМ, приведенные на рисунке 17, показывают возможность прослеживания золотого оруденения описываемого типа с поверхности даже в таких сложных геологических условиях. Отдельные пучки золотосеребряных жил неплохо фиксируются по результатам измерений магнитной восприимчивости почвенных проб после их магнетизирующего обжига (Ткаппа). Данные традиционной литохимической съемки, также приведенные на рисунке, едва ли можно считать удовлетворительными.

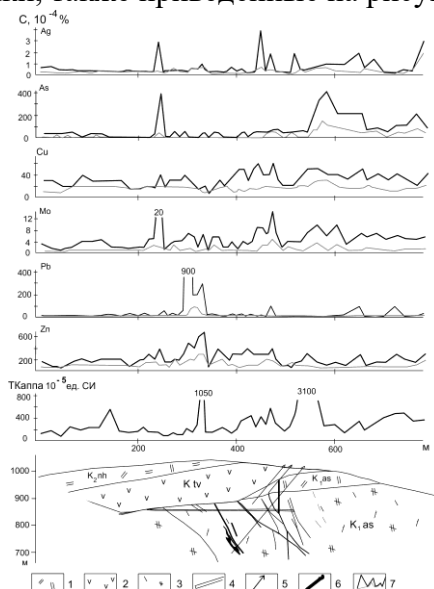


Рис. 17. Результаты наблюдений ТМГМ над глубокозалегающим золото-серебряным оруденением (месторождение Дукат; участок Смелый):

1 - липариты; 2 - андезиты; 3 - фельзиты; 4 - горные выработки; 5 - скважины; 6 - рудные тела; 7 - графики концентраций элементов (серая линия - в валовой пробе; черная - в терромагнитной фракции)

Своеобразная, достаточно жесткая проверка возможностей геоэлектрохимических методов была организована при проведении тестовых работ в Канаде. Для работ методами ТМГМ, МПФ и ЧИМ была предложена золоторудная залежь, залегающая на глубинах 300-900 метров, при этом кристаллические породы на участке работ перекрыты моренными отложениями мощностью 20 и более метров. К опробованию было предложено 7 профилей, заранее подготовленных. Как оказалось, некоторые из профилей были проложены вне пределов расположения залежи. Только по результатам геоэлектрохимических съемок, без какой-либо геологической информации по участку работ, необходимо было установить местоположение глубокозалегающего золоторудного

тела. Задача была решена удовлетворительно. На рисунке 18 приведен один из разрезов месторождения с данными геоэлектрохимических наблюдений МПФ, ТМГМ и ЧИМ.

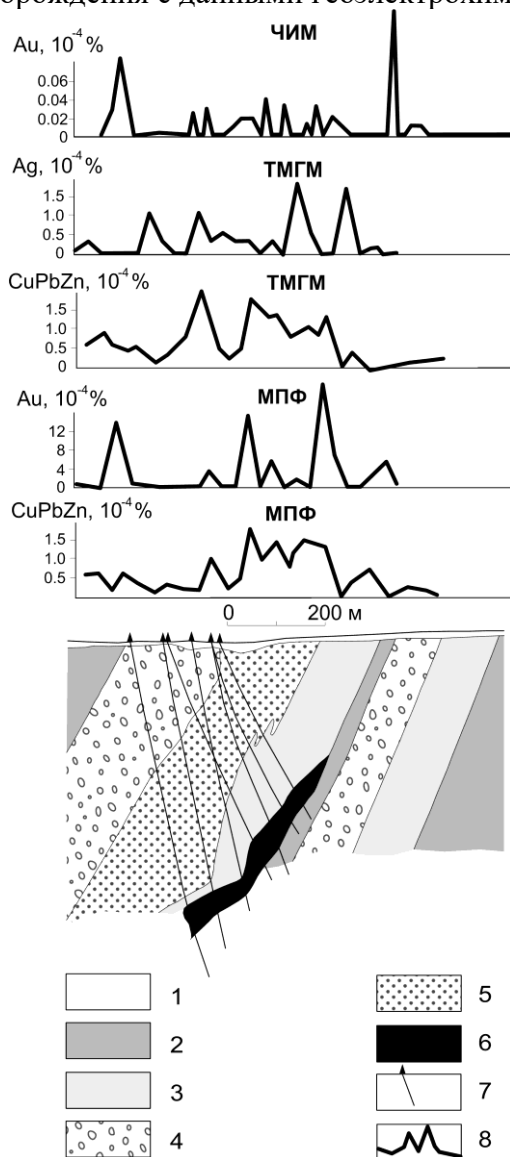


Рис. 18. Результаты наблюдений геоэлектрохимическими методами на золоторудном месторождении в Канаде:

1 – четвертичные отложения; 2 – ультраосновные породы; 3 – базальты; 4 – конгломераты; 5 – песчаники; 6 – золоторудная зона; 7 – скважины; 8 - графики содержаний подвижных форм элементов

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что сама золоторудная залежь, протягиваясь на глубину более 600 метров (по данным буровых скважин), а также участок выхода на дневную поверхность рудовмещающих пород и рудоконтролирующей структуры отмечаются наложенными ореолами, как самого золота, так и сопутствующих ему серебра, свинца, цинка и меди. Можно видеть, что выполаживающаяся на глубине залежь, возможно, не доразведана, - судя по наблюдаемому ореолу, залежь может распространяться в западном направлении. Между тем на профилях, заданных за пределами распространения исследуемой залежи по простиранию, сколько-нибудь заметных аномальных концентраций ни золота, ни его элементов-спутников выявлено не было.

Перекрытые россыпи золота и олова. Для золотоносных и оловорудных районов часто характерно образование россыпей. Их месторасположение дает важную

информацию о наличии и распределении в пределах таких районов коренных месторождений золота и олова и об их масштабах. Сами по себе россыпи являются предметом добычи. В условиях сильно денудированных районов значительная часть имеющихся россыпей перекрыта рыхлыми отложениями. При этом мощность перекрывающих аллювиальных отложений может достигать 30 - 50 и более метров. Как правило, такие россыпи ускользают от внимания поисковиков, традиционными геохимическими методами они не прослеживаются. Имеющийся опыт показал, что перекрытые россыпи золота и олова могут уверенно фиксироваться с поверхности, как по основным промышленным элементам, так и по их спутникам (рисунок 19).

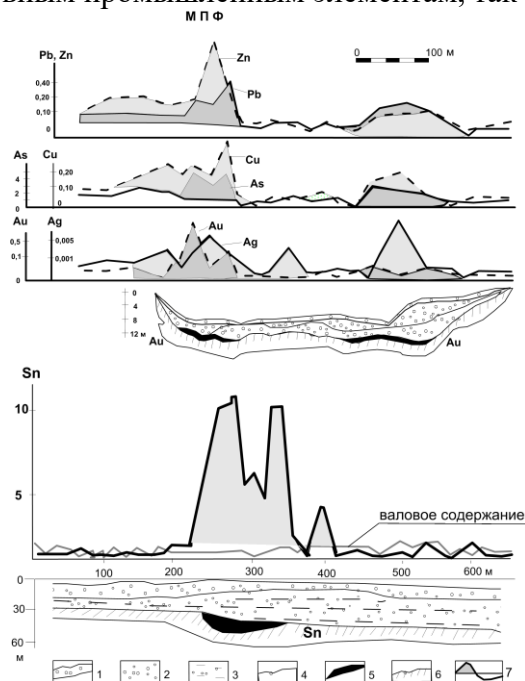


Рис. 19. Применение МПФ при поисках россыпей золота и олова:

1 - почвы; 2; 3 - перекрывающие аллювиальные отложения различного гранулометрического состава; 4 - бедная россыпь; 5 - продуктивные россыпи; 6 - кристаллические подстилающие породы; 7 – графики содержаний элементов в пробах выше и ниже фонового уровня

Сравнение результатов наблюдений МПФ и ТМГМ на перекрытых коренных месторождениях золота и олова с данными, полученными при поисках перекрытых россыпей, свидетельствует об отсутствии каких-либо принципиальных отличий между ними. И в том, и в другом случаях выявленные аномалии указывают на существование процессов перехода рудных элементов из перекрытых геологических объектов в легкоподвижное состояние и их последующей миграции из глубины к дневной поверхности. То обстоятельство, что основные промышленно ценные минералы россыпей, такие как самородное золото и касситерит, представлены всегда сростками с пиритом, халькопиритом, галенитом и другими минералами, характерными для коренного оруденения, пусть видоизмененными в результате окислительных процессов, вероятно и определяет сходство элементного состава наблюдаемых наложенных ореолов рассеяния.

Наибольшие объемы геоэлектрохимических работ при поисках перекрытых россыпей проведены в рудных районах Забайкалья, Хабаровского и Приморского краев. На одном из поисковых участков в Забайкалье методом МПФ надежно выявлена золотая россыпь, залегающая на глубине более 35 метров (рисунок 20). Здесь в качестве поискового признака выступает мультипликативный показатель, суммирующий вклад золота и сопровождающих его серебра и мышьяка. При использовании подробного рода показателей удается на очень спокойном геохимическом фоне уверенно выявить промышленные золотые россыпи.

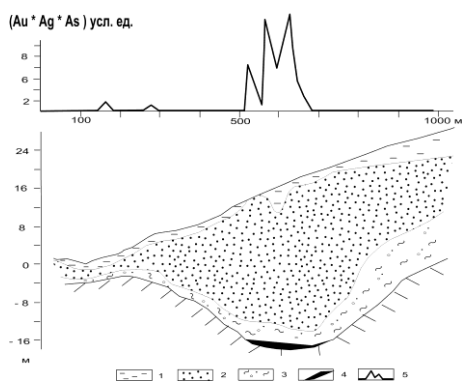


Рис. 20. Результаты наблюдений МПФ над россыпью золота. Забайкалье:
1 - почвенный слой; 2 - песок; 3 - приплотиковый материал; 4 - золотая россыпь; 5 –
графики значений мультипликативного показателя

Месторождения хромитов. Известно, что в применении традиционных геохимических методов поисков хромитовых месторождений возникли серьезные трудности, которые в целом-то и затормозили их использование. Прежде всего, рутинные литохимические методы поисков имеют малую глубинность. Уже незначительные по мощности перекрывающие руды горные породы или рыхлые аллохтонные отложения делают эти методы не эффективными. Это значит, что объектами поисков могут являться лишь рудные тела, выходящие на уровень эрозионного среза, что в значительной мере снижает поисковые возможности литохимии. Да и в этом случае, поскольку хромитовые рудные тела, судя по многочисленным геофизическим данным, характеризуются очень незначительными по размерам зонами окolorудных изменений, в самых благоприятных для поисков условиях приходится использовать при съемках очень малый шаг опробования, что экономически невыгодно, особенно когда опoискованию подлежат большие малоизученные площади. Тем более, зачастую объектами поисков предстают средние и мелкие по размерам хромитовые тела. Следующая трудность использования геохимических методов при поисках хромитов заключена в своеобразных особенностях вмещающей среды, исключительно неблагоприятных с точки зрения выделения полезного геохимического сигнала от хромитового тела. Все разновидности пород ультрабазитов в той или другой степени буквально напичканы хромом и сопутствующими ему элементами. Между тем установленное зональное распределение в пределах ультрабазитовых массивов разновидностей пород и соответствующая ему минералогическая зональность вполне адекватно проявляются в закономерном пространственном распределении, как отдельных химических элементов, так и их определенных групп. Последние могут быть сформированы на основе сходства индивидуальных физических и химических свойств или четко выраженной принадлежности элементов к отдельным разновидностям пород. Таким образом, высокий и резко дифференцированный геохимический фон хрома и сопутствующих ему элементов из помехи может быть обращен в полезный поисковый признак, поскольку он способен выявлять различные хромитоносные породы. Выработка таких признаков позволила на основе вещественной характеристики различных пород, принимающих участие в геологическом строении конкретных площадей изучаемых территорий, предоставить геологам важную дополнительную информацию о пространственном положении разновидностей пород и их границ, даже в условиях плохой обнаженности. А это, в свою очередь, помогло более обоснованно, по комплексу геологической и геохимической (геоэлектрохимической) информации, локализовать участки, перспективные на хромитоносность, на которых можно будет сосредоточить детальные дальнейшие поиски.

Изложенный выше подход позволил разработать и опробовать комплекс геоэлектрохимических и геофизических методов [30]. Первые из них направлены на изучение как валовых содержаний элементов в пробах, так и различных, в том числе

подвижных, форм их нахождения. Рекомендовано определение широкого круга элементов-индикаторов в пробах (в том числе редких элементов, ЭПГ, элементов, связанных с сульфидными минералами и т.п.). Это позволит устанавливать пространственное положение разновидностей пород и зональность их распределения, а также непосредственно оценивать возможное местоположения перспективных участков. - Использование высокочувствительных методов анализа позволило надежно использовать такой признак, как наличие отрицательных ореолов хрома, а также титана, ванадия меди и марганца вокруг богатых хромовых руд (рис. 21).

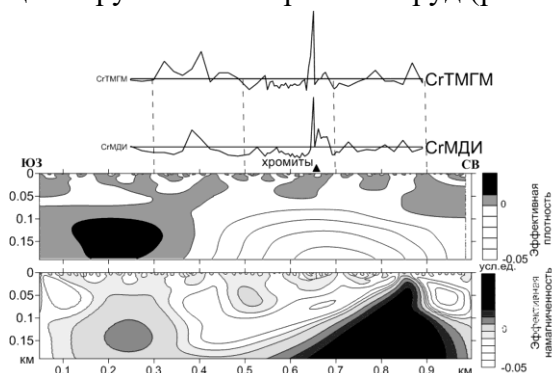


Рис. 21. Полярный Урал. Войкаро-Сыньинский массив, Косшорский участок. Распределения стандартизованных содержаний хрома ТМГМ и МДИ, эффективных плотности и намагниченности пород в разрезе в районе хромитового рудного тела

Построенные геофизические разрезы продолжения гравитационного и магнитного поля на глубину выявили приуроченность отрицательных геоэлектрохимических аномалий к участкам разуплотненных и размагниченных пород. На таких перспективных участках и следует проводить детальные геохимические съемки по плотной сети наблюдений, которые позволяют непосредственно выявлять хромитовые рудные тела и оценивать их размеры.

Месторождения алмазов. Из геохимических методов при поисках кимберлитов применялись главным образом литохимические методы поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния. Результаты работ показали, что в благоприятных условиях, когда кимберлитовые трубки выходят на дневную поверхность, в рыхлых отложениях над этими телами наблюдаются слабоконтрастные аномалии никеля, хрома, титана, иногда ниобия, свинца, цинка, церия. При этом отмечено, что набор элементов-индикаторов во вторичном ореоле, так называемый геохимический спектр аномалий, значительно меняется при переходе от одного кимберлитового объекта к другому и тем более для объектов из разных районов. В тех случаях, когда кимберлитовые тела не затронуты эрозионным срезом и залегают на глубине, или когда они перекрыты траппами, геохимические аномалии над ними вообще не обнаруживаются.

Сопоставление химического состава кимберлитов и различных вмещающих пород позволяет отметить следующее.

1. В геохимических отличиях кимберлитов существенное значение имеют породообразующие элементы, такие как магний, кальций, железо. Содержания окислов этих элементов в кимберлитах в среднем в 2-10 раз выше, чем в осадочных породах, а по кальцию и магнию в 1,5-3 раза выше, чем и в основных породах.
2. Значительны отличия кимберлитов по группе сидерофильных элементов, особенно по хрому и никелю. Особенностью элементов этой группы является тесная связь с основными первичными минералами кимберлитовых пород: оливином серпентином, хлоритом, гранатом, магнетитом, титаномagnetитом, ильменитом, хромдиопсидом.
3. Большая группа редких и редкоземельных элементов имеет в кимберлитах повышенные средние содержания (по сравнению с осадочными и основными породами).

Наиболее контрастно отмеченные отличия проявляются у циркония, церия, ниобия, тантала. Особенностью распределения этих элементов является приуроченность их к аксессуарным минералам, таким как пикроильменит, апатит, перовскит. Их содержания резко меняются при переходе не только от одной кимберлитовой провинции к другой, но и от объекта к объекту в пределах отдельно взятой провинции.

4. Из группы халькофильных элементов содержания в кимберлитах превосходят их кларки в осадочных породах только у меди (в 2,1 раза). Содержания в кимберлитах свинца и молибдена превосходят их кларки основных пород в 2,5 и 1,3 раза, соответственно. Для отдельных кимберлитовых объектов характерны довольно высокие содержания халькофильных элементов (для меди до 0,132 %, для свинца и цинка до 0,04-0,06 %). Эти элементы обычно представлены собственными минералами (халькопиритом, сфалеритом и галенитом), вкрапленными в кальцитовые прожилки. Возможно, что аномальные концентрации халькофильных элементов в кимберлитах есть результат проявления наложенной гидротермальной минерализации.

5. Из других элементов заслуживают внимания барий и стронций, у обоих среднее содержание в кимберлитах выше, чем в осадочных и основных породах (в отдельных случаях более чем 20 раз). Особое положение занимают фосфор и бор, средние содержания которых в кимберлитах чуть ли не на порядок превосходят кларки их для основных пород. Элементы широкого рассеяния, фтор и хлор, характеризуются устойчивыми повышенными содержаниями в кимберлитах (в 5 - 7 раз), как по сравнению с осадочными, так и с основными породами.

6. Группа элементов, составленная из щелочных (литий, натрий, калий, рубидий), редких и рассеянных (бериллий, вольфрам, галлий и германий), халькофильных (ртуть и висмут), из других элементов - сера и селен, ведет себя противоположным образом, содержания этих элементов в кимберлитах сравнительно ниже таковых во вмещающих породах.

На основе приведенных данных были подобраны элементы-индикаторы, использованные для наблюдений геоэлектрохимическими методами при поисках алмазонасных трубок в Якутии и Архангельской области.

В Якутии на трубке Амакинской вмещающие породы представлены известняками. Мощность рыхлых отложений на участке не превышает 1,5 м. По профилю, пересекающему выход кимберлитовой трубки, показано распределение концентраций некоторых элементов-индикаторов по ТМГМ (рис. 22).

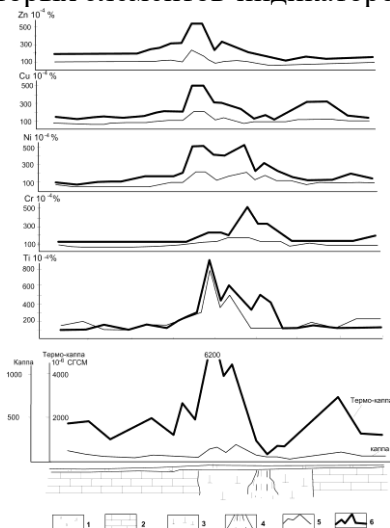


Рис. 22. Результаты ТМГМ над кимберлитовой трубкой. Якутия:

1 - рыхлые отложения; 2 - известняки; 3 - кимберлиты; 4 - зона дробления; 5 - график содержаний элементов в валовой концентрации; 6 - график содержания элементов в ТМ фракции

Для сопоставления здесь приведены графики распределения элементов по результатам анализа валовых проб. По большинству элементов аномалии ТМГМ более четкие и контрастные по сравнению с обычной литохимической съемкой. Даже при незначительном увеличении мощности рыхлых отложений эффективность литохимической съемки стремительно падает. Ширина аномалий ТМГМ превосходит по размерам контуры трубок. Это особенно хорошо видно на плане участка, где распределение содержаний элементов представлено в виде изолиний (Рис.23, 24).

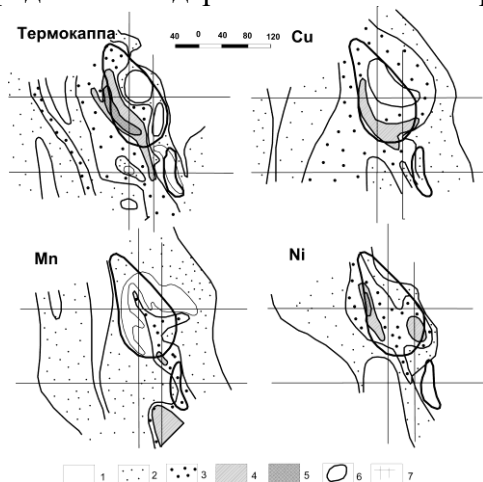


Рис. 23. Результаты ТМГМ над кимберлитовой трубкой Амакинская:

Термокаппа – магнитная восприимчивость проб после обжига;

Концентрации элементов, %, и значения Термокаппа, ед. СГСМ:

1 – Cu, Ni < 0,01; Mn < 0,1; Термокаппа < 1000;

2 – 0,01 < Cu, Ni < 0,02; 0,1 < Mn < 0,2; 2000 < Термокаппа < 3000;

3 – 0,02 < Cu, Ni < 0,04; 0,2 < Mn < 0,4; 3000 < Термокаппа < 4000;

4 – Cu, Ni > 0,04; Mn > 0,4; Термокаппа > 4000;

6 – контур кимберлитовой трубки; 7 – профиль опробования

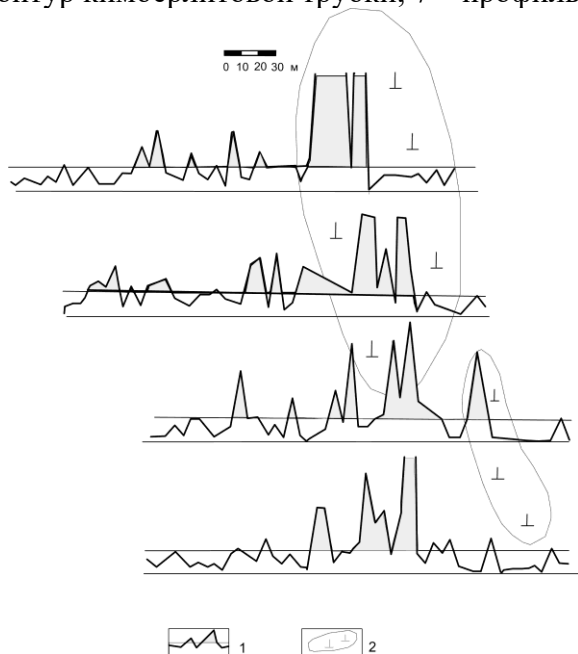


Рис. 24. Результаты МППФ в районе трубки Амакинская

1 - графики значений произведения содержаний Ni * Cu * V * Cr ниже и выше фонового уровня; 2 - контур кимберлитовой трубки

Аномальные поля рассеяния элементов вытягиваются в виде полосы в направлении, согласующемся с ориентировкой цепочки кимберлитовых тел. Максимальные концентрации элементов приурочены, как правило, не к центру кимберлитовых тел, а к их контактам с вмещающими породами. В МПФ по аномальным значениям никеля, меди, ванадия, свинца, цинка на участке также выделяется зона, вытянутая в субмеридиональном направлении. Выходы кимберлитовых тел приурочены к этой зоне. Результаты опытных работ позволяют заключить, что геоэлектрохимические методы надежно фиксируют выходящие на дневную поверхность кимберлитовые тела по широкому кругу химических элементов-индикаторов. Наибольшая контрастность аномалий может быть достигнута использованием мультипликативных ореолов. Отличительной особенностью геохимических аномалий, фиксируемых обоими методами, является то, что размер их превосходит размеры контуров кимберлитовых трубок. Геоэлектрохимическими методами фиксируются не только сами кимберлитовые тела, но и ослабленные тектонические зоны, или участки их пересечения, к которым эти кимберлитовые тела приурочены. Правильность такого предположения подтверждается результатами геофизических работ, подобные тектонические зоны прослеживаются электроразведочными методами. Получены первые данные, позволяющие надеяться на возможность применения геоэлектрохимических методов при поисках кимберлитовых трубок перекрытых или залегающих под траппами трубки (Подтрапповая и Заря). К числу элементов-индикаторов в этом случае можно отнести магний, барий, стронций, никель, кобальт, олово, тантал, лантан, церий, фосфор, бор, фтор, хлор и некоторые халькофильные элементы.

Примером геоэлектрохимических работ на территории Архангельской области в пределах Золотицкого кимберлитового поля могут служить исследования на трубке Пионерская, перекрытой осадочными породами, представленными каменноугольными песчаниками и известняками (рис.25).

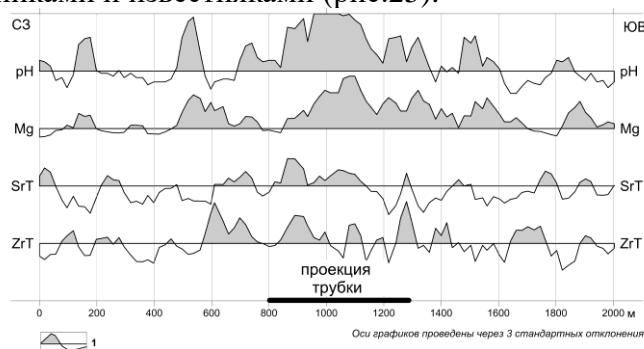


Рис. 25. Результаты МДИ и ТМГМ на трубкой Пионерская, Архангельская область: 1 – графики значений pH и содержаний элементов в пробах выше и ниже фонового уровня; T – содержания в терромагнитных фракциях проб

Работы проводились по отдельным профилям, проходящим с северо-запада на юго-восток. Над трубкой Пионерская наблюдается широкая аномалия повышенных значений pH и концентраций магния и более узкие аномалии циркония и стронция. Аналогичная картина наблюдается и над трубкой Белой.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования геоэлектрохимических методов для обнаружения кимберлитовых образований, в том числе под трапповыми или моренными отложениями. При этом важно отметить, что этими методами фиксируются не только сами трубки, но и ослабленные тектонические зоны вмещающих кимберлиты пород.

К настоящему времени рекомендуемые технологии прошли широкую производственную проверку. Они обеспечены всеми необходимыми методическими материалами, отечественными аппаратурой, оборудованием и снаряжением. В

разработанной технологии используются новые приемы селективного извлечения легкоподвижных фаз химических элементов и газов из проб почв и современные количественные методы анализа химических элементов и газов в получаемых при физико-химической обработке проб концентратов (ICP ES, ICP MS, AAS, хроматография и др.). В ней применены новые идеи и подходы в обработке и комплексной геологической интерпретации получаемых данных. Сказанное позволяет рассматривать вновь разработанные технологии инновационными, соответствующими уровню мировых стандартов. Новизна методов, включенных в технологию, подтверждена серией патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Опыт широкого многолетнего производственного применения геоэлектрoхимических методов при разномасштабных поисках месторождений твердых полезных ископаемых на закрытых территориях, да и на любых других площадях, где использование традиционных литохимических методов по той или другой причине успеха не имеет, показал их удовлетворительную геологическую и экономическую эффективность. Геологическая эффективность обеспечивается получением качественно новой, уникальной информации о вещественном составе рудных объектов, их морфологии, положении в плане. Особенно эффективно использование геоэлектрoхимических методов на закрытых территориях при поиске и оценке глубокозалегающих руд в условиях, когда другие геохимические методы малоэффективны.

Экономическая эффективность работ обеспечивается за счет сокращения и более целесообразного использования необходимого для изучения участков объема дорогостоящих геофизических и буровых работ и сокращения сроков поиска и оценки месторождений. При этом геоэлектрoхимические методы могут использоваться как опережающие на новых малоизученных участках с целью оценки их минерагенических перспектив, а также в комплексе с другими геофизическими исследованиями для разбраковки аномалий. Применение геоэлектрoхимических методов привело к открытию новых рудных объектов.

В рамках проведенных исследований разработаны Методические рекомендации «Технология работ и интерпретации геоэлектрoхимических методов на рудных объектах» и «По применению рациональных комплексов геофизических методов прогноза и поисков месторождений хромитов», которые были представлены к рассмотрению на Научно-методическом Совете по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки твердых полезных ископаемых МПР России. Рекомендации одобрены, засчитаны Нормативно-методическими документами, полностью соответствующими своему назначению и рекомендованы для широкого внедрения производственными предприятиями при выполнении ими прогнозно-поисковых и поисково-оценочных ГРП на твердые полезные ископаемые [31-34].

К настоящему времени накопился обильный фактический материал по адаптации геохимических методов поисков месторождений твердых полезных ископаемых в сложных ландшафтно-геологических и геолого-минерагенических условиях (на полукрытых и закрытых территориях), из которого явствует следующее.

Основой новых технологий поисков должны стать методы поисков по наложенным ореолам рассеяния основных и сопутствующих элементов-индикаторов месторождений. Процесс образования наложенных ореолов рассеяния химических элементов в горных породах вокруг источников их повышенной концентрации (рудных жил, залежей и др.) имеет практически повсеместное распространение. Известно, что элементный и газовый состав наложенных ореолов рассеяния соответствует вещественному составу связанных с ними геологических объектов. Наложённые ореолы рассеяния служат одним из поисковых признаков глубокозалегающих или перекрытых месторождений твердых полезных ископаемых.

Новые технологии должны быть комплексными и ориентированы на структурно-тектоническую и вещественную характеристику искоемых объектов. Каждый из включенных в комплекс метод должен иметь значительную глубинность. Технологии в целом должны быть универсальными, рассчитанными на обнаружение разнообразных типов месторождений в различных регионах, отличающихся по геологическому строению.

Важными представляются вопросы геологической интерпретации выявляемых рудогенных аномалий и оценки их прогнозных ресурсов, они еще находятся в начале своего решения.

В связи со сказанным представляется своевременным предложение, высказанное ведущими специалистами ФГУП «ИМГРЭ» и Роснедра [2] «разработать, финансировать и реализовать отраслевую программу НИОКР «Геохимические работы в сложных ландшафтно-геологических условиях». В рамках такой программы ключевым вопросом должно стать комплексное изучение физико-химических процессов формирования наложенных ореолов рассеяния, обобщение, сопоставление всех имеющихся разработок по рассматриваемой проблеме в целях создания новых поисковых технологий. Параллельно с реализацией такой программы необходима актуализация и разработка новой Инструкции по геохимическим методам поисков месторождений твердых полезных ископаемых взамен устаревшей [3].

Литература

1. Алексеев С.Г., Вешев С.А., Ворошилов Н.А., Касьянкова Н.А., Путиков О.Ф., Штокаленко М.Б. Геоэлектрохимические технологии прогноза и поисков рудных и нефтяных объектов // Прикладная геохимия. Вып.3. Прогноз и поиски. М.: ИМГРЭ, 2002, с. 365-382.
2. Алексеев С.Г., Ворошилов Н.А., Вешев С.А., Штокаленко М.Б. Опыт использования наложенных ореолов рассеяния при прогнозе и поисках месторождений на закрытых территориях // Разведка и охрана недр, 2008, № 4-5, с. 93-99.
3. Антропова Л.В. Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л.: Недра. 1975. 140 с.
4. Антропова Л.В., Шуралева А.З. Способ анализа проб горных пород. Авт. свид. СССР №637665, БИ №46, 1978.
5. Боголюбов А.Н. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Способ поисков рудных месторождений. Авт. свид. СССР № 391518. БИ №31, 1973.
6. Вешев С.А., Ворошилов Н.А., Алексеев С.Г. Геоэлектрохимические технологии прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых и углеводородов // Разведка и охрана недр, 2003, № 4, с. 38-43.
7. Ворошилов Н.А. Эндогенные ореолы выноса как поисковый и оценочный признак рудных месторождений. Методы разведочной геофизики. Исследование и применение физико-химических и геоэлектрохимических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых. Сборник научных трудов. Мингео СССР, Ленинград, 1982, с. 88-94.
8. Ворошилов Н.А., Алексеев С.Г., Штокаленко М.Б. Геохимические поиски хромитовых месторождений в альпинотипных гипербазитах Урала // Российский геофизический журнал. № 53-54, 2014. с. 43-67.
9. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Геохимические критерии прогноза скарновых шеелитовых месторождений Дальнего Востока // Тезисы докладов Всесоюзного совещания: Комплексное использование вольфрамовых месторождений в СССР. Раздел 5.
10. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Геохимические поиски малосульфидной золотосеребряной минерализации. Методы разведочной геофизики. Геохимические методы при прогнозировании и поисках рудных месторождений. Сборник научных трудов. Мингео СССР. 1982, с. 7-21.

11. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Применение терромагнитного геохимического метода (ТМГМ) при поисках рудных месторождений // Методы интерпретации результатов литохимических поисков. М.: Наука, 1987, с. 135-151.
12. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н., Вешев С.А., Алексеев С.Г. Новый способ поисков месторождений полезных ископаемых на закрытых территориях // Российский геофизический журнал, 2002, № 29-30, с. 25-33.
13. Головин А.А., Криночкин Л.А., Чепкасова Е.А. Проблемы выявления, интерпретации и оценки рудогенных геохимических аномалий в сложных ландшафтно-геологических условиях. Разведка и охрана недр, 2013, № 8, с. 6-12.
14. Духанин А.С., Рысс Ю.С., Гольдберг И.С., Ворошилов Н.А., Квятковский Е.М. Физико-химическая сущность и возможности геохимических методов поисков по наложенным ореолам рассеяния // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 1989, № , с. 53-61.
15. Заключение научно-методического Совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки твердых полезных ископаемых МПР России. 26-27 апреля 2005 г. Санкт-Петербург. С. 9-11.
16. Заключение научно-методического Совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки твердых полезных ископаемых МПР России. 14-15 октября 2010 г. Санкт-Петербург. С. 14-16.
17. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Министерство геологии СССР. М.: Недра, 1983, 191 с.
18. Кременецкий А.А., Морозов А.Ф., Киселев Е.А. Разномасштабные геохимические работы: состояние и пути повышения эффективности прогноза и поисков твердых полезных ископаемых и углеводородного сырья // Разведка и охрана недр, 2013, № 8, с. 3-6.
19. Кременецкий А.А., Головин А.А., Кубанцев И.А. 19-й международный симпозиум по прикладной геохимии (Ванкувер, Канада) // Руды и металлы, 1999, № 5, с. 68-74.
20. Лось В.Л., Назаров В.Н. Концепция и технология прогнозно-поисковых работ в Лениногорском и Зыряновском рудных районах, Рудный Алтай // Руды и металлы, 2006, с. 66-72.
21. Менчинская О.В., Юшко Н.А., Галюк С.В. Опыт методического сопровождения поисковых геохимических работ // Разведка и охрана недр. 2013. № 8. с. 58-63.
22. Методические рекомендации по применению рациональных комплексов геофизических методов прогноза и поисков месторождений хромитов. Составители: Ладнер Г.А., Карасева Н.Б., Ворошилов Н.А. и др. Санкт-Петербург. 2010. 79 с.
23. Милков Г.В., Виноградов В.Н., Алексеев С.Г., Духанин А.С., Способ поисков полезных ископаемых. Авт. свид. СССР, № 894660. БИ №48, 1981.
24. Миляев С.А., Чекваидзе В.Б. Соотношения вторичных ореолов рассеяния и ионно-потенциометрических аномалий в сложных ландшафтно-геологических условиях // Разведка и охрана недр. 2013. № 8. с. 73-77.
25. Рысс Ю.С. Геоэлектрoхимические методы разведки. Л.: Недра, 1983, 255 с.
26. Соколов С.В., Макарова Ю.В., Юрченко Ю.Ю. Метод анализа сверхтонкой фракции: результаты, эффективность // Разведка и охрана недр, 2013, № 8, с. 54-58.
27. Технология работ и интерпретация данных геоэлектрoхимических методов на рудных объектах. (Методические рекомендации). Составители: Алексеев С.Г., Вешев С.А., Ворошилов Н.А., Путиков О.Ф., Савицкий А.П. Штокаленко М.Б. Санкт-Петербург. 2005. 59 с.
28. Шахнович Ю.Л., Ворошилов Н.А. Особенности распределения калия и натрия на месторождениях олова и их поисковое значение // Методы рудной геофизики. Гамма-спектрометрия при поисках рудных месторождений. Ленинград, 1978, с. 92-99.

29. Alekseev S.G., Dukhanin A.S., Veshev S.A. Voroshilov N.A. Some aspects of practical use of geoelectrochemical methods of exploration for deep-seated mineralization. In: Journal of Geochemical Exploration, 1996, 56, p. 79-86.
30. Antropova L.V., Goldberg I.S., Voroshilov N.A., Ryss Yu.S. New methods of regional exploration for blind mineralization: application in the USSR. In: Journal of Geochemical exploration, 1992, 43, p. 157-166.
31. Gwendy E.M. Hall. Analitical perspective on trace elements species of interest in exploration. In: Journal of Geochemical exploration, 1998, 61, p. 1-19.
32. Putikov O.F. and Wen B. Geoelectrochemistry and Stream Dispersion. Chapter 2. In: Geochemical Remote Sensing of the Subsurface. Handbook of Exploration Geochemistry edited by M. Hale, vol.7. Amsterdam, Elsevier, 2000. c. 17-79.