

Геохимические поиски рудных месторождений, не выходящих на дневную поверхность. Состояние и перспективы

Geochemical exploration of ore deposits that are hidden beneath the surface. Status and prospects

Воробьёв С. А., Миляев С. А.

Vorobyov S. A., Milyaev S. A.

Сокращение фонда месторождений, выходящих на современную эрозионную поверхность, привело к необходимости развития и совершенствования геохимических методов поисков глубокозалегающих месторождений. Они ориентированы на выявление газовых и литохимических ореолов косвенных (CO_2 , H_2 , He, ионы NH_4^+ , K^+ и др.) и прямых индикаторов (Au, Pb, Cu и др.) рудных тел в погребённом и слепом залегании. Данные опытно-методических работ на многих месторождениях различного генезиса позволяют предположить, что образование наложенных ореолов этих двух групп компонентов рудообразующей среды протекает по единому механизму. Их совместная миграция к дневной поверхности и последующая разгрузка в атмосферу формируют в приземном воздухе ореолы, содержания которых многократно превышают геохимический фон, что позволяет использовать для их обнаружения при проведении полевых работ лазерную аналитическую аппаратуру (лидары, корреляционные спектрометры и др.), применяемую в метеорологии для мониторинга состава атмосферы.

Ключевые слова: литохимия, биогеохимия, атмосфера, лидары, ионопотенциметрия.

The reduction in the number of deposits reaching the modern erosional surface has led to the need to develop and improve the geochemical exploration methods for searching for deposits under deep cover. They are focused on the identification of gas and lithochemical halos of indirect (CO_2 , H_2 , He, NH_4^+ , K^+ ions, etc.) and direct indicators (Au, Pb, Cu, etc.) for buried ore bodies and blind deposits. The data of experimental and methodical works for numerous deposits of different genesis suggest that the formation of superimposed halos of these two groups of indicators of ore-forming environment proceeds by a single mechanism. Their joint migration to the day surface and the subsequent unloading into the atmosphere form halos in the subsurface air, where the concentration of the indicative elements many times exceeds the geochemical background. That allows laser analytical equipment used in meteorology (lidars, correlation spectrometers, etc.) to be applied during fieldwork to monitor the composition of the atmosphere.

Keywords: lithochemistry, biogeochemistry, atmosphere, lidars, ionopotentiometry.

Для цитирования: Воробьёв С. А., Миляев С. А. Геохимические поиски рудных месторождений, не выходящих на дневную поверхность. Состояние и перспективы. Руды и металлы. 2022. № 1. С. 6–23. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10001.

For citation: Vorobyov S. A., Milyaev S. A. Geochemical exploration of ore deposits that are hidden beneath the surface. Status and prospects. Ores and metals, 2022, № 1, pp. 6–23. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10001.

Введение. Прирост запасов металлов в «старых» и геологически хорошо изученных рудных районах мира ожидается главным образом за счёт обнаружения не выходящих на дневную поверхность скрытых – слепых и погребённых месторождений. Закрытые территории экономически развитых районов с ограниченной мощностью молодых отложений, перекрывающих рудоносный фундамент, представляют важный резерв для открытия новых промышленных месторождений различных металлов.

Современная методика геохимических поисков погребённых месторождений ориентируется на выявление на поверхности чехла наложенных ореолов рассеяния, которые сформировались при миграции образующих их компонентов с глубоких горизонтов земли. Теоретические представления о наложенных литохимических ореолах рассеяния рудных месторождений впервые сформулированы Н. И. Сафроновым в 1936 г., но только к середине 70-х годов реализованы в практике геохимических поисков на территории бывшего СССР. В Китае, Канаде, Австралии и США методы поисков по наложенным ореолам рассеяния стали активно применяться с конца прошлого столетия.

Анализ современного состояния геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых, выполненный по материалам периодических изданий (рис. 1) с результатами работ в этой области за последнее два десятилетия, показывает, что доля публикаций, посвящённых поиску погребённых месторождений, за рассмотренный период в два раза выше этого показателя для последней четверти прошедшего столетия, что указывает на возросший интерес геологических компаний к данной проблеме. В российских изданиях преимущественно анализируются технологии поисков погребённых месторождений по наложенным литохимическим ореолам рассеяния, в зарубежных – по газовым.

Закономерности проявления наложенных ореолов в геохимическом поле. Геохимические поиски перекрытых и погребённых рудных

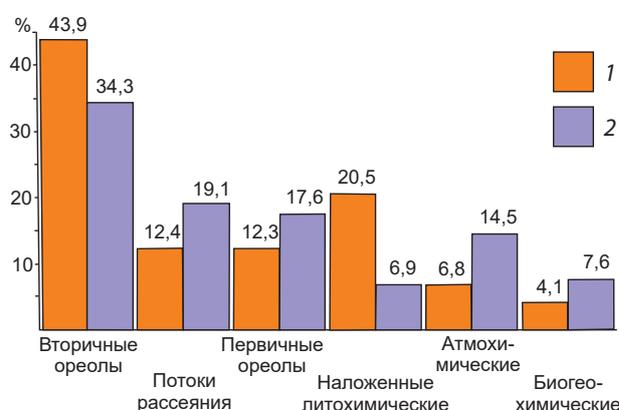


Рис. 1. Распределение публикаций по видам геохимических поисков рудных месторождений по данным электронной библиотеки «eLibrary» за период 2001–2021 гг.:

число публикаций: 1 – отечественные, 2 – зарубежные

Fig. 1. Classification of publications by types of geochemical exploration for ore deposits according to the electronic library "eLibrary" for the period 2001–2021:

number of publications: 1 – domestic, 2 – foreign

месторождений ведутся путём выявления над ними вторичных наложенных ореолов, образующихся в процессе миграции рудных компонентов из глубинных источников к земной поверхности, где они фиксируются в почвах современной коры выветривания. Исследования по определению наложенных ореолов начались в 70-е гг. XX века Л. В. Антроповой, Ю. Е. Саетом, В. З. Фурсовым, А. И. Фридманом и другими учёными. Газортутные съёмки и опытно-производственные работы по поиску погребённых месторождений методами частичного извлечения металлов, свободных и сорбированных газов подпочвенной атмосферы, выполненные во многих районах бывшего СССР и России, а также в зарубежных странах, позволили установить основные закономерности проявления геохимических аномалий этого типа:

- максимальное содержание элементов в ореоле не зависит от мощности пород перекрывающего чехла;

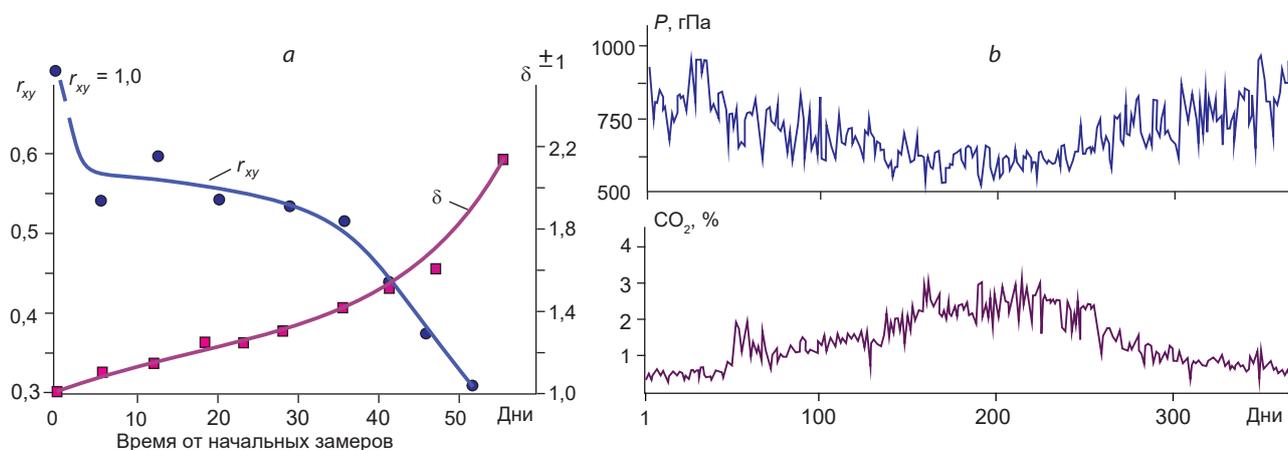


Рис. 2. Диаграмма оценок параметров воспроизводимости повторных измерений содержания CO₂ в ореоле (а) и совместные вариации атмосферного давления и содержания CO₂ в подпочвенном воздухе (b) [2]

Fig. 2. Diagram of estimates of reproducibility parameters of repeated measurements of the CO₂ content in the halo (a) and joint variations in atmospheric pressure and CO₂ content in the subsurface air (b) [2]

- контуры ореолов не выходят за пределы рудной зоны независимо от глубины её залегания и литологического состава перекрывающих пород;

- содержания элементов в пределах контуров ореолов периодически изменяются, возрастая и снижаясь с течением времени.

Наиболее отчетливо эффект изменения контрастности аномалий проявлен в газовых ореолах. На рис. 2, а приведена диаграмма изменения случайной ошибки (δ) и коэффициента корреляции (r_{xy}) между первым и повторными замерами содержания CO₂ в точках наблюдения над погребённым полиметаллическим месторождением Алыс, открытым атмосферической съёмкой в восточном борту Тургайского прогиба (Казахстан) [4].

Возрастание случайной ошибки и снижение коэффициента парной корреляции между первой и последующими сериями измерения содержания CO₂ в газовом ореоле позволяют предположить, что состав подземной атмосферы изменяется с течением времени. На рис. 2, b показан годовой цикл колебания атмосферного давления и содержания CO₂ в подпочвенном воздухе с суточными вариациями метеоусловий случайного характера, что обуслов-

ливает сложную взаимосвязь между состояниями наземной и подземной атмосферы. На миграцию газов к земной поверхности и далее в атмосферу наряду с атмосферным давлением влияет множество дополнительных факторов (температура, влажность, пористость пород и др.), осложняющих учёт их воздействия на результаты повторных наблюдений. Подробно данный вопрос изучен в работе [2]. В меньшей степени это проявлено для наложенных литохимических ореолов, так как главным фактором их появления у поверхности земли является сорбция органоминеральным субстратом почвы мигрирующих через неё элементов в составе микроминеральных частиц и газов.

В настоящее время нет общепринятой теории формирования наложенных ореолов рассеяния над погребёнными рудными месторождениями. В этой области поисковой геохимии практика полностью опережает теоретические разработки. Временные вариации содержаний металлов и газов в наложенных ореолах позволяют предположить, что их миграция из глубинных источников осуществляется по единому механизму в форме кластеров из наноминеральных частиц и молекул газа. Микрочастицы рудных минералов могут адсорби-



роваться на поверхности газовых молекул в силу их огромной поверхностной энергии и совместно мигрировать с ними к земной поверхности, при этом часть из них разгружается в атмосферу, часть – сорбируется почвой. Это подтверждается геохимическими съёмками в морских акваториях, выполненными для оценки перспективности нефтегазоносных структур, выявляемых сейсмоакустическими методами.

Пример – результаты геохимической съёмки, проведённой в 2009 г. при личном участии одного из авторов Институтом геолого-экологических проблем Донбасса (ИГЕПД) совместно с Морской геолого-геофизической экспедицией Причерноморского государственного регионального геологического предприятия (Украина) по оценке перспектив нефтегазоносности антиклинальных структур, выявленных геофизическими методами в акватории Прикерченского шельфа Чёрного моря, где в пределах одной из них расположено Субботинское нефтяное месторождение. Глубина залегания нефтегазоносных структур составляет более 4 тыс. м от поверхности морского дна. Пробы донных осадков отобраны на площади 650 км² по сети 500 × 500 м. Глубина моря в пределах исследованной акватории в южных румбах возрастает от 20 до 100 м.

В пробах донных осадков хроматографическим методом определены содержания сорбированных газов (метан, этан, пропан, пропилен, бутан, н-бутан), методом индуктивно-связанной плазмы – содержания 46 химических элементов. В результате выделены две высококонтрастные линейные аномальные зоны металлов (Mo, Fe, V, Ni, Au, U, Pb, As, Co, Sn) и углеводородных газов (CH₄, C₂H₆, H-C₄H₁₀ и др.), протягивающиеся сплошными полосами более чем на 12 км в субширотном направлении [5] вдоль осей главных антиклинальных структур сеноманского возраста. На рис. 3 показаны наложенные ореолы метана и золота в донных осадках морского дна исследованной акватории.

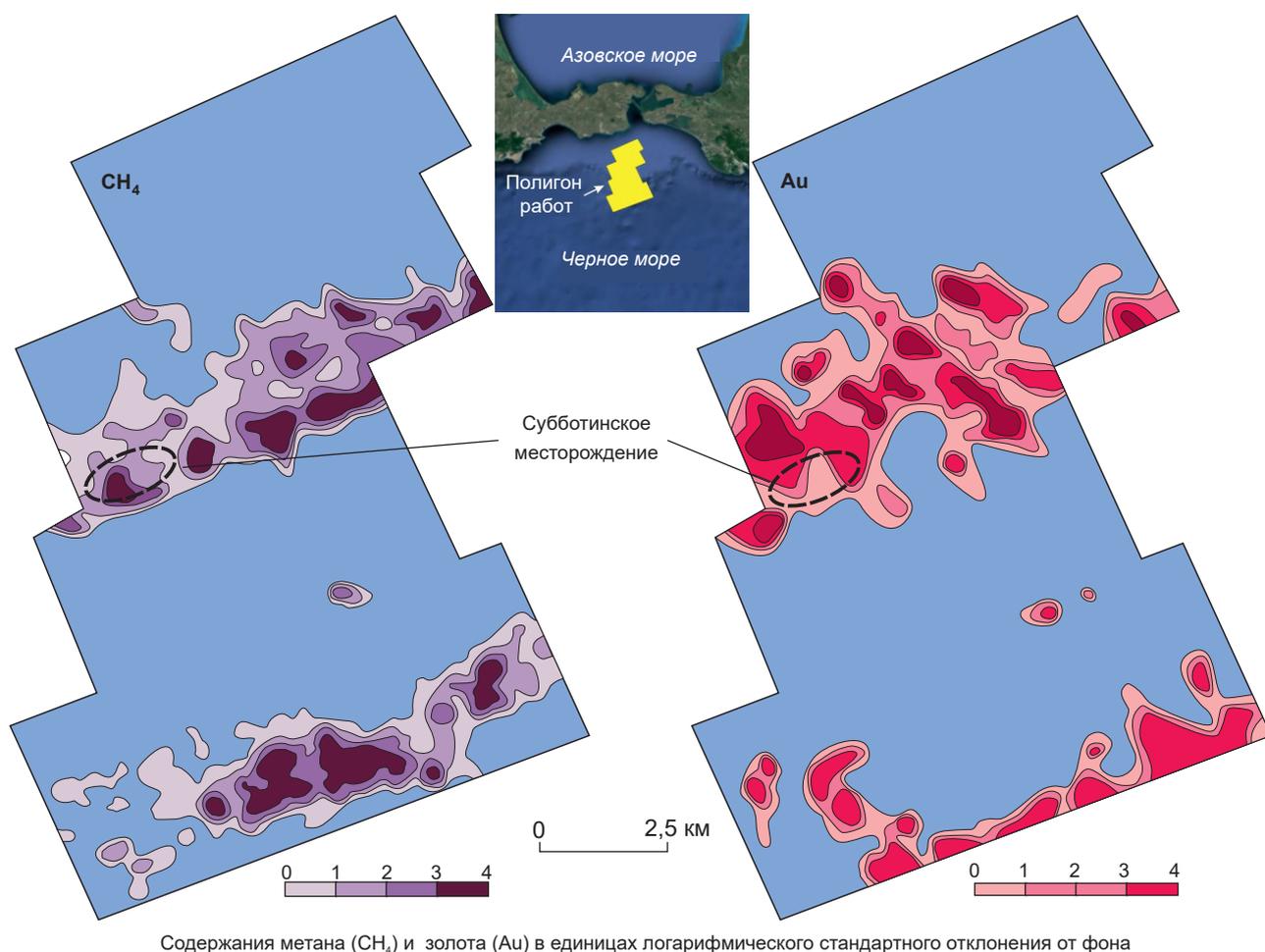
В геохимическом поле Субботинское месторождение на уровне морского дна отмечается комплексными аномалиями металлов и газов.

Весьма интересно, что области их максимального содержания пространственно разобщены, аномалии металлов расположены по периферии газовых ореолов, оконтуривая их. Причиной этого, вероятно, является разрушение металл-газовых кластеров на границе раздела вода–порода на поверхности морского дна, далее латеральная миграция металлов и газов идёт раздельно, конкурируя за центры сорбции, что отражается в их пространственной обособленности. Наиболее отчётливо это проявлено в южной части поисковой площади, где шельф переходит в континентальный склон и резко возрастает глубина моря, что увеличивает миграционную способность металлосодержащих частиц с понижением рельефа за счёт воздействия гравитации.

Совместная миграция металлов и газов к земной поверхности из залегающих на глубине рудных тел подтверждается результатами исследований китайских геохимиков на погребённых полиметаллических, медно-никелевых и золоторудных месторождениях [11, 16, 17]. На полиметаллическом месторождении Фэнкоу (Южный Китай), перекрытом карбонатно-терригенными породами мощностью более 100 м, микрочастицы, содержащие металлы, улавливались фильтрами в газоприёмниках, установленных на дно скважин глубиной 0,5 м. Их размер варьировался от одного до 100 мкм, они имели сложное внутреннее строение, представляя собой соединённые агрегаты меньшего размера, состоящие из сульфидов, оксидов и гидроксидов металлов (рис. 4, а).

Подобные исследования, выполненные на двух десятках месторождений Китая, показали постоянное присутствие рудных микрочастиц в подземной атмосфере над погребёнными рудными телами. Откачка фиксированных объёмов воздуха из призабойных частей скважин глубиной до 1 м позволила установить, что содержание рудных элементов на участках залегания рудных тел достигает 300 ppm на 1 л воздуха, тогда как в области геохимического фона оно на два порядка меньше [16].

В составе подземной атмосферы золоторудных месторождений обнаружены микро-



Содержания метана (CH_4) и золота (Au) в единицах логарифмического стандартного отклонения от фона

Рис. 3. Наложённые литохимические ореолы метана и золота по данным анализа донных осадков в акватории Прикерченского шельфа Чёрного моря

Fig. 3. Superimposed lithochemical halos of methane and gold according to the analysis of bottom sediments in the water area of the Prikerch shelf of the Black Sea

частицы золота, адсорбированные частицами большего размера и различных форм, сложенными преимущественно оксидами железа, алюминия (см. рис. 4, b). В процессе миграции элементы, входящие в состав микрочастиц, сорбируются почвой и захватываются корнями растений, образуя наложенные ореолы, которые служат индикаторами погребённых рудных объектов. В зависимости от опробуемой среды геохимические поиски погребённых месторождений подразделяются на литохимические, биогеохимические и атмосферические. Как показывает практика, по

информативности эти методы близки между собой, применимость каждого из них определяется ландшафтными условиями территорий проведения поисков, технической сложностью пробоотбора и трудоёмкостью операций по подготовке отобранного материала к анализу, а также личными предпочтениями исполнителей.

Литохимические методы. Наложённые ореолы относятся к разряду слабых геохимических аномалий с максимальными содержаниями рудных элементов, соизмеримыми с колебаниями местного геохимического фо-

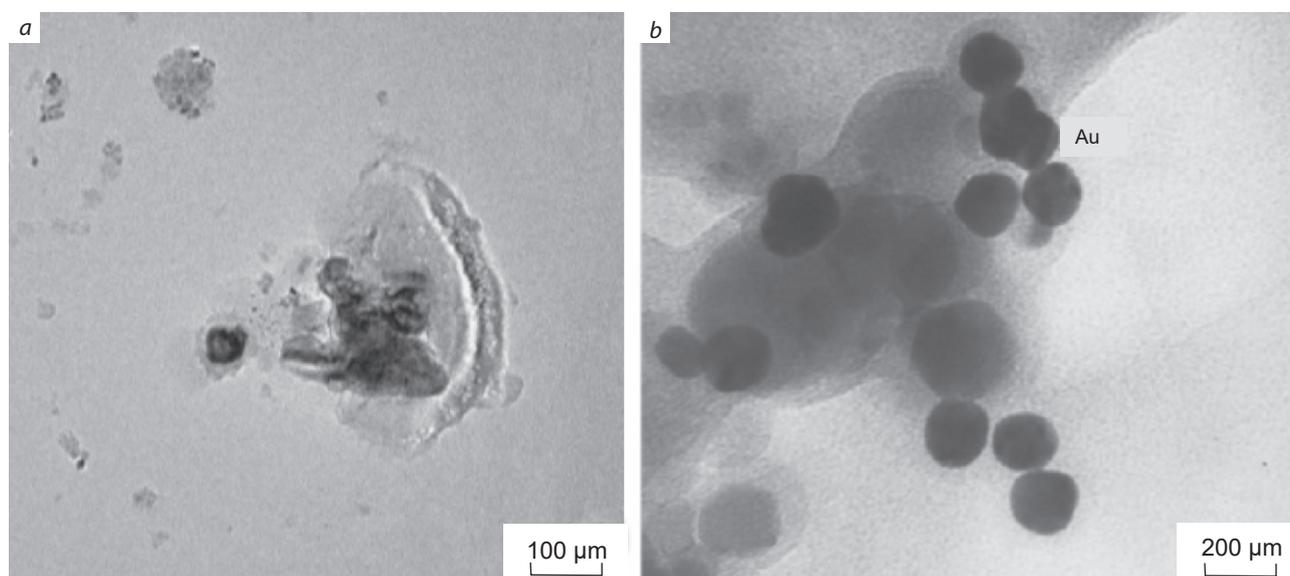


Рис. 4. Фото Pb-Zn содержащих микрочастиц в подземной атмосфере над погребённым месторождением Фэнкоу (a) и частиц золота, адсорбированных оксидами железа (b) в рудничном воздухе [16, 17]

Fig. 4. Photo of lead-zinc-containing microparticles in the underground atmosphere above the buried Fenkow deposit (a) and gold particles absorbed by iron oxides (b) in mine air [16, 17]

на и погрешностями съёмки. Повышение их контрастности достигается частично фазовым анализом литохимических проб, основанным на выделении подвижных, легко-растворимых, солевых и других форм нахождения рудных элементов, доля которых в области фона ничтожно мала, а в ореолах является преобладающей. Их соотношения в геохимических аномалиях во многом обусловлены химическими свойствами элементов, слагающих руды. Для обнаружения наложенных ореолов рассеяния металлов применяют три вида геохимических съёмок, реализующих выявление слабых геохимических аномалий методами:

- термомагнитных фракций (ТМФ);
- подвижных форм (МПФ);
- анализа сверхтонких фракций (МАФС).

Термомагнитный метод ориентирован на выделение аномалий химических элементов, сорбированных гидроксидами железа и марганца в приповерхностном слое земли в процессе их миграции от погребённых рудных тел

к дневной поверхности. В гипергенных условиях соединения железа в литохимических пробах находятся преимущественно в форме слабомагнитных гидроксидов – лимонита и гётита. В зоне окисления месторождений, содержащих сульфиды, многие рудные элементы мигрируют совместно с железом в форме легко-растворимых сульфатов, в последующем концентрируясь в гидроксидах железа, поэтому анализ магнитной фракции проб повышает контрастность ореолов.

Для определения состава термомагнитной фракции пробы прокаливаются в графитовых кюветах без доступа воздуха, в результате железосодержащие минералы переходят в магнетит или маггемит, обладающие высокой остаточной намагниченностью. Магнитная фракция улавливается магнитным сепаратором, попутно извлекаются минералы, в состав которых входят Ni, Co, Mn и лантаноиды, имеющие повышенную магнитную восприимчивость. Выделенный концентрат исследуется аналитическими методами [1]. Следует отметить, что

гидроксиды железа и марганца являются хорошими сорбентами, поэтому геохимическими съёмками методом ТМФ могут быть установлены аномалии ландшафтной природы, никак не связанные с погребёнными рудами.

Геохимические съёмки методом подвижных форм относятся к числу способов выявления слабых геохимических аномалий путём частично-фазового анализа минеральных агрегатов, образованных рудными элементами в почве. Он включает вытяжки, растворяющие слабоустойчивые минеральные формы элементов, доля которых в пробах над месторождениями значительно выше по сравнению с фоновыми участками. Формы нахождения разных элементов в наложенных ореолах над месторождениями одного и того же генетического типа существенно различаются. Вследствие этого при проведении поисковых работ приходится выбирать селективные экстрагенты для выделения коллективной преобладающей формы нахождения рудных элементов в опробуемой среде. Экстрагенты в порядке возрастания силы их воздействия приведены ниже [15]:

- деионизированная вода – для извлечения водорастворимых форм, которые находятся в составе водорастворимых солей, и слабоадсорбированных ионов элементов;
- энзимная экстракция (Enzyme Leach) – для тех же целей; степень извлечения и воспроизводимость результатов, как правило, несколько выше, чем при использовании водной вытяжки;
- раствор цитрата аммония $(\text{NH}_4)_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ – для извлечения элементов, находящихся в составе ионообменного комплекса и адсорбированных глинистыми частицами;
- раствор пирофосфата Na ($0,1 \text{ M Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times \text{H}_2\text{O}$) – для извлечения элементов, связанных с органическим веществом, т. е. находящихся в виде металлоорганических соединений;
- раствор ацетата аммония $(\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$ – для растворения карбонатных минералов;
- холодный раствор гидроксиламина гидрохлорида $(\text{HNOH}_2\text{HCl})$ – для извлечения элементов, сорбированных гидроксидами марганца;

- горячий раствор гидроксиламина гидрохлорида – для извлечения элементов, сорбированных гидроксидами марганца и железа;
- царская водка – для извлечения солевых и сорбированных форм элементов, а также золота и многих самородных металлов и растворения сульфидов.

При съёмках МПФ наиболее употребимы пирофосфатные вытяжки, индикатором погребённых месторождений служит возрастание показателя Me / C , где Me – концентрация рудного элемента в пирофосфат-натриевой вытяжке, C – содержание органического углерода в исходной литохимической (почвенной) пробе. В зарубежной практике этот способ выделения аномалий именуется методом подвижных ионов (Methods Mobility Ions, MMI), в качестве селективного растворителя применяются лиганды, растворяющие адсорбированные на поверхности твёрдых частиц ионы металлов. На рис. 5 показаны наложенные ореолы золота, выявленные методом частичной экстракции над месторождением Фолокади (Республика Гвинея), перекрытого терригенными породами мощностью более 20 м. В результате проведённых работ на флангах месторождения обнаружены пять новых рудных зон, что позволило существенно сократить объём буровых работ [15].

К способам выявления погребённых месторождений путём выделения ореолов подвижных форм компонентов, мигрирующих с рудообразующими элементами, относится ионно-потенциометрический метод. Это – косвенный метод поисков, так как не ориентирован на вещественный состав руд. Данным методом геохимической съёмки определяется состав водорастворимых компонентов, сорбированных почвой и легко переходящих в растворённое состояние. Анализ выполняется ионоселективными электродами, измеряющими кислотно-щелочной показатель водных вытяжек (рН), их окислительно-восстановительный потенциал (Еh), а также определяющими содержание ионов: NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , CO_3^{2-} , F^- , NO_3^- и др.

Перечисленные компоненты, обладая высокой подвижностью в зоне гипергенеза, с одной стороны, способны формировать аномалии

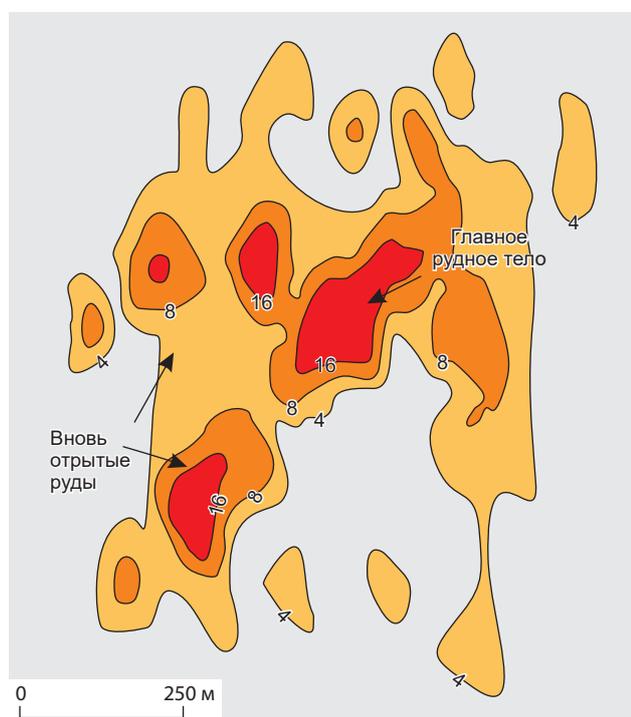


Рис. 5. Наложенные ореолы золота над погребённым золоторудным месторождением Фолокади (Республика Гвинея), выявленные методом MMI [15]

Fig. 5. Superimposed halos of gold over the buried gold ore deposit of Folokadi (Republic of Guinea), revealed by the MMI method [15]

над погребёнными месторождениями при мощности аллохтона в десятки метров, с другой – образуют ореолы в надрудных частях месторождений, что важно при поисках слепых объектов. Как показывают результаты опытно-методических работ на золотых и золото-серебряных месторождениях, самые высокие содержания иона аммония NH_4^+ характерны для надрудных и верхнерудных частей рудных тел. Важная поисково-оценочная особенность иона NH_4^+ – прямая корреляция его продуктивности с количеством отложившегося золота.

На рис. 6 показаны аномалии ионов и потенциометрического показателя pH / Eh над золото-полиметаллическим месторождением Береговское (Западная Украина), выделенные геохимической съёмкой масштаба 1 : 10 000. По

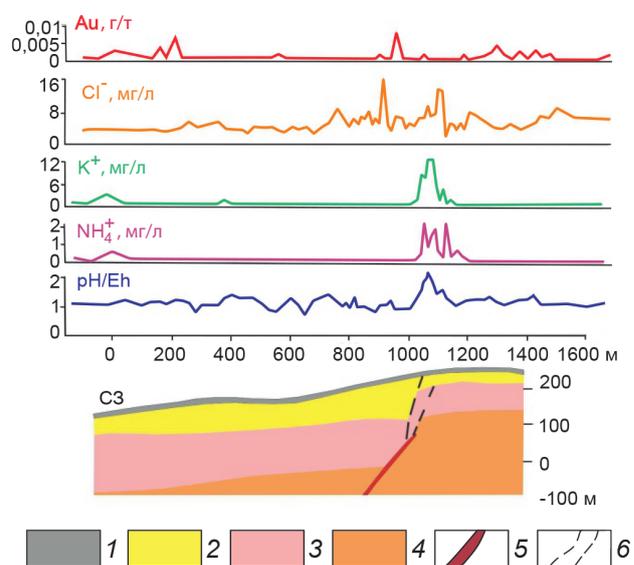


Рис. 6. Результаты ионно-потенциметрической и литохимической съёмки над золото-полиметаллическим месторождением Береговское:

1 – рыхлые отложения; 2 – туффиты; 3 – алевролиты, 4 – вулканиты кислого состава; 5 – рудная залежь; 6 – тектонические нарушения

Fig. 6. Results of ion-potentiometric and lithochemical surveys over the Beregovskoye gold-polymetallic deposit:

1 – loose deposits; 2 – tuffite; 3 – siltstone, 4 – felsic volcanic; 5 – ore deposit; 6 – tectonic dislocations

вторичным ореолам рассеяния аммония и калия с поверхности прослеживаются рудные тела, залегающие на глубине 150–200 м и перекрытые рыхлыми отложениями мощностью 5–10 м [6]. Индикационными свойствами также обладают отношение потенциметрических показателей pH к Eh и ореолы хлор-иона. Данный метод не требует сложной аппаратуры и позволяет непосредственно в поле конкретизировать контуры перспективных участков и даже фиксировать выходы рудных зон, что особенно важно при полевой оценке первоочередных объектов для планирования последовательности геолого-поисковых работ.

При поисках полиметаллических месторождений хорошо зарекомендовал себя ионносорбционный метод, разработанный в ЦНИГРИ.

Он апробирован при поисках полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Салаирского кряжа, Восточного Забайкалья, Енисейского кряжа, Центрального Казахстана. Сущность метода заключается в избирательной способности разбавленного раствора азотной кислоты извлекать катионы химических элементов из ионообменных карбонатных, оксидных и органоминеральных форм нахождения элементов из почвенного покрова. Верхний почвенный слой (A_1), обладая высокой дисперсностью, служит прекрасным сорбентом катионов, которые при взаимодействии почв с разбавленной азотной кислотой замещаются на ион гидроксония (H_3O^+), переводя катионы химических элементов в раствор, анализируемый ICP-MS методом. При поисковых работах ионно-сорбционный метод способствовал выявлению новых промышленных рудных залежей. На рис. 7 приведены результаты геохимических работ на Петровском участке Змеиногорского района российской части Рудного Алтая. При прогнозной оценке перспектив участка учитывался комплекс геохимических поисковых признаков, представленный ассоциацией рудных (Pb, Zn, Cu) и петрогенных (K, Na) элементов, определяющих химизм метасоматических преобразований. Поисковые скважины, пробуренные с учётом геохимических данных, вскрыли три слепых рудных тела на глубинах 80, 200 и 250 м от дневной поверхности [7].

Метод анализа сверхтонких фракций рыхлых отложений разработан и опробован при проведении опытно-производственных работ в северных и восточных регионах России при производстве геохимических работ масштабов 1 : 1 000 000 – 1 : 10 000 геохимиками ВСЕГЕИ. Он базируется на результатах российских и зарубежных исследований по изучению состава, форм и размеров микрочастиц, присутствующих в подземной атмосфере рудных месторождений. Мигрируя с газовыми потоками в атмосферу, они частично сорбируются органоминеральной малоразмерной гранулометрической фракцией почв с большой эффективной поверхностью, образуя вторичные наложенные ореолы рассеяния.

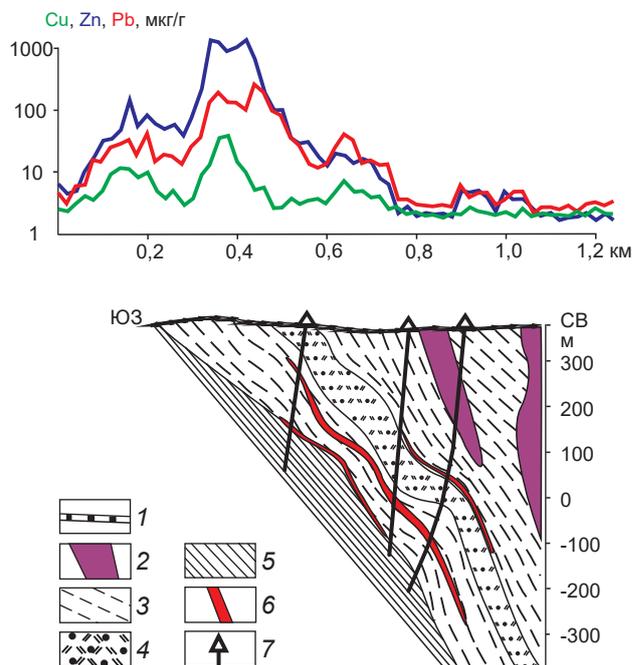


Рис. 7. Графики содержаний рудных элементов по профилю VIII участка Петровский:

1 – элювий; 2 – риолиты; 3 – алевролиты; 4 – чередование туффитов кислого состава, кремнистых и туфогенных алевролитов; 5 – метаморфические сланцы раннего палеозоя; 6 – рудные тела; 7 – поисковые скважины

Fig. 7. Graphs for the content of ore elements along the profile of the VIII section of the Petrovsky site:

1 – eluvium; 2 – rhyolite; 3 – siltstone; 4 – alternation of felsic tuffite, siliceous and tuffaceous siltstone; 5 – early Paleozoic metamorphic schist; 6 – ore bodies; 7 – prospecting wells

При съёмках этим методом отобранный материал после сушки до постоянной массы переносится в вибратор, продуваемый воздухом. При выходе из него пылевидные частицы размером менее 10 мкм, пройдя этап промежуточной очистки, осаждаются на фильтре. Их основу составляет полотно Петрянова, представляющее собой волокнистый полимер, улавливающий микрочастицы не только их непосредственным осаждением на фильтре, но и электростатическим притяжением к заряженным волокнам фильтра. Собранный материал ана-



лизируется прецизионными методами количественного анализа [8].

Как сообщают авторы этого метода, он применяется на закрытых и полужакрытых территориях северных регионов, характеризующихся большой мощностью чехла покровных отложений различного генезиса, где традиционные методы литохимических поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния малоэффективны. Примером положительного применения метода МАСФ являются ревизионно-поисковые работы, выполненные сотрудниками ВСЕГЕИ на территории полуострова Таймыр на площади 180 км². Район работ характеризуется сложными условиями ведения геохимических поисков, что связано с широким развитием аллювиально-пролювиальных и солифлюкционных отложений. По результатам геохимических работ с использованием метода МАСФ масштаба 1 : 50 000 в северной части Верхнеленинградской площади выделены пространственно совмещённые контрастные ореолы Au, Ag, As, Sb, образующие аномальную геохимическую зону протяжённостью около 8 км, соответствующую погребённому месторождению [8].

Хорошая аналитическая база даёт возможность выявлять геохимические аномалии над погребёнными объектами методами математической обработки данных геохимического опробования без применения специализированных технологий выделения наложенных ореолов в геохимическом поле. Примером такого подхода являются результаты опытно-производственных работ по поиску погребённых кимберлитовых трубок на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля Якутской алмазонасной провинции, проведённые Опытно-методической экспедицией (г. Александров, Владимирская область). Мощность перекрывающего чехла, сложенного терригенными отложениями пермского и трапповыми покровами триасового возраста на территории поисков, составляет 100 м. Тем не менее все известные на этой территории кимберлитовые тела зафиксированы наложенными ореолами. Они образованы элементами, присутствующими в напорных

подмерзлотных рассолах, мигрирующими по тектоническим нарушениям с земных глубин к дневной поверхности (рис. 8) [3].

Данные изучения состава ореолов показывают, что в перечень ореолообразующих элементов входят компоненты (Sr, Li, Ba и др.) высокоминерализованных подземных вод (криопэггов), широко распространённых на территории Якутии. Они имеют напорный режим и за счёт высокой минерализации (более 200 г/л) способны активно мигрировать сквозь толщу мёрзлых пород, химически взаимодействуя с ними. В пределах выделенных аномалий в южной части площади опытно-производственных работ позднее были обнаружены кимберлитовые тела.

Биогеохимический метод. Биогеохимический метод поисков при геолого-поисковых работах применяется в весьма ограниченных объёмах. Как показывает практика, максимальная мощность рыхлых отложений, ограничивающая поисковую возможность метода в степных и пустынных районах, составляет 20–50 м, в лесных районах гумидной зоны – 10–20 м, в районах с многолетней мерзлотой не превышает 3–10 м.

Основными факторами, влияющими на формирование биогеохимических ореолов рудных месторождений в растениях, являются: доступность растениям минеральных и химических форм элементов-индикаторов, находящихся в корнеобитаемой зоне почв и почвообразующих пород; величина поверхности контакта корневых систем растений с лито-, гидро- и атмосферическими ореолами рассеяния; наличие и величина антиконцентрационных физиолого-биохимических барьеров против высоких концентраций рудных элементов в питающей среде.

Проведение биогеохимических съёмок осложнено тем, что в пределах поисковой площади не всегда удаётся отобрать пробы из одного и того же вида растительности. Различные виды растений, их разные части (даже в одном органе) с разной интенсивностью аккумулируют химические элементы. Это хорошо видно на рис. 9, где показано распределение содержания меди, стронция и золота в

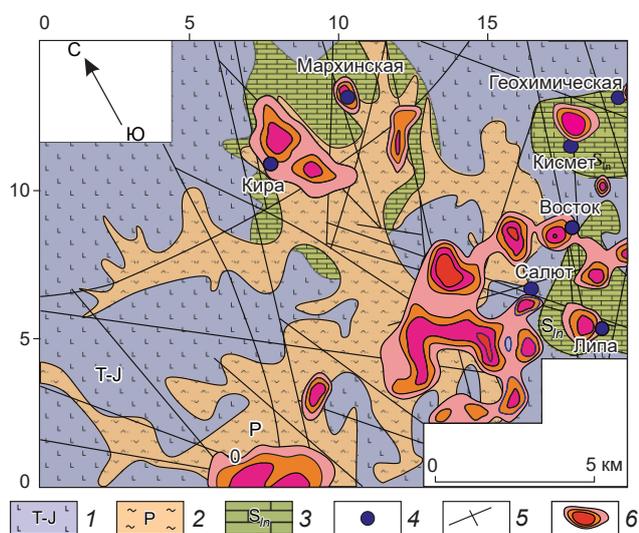


Рис. 8. Структура геохимических аномалий центральной части Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Якутия):

I – траппы; 2 – терригенно-осадочные отложения; 3 – карбонатные породы; 4 – кимберлитовые трубки; 5 – тектонические нарушения; 6 – аномалии мультипликативного показателя $I = Ba \cdot Sr \cdot Sc$ в единицах стандартного отклонения геохимического фона

Fig. 8. Structure of geochemical anomalies in the core of the Alakit-Marxhin kimberlite field (Yakutia):

I – traps; 2 – terrigenous-sedimentary deposits; 3 – carbonate rocks; 4 – kimberlite pipes; 5 – tectonic faults; 6 – anomalies of the multiplicative index $I = Ba \cdot Sr \cdot Sc$ in units of the standard deviation of the geochemical background

листе дерева, произрастающего над погребённым золоторудным месторождением.

Всё это приводит к необходимости вводить поправочные коэффициенты для приведения содержаний элементов к одному уровню, что неизбежно увеличивает дисперсию геохимического поля и затрудняет выделение аномалий. Сложность интерпретации выявленных аномалий, связанная с необходимостью учёта всех воздействующих на растения факторов (биологических, техногенных, антропогенных и др.), влияющих на концентрацию химических элементов в различных его частях, безусловно, снижает достоверность результатов биогеохимических методов поисков.

Отмирание стеблей, опад листвы и отмерших ветвей деревьев обуславливает возвращение в почву элементов, накопленных растением, где они образуют вторичный ореол, который может быть обнаружен рядовой литохимической съёмкой. Этот вывод полностью согласуется с результатами биогеохимических исследований, выполненных австралийскими и российскими геохимиками.

Применение биогеохимического метода целесообразно в тех геологических и ландшафтных условиях, когда выявление вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния сильно затруднено или по ряду природных причин невозможно. К ним относятся участки заболоченных равнин в таёжных и тундровых ландшафтах, где возможно успешное применение биогеохимического метода поисков, заключающегося в опробовании мхов.

Атмохимические методы. Атмохимические ореолы рудных месторождений образуют газы трёх генераций. Первая – компоненты рудообразующей среды (CO_2 , CH_4 , H_2 и др.), захваченные минералами в процессе рудоотложения. Их высвобождение происходит непрерывно по мере вскрытия газово-жидких включений при выветривании. Вторую генерацию составляют газы глубинного происхождения (CO_2 , He, Ar, CH_4 , H_2 и др.), мигрирующие по рудоконтролирующим тектоническим зонам. Они являются продуктами химических и ядерных реакций в земных недрах. К третьей генерации относятся газы (CO_2 , SO_2 , H_2S и др.), образующиеся в зоне гипергенеза рудных месторождений. Гипергенное преобразование сульфидных минералов протекает с поглощением большого количества кислорода, что приводит к резкому снижению его содержания в подземной атмосфере над рудными телами. Газовые ореолы также образуют и рудные элементы, поступающие в вышележащие породы и далее в атмосферу в виде паров и минеральных микрочастиц.

В практике атмохимических съёмок применяются два варианта проведения работ. В первом на точках наблюдения с помощью специализированной аппаратуры измеряются содержания газов прямых или косвенных

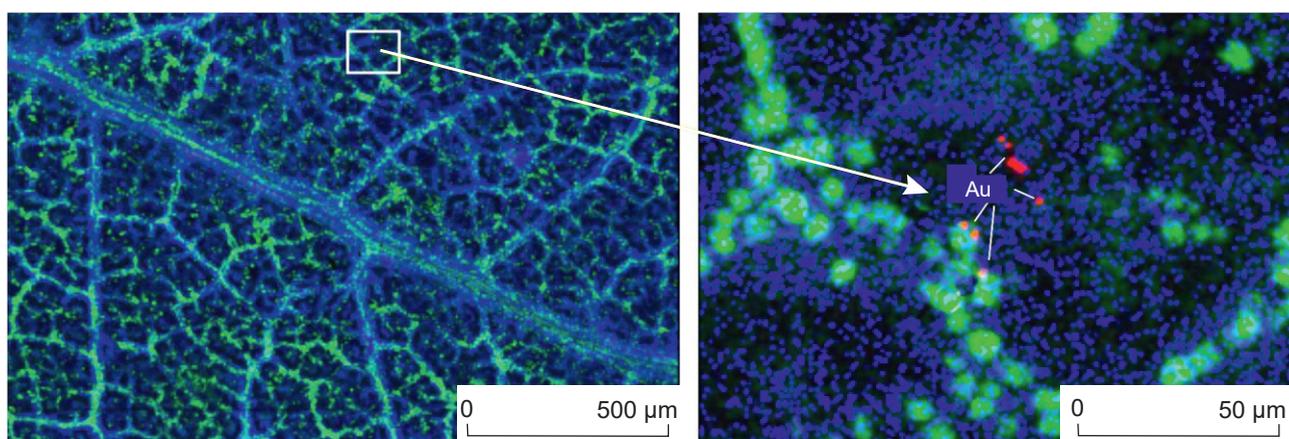


Рис. 9. Распределение меди (синий цвет), стронция (зелёный) и золота (красный) в листе эвкалипта, произрастающего над погребённым золоторудным месторождением, справа – распределение элементов на участке листа, выделенном белым прямоугольником [14]

Fig. 9. Distribution of copper (blue), strontium (green) and gold (red) in a eucalyptus leaf growing over a buried gold deposit, location of elements on the leaf area highlighted in white [14]

индикаторов погребённых руд: Hg, He, H₂, CO₂ и др.

В геологической практике наиболее используемым из них является газортутный метод, разработанный В. З. Фурсовым. Откачиваемый из шпуров газ пропускается через золотой сорбент для сбора ртути. После прокачки поглощённая сорбентом ртуть десорбируется нагреванием и потоком атмосферного воздуха вводится в ртутный фотометр. Проверка буровыми работами газортутной аномалии привела к открытию золоторудного месторождения Амантайтау (Узбекистан), залегающего в осадочных породах палеозойского возраста и перекрытого аллохтонными песчаниками и глинами мощностью 130 м. За последние десятилетия возросли возможности аналитической техники, что позволяет осуществлять газортутные съёмки на более высоком техническом уровне. Портативный ртутный атомно-абсорбционный анализатор РГА-11 с зеемановской коррекцией неселективного фонового поглощения излучения изотопа ртути ¹⁹⁸Hg позволяет в режиме реального времени с высокой чувствительностью и точностью определять содержание этого эле-

мента в различных средах (атмосфера, вода и др.), что значительно упрощает выполнение полевых работ.

Китайскими геохимиками в поисковую практику внедряются портативные высокочувствительные анализаторы двуоксида углерода (CO₂) и сернистых газов (H₂S и SO₂), служащих прямыми индикаторами погребённых сульфидных руд. Двуоксид углерода определяется инфракрасной абсорбционной спектроскопией с пределом обнаружения 1 ppm, сернистые газы анализируются электрохимическим газовым датчиком с чувствительностью 0,001 ppm. По опубликованным данным [12, 18], содержание SO₂ в подпочвенной атмосфере на глубине около 0,5 м над погребёнными сульфидными рудами, перекрытыми чехлом четвертичных пород мощностью до 30 м, составляет $(1-5) \times 10^{-4} \%$. Весьма примечательно, что при большой растворимости сернистого газа (> 10 %) он не поглощается поровыми водами, а формирует в подпочвенной атмосфере самостоятельные ореолы.

Дальнейшим совершенствованием атмосферических съёмок стало использование оптических корреляционных спектрометров, ре-

гистрирующих спектры поглощения газовых компонентов вдоль детектируемой трассы. В зависимости от конструкции прибора источниками излучения служат солнце или лазеры, генерирующие волны фиксированной частоты. С помощью подобной аппаратуры Н. Н. Трофимов и А. И. Рычков выявили ореолы йода над свинцово-цинковым месторождением Бозанг в Северной Осетии, залегающим на глубине 500 м от дневной поверхности [10]. Одна из проблем, возникающих в применении йодометрических съёмок, – устойчивость его аномалий в приземной атмосфере, что во многом определяется формой нахождения этого элемента. Ряд исследователей полагает, что молекулярная форма йода является кратковременной, так как присутствие в атмосфере таких сильных окислителей, как озон, кислород, оксиды азота, углекислота и ультрафиолетовая радиация, приводит к образованию ионных соединений высокой валентности и йодоорганических соединений. Однако мониторинг газовых ореолов йода над рудными месторождениями Юго-Восточной Грузии показал их устойчивость во времени, вполне достаточную для проведения съёмок.

Атмохимические поиски погребённых руд по комплексу газовых компонентов выполняются путём отбора почвенного воздуха из призабойных частей скважин, пробуренных на глубину до 3 м [9]. Газ отбирается в стеклянные ампулы, затем анализируется хроматографическим методом на широкий круг компонентов (CO_2 , O_2 , H_2 , He , Ne , Ar , CH_4 и др.). Критерием рудной природы газовой аномалии над окисляемым рудным телом служит содержание кислорода меньше уровня порогового значения при разбавлении подземной атмосферы потоком тектонических газов. На рис. 10 показаны атмохимические ореолы, проверка которых привела к открытию погребённых полиметаллических месторождений стратиформного типа в восточном борту Тургайского прогиба (Казахстан).

В Канаде на территории бассейна Атабаска (Athabaska Basin) аналогичным методом проводятся поиски урановых месторождений типа несогласия на глубине 100–400 м. Испол-

нители этих работ полагают, что он идеально подходит для поиска урановых месторождений, залегающих на малых и больших глубинах [13]. Наличие ореолов углекислого газа, метана, водорода, гелия и неона в подземной атмосфере служит критерием оценки перспективности геофизических аномалий. Как показали результаты оценки газовых аномалий бурением, продуктивность ореолов гелия пропорциональна количеству урана на глубине, а контуры атмохимических аномалий наследуют форму рудных тел.

Логическим развитием атмохимических методов стали поиски рудных месторождений путём улавливания металлосодержащих минеральных микрочастиц, транспортируемых воздушными потоками из погребённых рудных тел к земной поверхности [19]. В зарубежной практике этот вид атмохимической съёмки именуется «геогаз». Он стал экономически доступным в связи с широким применением высокочувствительных прецизионных методов анализа малых количеств вещества. Подпочвенный газ, откачиваемый из призабойной камеры пробуренной скважины, пропускается через мембранный фильтр, улавливающий грубые частицы почвы, и барботируется через раствор азотной кислоты в сборном коллекторе. Анализ собранного материала проводится в стационарной лаборатории методом индуктивно-связанной плазмы.

На рис. 11 приведены результаты газовой съёмки на никель-медном месторождении Лашуйся (Lashuixia) в провинции Цинхай в Китае [17]. Никель-медные рудные тела месторождения находятся в слепом залегании, перекрыты плотными песчаниками и сланцами мощностью от 50 до 300 м. По результатам геохимической съёмки они отчётливо фиксируются высококонтрастными ореолами меди, никеля, кобальта и других сопутствующих им элементов.

Как видно из рисунка, содержания металлов в почвенной атмосфере над погребёнными рудными телами многократно превышают местный геохимический фон. Этот метод поисковых работ используется китайскими геохимиками для оценки рудоносности тер-

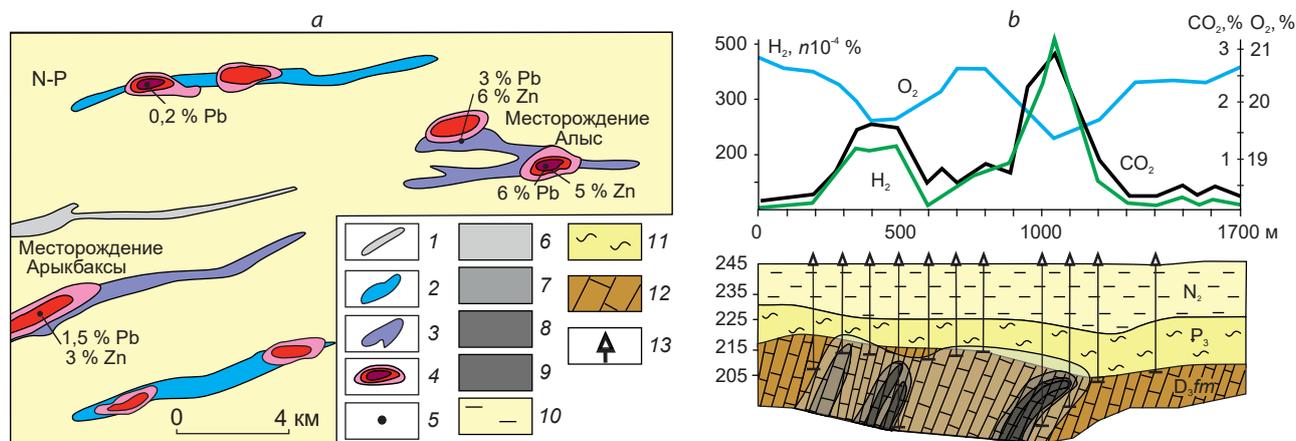


Рис. 10. Атмохимические и наложенные литохимические ореолы над погребёнными рудными объектами (а) и геологический разрез по линии скважин, пробуренных для оценки атмохимической аномалии над месторождением Алыс (б). Восточный борт Тургайского прогиба (Казахстан) [4]:

ореолы: 1 – CO₂; 2 – CO₂, CH₄; 3 – CO₂, CH₄, H₂, O₂; 4 – Pb · Zn · Ag; 5 – разведочный профиль; содержание, Zn, %: 6 – 0,1–0,5; 7 – 0,5–1,0; 8 – 1–2; 9 – >2; 10 – глины; 11 – песчаные глины; 12 – известняки; 13 – скважины

Fig. 10. Atmochemical and superimposed lithochemical haloes over buried ore objects (a) and lymphoid sections along the line of wells drilled to assess the atmochemical anomaly over the Alyks deposit (b). Eastern side of the Turgai trough (Kazakhstan) [4]:

halos: 1 – CO₂; 2 – CO₂, CH₄; 3 – CO₂, CH₄, H₂, O₂; 4 – Pb · Zn · Ag; 5 – exploratory profile; Zn content, %: 6 – 0,1–0,5; 7 – 0,5–1,0; 8 – 1–2; 9 – >2; 10 – clay; 11 – sandy clay; 12 – limestone; 13 – wells

риторий, прилегающих к месторождениям с истощаемыми запасами.

Данный способ поисков, как и все атмохимические методы, весьма трудоёмок, а его результативность во многом зависит от метеорологических условий на момент выполнения работ. Тем не менее, он – единственный прямой метод атмохимических поисков, позволяющий до проведения буровых работ оценивать природу выявляемых геохимических аномалий. Несомненно, что дальнейшее совершенствование метода будет связано с совершенствованием лазерных анализаторов, позволяющих фиксировать металлоорганические соединения в земной атмосфере.

Заключение. Сокращение фонда месторождений, выходящих на современную эрозионную поверхность, делает необходимым развивать и совершенствовать методы поисков рудных объ-

ектов, залегающих на глубине в толще коренных пород. Решение этой задачи достигается совершенствованием технологий выделения аномальных геохимических полей, сформировавшихся в результате вертикальной миграции рудных элементов и сопутствующих им компонентов из глубинных источников. Методы поисков по наложенным ореолам разработаны и применены на практике российскими геохимиками в середине прошлого века. Как показывает обзор информационных потоков по геохимическим поискам, число работ по этому направлению поисковой геохимии неуклонно растёт в России и за рубежом и становится сопоставимым с поисками по вторичным ореолам и потокам рассеяния.

Поиски скрыто-погребённых месторождений ориентированы на выявление газовых ореолов косвенных индикаторов оруденения (He,

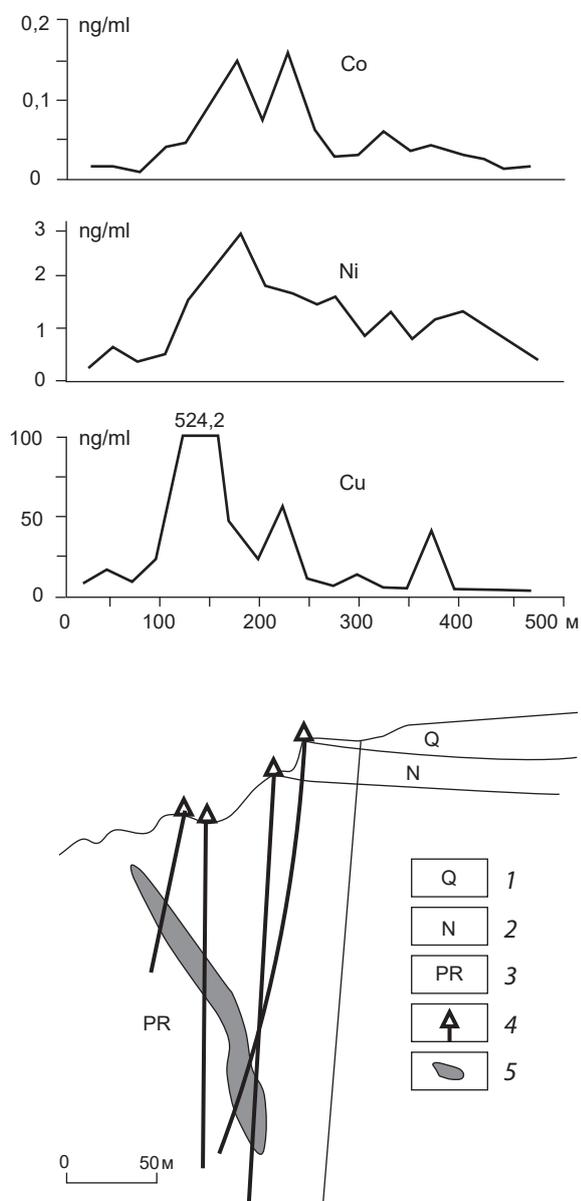


Рис. 11. Распределение металлов по данным опробования подпочвенной атмосферы над медно-никелевым месторождением Лашуйся, Китай [17]:

1 – лёссы; 2 – песчаники; 3 – кварцевые сланцы; 4 – скважины; 5 – рудное тело

Fig. 11. Distribution of metals based on the sampling of the subsoil atmosphere over the copper-nickel deposit of Lashuixia, China [17]:

1 – loess; 2 – sandstone; 3 – quartz shale; 4 – wells; 5 – orebody

H_2 , CO_2 , CH_4 , Hg, галогены и др.) и литохимических ореолов главных рудообразующих элементов (Au, U, Pb, Zn, Cu и др.). Данные опытно-методических работ на многих месторождениях различного генезиса позволяют предположить, что образование ореолов этих двух групп компонентов рудообразующей среды протекает по единому механизму. Совместная миграция кластеров металлов и газов к дневной поверхности в итоге обуславливает их разгрузку в атмосферу, вследствие чего в приземном слое воздуха образуются атмосферические ореолы подобно тому, как это зафиксировано для йода и ртути. Такой подход к постановке поисковых работ позволит сократить влияние технических погрешностей, связанных с воздействием на состав подземной атмосферы бурения скважин и принудительного пробоотбора. Данные изучения динамики газообмена пород с атмосферой показывают, что распределение содержания газов по глубине в приповерхностном слое земли периодически изменяется в зависимости от метеоусловий, что обуславливает плохую воспроизводимость первичных и повторно-контрольных наблюдений на выявленных аномалиях, тогда как их содержание на границе раздела земля–воздух постоянно. Воздушные потоки увеличивают площадь аномальной области, уменьшая среднее содержание газовых индикаторов, однако продуктивность газовых ореолов остаётся постоянной.

Развитие аналитической техники позволяет предположить, что в недалёком будущем для обнаружения погребённых рудных месторождений по их газовым ореолам в приземном слое атмосферы будет использоваться аналитическая аппаратура, подобная лидарам и корреляционным спектрометрам. В настоящее время лидары с дифференциальным поглощением активно применяются для мониторинга состава атмосферы.

Список литературы

1. Алексеев С. Г., Ворошилов Н. А., Вешев С. А., Штокаленко М. Б. Опыт использования назложенных ореолов рассеяния при прогнозе



- и поисках месторождений на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 93–99.
2. Воробьёв С. А., Симакин А. Г. Миграция газов в атмосферических ореолах рассеяния // Вестник Московского государственного университета. Серия Геология. – 1986. – № 2. – С. 47–55.
 3. Воробьёв С. А. Структура и состав наложенных ореолов погребённых трубок Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Якутия). – М. : ИМГРЭ, 2013. – С. 368–378.
 4. Досанова Б. А., Колесников В. Н., Воробьёв С. А. Атмосферические поиски погребённых месторождений // Разведка и охрана недр. – 1979. – № 1. – С. 23–26.
 5. Дудик А. М., Воробьёв С. А. Структура геохимического поля акватории Прикерченского шельфа Чёрного моря в районе Субботинского нефтяного месторождения. Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Региональные геохимические работы как основа для оценки рудоносности и нефтегазосности территории». – М. : ИМГРЭ, 2015. – С. 41–42.
 6. Мильяев С. А., Чекваидзе В. Б. Соотношения вторичных ореолов рассеяния и ионно-потенциметрических аномалий в сложных ландшафтно-геологических условиях // Разведка и охрана недр. – 2013. – С. 73–77.
 7. Мильяев С. А., Кряжев С. Г., Виленкина Ю. В. Поиски полиметаллических месторождений в сложных ландшафтно-геологических обстановках по наложенным ореолам рассеяния // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 1. – С. 39–45.
 8. Соколов С. В., Марченко А. Г., Макарова Ю. В. Геологическая эффективность геохимических поисков методом анализа сверхтонкой фракции // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 54–58.
 9. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М. : Недра, 1990. – 336 с.
 10. Трофимов Н. Н., Рычков А. И. Геохимические поиски рудных месторождений по газовым ореолам йода // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Инженерные исследования. – 2010. – № 1. – С. 45–50.
 11. Cao J. Migration mechanisms of gold nanoparticles explored in geogas of the Hetai ore district, southern China // *Geochemical Journal*. – 2011. – Vol. 45. – P. 9–13.
 12. Cao J., Li Y. K., Tao Jiang, Guai Hu. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere // *Supplement of Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – № 15. – P. 6959–6969.
 13. Lafleur P. Cost-effective helium surveys in uranium exploration. – 2014. – URL : <https://www.gasoilgeochem.com/helium.html>.
 14. Lintern M. J. Natural gold particles in Eucalyptus leaves and their relevance to exploration for buried gold deposits // *Nature Communications*. – Doi: 10.1038/ncomms3614.
 15. Mann A. W. Ligand Based Soil Extraction Geochemistry // *Proceedings of Exploration. Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. – 2007. – P. 281–289.
 16. Wang X., Lu Y., Xuejing X. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in the search for buried deposits (in Chinese) // *Geophysical and Geochemical Exploration*. – 1995. – Vol. 19, I. (3). – P. 161–171.
 17. Wei X., Cao J., Holub R. F., Hopke P. K., Zha S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead zinc deposit. Guangdong Province, South China // *Journal Exploration*. – 2013. – № 128. – P. 124–135.
 18. Zhang J., Cheng Z. Z., Lun Z. Y. [et al.]. Soil Air Carbon Dioxide, Sulphur Dioxide and Hydrogen Sulfide Measurements as a Guide to Concealed Mineralization // *Geological Science and Technology Information*. – 2016. – Vol. 35 (4). – P. 12–17.
 19. Zhou S. C., Liu X. H., Tong C. H. [et al.] Application Research of Geogas Survey in Prospecting Concealed Ore // *Acta Geologica Sinica*. – 2014. – Vol. 88 (4). – P. 736–754.

References

1. Alekseev S. G., Voroshilov N. A., Veshev S. A., Shtokalenko M. B. Opyt ispol'zovaniya nalozhennykh oreolov rasseyaniya pri prognoze i poiskakh mestorozhdenii na zakrytykh territoriyakh [Experience of using superimposed scattering halos in forecasting and prospecting for deposits in closed

- territories], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2008, No 4–5, pp. 93–99. (In Russ.).
2. Vorobyev S. A., Simakin A. G. Migratsiya gazov v atmokhimicheskikh oreolakh rasseyaniya [Migration of gases in atmochemical scattering halos], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4. Geologiya [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology]*, 1986, No 2, pp. 47–55. (In Russ.).
 3. Vorobyev S. A. Struktura i sostav nalozhennykh oreolov pogrebennykh trubok Alakit-Markhinskogo kimberlitovogo polya (Yakutiya) [Structure and composition of super-imposed halos of buried tubes of the Alakit-Markhinsky kimberlite field (Yakutia)], Moscow, IMGRE Publ., 2013, pp. 368–378.
 4. Dosanova B. A., Kolesnikov V. N., Vorobyev S. A. Atmokhimicheskie poiski pogrebennykh mestorozhdenii [Atmochemical searches of buried deposits], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 1979, No 1, pp. 23–26. (In Russ.).
 5. Dudik A. M., Vorobyev S. A. Struktura geokhimicheskogo polya akvatorii Prikerchenskogo shel'fa Chernogo morya v raione Subbotinskogo neftyanogo mestorozhdeniya. Tezisy докладов Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Regional'nye geokhimicheskie raboty kak osnova dlya otsenki rudonosnosti i neftegazonosnosti territorii» [The structure of the geochemical field of the water area of the Prikerchensky shelf of the Black Sea in the area of the Subbotinsky oil field. Abstracts of the reports of the All-Russian scientific and Practical conference «Regional geochemical work as a basis for assessing the ore and oil and gas potential of the territory»], Moscow, IMGRE Publ., 2015, pp. 41–42.
 6. Milyaev S. A., Chekvaidze V. B. Sootnosheniya vtorichnykh oreolov rasseyaniya i iono-potentsiometricheskikh anomalii v slozhnykh landshaftno-geologicheskikh usloviyakh [Ratios of secondary scattering halos and ion-potentiometric anomalies in complex landscape-geological conditions], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2013, pp. 73–77. (In Russ.).
 7. Milyaev S. A., Kryazhev S. G., Vilenkina Yu. V. Poiski polimetallicheskikh mestorozhdenii v slozhnykh landshaftno-geologicheskikh obstanovkakh po nalozhennym oreolam rasseyaniya [Search for polymetallic deposits in complex landscape-geological settings by superimposed scattering halos], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2019, No 1, pp. 39–45. (In Russ.).
 8. Sokolov S. V., Marchenko A. G., Makarova Yu. V. Geologicheskaya effektivnost' geokhimicheskikh poiskov metodom analiza sverkh-tonkoi fraktsii [Geological efficiency of geochemical prospecting by the method of hyperfine fraction analysis], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2008, No 4–5, pp. 54–58. (In Russ.).
 9. Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh [Handbook of geochemical prospecting of minerals], Moscow, Nedra Publ., 1990, 336 p.
 10. Trofimov N. N., Rychkov A. I. Geokhimicheskie poiski rudnykh mestorozhdenii po gazovym oreolam ioda [Geochemical searches of ore deposits by gas halos of iodine], *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya Inzhenernye issledovaniya [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Engineering Research Series]*, 2010, No 1, pp. 45–50. (In Russ.).
 11. Cao J. Migration mechanisms of gold nano-particles explored in geogas of the Hetai ore district, southern China, *Geochemical Journal*, 2011, V. 45, pp. 9–13.
 12. Cao J., Li Y. K., Tao Jiang, Guai Hu. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere, *Supplement of Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, No 15, pp. 6959–6969.
 13. Lafleur P. Cost-effective helium surveys in uranium exploration, 2014, URL: <https://www.gasoil-geochem.com/helium.html>.
 14. Lintern M.J. Natural gold particles in Eucalyptus leaves and their relevance to exploration for buried gold deposits, *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms3614.
 15. Mann A. W. Ligand Based Soil Extraction Geochemistry, *Proceedings of Exploration. Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 2007, pp. 281–289.
 16. Wang X, Lu Y., Xuejing X. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in the search for buried deposits (in Chinese), *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, V. 19, I. (3), pp. 161–171.



17. Wei X., Cao J., Holub R. F., Hopke P. K., Zha S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead zinc deposit. Guangdong Province, South China, *Journal Exploration*, 2013, No 128, pp. 124–135.
18. Zhang J., Cheng Z. Z., Lun Z. Y. [et al.] Soil Air Carbon Dioxide, Sulphur Dioxide and Hydrogen Sulfide Measurements as a Guide to Concealed Mineralization, *Geological Science and Technology Information*, 2016, V. 35 (4), pp. 12–17.
19. Zhou S. C., Liu X. H., Tong C. H. [et al.] Application Research of Geogas Survey in Prospecting Concealed Ore, *Acta Geologica Sinica*, 2014, V. 88 (4), pp. 736–754.

Авторы

Воробьёв Сергей Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент¹
vorobjov@geol.msu.ru

Миляев Сергей Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник²
milyaev@tsnigri.ru

¹ Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

² ФГБУ «Центральный научно-исследовательский
геологоразведочный институт цветных
и благородных металлов», г. Москва, Россия

Authors

Sergey A. Vorobyev

PhD
Docent¹
vorobjov@geol.msu.ru

Sergey A. Milyaev

PhD
Leading Researcher²
milyaev@tsnigri.ru

¹ Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

² Central Research Institute of Geological Prospecting
for Base and Precious Metals (FSBI TsNIGRI),
Moscow, Russia