

### 7.3. ГЕОХИМИЯ БЛАГОРОДНЫХ, РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКЗОГЕННЫХ РУДОФОРМИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

---

В этом разделе рассмотрены результаты исследований по экзогенной геохимии, а заключительный очерк посвящен аналитической геохимии.

К решению проблем по экзогенной геохимии золота, редких и радиоактивных элементов Ф.Н. Шахов привлек большой научный коллектив. Этой фундаментальной проблемой в разные годы занимались Г.Н. Аношин, В.А. Бобров, Б.А. Воротников, В.М. Гавшин, С.М. Жмодик, В.П. Ковалёв, Ф.П. Кренделев, Р.Д. Мельникова, Г.В. Нестеренко, С.Р. Осинцев, Л.К. Павлова, Л.М. Попова, Н.А. и Н.В. Росляковы, Ф.В. Сухоруков, В.М. Цибульчик, В.Г. Цимбалист, Г.Г. Шалмина, Б.Л. Щербов и др.

Основные идеи Ф.Н. Шахова в области экзогенной геологии и геохимии включали проблемы теоретического и прикладного значения, в том числе:

- экзогенная геохимия рудообразующих систем месторождений редких, радиоактивных и благородных элементов;
- картирование и оценка рудных месторождений по их окисленным выходам (зонам окисления и глинистым корам выветривания);
- создание новых и совершенствование существующих геохимических методов поисков рудных месторождений.

Позже результаты исследований по геохимии гипергенеза способствовали становлению и развитию нового научного направления — экогеохимии.

С учетом современной аналитической основы отчетливо выделяются несколько научных направлений, каждое из которых характеризуется не только специфическими методами и подходами исследования, но и разными в геологическом и генетическом отношении объектами изучения: зоны окисления сульфидных и золоторудных месторождений, золотоносные коры выветривания; редкометалльные коры выветривания; ураноносные коры выветривания; золотоносные и редкометалльные россыпи; подземные и поверхностные воды рудных полей и месторождений, в том числе водные вытяжки и поровые растворы окисленных руд, перекрывающих их рыхлых отложений и почв золоторудных месторождений.

По каждому из этих объектов сотрудниками отдела геохимии получены оригинальные материалы, нередко впервые опубликованные в сериях журнальных статей, тематических сборниках научных трудов, материалах всесоюзных и международных совещаний и ряде монографий.

### ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ И ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ЗОЛОТОНОСНЫЕ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

---

*Ю.А. Калинин, Н.А. Росляков*

Зоны окисления сульфидных месторождений сыграли важную роль в горно-рудной промышленности Сибири. Они формируются при активном участии сернокислых процессов на фоне региональных факторов. Ф.Н. Шахов (1960) рассматривал их как особый, частный случай коры выветривания.



Сотрудники лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии поздравляют с юбилеем В.М. Гавшина

К моменту постановки исследований по геологии и геохимии зон окисления сульфидных месторождений имелось достаточно большое количество публикаций, в том числе ряд известных монографий (Loke, 1926; Эммонс, 1935; Смирнов, 1955; и др.). Несмотря на это, Ф.Н. Шахов поручил исполнение данной темы Н.А. Рослякову, который под его руководством разработал методику и провел геолого-геохимическое картирование окисленных рудных выходов основных минералогических типов полиметаллических месторождений Западного Алтая. В 1970 г. под редакцией Ф.Н. Шахова вышла монография Н.А. Рослякова «Зоны окисления сульфидных месторождений Западного Алтая». На детальной геологической основе была разработана унифицированная легенда, включающая все многообразие окисленных руд и околорудных пород региона, претерпевших сернокислотное выветривание. Впервые рассмотрен баланс вещества при формировании основных морфологических разновидностей рудного выхода, их связи с минеральным составом первичных руд и положением рудных тел. Большое внимание уделено формам нахождения, условиям миграции и гипергенной концентрации рудообразующих элементов и их спутников при формировании окисленных рудных выходов. В сферу обсуждения были включены: Cu, Pb, Zn, As, Ba, Sb, Ag, Co, Ni, Cd, In, Ga, Mo, Sn, Bi, Tl, Sc, Se, Te, Y, W, V, Hg, Ti, Mn, P. Описание такого широкого спектра элементов в процессах сернокислотного выветривания в литературе было приведено впервые.

Зоны окисления золоторудных месторождений были изучены слабее, чем сульфидных. Особенности их геохимии описаны Е. Данном (1929), В. Эммонсом (1935), О.Е. Звягинцевым (1941), Д.С. Крейтером (1941), Т.Н. Шадлун

(1948), Ф.В. Чухровым (1950), М.Н. Альбовым (1960) и др. Изучались главным образом окисленные руды, выветрелые околорудные породы из-за отсутствия чувствительных методов определения золота оставались неисследованными, поэтому не был определен баланс благородного металла в зоне гипергенеза. Поставленные в отделе геохимии прецизионные методы анализа золота позволили восполнить этот пробел, а также получить количественные данные по поведению золота в покровных рыхлых отложениях, почвах, поровых растворах и водах золоторудных полей Сибири, Казахстана, Средней Азии. Результаты изложены в монографии Н.А. Рослякова «Геохимия золота в зоне гипергенеза» (1981), высоко оцененной коллегами.

Резюмируя итоги геолого-геохимических исследований поведения породообразующих и рудных элементов в сернокислых процессах, сформировавших все морфологическое и минеральное многообразие зон окисления, можно констатировать следующее.

1. Гипергенное преобразование полиметаллических и золоторудных тел и вмещающих их околорудных пород связано в первую очередь с окислением сульфидов и приводит к образованию закономерного сочетания осветленных, окремненных, лимонитизированных и других морфологических типов пород, специфичных только для зон окисления (Шахов, 1960).

2. В сернокислом процессе золото и сопутствующие металлы интенсивно перераспределяются, мигрируя из одних горизонтов и накапливаясь в других, что контролируется, прежде всего, сульфидностью первичных руд, рН и Eh гипергенных растворов. Зоны окисления различных морфологических типов золоторудных месторождений с повышенным содержанием сульфидов по распределению золота характеризуются в общем сходной вертикальной зональностью с развитием (снизу вверх): зоны вторичного золото-сульфидного обогащения, зоны окисления с подзонами окисленных руд цветных металлов, вторичного золотого обогащения и приповерхностного выщелачивания золота. Средний коэффициент концентрации золота в этих горизонтах варьирует в пределах 2–30; 1–1,5; 1–10; 0,2–0,5 соответственно.

3. В зависимости от стадии развития зоны окисления в ее формировании кроме сернокислотного процесса участвуют и другие эпигенетические гипергенные процессы окислительного ряда (по А.И. Перельману, 1965): кислый, нейтральный карбонатный, хлоридно-сульфатный, содовый. Наиболее благоприятными условиями для вторичной концентрации золота являются нейтральные и слабощелочные среды. Слабокислые и щелочные окислительные условия способствуют активной миграции золота, что рекомендовано учитывать при интерпретации вторичных геохимических аномалий при геохимических методах поисков (Росляков, 1976).

4. Под руководством Ф.Н. Шахова создана методика геолого-геохимического картирования окисленных рудных выходов и гипергенных аномалий с целью оценки глубины зоны окисления, состава и промышленной значимости ее первичного оруденения. Разработаны унифицированная легенда для крупномасштабных карт окисленных рудных выходов полиметаллических, серноколчеданных, медно-пирротиновых, золоторудных месторождений и принципы прогноза эндогенного оруденения по морфологическим и геохимическим критериям окисленных выходов (Росляков, 1960, 1964, 1970; Росляков, Рослякова, 1965, 1967, 1968, 1990; Roslyakov, Roslyakova, 1986). Картирование зон окисления в старых золоторудных районах позволило возродить к жизни ряд месторождений в Восточном Забайкалье (Апрелково, Дель-



мачик, Козловское, Ключевское, Погромное), на Салаире (Апрельское и Июньское), в Казахстане (Жолпак-Тюбе, Кенгир).

5. Опыт изучения зон окисления региона и мировая практика показывают, что, несмотря на многовековую эксплуатацию и относительно легкую открываемость окисленных рудных выходов, перспективы их золотоносности не исчерпаны. Весьма интересны в этом отношении Рудный Алтай, Кузнецкий Алатау, Салаир и Восточное Забайкалье. Здесь известно более 2000 рудопроявлений, относящихся к разным морфологическим и формационным типам, но в подавляющем большинстве не получивших даже предварительной оценки. Отсюда следует, что проблема золотоносных зон окисления остается актуальной. Вместе с тем наибольшие перспективы следует связывать с другими разностями гипергенных образований — с золотоносными глинистыми корами выветривания.

Золотоносные, чаще глинистые, коры выветривания в понимании Ф.Н. Шахова (1998, с. 50) представляют собой «латеритового типа красный железистый элювий зоны окисления на участках рассеянной сульфидной минерализации». Золотоносные коры выветривания являются продуктами выветривания минерализованных пород с невысоким содержанием золота и сульфидов, практически не оказывающих влияния на макросостав региональных гипергенных растворов. Элювий «латеритового типа» долгое время оставался вне поля зрения исследователей или относился к «элювиальным россыпям». Глинистый элювий привлек внимание геологов сравнительно недавно, после открытия в 1976 г. в огнеупорных глинах линейно-карстовой коры выветривания Апрельского месторождения (Северо-Восточный Салаир) концентраций золота до 10 г/т (Росляков и др., 1978, 1982). Одним из принципиальных результатов многолетних исследований представляется выделение нетрадиционного типа месторождений золота в каолиновых корях выветривания, развитых по слабо золотоносным минерализованным зонам. Специфика их в том, что они, с одной стороны, представляют собой глинистые продукты выветривания со свободным и связанным золотом, с другой — имеют значительные мощности, линейные масштабы и широкую распространенность. В настоящее время на нетрадиционные геолого-промышленные типы месторождений золотоносных кор выветривания приходится 0,95 % мировых запасов.

Результаты исследований золотоносных кор выветривания Сибири каолинового профиля сведены в двух монографиях (Росляков и др., 1995; Калинин и др., 2006) и цикле статей и могут быть сформулированы в тезисной форме:

1. Морфология мел-палеогеновых золотоносных кор выветривания юга Сибири достаточно многообразна, однако обладает рядом общих особенностей, позволяющих проводить сопоставление профилей выветривания разных геолого-тектонических структур юга Сибири, Казахстана и Урала. Прежде всего, морфологический тип определяется минеральным составом экзогенных новообразований и количественными соотношениями среди минералов групп каолинит-гидрослюдистого ряда, гидроксидов железа и реже марганца. Формирование ассоциаций гипергенных минералов эволюционировало как во времени, так и в пространстве, что проявляется в латеральной и горизонтальной зональности, выраженной в смене ассоциаций, соответствующих конкретным физико-химическим условиям гипергенного минералообразования. В корях выветривания линейно-карстового типа эта зональ-



ность осложнена материалом местного переотложения. Разработана систематика золотоносных кор выветривания, количественно отражающая источник первичного золота (Росляков, 2004).

2. Месторождения формации золотоносных кор выветривания формируются за счет первичных руд, а также за счет гипергенного концентрирования золота эндогенных ореолов месторождений, рудных полей и слабо золотоносных минерализованных зон. Ассоциация месторождений и проявлений золотоносных кор выветривания образует самостоятельный промышленно-генетический тип экзогенных месторождений золота, эквивалентных в геологическом отношении самостоятельной экзогенной золоторудной формации (Калинин и др., 2006). Все изученные месторождения формации золотоносных кор выветривания пространственно расположены в горно-складчатом обрамлении Западно-Сибирской плиты — наиболее крупной структурно-тектонической единицы Сибири, в переходной от гор к равнине геоморфологической зоне.

3. Расширены теоретические основы гипергенной геохимии золота, в частности, реализации геохимических барьеров и процессов метасоматического замещения и растворения золотоносных пород при выветривании (Калинин, Росляков, 2000). На базе фактических материалов по большому региону создана геолого-генетическая модель гипергенного концентрирования золота в различные этапы развития кор выветривания линейно-карстового типа (Калинин, Росляков, 2003). Главными факторами этой модели являются: а) общий уровень золотоносности и формы нахождения благородного металла в исходном субстрате, определяющие возможность его перехода в подвижное состояние; б) форма миграции золота в зависимости от направленного изменения физико-химических параметров в системе вода–порода; в) геохимические барьеры на пути миграции подвижных форм золота.

- В формировании золотоносных кор выветривания участвуют россыпеобразующее (нерастворимое) золото и его потенциально подвижные формы — тонкодисперсное золото, содержащееся в сульфидах и пороодообразующих минералах-концентраторах. Соотношение этих разновидностей золота во многом определяется общим уровнем золотоносности, которая, как известно, в свою очередь контролируется сульфидностью руд и их составом.

- В процессах миграции золота в условиях зоны гипергенеза рудных полей участвует большое разнообразие его неорганических и органокомплексов, состав которых эволюционирует с глубиной и по мере удаления от рудного выхода (Росляков, 1981, 1986; Росляков, Цимбалист, 1988; Росляков и др., 1971, 1972, 1988; Кулебакин и др., 1977; Семьехин, Росляков, 1983; Roslyakov, 1983). Дальность миграции неорганических комплексов с золотом определяется устойчивостью самих комплексов в зависимости от меняющихся физико-химических параметров растворов по мере их продвижения в глубь и на периферию профиля выветривания. Оно мигрирует на десятки и даже сотни метров и постепенно накапливается в определенных, как правило, небольших по мощности горизонтах.

В эволюции кор выветривания золотоносность грунтовых растворов обусловлена либо выветриванием гидротермально измененных пород с аномальным содержанием золота, либо окислением золоторудных тел. Обогащение вод золотом и сопутствующими ему рудными компонентами происходит на всех стадиях развития зоны гипергенеза, включая современную. Отличительной особенностью собственно рудоносных вод являются значи-



тельные вариации их рН, Eh и металлоносности во времени и пространстве. Для гидрогенного минералообразования, в том числе и золотого, благоприятными являются горизонты смешивания восходящих потоков подземных вод с богатыми кислородом и активными в физико-химическом отношении нисходящими грунтовыми.

С изменением физико-химических палеоусловий среды меняется миграционный ряд элементов и место в них золота.

- Гипергенное концентрирование золота контролируется геохимическими барьерами, ведущими из которых являются восстановительный и щелочной. На восстановительном барьере в зоне застойных вод образуются горизонты вторичного золотого обогащения с мощностью в первые метры. При устойчивом режиме уровня грунтовых вод и длительном формировании элювия в этом горизонте возникают гипергенные руды с выделением самородного золота и коэффициентом концентрации до 100 и более. Столь же важное значение для гипергенного рудного концентрирования золота имеет щелочной барьер — место встречи приповерхностных золотоносных кислых растворов с грунтовыми щелочными водами. Электрохимический барьер способствует облагораживанию и укрупнению первичного золота и осаждению на нем вторичного металла, что часто наблюдается в самых различных фациях гипергенной зоны.

В итоге в золотоносной коре выветривания формируется несколько обогащенных золотом горизонтов. Наиболее выраженные из них — горизонт золото-сульфидного обогащения (в основании коры выветривания) и горизонт золотого обогащения (вблизи современного уровня грунтовых вод). Самые богатые золотом — многоэтапные коры выветривания, особенно в случае наложения гипергенного золота на его эндогенные золоторудные столбы.

С учетом данных, полученных по микроскопии золота зон окисления, перекрывающих их покровных рыхлых отложений и почв (Росляков, 1981; Нестеренко и др., 1985), есть основание констатировать, что в гипергенной зоне золоторудных полей и месторождений золото находится в форме остаточных (эндогенных), гипергенно образованных и преобразованных самородных частиц. Новообразования гипергенного (нового) золота представлены губчатыми, пленочными и жилкообразными выделениями и часто формами свободного роста: микрокристаллами и их сростками, нередко со вторичными рудными минералами. Микронные частицы золота присутствуют во всех вторичных минералах, но главными его концентраторами являются гетит, гидрогетит, пиролюзит, ярозит, скородит, самородная сера и гипс.

Выделяются три главных типа гипергенного золота: 1) очень высокопробное (990–1000 ‰), гомогенное, образованное за счет распада галогенидных, главным образом хлоридных ( $\text{AuCl}_2$ ), его комплексов; 2) негемогенное высокопробное и очень высокопробное (850–985 ‰), образованное в результате распада тиосульфатных комплексов золота и серебра (типа  $\text{AuAg}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ ). Оно встречено в низах зоны окисления (железной шляпы) колчеданного золотосодержащего месторождения Майкаин, в подзоне вторичного золотосульфидного обогащения, в тесной ассоциации с золото-серебряным сульфидом (петровскаитом)  $\text{AuAg}(\text{S},\text{Se})$ , открытым Г.В. Нестеренко и др. (1985); 3) «горчичное» очень низкопробное золото, распространено по всему разрезу гипергенной зоны как результат разложения собственных минералов: теллуридов, аурустибита, сульфидов.

Процессы гипергенного преобразования самородного россыпеобразующего золота выражены прежде всего в облагораживании за счет выщела-

чивания из золотин Ag, Hg и Cu и образования в них высокопробных межзерновых прожилков и кайм разной толщины, вплоть до полного «очищения» частиц благородного металла. Каймы, кроме того, могут быть следствием осаждения высокопробного золота из гипергенных грунтовых растворов, сформированных преимущественно за счет тонкодисперсного невидимого золота. В этом случае их следует рассматривать как морфологическую разновидность гипергенного золота.

4. Важнейшей геохимической особенностью латеритных кор выветривания, сохранившихся в Сибири на локальных площадях, является глубокое преобразование пород и руд, приводящее к максимальному высвобождению большинства химических элементов и вовлечению их в процесс миграции. В полной мере это относится и к золоту. Характер поведения золота в латеритных профилях выветривания аналогичен таковому в каолиновых, различаясь масштабами перераспределения за счет более интенсивной степени выветривания. При латеритообразовании происходит дифференциация не только кремнезема и глинозема, но и глинозема с золотом. Глинозем в средах с наиболее вероятностными значениями для грунтовых вод  $E_h > 0,3В$  и  $pH = 4-8$  обладает очень низкой растворимостью. Кремнезем и золото в этих условиях подвижны и при испарительной концентрации накапливаются в кирасе и феррикретах в верхней части латеритного профиля. Другая часть золота мигрирует вниз к основанию профиля, образуя на восстановительном барьере горизонт вторичного золотого обогащения.

5. Получены оригинальные данные по составу самородного золота в новом нетрадиционном для России типе элювиальных месторождений золота — марганценозной коре выветривания Мурзинского месторождения на Северо-Западном Алтае (Росляков и др., 2000). Изучен механизм мобилизации, транспорта и отложения золота в корях выветривания, обогащенных гипергенными минералами марганца (Росляков и др., 2005). Здесь, в отличие от каолиновых кор выветривания, существенную роль играет гипергенное высокопробное золото. При его отложении отчетливо проявились окислительный и сорбционный барьеры. Образовавшиеся на кислородном барьере инфильтрационные оксид-гидроксидные скопления Mn, своеобразные гипергенные «чернушки» марганцевых руд, создавали, в свою очередь, два геохимических барьера — сорбционный и окислительный. Благодаря высокой сорбционной способности они накапливали некоторые катионы металлов (Ni, Co и др.), а по причине высокого окислительного потенциала оксидных соединений  $Mn^{4+}$  способствовали осаждению золота, источником которого являются золотоносные сульфиды скарнов.

6. Экзогенная золотоносная система наследует главные минералогеохимические особенности эндогенного золотого оруденения региона, которые обусловлены составом и строением структурно-вещественных комплексов. В корях выветривания совместно с золотом нередко до рудных концентраций накапливаются: Al, Fe, Mn, Ag, Pt, Ir, Pd, Ni, Pb, Zn, Cu, TR. Постоянно в повышенных количествах присутствуют Ti, реже Zr, Cd, Hg, As, Sb, Mo, Se. В то же время с различной интенсивностью из продуктов выветривания вынесены U, Th, Sn, Sr и др. Эти элементы-мигранты в зоне влияния корообразующего субстрата могут накапливаться на геохимических барьерах. Для радиоактивных элементов таковыми служат торфяники и донные осадки, где содержание урана в золе торфа варьирует в пределах 10–900 г/т, в илистом осадке его основания — 100–3800 г/т (Росляков и др., 2005).



7. В южных районах Западной Сибири широко развиты глеевые и окислительные неоэлювиальные процессы неоген-четвертичной эпохи. Неоэлювий представлен продуктами карбонатизации, лимонитизации, декаолинизации и соленакопления. Под действием неоэлювиальных процессов происходит перераспределение золота и сопутствующих ему металлов. В золотоносных полях в результате неоэлювиальных процессов формируются главным образом вторичные ореолы рассеяния металлов в покровных отложениях, почвах и водах, идет новообразование золота в отработанных россыпях и формируются его высокопробные каемки в золоте древней коры выветривания и россыпей. В палеодолинах Урало-Сибирской ураноносной провинции неоэлювиальные процессы благоприятствуют формированию гипергенных месторождений урана (Росляков и др., 2009).

8. Создано новое научное направление, пророзливо предсказанное Ф.Н. Шаховым, — «геология и геохимия глинистых кор выветривания как производных гипергенного преобразования эндогенной золоторудной минерализации». Обрамление Западно-Сибирской плиты выдвинуто как новая золоторудная провинция месторождений золота в корах химического выветривания (Росляков и др., 1994; Калинин и др., 1999). В бокситовых месторождениях Тургайского прогиба выявлены граммовые до промышленных концентрации золота и серебра (Рослякова, Росляков, 2005). Появилось достаточно данных, свидетельствующих о высокой подвижности, перераспределении и возможности гипергенного концентрирования в микроразмерной форме других, традиционно «инертных» рудогенных элементов, включая платиноиды, редкие земли и металлы. Это создает теоретическую базу для разработки критериев поисков и прогноза новых нетрадиционных месторождений в корах выветривания и их коренных источников в палеодолинах.

9. Одним из принципиальных результатов многолетних исследований представляется выделение нового типа месторождений золота в каолиновых корах выветривания, развитых по слабо золотоносным минерализованным зонам, пространственно приуроченным к горизонтам и блокам карбонатных пород. Хорошие предпосылки для выявления месторождений золотоносных кор выветривания каолинового типа появились не только в Сибири, но и в России в целом. Стало понятно, что «коры выветривания различной степени проработки (включая латеритные) распространены и были распространены на территории России значительно шире, чем это предполагалось ранее» (Орлова и др., 2000).

10. Усилилось внимание исследователей к проблемам мелкого субмикронного золота в продуктах выветривания. Золотоносные рыхлые отложения так называемых «желтых» разрезов мезозойско-кайнозойских впадин Забайкалья в последние годы рассматриваются в качестве нового перспективного типа месторождений золота (Золото Бурятии, 2000). Они приурочены к палеодолинам водотоков, ортогонально секущих борта мезозойских тектонических впадин. Золотоносность «желтых» разрезов по многим признакам близка, с одной стороны, к россыпям тектонических уступов приразломных впадин, с другой — к золотоносным корам выветривания.

Особенностями оруденения этого типа являются: большие мощности золотосодержащих рыхлых отложений (десятки метров), значительные площади распространения (до сотен квадратных километров), повышенное содержание в них золота, связанного как с высокодисперсными минералами зоны гипергенеза, так и с самородными его микроноразмерными частицами



(invisible gold). Ресурсы такого золота зачастую существенно превосходят ресурсы гравитационно извлекаемого металла (Золото Бурятии, 2000). Чрезвычайно важной фундаментальной проблемой экзогенной геохимии и металлогении золота представляется реставрация условий миграции и концентрирования микроразмерных, вплоть до наночастиц, форм золота в широком диапазоне природных обстановок палеоген-четвертичного возрастного периода. Требуется выяснение диагностических признаков гипергенного генезиса золота и изучение эволюции форм его миграции в рудообразующем осадочном цикле, в том числе под влиянием вечной мерзлоты.

Исследования, проведенные в золотоносных мезозойско-кайнозойских впадинах Западного Забайкалья (Талойская, Горбылокская и др.) (Нестеренко и др., 2006; Жмодик и др., 2007; Росляков и др., 2007) показывают, что «желтые» разрезы впадин находятся в зоне формирования коры выветривания по породам с эндогенной золоторудной минерализацией. Перспективным источником золотоносности «желтых» разрезов представляется новый для Забайкалья золото-порфиновый тип минерализации (Жмодик и др., 2009). Потенциальным площадным коренным источником могут стать ультрамафит-мафитовые ассоциации, а также островодужные вулканы кислого, среднего и основного состава. Содержание золота в них достигает первые граммы на тонну.

## ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ

*Ф.В. Сухоруков, Б.Л. Щербов, С.М. Жмодик, Н.А. Росляков*

Поведению титана в процессе корообразования на метаморфических комплексах пород северной части Кузнецкого Алатау посвящена монография В.М. Цибульчика (1972), в которой на базе большого аналитического материала описано влияние первичных форм нахождения титана в исходных породах на формы его новообразований и характер перераспределения в продуктах выветривания. По мнению В.М. Цибульчика с соавт. (1983), Ф.В. Сухорукова и Б.Л. Щербова (1979, 1988), этот фактор играет важнейшую роль в гипергенной геохимии ниобия, тантала, циркония, гафния, бериллия, бора и других мало распространенных элементов. Основываясь на большом фактическом материале по геохимии редких и редкоземельных элементов в корях выветривания юга Сибири, в этих работах показано, что в процессе формирования каолиновых кор выветривания на породах с околоскарповым содержанием ниобия, тантала, циркония, гафния промышленных концентраций этих элементов в элювии не образуется. Обычно наблюдается их рассеяние в новообразованных минералах. Промышленные скопления могут формироваться в локальных участках линейных кор выветривания разной природы. Рудный элювий возникает лишь на коренных редкометалльных рудах, при этом гипергенные концентрации редких элементов обычно богаче коренных источников.



Б.А. Щербов (слева), Н.В. Резников, Л.М. Попова. Март 1988 г.

Как известно, с кайнозойскими корами выветривания карбонатитов Восточной Сибири связано 40 % запасов ниобия в России. На Белозиминском месторождении помимо минералов ниобия из руд добывают апатит. По данным Л.П. Рихванова с соавт. (2001), за рубежом ведущим геолого-промышленным типом ниобиевых месторождений тоже являются коры выветривания карбонатитов. Главный рудный минерал карбонатитов и их кор выветривания — пирохлор.

В золотоносных корях выветривания Западной Сибири наблюдается концентрирование кобальта, иттрия, иттербия (Минерагения..., 2001). С переотложенными корями выветривания генетически связаны титан-циркониевые россыпи региона, которые рекомендуются для переоценки как комплексное золото-титан-циркониевое минеральное сырье (Росляков, Калинин, 2006).

Многолетнее изучение поведения редких элементов в каолиновых корях выветривания Казахстана, Узбекистана, Украины, Тувы, Енисейского края, Салаира и Кольвань-Томской зоны позволило:

— решить полувековые споры о возможности реставрации палеосолености бассейнов осадконакопления по содержанию бора в глинистых отложениях. Показано, что глинистые минералы кор выветривания не могут обогащаться бором в элювиальном процессе до значений, характерных для морских или солоновато-водных континентальных бассейнов. Несмотря на различный характер поведения бора в элювиальных профилях, в целом при выветривании пород различного состава он выносится из кор выветривания (Щербов, 1982; Сухоруков, Щербов, 1979, 1988);

— показать впервые в теории корообразования латеральное перемещение микро- и макрокомпонентов в элювиальных процессах. Ранее поведение элементов при формировании профилей выветривания рассматривалось только как результат просачивания растворов, формирующих различные зоны коры выветривания. Исследованиями установлена закономерность: чем выше содержание элемента в исходных породах, тем выше возможность его выноса, и наоборот — чем ниже исходное содержание, тем выше вероятность накопления в элювии. Ничем иным, кроме привноса со стороны, обо-



С.М. Жмодик на обнажении кирасированной коры выветривания.  
Республика Гвинея, 2007 г.

гашение тем или иным элементом разреза коры выветривания в целом объяснить нельзя (Щербов, 1990);

– конкретизировать масштабы горизонтального перемещения материала продуктов ближнего переотложения кор выветривания. Для мезозойско-кайнозойских кор эти масштабы не превышают 1,5–2 км (Щербов, 1987);

– обосновать развитие и распространение высокопродуктивных линейных кор выветривания в пределах Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения, связанных с зонами максимальной деформированности и метасоматической проработки. В продуктах выветривания редкометалльных метасоматитов резко возрастают концентрации тантала, ниобия, редкоземельных элементов, циркония, урана и тория, что позволяет рассматривать их как высокотехнологичный тип руд, благоприятный для открытой отработки (Цибульчик и др., 1999).

Геохимия урана и тория в процессах формирования кор выветривания в литературе освещена в целом достаточно слабо. Сотрудниками отдела геохимии изучено поведение урана и тория в корах выветривания гранитоидов Среднего Урала (Шалмина, Бобров, 1972), Кольванского массива (Бобров и др., 1972), Барлакского гранитоидного массива (Гавшин и др., 1979). Показано, что уран выносится за пределы профиля в начальные стадии выветривания и накапливается в верхних горизонтах каолинового элювия, что контролируется кислотно-щелочными свойствами корообразующих растворов и преимущественно сорбционным геохимическим барьером. Комплексное изучение поведения в корах выветривания урана, тория, бериллия, бора, титана, цветных металлов и др. показало полное соответствие поведения урана и бериллия, которые мигрируют в результате карбонатного комплексобразования при выветривании гранитов. Поведение тория и титана контролируется распределением оксидного железа.

Распределение кларковых содержаний U, Th и K в корах выветривания кислых изверженных и метаморфических пород изучено Ф.П. Кренделевым



и В.А. Бобровым (1970). Наиболее детально рассмотрено поведение урана и тория в процессе формирования площадных кор выветривания гранитоидов, щелочных пород и карбонатитов на территории Восточной Сибири в монографии С.М. Жмодика (1984). Им установлено значительное разнообразие поведения этих элементов в процессе выветривания. Уран способен как накапливаться, так и мигрировать из профилей кор выветривания, образуя горизонты обогащения и истощения. Для тория наиболее характерно накопление в элювии. Высокодисперсные минералы кор выветривания аккумулируют и уран, и торий. Обогащенные глинистой фракцией горизонты элювия могут рассматриваться в качестве источника радиоактивных элементов и в условиях аридного климата могут формировать уникальные месторождения урана в калькретах и силькретах. Установлено, что существующая корреляция концентраций урана и тория с гранулометрическим составом осадочных пород закладывается на стадии формирования кор выветривания.

Накопление естественных радионуклидов до рудных концентраций в торфяниках и переотложенных продуктах коры выветривания Барлакского гранитоидного массива связано с их перераспределением под влиянием гипергенных процессов (Росляков и др., 2004).

Таким образом, установлено широкое распространение рудоносных глинистых кор выветривания в рудных районах Сибири. Они представлены преимущественно каолиновым профилем, в общем достаточно близки по морфологическим чертам и геологическому строению. Все они сформированы в зоне гипергенеза за счет выветривания эндогенного оруденения и пород с повышенным содержанием металла, определяющего минеральный тип экзогенных образований. Во всех типах экзогенных руд максимальные концентрации и существенная доля полезного компонента связаны с алевритовой и глинистой фракциями кор выветривания, сложенных глинистыми минералами и гидроксидами.

Поскольку эндогенное оруденение часто полиминеральное, его коры выветривания могут рассматриваться как объект на комплексное минеральное сырье (Цибульчик и др., 1986; Росляков, Калинин, 2006). С позиции комплексности известные моноэлементные коры выветривания Сибири изучены слабо. В региональном плане их распределение контролируется зональным размещением эндогенных рудных полей. Промышленный минеральный тип кор выветривания должен выявляться специализированным комплексным видом опробования и анализа рыхлого материала элювиальных образований.

Решая проблему рудоносности кор выветривания, представляется возможность решения обратной задачи — реставрации эндогенных источников оруденения.

---

## ЗОЛОТОНОСНЫЕ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ РОССЫПИ

---

*Г.В. Нестеренко*

Изучение источников питания и условий формирования титано-циркониевых россыпей началось Г.В. Нестеренко и В.М. Цибульчиком с основания



лаборатории Ф.Н. Шахова. Уже в 1960 г. было установлено, что источником титан-циркониевых россыпей являются акцессорные минералы гранодиоритовой интрузии; важнейшая роль в формировании россыпей принадлежит химическому выветриванию — аллювиальные россыпи образованы в древних долинах путем перемыва коры химического выветривания или продуктов ее переотложения, впоследствии россыпи переотлагались или разрушались (Нестеренко, 1962). Генетическая связь титан-циркониевых россыпей с мел-палеогеновыми корами выветривания позже подтверждена другими исследователями. Г.В. Нестеренко, В.М. Цибульчик, совместно с В.А. Даргевич (1994) рассматривают Западную Сибирь как крупную титан-циркониевую россыпную провинцию.

Вопросам поведения золота в осадочном процессе Ф.Н. Шахов (1961) придавал важное значение прежде всего в связи с проблемой круговорота благородного элемента на Земле. Он писал: «Решать эту проблему, столь близкую идее унаследованности, можно лишь при помощи тщательных геохимических исследований осадочных пород и установления способов перемещения золота в экзогенной обстановке». Несколько позднее Ф.Н. Шахов инициировал исследования поведения золота в современном осадочном процессе как часть проблемы золотоносности. Решение вопросов по геологии и геохимии золотоносных россыпей руководитель лаборатории поручил Г.В. Нестеренко, а по геохимии редких элементов в процессах коро- и россыпеобразования — В.М. Цибульчику.

Г.В. Нестеренко в монографиях «Происхождение россыпных месторождений» (1977) и «Прогноз золотого оруденения по россыпям (на примере районов юга Сибири)» (1991) показал, что поведение золота в аллювиальном процессе весьма многообразно и связано с неодинаковой подвижностью различных его форм, приводящей к зональному распределению их аккумуляций. Концентрации россыпеобразующего самородного золота, гидравлическая крупность которого превышает 7–10 см/с, формируются в речных долинах в непосредственной близости к размываемым рудным источникам. К настоящему времени они (автохтонные, пластовые россыпи) в основном отработаны. Постоянным местом аккумуляции мелкого свободного самородного (косового) металла является переходная от гор к равнинам геоморфологическая зона. В особо благоприятных условиях, выявленных Г.В. Нестеренко и В.В. Колпаковым (2008, 2009), оно может образовывать здесь достаточно концентрированные (граммы/м<sup>3</sup>), но мелкие по запасам (до десятков килограммов) скопления.

Намечаются определенные черты сходства в поведении и условиях концентрирования такого золота и тяжелых шлиховых минералов, в частности магнетита, ильменита, циркона, монацита. Исследуется проблема пространственной и генетической совмещенности в палеодолинах известных титан-циркониевых россыпей Западной Сибири с золотоносными и ураноносными (Росляков, Калинин, 2003, 2005, 2009; Калинин, Росляков, 2003, 2006).

Существенно более подвижные в аллювиальном процессе формы золота — тонкодисперсная, коллоидальная и растворенная. Соотношение их в водах транзитных рек до настоящего времени изучено слабо. По данным Г.В. Нестеренко и Б.А. Воротникова (1983), в речных водах Приморского края доля тонкодисперсного золота изменяется от 3 до 30 % при колебании общего содержания благородного металла от 0,001 до 0,007 мкг/л. Весьма распро-





страненными формами современной речной миграции растворенного золота являются комплексы типа  $[\text{Au}(\text{OH})_2]^-$  или  $[\text{AuCl}_3\text{OH}]^-$  (Воротников и др., 1973). Подобные комплексы обладают ограниченной устойчивостью, достаточно легко распадаются, вследствие чего формируются коллоидные растворы и осуществляется осаждение золота на различных сорбентах (гидроксиды железа, органика и пр.). Такое легко подвижное золото энергично выносятся из областей денудации и переходных геоморфологических зон, образуя в их пределах лишь спорадические, не имеющие практического значения слабые концентрации. Достаточно контрастные геохимические потоки рассеяния, которые используются в поисковых целях, они образуют на площадях развития золоторудной минерализации. На удалении от таких площадей фоновое содержание золота в речных водах обычно равно тысячным долям мкг/л. В песчаных, песчано-гравийных и песчано-алевритовых речных отложениях областей, удаленных от горного обрамления на первые сотни километров, содержание золота приближается к кларковому и определяется степенью золотоносности породообразующих минералов и содержанием дисперсных форм золота. Для Чулымо-Енисейской и Бийско-Барнаульской впадин (юг Западной Сибири) оно составляет 4,0 и 3,5 мг/т соответственно. Близкие значения характерны для отдельных литологических разностей отложений (галечников, песков), за исключением алевритов, региональный фон золота в которых равен 17 мг/т. Повышенная золотоносность алевритов может быть объяснена приуроченностью к переходной от гор к равнинам геоморфологической зоны аккумуляции мелкого и тонкого свободного золота.

При исследовании процессов мезозойского осадконакопления на территории Западно-Сибирской плиты преимущественно в условиях морского бассейна В.М. Гавшиным, В.А. Бобровым с соавт. (1979) аргументированно доказана гранулометрическая дифференциация в распределении радиоактивных элементов. Отчетливо наблюдается возрастание содержаний урана, тория и в меньшей степени калия от песчаников к алевролитам и далее к алевропелитам. При этом концентрации урана и тория возрастают по мере увеличения количества пелитового вещества по всему гранулометрическому спектру осадочной толщи. Пути миграции в морском осадочном процессе неодинаковы. Торий поступает в осадки в основном со взвесью, значительная часть урана осаждается из раствора. При благоприятных условиях уран формирует гидрогенные месторождения.

Каолиновые и латеритные коры выветривания могут служить источником гидрогенного и кластогенного россыпеобразующего золота. В случае когда исходные корообразующие породы сложены неустойчивыми к выветриванию золотосодержащими минералами, миграционное золото из подзон выщелачивания может поступать в область осадконакопления в начальный доэрозионный этап выветривания и в повышенных содержаниях накапливаться в нижней части осадочной толщи данного эрозионного цикла. Вероятность формирования таких гидрогенных концентраций повышается с увеличением сульфидности первичных руд и кислотности корообразующих растворов. В завершающий этап эрозионного цикла, когда денудируются горизонты вторичного золотого обогащения кор выветривания, золото транспортируется в область аккумуляции вместе с кластическим материалом и накапливается в верхней стратиграфической части пород осадочного цикла (Росляков, 1984).