

ГИДРОГЕННОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЗОЛОТА В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ РОССЫПЯХ ЕГОРЬЕВСКОГО РАЙОНА (Салаир)

Е.М. Дутова, М.Б. Букаты*, А.И. Неволько**, Д.С. Покровский***, С.Л. Шварцев*

Томский политехнический университет, 634034, Томск, просп. Ленина, 30, Россия

** Томский филиал Института геологии нефти и газа СО РАН, 634055, Томск, Академический просп., 3, Россия*

*** Региональное агентство по недропользованию по Сибирскому федеральному округу,
630099, Новосибирск, Красный просп., 35, Россия*

**** Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, Томск, пл. Соляная, 2, Россия*

По результатам исследования геохимии подземных вод Егорьевского золотоносного района и распределения в них золота предложен механизм мобилизации, миграции и накопления этого элемента в условиях горно-лесного ландшафта. Показано, что массоперенос золота является частью рудогенерирующего процесса, присущего системе вода—порода в целом. Возможность гидрогенного образования золота в россыпях определяется как физико-химическими процессами вторичного минералообразования, так и определенными гидродинамическими условиями. Количественные характеристики накопления зависят от золотообразующей способности вод, их количества, участвующего в минералообразовании, и длительности этого процесса.

Подземные воды, геохимия, золото, мобилизация, формы миграции, осаждение.

HYDROGENIC CONCENTRATION OF GOLD IN ALLUVIAL PLACERS OF THE EGOR'EVSK AREA (Salair)

E.M. Dutova, M.B. Bukaty, A.I. Nevol'ko, D.S. Pokrovsky, and S.L. Shvartsev

Based on results of studying the geochemistry and gold distribution of groundwaters in the Egor'evsk gold-bearing area, a mechanism of gold mobilization, migration, and accumulation in mountain-forest landscape is proposed. Gold mass transfer is part of an ore-generating process running in a water–rock system. Hydrogenic concentration of gold in placers is equally determined by physicochemical processes of secondary mineral formation and hydrodynamic conditions. The amounts of accumulated gold depend on the gold-producing capacity and volumes of waters involved in the mineral formation and on the duration of this process.

Groundwaters, geochemistry, gold, mobilization, form of migration, deposition

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия появились достаточные основания считать, что существенная часть россыпного золота в речном аллювии сформирована путем осаждения из водных растворов [1—5]. Такое мнение возникло благодаря изучению особенностей миграции этого элемента в природных водах разных климатических зон [6—14] и в различных минеральных новообразованиях [15—23], проведенным экспериментальным работам и физико-химическим расчетам [24, 25]. В то же время масштабы гидрогенного концентрирования золота в зоне гипергенеза, в целом, и в россыпях, в частности, остаются слабоизученными, хотя эти вопросы в той или иной степени рассматривались во многих из названных работ. В этой связи, на наш взгляд, весьма полезным и перспективным является привлечение современных научных представлений о системе вода—порода, рассмотренных в работах [26—28], и возможностей компьютерного моделирования [29, 30], способствующих более глубокому пониманию физико-химических процессов, происходящих в зоне гипергенеза, и расширяющих методологическую базу количественной оценки геологической деятельности подземных вод, и выявление особенностей и механизмов формирования гипергенных продуктов.

Ранее, на примере Центрального рудного поля, где проявлено главным образом золото-кварцевое оруденение в гранитоидах, нами было показано, что мобилизация золота является частью общего рудогенерирующего процесса, присущего системе вода—порода. Извлечение золота в воды из слаборастворимых водовмещающих пород составляет при этом в среднем десятые доли нг/дм³, а его гидрогенное концентрирование хотя и имеет место, но с практической точки зрения малорезультативно [12].

Настоящая работа продолжает исследование и имеет целью расширение представлений о поведении золота в экзогенных процессах на территории, характеризующейся повышенной растворимостью водовмещающих пород и наличием золото-сульфидной минерализации, а также оценку масштабов обогащения вод и гидрогенного концентрирования золота в россыпях. В качестве объекта исследований выбран хорошо изученный в геохимическом отношении Егорьевский золотоносный район (рис. 1). Как

Рис. 1. Обзорная карта района исследований.

золотоносный он известен с момента открытия в 1830 г. первой россыпи золота, а впоследствии неоднократно привлекал внимание многих геологов (А.Я. Булытников, Б.Ф. Сперанский, И.В. Дерби-ков, В.В. Сыроватский, Е.А. Пономарев, В.Г. Свиридов, В.В. Не-чаев, А.И. Казеннов, В.Д. Мисюк, Э.И. Большаков, Ю.Г. Щербаков, Н.А. Росляков, Г.В. Нестеренко, А.И. Неволько, В.И. Беляев, Л.Ф. Крапивко, А.В. Валуев, Ю.А. Калинин и многие другие).

Для решения поставленных задач использованы результаты проведенных нами ранее поисковых исследований, в процессе кото-рых на обширной территории отбирались тысячи водных проб. В частности, только под руководством одного из авторов данной статьи проведены полевые работы на площади около 2,5 тыс. км² и опробовано порядка 3 тыс. водопроявлений [31]. Пробы отбирались из водотоков, родников, скважин. В каждой пробе определялся макро- и микрокомпонентный состав воды. Изучался, хотя и с мень-шей детальностью, газовый, органический, микробиологический и изотопный состав вод. Аналитические определения, в большинстве своем, выполнялись в Проблемной гидрогеохимической лаборатории ТПУ. Определения быстро меняющихся компонентов проводились непосредственно у водопунктов, а общий химический анализ осуществлялся в течение суток после отбора проб в полевой лаборатории. Золото анализировалось нейтронно-активационным методом [7] из концентратов на активированном угле с пределом обнаружения 0,2 нг/л в Центральной лаборатории МинГео УзССР. Кроме гидрогеохимических проводились лито-геохимические, минералогические, морфоструктурно-гидрогеологические и гидрометрические иссле-дования.

Наряду с анализом результатов съемочных работ, для изучения гидрогеохимических процессов и получения представления о формах миграции золота и о способности вод к его гидрогенному минерало-образованию выполнены физико-химические расчеты и моделирование взаимодействий в системе вода—порода [32], для чего использовались программный комплекс HG32 [30] и пакет программ Селектор-С [29]. Изучены фондовые и опубликованные материалы производственных и научных организаций по россыпной золотоносности района (ПГО „Новосибирскгеология“ и „ЗапСибЗолото“, ОИГТМ СО РАН, г. Новосибирск).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В структурном отношении Егорьевский золотоносный район расположен на северо-западном крыле Салаирского мегаантиклинория. Главный водораздел Салаира на 150—300 м возвышается над соседними структурами Кузнецкой межгорной впадины и Западно-Сибирской плиты и распределяет между ними региональный сток хорошо развитой гидрографической сети бассейнов рек Бердь и Иня (см. рис. 1). Южный и юго-западный мегасклоны Салаира пологими ступенями переходят в степное Присалаирье, северный и северо-восточный крутым уступом (Тырган) опускаются к Кузбассу.

Слагающие район горные породы сложноподислоцированы. В северо-восточной части территории развиты терригенно-карбонатные и вулканогенные отложения суенгинской и печеркинской свит нижнего кембрия, образующие Чесноковскую антиклиналь. Юго-западная часть сложена преимущественно карбо-натными отложениями кинтерепской свиты нижнего кембрия, образующими Егорьевскую антиклиналь. Расположенная между ними Бухаринская синклиналь выполнена терригенными отложениями раннего—среднего кембрия и терригенно-карбонатными образованиями среднего девона. Осевая часть Чесноков-ской антиклинали разбита разрывными нарушениями Центрально-Салаирского глубинного разлома, а многочисленные нарушения в других частях района отражают в совокупности блоковое строение до-кембрийского основания Салаира.

Интрузивные образования преимущественно гранитоидного и габброидного составов имеют огра-ниченное распространение и группируются в основном в линейные пояса, приуроченные к продольным зонам разломов глубинного заложения.

Практически на всей территории развит чехол рыхлых разновозрастных гетерогенных песчано-суглинистых образований мощностью от нескольких до 20—30, а в ряде случаев до 80—100 м. Наиболее древние из них — образования мел-палеогеновой коры химического выветривания. С современной и древней речной сетью связаны четвертичные аллювиальные отложения, к которым приурочено россыпное золото.



Наибольшее количество россыпей приурочено к речной и ложковой сетям, рыхлые отложения которых являются вмещающей средой для концентрации золота, россыпи в долинах первых порядков — к отложениям русла и поймы, россыпи водотоков высоких порядков — к пойме и аккумулятивным террасам. Эти долинные аллювиальные россыпи среднечетвертичного и современного возрастов занимают ведущее место в золотодобыче [33].

Преобладающая часть аллювиальных россыпей характеризуется линейной продуктивностью золота порядка 50—100 кг/км, причем величины средней продуктивности возрастают от первых десятков килограммов на километр для мелких россыпей небольших долин до почти 200 кг/км для крупных и относительно богатых золотоносных долин высоких порядков (рек Каменка-Барабановская — 189, Мостовая — 160, Дражные Тайлы — 150 кг/км). Иногда большие значения средней продуктивности отмечаются и в долинах рек более низких порядков (Фомиха — 184, Петровка с притоками — 153 кг/км). Многие россыпи являются сложными, состоящими из цепи отдельных простых россыпей различной длины и насыщенности, что обуславливает частое чередование богатых участков долин с обедненными и даже пустыми. Прерывистость россыпей геологами обычно объясняется наличием нескольких питающих источников или пережимов долин и порогов в плотике, сложенных устойчивыми к размыву породами [34]. Не отрицая доминирующей роли этих факторов, неравномерность золотоносности можно обосновать и с гидродинамических позиций — соответствующими условиями разгрузки подземных вод, обеспечивающих транспортировку россыпеобразующего вещества от источника питания.

К постоянно существующим водоносным горизонтам относятся гидравлически связанные воды зоны региональной трещиноватости коренных пород, развитой до глубины 50—80 м, и зон тектонических нарушений, обводненных до глубины 100 м и более, а также воды четвертичных аллювиальных отложений, развитых в долинах рек. Основная разгрузка подземных вод осуществляется в местную речную сеть — реки Ик, Гарсьма, Еловка, Фролиха, Колтырак и другие, а также их притоки.

Анализ условий разгрузки подземных вод, проведенный на основе карт базисных поверхностей различных порядков (примеры некоторых из них приведены на рис. 2), построенных нами по методике А.А. Лукина [35], позволил провести оценку интенсивности водообмена и дренирующей роли водотоков [32].

Из нее следует, что разгрузка подземных вод на наиболее высоких гипсометрических уровнях начинается с долин 2-го или устьевых частей долин 1-го порядков, на долю которых приходится до 90 % общего числа истоков рек. В долины 1-го порядка разгружаются воды, проникающие в среднем на глубину до 30 м. В долины 2 и 3-го порядков разгружаются воды, проникающие на глубины 55 и 70 м. Разгрузка подземных вод осуществляется как рассеянными выходами непосредственно в руслах водотоков, так и в виде родников, дебиты которых достигают 5—8, а в редких случаях до 20 л/с и более. По нашим данным, линейная плотность родников (количество на 1 км длины дрены) с ростом порядка долин уменьшается от 1,54 в долинах 1-го порядка до 0,42 в долинах 4-го порядка. В этом же направлении возрастает доля родников, связанных с зонами разломов. Если в долинах 1 и 2-го порядков доля таких родников составляет 55—57 %, то в долинах 5-го порядка практически все они приурочены к зонам тектонических нарушений.

На изучаемой территории выделено более 2000 речных бассейнов (от 2 до 5-го порядков, по классификации Р.Е. Хортон), принимающих разгрузку подземных вод. Их усредненные характеристики приведены в табл. 1.

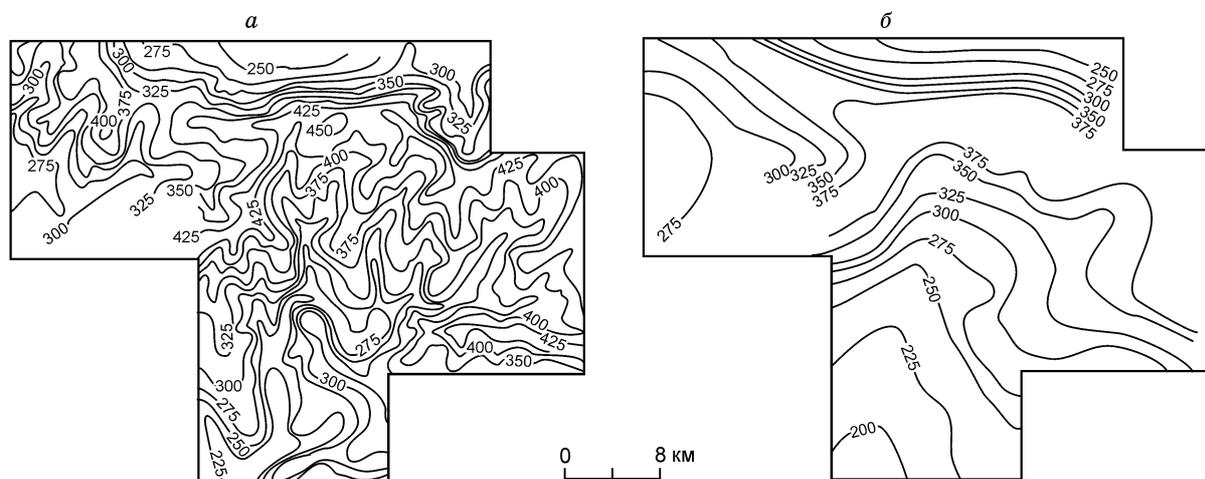


Рис. 2. Карты изобазит водной поверхности 2-го (а) и 4-го (б) порядков.

Таблица 1.

Средние характеристики бассейнов стока разных порядков

Характеристика бассейнов	Единица измерения	Порядок долин			
		2	3	4	5
Площадь водосбора	км ²	0,79	3,56	18,85	58,29
Длина дренирующей границы	км	0,68	1,36	3,18	4,04
Доля площади водосбора на единицу длины дренирующей границы	км ² /км	1,2	2,6	5,9	14,4
Расход реки	л/с	2,5	13,7	57,2	127,0
Линейный расход реки	л/(с·км)	3,7	10,1	18,0	31,4
Расход подземного питания рек	л/с	2,5	5,92	18,3	50,41
Линейный расход подземного питания рек	л/(с·км)	3,7	4,4	5,8	12,5
Модуль общего речного стока	л/(с·км ²)	3,16	3,85	3,03	2,18
Модуль подземного стока	л/(с·км ²)	3,16	1,66	0,97	0,87
Число определений	—	537	112	28	9

Основным источником питания россыпей, по мнению Г.Б. Нестеренко с соавторами [36], послужило самородное золото золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой минеральных ассоциаций, локализующихся в линейных штокверках, наложенных на вкрапленную золото-сульфидную минерализацию. Именно в кварц-карбонатных жилах и штокверках присутствует в повышенном количестве самородное золото, по размерам частиц сопоставимое с россыпным. Оно дает обобщенную гистограмму пробности, близкую к таковой для золота из россыпей. Вместе с тем подчеркивается, что для золота россыпей характерно присутствие высокопробных гипергенных разностей, доля которых в отдельных случаях достигает 10—40 %. Широкое развитие гидротермально измененных пород, в которых также отмечается видимое золото, позволяет считать их дополнительным источником золота в россыпях. Самородное золото колчеданно-полиметаллических руд заметного участия в питании россыпей не принимало, поскольку оно там имеет низкую пробность и представлено в основном очень мелкими нероссыпеобразующими фракциями [36].

Таблица 2.

Химический состав подземных вод, мг/дм³

Компонент	Все типы подземных вод в целом		Воды зоны насыщения разных водовмещающих пород			
	Пределы	Среднее	Алюмосиликатных	Преимущественно алюмосиликатных	Карбонатно-алюмосиликатных	Преимущественно карбонатных
			Среднее	Среднее	Среднее	Среднее
Общая минерализация	38—951	450	323	407	437	502
pH	6,0—8,6	7,56	7,3	7,4	7,6	7,6
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	0,3—10,4	5,27	3,7	4,7	5,1	5,8
HCO ₃	24—671	324	237	319	323	369
Cl	1,2—66,7	8,0	7,1	6,7	7,3	10,4
SO ₄	<1—75	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
Ca	4—180	86	58	74	85	100
Mg	0,1—73	10,8	8,6	9,1	12,4	10,4
Na	0,5—85	6,3	6	6,85	7,0	10,2
K	0,1—9,9	0,86	0,8	0,85	0,79	0,95
SiO ₂	1,0—25,2	14,2	16,0	14,3	14,9	12,5
Fe _{общ}	0,1—9,0	0,4	0,2	0,43	0,34	0,29
CO ₂ св.	4—93	11,0	10,6	11,6	10,8	11,0
Кол-во анализов	3000		30	534	773	355

ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Проведенные работы позволили установить, что все изученные типы вод Северо-Западного Салаира пресные с минерализацией менее 1 г/дм^3 , в основном гидрокарбонатные кальциевые, магниевые-кальциевые, нейтральные или слабощелочные (табл. 2).

Такие воды характерны для зоны активного водообмена регионов с гумидным климатом. По средним значениям химического состава они занимают промежуточное положение между водами горно-таежных и горно-степных ландшафтных зон Алтае-Саянской области [27]. В пределах района наблюдается дифференциация параметров состава вод в зависимости от условий залегания, интенсивности водообмена, состава водовмещающих отложений. Минерализация подземных вод, концентрации большинства химических элементов и значения отношения Ca/Mg возрастают от вод алюмосиликатных пород к водам преимущественно карбонатных образований. Воды карбонатно-алюмосиликатных пород занимают промежуточное положение. Наиболее ярко эта закономерность проявляется на начальных стадиях взаимодействия вод с породами. Чем выше карбонатность водовмещающих пород, тем меньше диапазон пространственно-временной изменчивости состава вод.

С увеличением длительности взаимодействия подземных вод со всеми типами горных пород возрастают рН и концентрации Mg, Na (подвижные химические элементы), а поведение Ca (относительно малоподвижный элемент) имеет свою специфику в водах пород разного состава. В водах алюмосиликат-

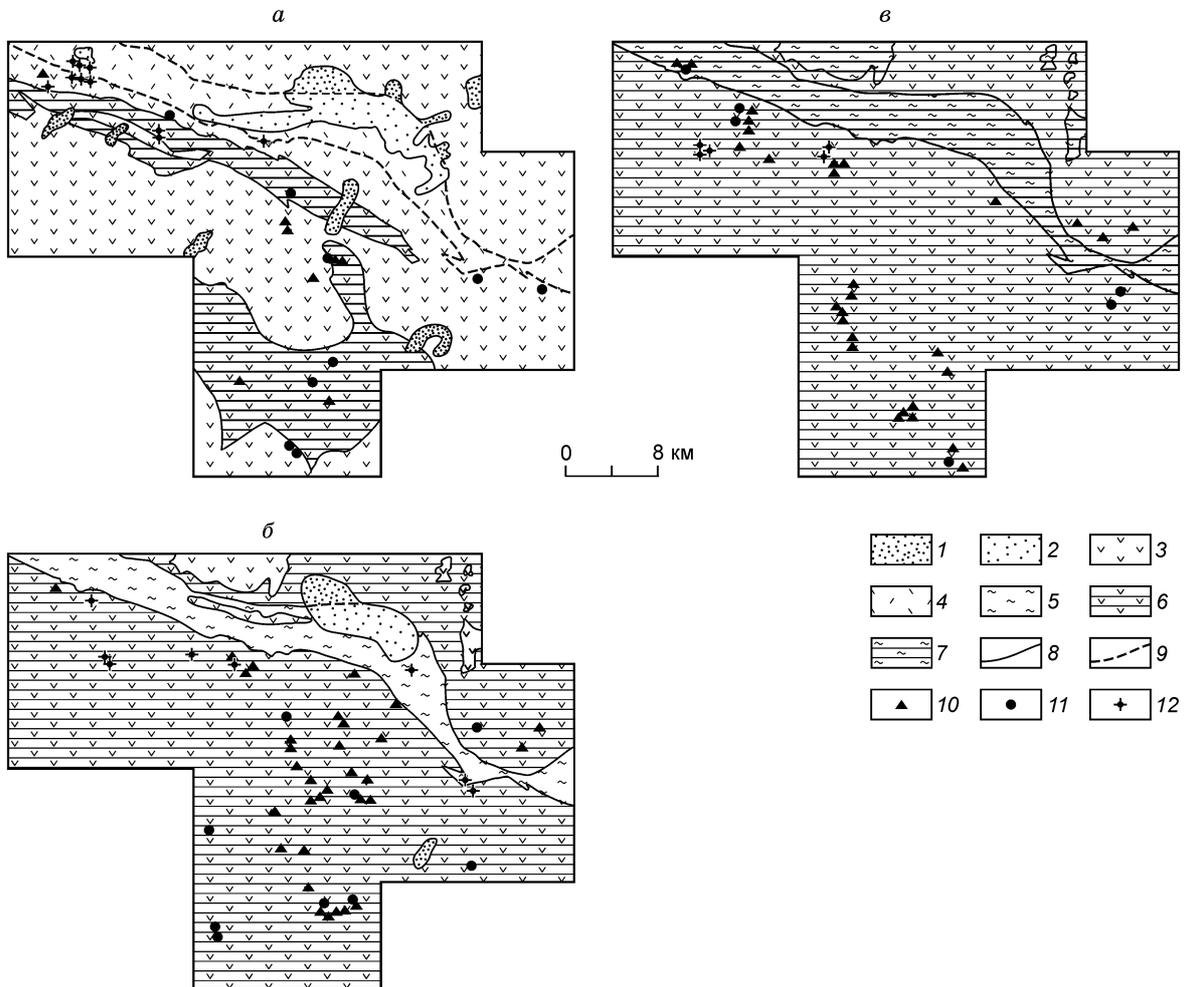


Рис. 3. Схематические карты вероятного вторичного минералообразования в зоне миграции подземных вод на глубине вреза долин 2-го (а), 3-го (б) и 4-го (в) порядков.

Зона преимущественно каолинитообразования: 1 — подзона каолинит-гидрослюдисто-гетитового состава, 2 — подзона каолинит-гетит-гидрослюдистого состава; зона преимущественного гидрослюдитообразования: 3 — подзона гидрослюдисто-каолинит-гетитового состава, 4 — подзона гидрослюдисто-гетит-каолинитового состава; 5 — зона преимущественного монтмориллонитообразования; зона преимущественного карбонатообразования: 6 — подзона карбонатно-гидрослюдистого состава, 7 — подзона карбонатно-монтмориллонитового состава; 8 — границы зон; 9 — границы подзон; 10–12 — факты вторичного карбонатообразования: 10 — в реках, 11 — в родниках, 12 — в родниках с аномальными концентрациями сульфат-иона.

ных образований концентрации его растут во всем временном интервале взаимодействия. В водах карбонатно-алюмосиликатных образований рост концентраций кальция, начиная с вод долин 2-го порядка, замедляется, и содержания практически стабилизируются. В водах преимущественно карбонатных образований содержания кальция, гидрокарбонат-иона и магния вначале растут, а начиная с вод, разгружающихся в долины 2-го порядка, уменьшаются.

В пределах исследуемого района хорошо проявляется роль рельефа и выдерживаются вертикальная высотная и глубинная зональности подземных вод. Прослеживается четкая связь показателей химического состава подземных вод с гипсометрическим положением точек опробования и экспозицией склонов главного водораздела. От высоких гипсометрических условий к низким увеличиваются также площади развития и встречаемость разгрузки более минерализованных вод.

Совместный анализ диаграмм полей устойчивости минералов, на которые нанесены точки, соответствующие химическому составу различных вод района, результатов моделирования взаимодействий вод с водовмещающими породами, сопоставление этих данных с реальными составами вод и минералогическим составом вторичной твердой фазы района [31, 32, 37, 38] позволяют представить общую картину современных гипергенных процессов и отметить следующие закономерности.

Подземные воды района неравновесны с первичными алюмосиликатными минералами (микроклин, анортит, альбит, мусковит) и, как правило, способны к образованию каолинита, гидрослюд, кварца, а зачастую и монтмориллонита и кальцита. Таким образом, современное вторичное минералообразование в регионе в большинстве своем соответствует гетит-каолинит-гидрослюдистой и каолинит-гидрослюдисто-монтмориллонит-кварц-карбонатной стадиям выветривания. Для кор мел-палеогенового возраста, формировавшихся в более влажных и теплых климатических условиях, характерен преимущественно кварц-гетит-каолинитовый тип выветривания [38, 39].

Полученные результаты позволили обосновать и составить картограммы зон распространения современного вторичного минералообразования Северо-Западного Салаира (рис. 3). Построения проведены для трех уровней глубинности (уровней вреза долин 2, 3 и 4-го порядков). Минералы и минеральные ассоциации ранних стадий взаимодействия прогнозируются на уровнях дренирования, отвечающих долинам водотоков первых порядков, в гипсометрически наиболее высотных условиях, минералы и минеральные ассоциации поздних стадий отвечают уровням дренирования регионального подземного стока — на самых глубоких уровнях глубинности и в гипсометрически наиболее низких условиях. Все эти минералы выводятся из подземных вод соответствующие элементы, лимитируя уровень накопления последних в водах.

В количественном выражении подземные воды, мигрируя в различных породах района, в среднем разрушают в пересчете на 1 л воды порядка 500—800 мг породы и формируют 300—600 мг соответствующей вторичной фазы [31, 32].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА В ВОДАХ

Содержание золота в водах исследуемого района варьирует от долей до первых десятков нг/дм³ при средних значениях, не превышающих первые единицы нг/дм³ (табл. 3). Близкие величины содержания были установлены и в других подобных по природным условиям горно-рудных районах [7, 8, 40].

В пределах района наблюдается достаточно значительная изменчивость содержания золота в фоновых водах в зависимости от длительности миграции последних и от состава водовмещающих отложений. Наиболее низкие средние значения и минимальный разброс его содержания характерны для вод преимущественно карбонатных отложений кинтерепской свиты. Водам преимущественно алюмосиликатных, карбонатно-алюмосиликатных образований ($\epsilon_{р\check{c}}$, ϵ_{sng} , D_2), с металлогенических позиций наиболее благоприятных для локализации золотого оруденения, свойственны более высокие средние значения и больший разброс содержания золота. Воды, разгружающиеся в долины высоких порядков, характеризуются в среднем почти в 2 раза более низкими содержаниями золота по сравнению с водами, разгружающимися в долины первых порядков (табл. 4).

Таблица 3. Содержания золота в водах разных типов водовмещающих пород, нг/дм³

Параметр	Все типы подземных вод в целом	Воды разных типов водовмещающих пород			
		Преимущественно алюмосиликатных ($\epsilon_{р\check{c}}$)	Карбонатно-алюмосиликатных (ϵ_{sng})	Карбонатно-алюмосиликатных (D_2)	Преимущественно карбонатных (ϵ_{kt})
Пределы	0,36—24,0	0,43—23,5	0,36—23,8	1,36—9,19	0,74—7,1
Среднее	3,22	3,04	3,66	3,66	2,44
Число анализов	360	103	170	26	23

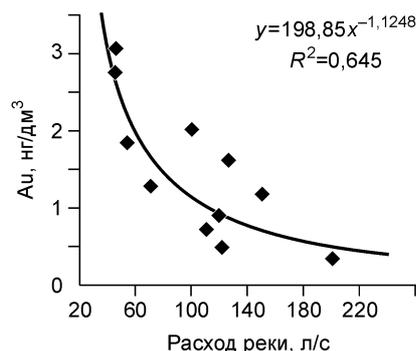


Рис. 4. Зависимость содержания золота в водах крупных рек от их расхода.

Проявляется тенденция уменьшения содержания золота в водах с увеличением расхода крупных водотоков (рис. 4).

Концентрации золота в водах, связанных с зонами и участками проявлений рудной минерализации, существенно более высоки. Концентрации, достигающие десятков нг/л, характерные для таких территорий, встречаются приблизительно в 5 % общего количества проб. В этих условиях, помимо общего повышенного содержания золота в породах, в его мобилизации, вероятно, существенную роль играют процессы окисления сульфидов. Это явление, на наш взгляд,

фиксируется синхронным увеличением концентрации золота и повышением содержания сульфат-иона в водах (табл. 5).

В рудничных водах, изученных нами, например, на Салаирском (Восточный Салаир) и Ольховском (Восточный Саян) месторождениях и характеризующихся гидрокарбонатно-сульфатным, сульфатно-гидрокарбонатным составом и низкими значениями pH, концентрации сульфат-иона составляют сотни и тысячи мг/дм³, а содержания золота весьма велики и достигают десятых долей и даже целых мкг/дм³ [41]. Столь значительные концентрации золота обеспечиваются активной растворимостью сульфидов, достигающей долей и даже целых г/дм³. Растворение сульфидов, имеющих, как правило, концентрации золота в сотни раз более высокие, чем породообразующие минералы [42, 43], не только освобождает золото из минерала-носителя, но и создает кислую среду, благоприятную для его нахождения в растворенном состоянии.

Таблица 4. Содержания золота в водах, разгружающихся в речные долины разных порядков, нг/дм³

Параметр	Порядок речных долин			
	1	2	3	4–5
Пределы	0,43—15,8	0,42—23,3	0,44—21,5	0,34—4,36
Среднее	3,31	3,29	2,95	1,71
Число анализов	37	114	121	12

П р и м е ч а н и е. Золото анализировалось в Центральной лаборатории МинГео УзССР нейтронно-активационным методом из концентратов на активированном угле, предел обнаружения 0,2 нг/л.

Таблица 5. Содержания золота в водах с различным содержанием сульфат-иона, нг/дм³

Параметр	Воды с содержанием сульфат-иона	
	менее 10 мг/дм ³	более 10 мг/дм ³
Пределы	0,36—24,0	0,69—23,3
Среднее	2,95	4,79
Количество анализов	341	19

МОБИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛОТА

Переходя к рассмотрению механизмов мобилизации золота, следует, прежде всего, подчеркнуть, что последние определяются формой его нахождения в конкретных минеральных фазах горных пород или руд, а также характером и степенью их растворения и выщелачивания в условиях конкретной геохимической обстановки. Применительно к рассматриваемому региону можно выделить три формы нахождения золота в горных породах: 1) связанное с породообразующими минералами; 2) связанное с рудными минералами и минералами околорудно измененных пород, главным образом сульфидами; 3) самородное. Следует заметить, что указанные формы нахождения отражают степень дисперсности золота в породе. В отличие от подавляющего большинства других металлов, золото в гипогенных источниках находится главным образом в элементном (самородном) состоянии, т. е. в собственно металлической форме. Рассмотрим более подробно механизмы мобилизации применительно к каждой из форм.

Для того чтобы стать самостоятельной гидрогенной составляющей золото, как и любой другой элемент, должно извлекаться из гипогенных минералов-носителей, и именно подземные воды, растворяя

Таблица 6.

**Масштабы мобилизации и перераспределения золота при выветривании
основных типов пород Салаира (в расчете на 1 л воды)**

Показатель	Тип водовмещающих пород	
	Преимущественно алюмосиликатные	Карбонатно-алюмосиликатные
Масса разрушенной первичной породы, мг	525	760
Масса образовавшейся вторичной твердой фазы, мг	325	580
Концентрация золота, мг/г:		
а) в первичных образованиях	6,5	5,2
б) во вторичных образованиях	1,0	0,5
Масса золота, мобилизованного из первичных образований, мкг	3,41	3,95
Масса золота, связывающегося вторичной твердой фазой, мкг	0,33	0,29
Содержание золота в воде, мкг/л	3,09	3,66

и разрушая вмещающие горные породы и руды, открывают возможность для его последующего гипергенного перераспределения. Золото, рассеянное в породообразующих минералах, переходит в водный раствор одновременно с их конгруэнтным (кальцит, доломит, кварц) или инконгруэнтным (полевошпат, плагиоклазы, роговая обманка) растворением и перераспределяется между жидкой и новообразующейся твердой фазами.

Расчеты содержания золота в водах для различных типов водовмещающих пород проведены с учетом средних показателей их современного гипергенного преобразования [31, 32], сведений о содержаниях золота в первичных и вторичных образованиях района из работы Н.А. Рослякова с соавторами [34] и наших данных. В фоновых условиях каждый литр воды, растворяя водовмещающие отложения-носители золота, вовлекает в гипергенную миграцию 3,41—3,95 нг золота. Большая доля такого золота обеспечивает при этом формирование его содержания в водах на уровне порядка 3,09—3,66 нг/л, а меньшая связывается образующейся вторичной твердой фазой (табл. 6). Следует заметить, что величины содержания золота, полученные расчетом по растворимости минералов горных пород, сопоставимы с приведенными выше измеренными средними значениями содержания золота в водах (см. табл. 3), что свидетельствует о правильности выбранного подхода к анализу данного явления.

Дальнейшая специфика поведения золота в значительной мере определяется особенностями эволюции соответствующей твердой или жидкой фазы-носителя.

Часть золота, связываемая твердой фазой, с одной стороны, участвуя в механической миграции самой фазы, в ходе эрозионных процессов рассеивается за пределы рудных объектов, а с другой, участвуя в процессах формирования осадков речных долин и почв, концентрируется, создавая в той или иной степени обогащенные золотом горизонты.

Находящееся в водной среде золото рассеивается в различных формах [44—48]. В настоящее время большинством исследователей в качестве основных форм миграции золота в водах рассматриваются растворенные (неорганические комплексные и органоминеральные) соединения, коллоидные и взвешенные частицы. Последние две формы могут быть унаследованными от гипогенного источника или представлять собой рассеянное золото, сорбированное из растворов на механических частицах, в том числе на вторичных минералах (каолинит, кварц, кальцит), вновь формирующихся в зависимости от внешних условий. Убедительным доказательством миграции золота в сорбированном состоянии на вторичных минералах являются экспериментальные исследования, выполненные В.К. Бернатонисом [49].

Наряду с миграцией и рассеянием, растворенное золото способно к концентрированию и образованию элементарных форм. В пользу последнего явления в настоящее время появилось множество доказательств. Среди них исследования минералогов по изучению природы высокопробных кайм на золотинах [16, 17], экспериментальные исследования по сорбции золота и выращиванию его „кристаллов“ из растворов, аналогичных природным [24], работы, проясняющие механизм выведения золота из раствора [46], и, наконец, оригинальные исследования гидрогеохимиков, связанные как с количественным определением форм золота и изучением закономерностей их изменчивости [7], так и использованием физико-химических методов расчетов, в том числе физико-химического моделирования на ЭВМ [25, 50]

**ФОРМЫ ВОДНОЙ МИГРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО ЗОЛОТА
И СПОСОБНОСТЬ ВОД К ЕГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЮ**

Формы миграции растворенного золота и способность вод к его выведению из раствора с образованием самостоятельной самородной твердой фазы рассматривались с использованием программного

Таблица 7. Особенности миграции и концентрирования золота в подземных водах Салаира

Характеристика вод				Формы миграции золота*			Способность вод к новообразованию гидрогенного золота**
pH	Eh	Тип вод	Минерализация, г/дм ³	главные	второстепенные	редкие	
7,4	300	HCO ₃ -Ca	0,4	AuOHCl ⁻	—	AuOH	+
	100	»	0,4	»	—	»	+
	0	»	0,4	»	—	»	+
6,9	500	SO ₄ -Ca	2,2	»	—	AuOH, Au(Cl) ₂ ⁻	+
	200	»	2,2	»	—	»	+
	0	»	2,2	AuHS, AuOHCl ⁻	AuH ₂ S ⁺	—	+
4,1	0	»	1,2	AuH ₂ S ⁺ , AuHS	—	—	—
2,6	500	»	1,3	Au(Cl) ₂ ⁻ , AuOHCl ⁻	—	Au ⁺	+
	200	»	1,3	AuH ₂ S ⁺	—	—	—
	0	»	1,3	AuH ₃ S ₂ , Au(H ₂ S) ₂ ⁺	—	—	—

* Главные — доля которых более 25 %, второстепенные — от 1 до 25 %, редкие — от 0,01 до 1 % валового содержания.

** „+“ — высокая, „—“ — низкая.

комплекса HG32. Данная программа использует оригинальную авторскую версию известного „метода констант равновесия“, применение которого вместе с сеточной моделью геофильтрации дает полноценное средство физико-химического моделирования миграции в 0-, 1- и 2-мерной постановке [51]. Стандартные термодинамические параметры выполненных расчетов заимствовались из входящей в состав программного комплекса собственной базы данных, которая суммирует информацию большинства известных справочников термодинамических величин и других баз данных, таких как SUPCRT 92, Nagra 01/01, GEMBOCHS.V2 и др. В расчетах учитывались следующие теоретически возможные формы миграции: Au³⁺, AuS⁻, AuHS, AuH₂S⁺, Au(HS)₂, AuH₃S₂, Au(H₂S)₂⁺, Au(Cl)₂⁻, Au(Cl)₄⁻ трехвалентного и Au⁺, AuOH, AuOHCl⁻, Au₂H₂S₃⁻ — одновалентного золота, для которых имеются термодинамические параметры. Расчеты проведены для так называемых типичных фоновых вод Северо-Западного Салаира и рудничных вод Салаирского промышленного месторождения — яркого представителя колчеданно-полиметаллической формации, содержащей золоторудную минерализацию.

Результаты расчетов (табл. 7) в целом показали картину, не противоречащую высказываемым ранее, в ряде случаев априорно, положениям о миграции золота.

Формирующиеся кислые среды сульфатных растворов в восстановительных условиях способны значительно увеличивать растворимость золота и поддерживать его в растворенном состоянии, а преобладающими формами нахождения золота в таких водах являются серосодержащие комплексы. При смене восстановительных условий на окислительные содержащие серу комплексы золота переходят в гидрокомплексы, растворимость золота падает и происходит почти полное его выделение в форму Au⁰. По мнению ряда авторов, такой вид концентрирования золота является существенным при формировании золотоносных россыпей [1, 2, 11]. В то же время, несмотря на то что масштабы образования гидрогенной составляющей во многих случаях могут быть весьма значительными, указанный механизм, на наш взгляд, является лишь одним из возможных и особенно эффективных при повышенных содержаниях золота в растворе.

Миграция растворенного золота, находящегося в среде пресных гидрокарбонатных кальциевых вод, образованной растворением породобразующих минералов-носителей, осуществляется в основном в виде различных гидрокомплексов. При этом, как показывают наши расчеты, воды с концентрацией золота в 3—4 нг/дм³, обычной для фоновых вод золотоносных районов, уже способны к активному выведению золота из раствора и новообразованию твердой металлической составляющей. Именно подобный механизм перехода золота из гидрокомплексов в Au⁰ убедительно обосновала Г.М. Варшал с соавторами [46] с использованием ИК-спектрометрического и рентгеноструктурного методов исследований.

ГИДРОГЕННОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЗОЛОТА В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ РОССЫПЯХ

Способность вод к концентрированию золота может быть реализована в различных условиях: в почвенных горизонтах, в зоне аэрации, в среде миграции подземных вод. На наш взгляд, эта способность вод многократно усиливается в областях разгрузки, в среде аллювиальных отложений речных долин.

Именно аллювиальные отложения как объект для гидрогенного концентрирования золота представляют особый интерес. Сами аллювиальные отложения выступают в качестве фильтров, принимающих восходящую разгрузку вод коренных пород, а параллельно и продуктов гипергенного концентрирования, происходящего в объеме окружающего геологического пространства, являющегося в этом случае областью генерации и транзита продуктивной фазы. При этом их объем составляет лишь доли процента от объема генерирующего пространства. Формирование гидрогенного золота здесь происходит одновременно с общей гидрогенно формирующейся массой вторичных минеральных образований, характерных для той или иной стадии взаимодействия вод с породами. Следует обратить внимание и на то, что формирование основной массы вторичной минеральной фазы, в состав которой, как нами было описано ранее, входит и кальцит, происходит с выделением углекислоты, что соответственно сопровождается ростом кислотности среды, рН которой, как нами неоднократно наблюдалось при карбонатообразовании на выходах травертиновых родников, опускается до 6,9—7,0. В свою очередь, такие кислотно-щелочные условия благоприятствуют выведению коллоидов из раствора, а значит и новообразованного Au⁰ — золота, сорбированного из раствора на взвешенных частицах.

В среде четвертичных отложений, где генерализованные потоки вод собственно четвертичных отложений, богатых кислородом и активных в физико-химическом отношении, смешиваются с восходящими потоками вод коренных пород, характеризующихся более восстановительными средами и повышенными содержаниями золота, также создаются благоприятные условия для гидрогенного минералообразования, в том числе и золотого.

В паводковый период, когда поверхностные воды питают подземные, четвертичные отложения становятся средой, где происходит дополнительная аэрация недр, создающая соответственно и условия, благоприятные для гидрогенного образования железистых и марганцевых оксидных и гидроксидных минералов, являющихся также и хорошими сорбентами золота.

Крупное золото, обладающее химической инертностью и попавшее в россыпи при разрушении гипогенных источников, в большинстве случаев не является действенным источником растворенной составляющей, однако в среде четвертичных отложений оно становится центром минералообразования для вновь образующегося гидрогенного золота. В этом процессе между новообразованным и гипогенным золотом, в силу тесного химического родства, формируются прочнейшие связи, каких золото не образует с другими минералами. Прочность формирующихся связей осажденного из раствора и самородного золота доказана, в частности, экспериментальными работами, проведенными Ю.Ф. Погребняком [7].

Таким образом, в аллювиальных отложениях создается целый ряд условий (фильтрационных, термодинамических и др.), благоприятствующих гидрогенному золотообразованию.

Количественную оценку данного процесса можно произвести расчетом усредненной линейной продуктивности осаждения гидрогенного золота, приведенной к 1 км протяженности аллювиальных отложений речных долин различных порядков. Линейная продуктивность гидрогенного золота рассчитывалась как произведение величин концентрации золота, израсходованного на минералообразование, объема подземных вод, участвующих в минералообразовании, и времени протекания этого процесса. В качестве исходной величины для оценки количества золота, затраченного на минералообразование, принята концентрация в 1 нг/дм³. Достоверность такой, принятой с достаточным запасом прочности, величины, на наш взгляд, вытекает как из результатов физико-химических расчетов, так и из анализа фактической изменчивости концентраций золота в водах речных долин разных порядков, особенно в водах крупных

Таблица 8. Оценка масштабов гидрогенного концентрирования золота

Характеристика бассейнов	Единица измерения	Порядок долин			
		2	3	4	5
Линейный объем подземного питания рек	л/(с·км)	3,7	4,4	5,8	12,5
Принятое время формирования осадков	лет	10000	15000	25000	50000
Принятая концентрация золота, пошедшего на формирование гидрогенной составляющей	нг/дм ³	1	1	1	1
Линейная продуктивность гидрогенного золота	кг/км	1,2	2,1	4,5	19,7
Линейная продуктивность золота в россыпях*	кг/км	57	98	126	153
Доля гидрогенного золота	%	2	2	4	13

* Устное сообщение С.В. Колтунова.

рек, где явно идет процесс минералообразования (см. табл. 4, рис. 4). В числе параметров, контролирующих объем подземных вод, участвующих в минералообразовании, приняты средние значения линейных расходов подземного питания рек соответствующих порядков. Длительность процесса принята отвечающей времени формирования основной массы аллювия, которое, согласно ориентировочным хроностратиграфическим оценкам, составляет от 10 тыс. лет для долин 2-го порядка до 50 тыс. лет для долин 5-го порядка.

Результаты таких расчетов, приведенные в табл. 8, показывают, что линейные расходы подземных потоков в дрены с концентрациями золота в 1 нг/л за период формирования осадков речной сети способны обеспечить формирование от 1,2 до 19,7 кг/км гидрогенного золота. В среднем доля такого золота составляет от 2 до 13 % от средней линейной продуктивности россыпей, что уже сопоставимо с долей высокопробных гипергенных разностей, которая в отдельных случаях, по оценкам Г.В. Нестеренко, достигает 10—40 %. Следует напомнить, что указанные значения определены при минимальных значениях исходных показателей (концентраций и расходов), вариации которых могут достигать 2—2,5 раза. Это позволяет утверждать, что в определенных случаях доля расчетной гидрогенной составляющей может существенно возрастать.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты изучения миграции золота в составе подземных вод Егорьевского золотоносного района позволили предложить механизм и оценить масштабы гидрогенного концентрирования золота в россыпях. Масштабы концентрирования зависят от золотообразующей способности вод, количества вод, участвующих в минералообразовании, и длительности этого процесса.

Оценки показывают, что линейные расходы подземных потоков в дрены с концентрациями золота в 1 нг/л за период образования осадков речной сети способны обеспечить формирование до 20 кг/км гидрогенного золота, что сопоставимо с долей высокопробных гипергенных разностей золота в россыпях.

При наличии крупного золота в гипогенных источниках геологическая роль подземных вод сводится к разрушению минералов или пород — носителей золота, а сами гипогенные золотины становятся центрами минералообразования для гидрогенного золота.

Проведенные расчеты, учитывающие гидродинамические особенности тех или иных территорий и геологическую деятельность подземных вод, открывают дополнительные возможности для совершенствования методов поисков россыпных месторождений золота.

Выполненные исследования позволяют предположить, что золото колчеданно-полиметаллических руд, представленное так называемыми нероссыпеобразующими формами, может являться одним из источников высокопробных кайм гидрогенного золота россыпей. По нашему мнению, именно связанное золото колчеданно-полиметаллических руд является дополнительным источником россыпного, а именно, золота гидрогенного типа. Растворение носителя золота, в данном случае колчеданно-полиметаллических руд, может обеспечить повышенные концентрации растворенного золота и создание соответствующей среды, способствующей нахождению золота в растворенном состоянии. Изменение характеристик среды, имеющее место, например, при смешении ореольных и фоновых вод или вод аллювиальных отложений и вод коренных пород, сопровождается выпадением золота из раствора и формированием его твердой составляющей.

С общих гидродинамических позиций для формирования гидрогенного золота наиболее благоприятны долины рек крупных порядков. Появление высокопродуктивных участков гидрогенного золота в долинах первых порядков или появление участков долин с высокой продуктивностью золота, характеризующегося наличием значительной доли золотин с высокопробной каймой, свидетельствует о участии рудогенного источника колчеданно-полиметаллического типа в питании россыпи.

Работа выполняется при поддержке Минпромнауки, грант № НШ-1566.2003.05; комплексного интеграционного проекта СО РАН, № 65; Минобразования РФ, ЕЗН 1.4.04, проекты № 07.01.38, Е02-9.0-60 и ур 09.01.414; РФФИ № 02-05-64623.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кренделев Ф.П.** Растет ли золото в россыпях // Геохимические поиски рудных месторождений в таежных районах. Новосибирск, Наука, 1991, с. 92—100.
2. **Абрамов В.Ю., Потапов А.А., Кирюхин В.А. и др.** О гидрогенной составляющей аллювиальных россыпей золота // Геохимия, 1993, № 3, с. 427—434.
3. **Абрамов В.Ю., Кирюхин В.А., Потапов А.А.** Особенности водной миграции золота и образования его гидрогенных россыпей // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2003, с. 94—96.

4. **Jean G.E., Bancraff G.M.** An XPS and SEM study of gold deposition at low temperatures on sulphide mineral surface: concentration of gold by adsorption/reduction // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1985, v. 49, № 4, p. 979—987.
5. **Sagon J.-P., Chaker M., Dewuif P. et al.** L'or alluvionnaire du Massif Armorican et du Limousin (France): sources et processus de concentration // *Chron. Rech. Miniere*, 1985, v. 53, № 479, p. 35—50.
6. **Плюснин А.М.** Содержание и формы нахождения золота в различных типах природных вод Забайкалья // *Геохимические исследования горных пород, минералов и вод Забайкалья*. Улан-Удэ, 1981, с. 124—138.
7. **Погребняк Ю.Ф.** Золото в природных водах Забайкалья. М., Наука, 1983, 52 с.
8. **Погребняк Ю.Ф., Толочко В.В.** Гидрогеохимические поиски рудных месторождений в Забайкалье. Новосибирск, Наука, 1985, 97 с.
9. **Ломоносов И.С., Гапон А.Е., Дмитриев С.Н. и др.** Эффективность гидрогеохимического метода поисков месторождений золота // *Сов. геология*, 1986, № 8, с. 86—93.
10. **Велюханова Т.К., Варшал Г.М., Баранова Н.Н., Колотов В.П.** О содержании и формах нахождения золота в природных водах // *Химический анализ морских осадков*. М., Наука, 1988, с. 74—92.
11. **Шишкина Т.В., Дмитриев С.Н.** Золото в природных водах. Формы нахождения и методы концентрирования (обзор) // *Геохимия*, 1991, № 4, с. 486—506.
12. **Шварцев С.Л., Дутова Е.М.** Гидрогеохимия, механизмы и масштабы мобилизации золота в зоне гипергенеза (на примере Центрального рудного поля Кузнецкого Алатау) // *Геология рудных месторождений*, 2001, № 3, с. 252—264.
13. **Saunders J.A.** Hydrogeochemical aspects of gold in the weathering environment // *Southeast Geol.*, 1989, v. 29, № 3, p. 129—142.
14. **Hamilton T.W., Ellis J., Florence T.M., Fardy J.J.** Analysis of gold in surface waters from Australian goldfields; an investigation into direct hydrogeochemical prospecting for gold // *Econ. Geol.*, 1983, v. 78, № 7, p. 1335—1341.
15. **Росляков Н.А.** Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск, Наука, 1981, 239 с.
16. **Нестеренко Г.В., Воротников Б.А., Николаева Н.М., Пещевецкий Б.И.** Самородное золото в гипергенной зоне сульфидных месторождений Казахстана // *Зап. ВМО*, 1985, вып. 5, с. 555—568.
17. **Нестеренко Г.В., Воротников Б.А.** Самородное золото как геохимический признак оруденения // *Геохимические поиски рудных месторождений в таежных районах*. Новосибирск, Наука, 1991, с. 123—129.
18. **Тайсаев Т.Т.** Миграция золота в рудных полях гольцовых ландшафтов // *Геохимия и методы анализа геологических объектов в Забайкалье*. Улан-Удэ, 1987, с. 42—54.
19. **Борисенко А.С., Росляков Н.А., Калинин Ю.А. и др.** Перспективы золотоносности кор выветривания нового для Алтае-Саянской складчатой области золотортутного оруденения // *Проблемы золотоносности кор выветривания Сибири*. Красноярск, Изд-во КНИИГиМС, 1998, с. 29—31.
20. **Bergeron M., Harrison Y.** Le transport chimique de l'or dans les environnements de surface: formation d'un colloïde et complexation organique // *Canad. J. Earth Sci.*, 1989, v. 26, № 11, p. 2327—2332.
21. **Vlassopoulos D., Wood S.A.** Gold speciation in natural waters. I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solutions // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1990, v. 54, № 1, p. 3—12.
22. **Benedetti T.** Geochimie de l'or: mecanismes de transport et de depôt // *Sci. Geol., Mem.*, 1991, № 91, 147 p.
23. **Colin F., Vieillard P., Ambrosi J.P.** Behavior of gold in lateritic equatorial environment: mass transfer and thermodynamic study // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 114, p. 269—285.
24. **Диман Е.И., Карпов И.К., Макаров В.И.** Моделирование на ЭВМ гипергенных процессов. Новосибирск, Наука, 1982, 70 с.
25. **Королева Г.П., Ломоносов И.С., Карпов И.К.** Физико-химическая модель гидрогенного концентрирования золота в зоне гипергенеза // *Докл. АН СССР*, 1984, т. 278, № 3, с. 732—734.
26. **Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.** Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М., Наука, 2004, 677 с.
27. **Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1998, 431 с.
28. **Алексеев В.А.** Кинетика и механизмы реакций полевых шпатов с водными растворами. М., ГЕОС, 2002, 256 с.
29. **Карпов И.К.** Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск, Наука, 1981, 248 с.
30. **Букаты М.Б.** Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50980000051 ПК. М., ВНТИЦ, 1999, 5 с.

31. Дутова Е.М. Особенности геохимии подземных вод ряда золоторудных районов Алтае-Саянской складчатой области в связи с гидрогеохимическими поисками: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, ТПИ, 1989, 20 с.
32. Дутова Е.М. Геохимия подземных вод и процессы вторичного минералообразования на Северо-Западном Салаире // Изв. ТПУ, 2001, т. 304, вып. 1. с. 244—261.
33. Вараксин Ю.Н., Свиридов В.Г., Росляков Н.А. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири, Т. 2. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998, 254 с.
34. Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В. и др. Минералогия области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2001, 243 с.
35. Лукин А.А. Опыт разработки методики морфоструктурно-гидрогеологического анализа. Новосибирск, Наука, 1987, 111 с.
36. Нестеренко Г.В., Осинцев С.Р., Портянников Д.И. и др. Формирование и источники питания россыпей Северо-Восточного Салаира // Условия образования, принципы прогноза и поисков золоторудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1983, с. 166—194.
37. Ковалев Р.В., Корсунов В.М., Шоба В.Н. Процессы и продукты почвообразования в темнохвойных лесах. Новосибирск, Наука, 1981, 120 с.
38. Баженов В.А. Древние коры выветривания Салаира (состав и условия образования): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, ТГУ, 1981, 18 с.
39. Свиридов В.Г., Краснов В.И., Сурков В.С. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири, Т. 1. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999, 228 с.
40. Плюснин А.М., Гунин В.И. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2001, 137 с.
41. Дутова Е.М., Бернатонис В.К. Геохимия подземных вод Ольховско-Чибжекского рудного района // Изв. ТПУ, 2002, т. 305, вып. 6, с. 366—379.
42. Прохоров В.Г. Пирит (к геохимии, минералогии, экономике и промышленному использованию). Красноярск, 1970, 188 с. (Тр. СНИИГГиМСа, Вып. 102.)
43. Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. Геохимические особенности пирита золоторудных месторождений // Геохимия, 1985, № 1, с. 93—104.
44. Белеванцев В.И., Колонин Г.Р., Васильева Н.Г. и др. Возможные формы нахождения и растворимость золота в рудообразующих растворах // Гидротермальное низкотемпературное рудообразование и метасоматоз. Новосибирск, Наука, 1982, с. 83—117.
45. Воротников Б.А., Николаева Н.М., Пирожков А.В. О формах нахождения золота в водах Южно-Енисейского района // Геология и геофизика, 1973 (11), с. 37—42.
46. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Баранова Н.Н. Комплексообразование золота (III) с фульвокислотами и геохимическая роль этого процесса // Геохимия, 1984, № 3, с. 413—420.
47. Пещевецкий Б.И., Белеванцев В.И., Земсков С.В. Новые данные по химии соединений золота в растворах // Изв. СО АН СССР, Сер. хим. наук, 1976, № 4, вып. 2, с. 24—46.
48. McHugh J.V. Gold in natural water: a method of determination by solvent extraction and electrothermal atomization // J. Geoch. Explor., 1984, v. 20, № 3, p. 303—310.
49. Черепнин В.К., Бернатонис В.К. Вторичные процессы в сульфидных и золоторудных месторождениях. Томск, Изд-во ТПУ, 1981, 90 с.
50. Казьмин Л.А., Королева Г.П. Физико-химическое моделирование взаимодействий вода—порода в зоне гипергенеза золоторудных полей // Гидрогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. Новосибирск, Наука, 1990, с. 82—87.
51. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. ТПУ, 2002, т. 305, вып. 6, с. 348—365.

*Рекомендована к печати 30 августа 2005 г.
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 23 января 2004 г.,
после доработки — 25 мая 2005 г.*