*ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, 2022, том 64, № 1, с. 151–162*

*УДК 553.07*

# УГЛЕКИСЛЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ – РУДОСОХРАНЯЮЩИЙ ФАКТОР НА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

**© 2022 г. И. Н. Солодов[a], *, М. В. Нестерова[b], ****

*[a]Акционерное общество "Атомредметзолото", Москва, Россия*

*[b]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*

**e-mail: Info@armz.ru*

***e-mail: nestmv@igem.ru*

Поступила в редакцию 30.08.2021 г.
После доработки 08.09.2021 г.
Принята к публикации 06.10.2021 г.

Приведен фактический материал, обосновывающий смешанный режим питания рудоносного водоносного горизонта на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля. Существует два конкурирующих потока – инфильтрация кислородсодержащих метеогенных вод и эксфильтрация глубинных углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод, содержащих эпигенетические восстановители в виде газов и растворенного органического вещества нефтяного ряда. Эксфильтрация преобладает над инфильтрацией. Углекислые подземные воды, содержащие эпигенетические восстановители, формируют постоянно действующий восстановительный геохимический барьер, выступающий в роли рудосохраняющего фактора.

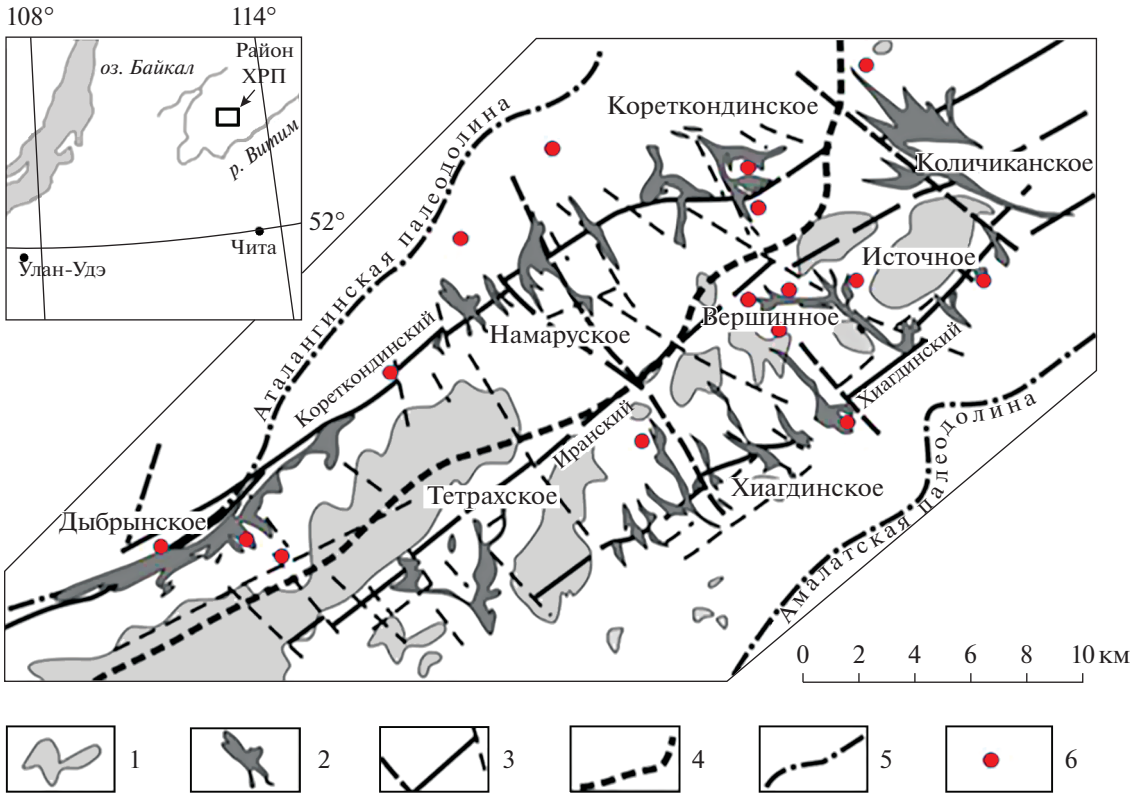
*Ключевые слова:* урановое месторождение, инфильтрация, эксфильтрация, углекислые подземные воды, эпигенетические восстановители, рудосохранение

**DOI:** 10.31857/S0016777022010087

## ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследователей, включая авторов данной статьи, урановые месторождения Хиагдинского рудного поля (ХРП) относят к экзогенному эпигенетическому классу палеодолинного типа грунтово-пластового окисления (Коченов и др., $1997_1$; Лучинин и др., 1992; Коченов и др., $1997_2$; Машковцев и др., 2010; Тарханова и др., 2014; Кочкин и др., 2017; Геотехнология ..., 2017; и др.). Значительно меньшая часть специалистов в области урановой геологии придерживается эндогенной гидротермальной теории рудообразования на этих месторождениях (Маринов и др., 1988; Ильичев и др., 1990; Винокуров и др., 2018 (неопубликованные данные); Рихванов и др., 2019), в которой телетермальным углекислым подземным водам отводится главенствующая роль в урановом рудообразовании и вторичных пострудных изменениях литологической среды восстановительной направленности. При этом рудосохраняющая роль углекислых подземных вод, содержащих растворенные минеральные и органические восстановители урана, в большинстве научных публикаций не обсуждается. Лишь Б.Т. Кочкиным с соавторами (2014) сделано предположение о проникновении в пострудную стадию из фундамента глеевых растворов (безсероводородных) в тальвеговой части палеооврагов и обогащении ураном этих участков рудных залежей. При этом доказательства существования эксфильтрации глеевых подземных вод не приведены. Часто фиксируемое присутствие сероводорода в подземных водах при опробовании гидрогеологических скважин не подтверждает глеевый тип гидрогеохимической среды.

Рудные залежи (37 шт.) месторождений ХРП Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количиканское, Кореткондинское, Намаруское, Дыбрынское и Тетрахское (фиг. 1) залегают на небольшой глубине 90–330 м и могут разрушаться кислородсодержащими метеогенными окислительными водами. Часть сторонников экзогенной и эндогенной теорий рудообразования предполагают, что рудоконсервирующими факторами, препятствующими проникновению метеогенных вод в рудоносный горизонт, выступают базальтовый трапп, покрывающий осадочные (рудоносные) и вулканогенно-осадочные отложения джилиндинской свиты, и многолетняя мерзлота, распростра-




**Фиг. 1.** Урановые залежи (2) месторождений ХРП в палеодолинах овражно-балочной сети на склонах Байсыханского поднятия, разрывная тектоника (3), вулканические аппараты (6). Другие условные обозначения: 1 – выходы на поверхность витимканских гранитов фундамента; 4 – ось Байсыханского поднятия; 5 – центральная часть стволовых Аталангинской и Амалатской палеодолин.

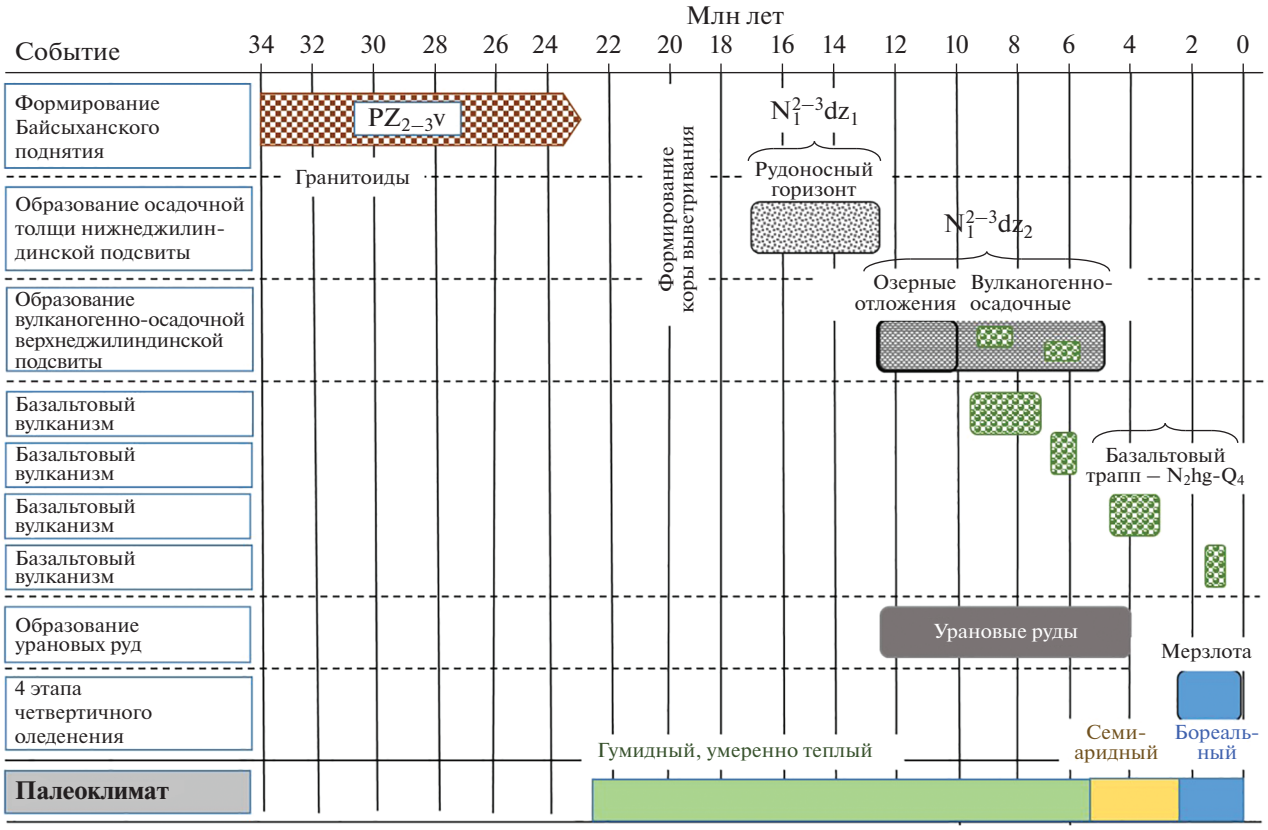
няющаяся повсеместно на площади ХРП на глубину до 40–90 м. Считается, что базальтовый покров и многолетнемерзлые породы (ММП), выступая в роли водоупора, обуславливают застойный режим фильтрации подземных вод в рудоносном горизонте.

Существующие теории рудообразования не объясняют отсутствие промышленного уранового оруденения во многих палеодолинах Витимского ураново-рудного района, частью которого являются месторождения ХРП. При наличии основных поисковых признаков: источника урана в витимканских гранитах; палеодолин на склонах поднятий, заполненных миоценовыми терригенными осадками, содержащими главный концентратор урана – органическое вещество; базальтового покрова; многолетней мерзлоты – при этом многие палеодолины безрудны или представлены урановыми рудопроявлениями, не имеющими практического значения.

Цель данного исследования обобщить новые данные по гидродинамике и геохимии подземных вод в рудоносных отложениях палеодолин, полученные в ходе геологоразведочных работ 2009–2013 гг., снять противоречия в перечисленных моделях и дать обоснование процессам сохранения урановых руд. В этом исследовании внимание сфокусировано на промышленных рудах (mC > 0.075 м%) в пролювиально-аллювиальных глинисто-песчано-гравийных отложениях нижнеджилиндинской подсвиты. Рудопроявления низкого качества и не имеющие промышленного значения в базальтах, вулканогенно-осадочных отложениях и в зонах трещиноватости гранитного скального основания в данном обобщении не рассматриваются.

## ХРОНОЛОГИЯ СОБЫТИЙ

Байсыханское поднятие (часть Витимского плоскогорья) и современный рельеф на территории ХРП сформировались в конце олигоцена – 23 млн лет назад (Рассказов и др., 2007) (фиг. 2). К этому времени образовались зоны разуплотнения – дорудные разрывные тектонические нарушения СЗ простирания с глубиной заложения до 2.5–5.0 км (Ильичев и др., 1990). По системе этих разломов и зон тектонической трещиноватости закладывались палеодолины (овражно-балочная сеть), расчленявшие склоны холмистых гряд. Палеодолины на южном и северном склонах поднятия в течение 17–12.5 млн лет заполнялись аллю-

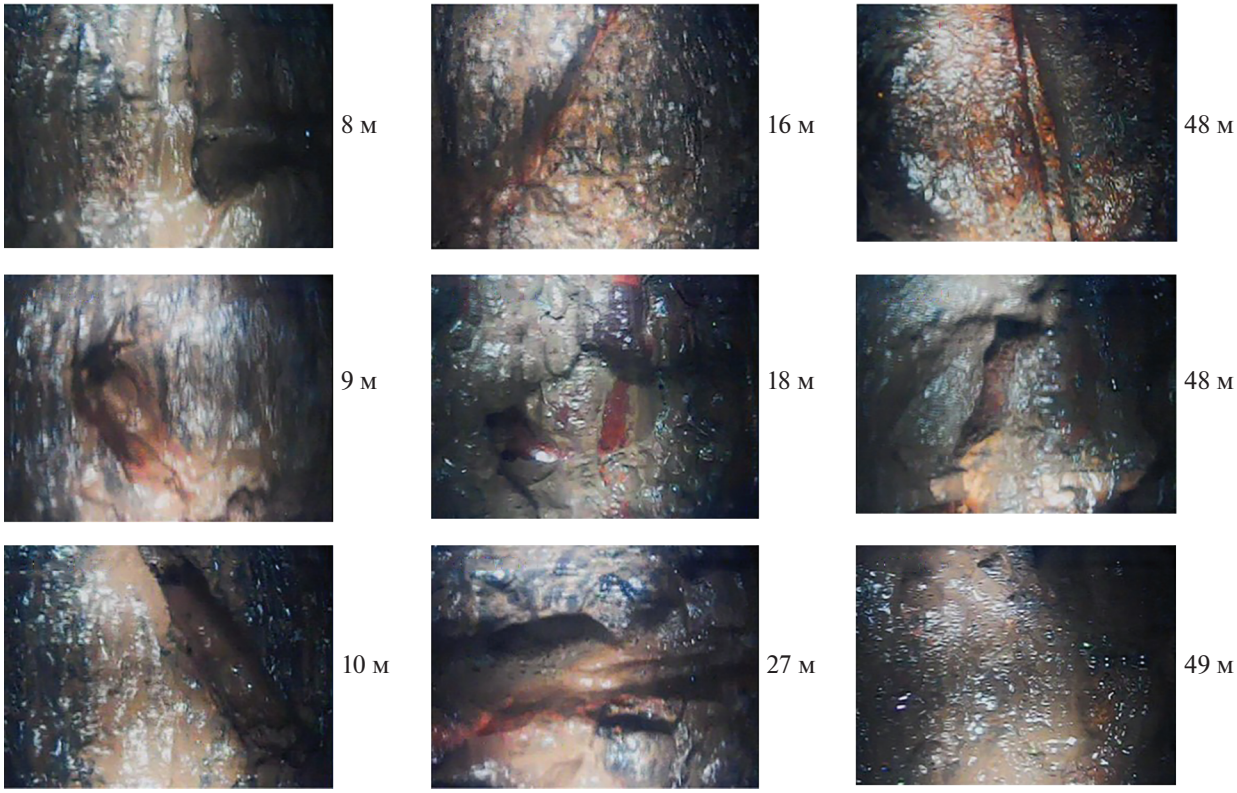



**Фиг. 2.** Хронология событий на территории Хиагдинского рудного поля.

виально-пролювиальными делювиальными отложениями, представляющими собой перемытую кору выветривания витимканских гранитоидов. По литологическому составу миоценовые отложения нижнеджилиндинской подсвиты ($N_1^{2-3}dz_1$) – это хлидолиты, песчано-глинистые, гравелитовые и дресвяные отложения (Черняева и др., 2007). В этот период в водоносном горизонте существовали грунтовые условия питания, транзита и разгрузки подземных вод в стволовые Аталангинскую и Амалатскую палеодолины (см. фиг. 1). Во время формирования болотно-озерных слабопроницаемых алеврито-глинистых и песчано-глинистых отложений с прослоями вулканитов верхнеджилиндинской подсвиты ($N_1^{2-3}dz_2$) (вулканогенно-осадочная толща) гидрогеологические условия в нижнеджилиндинском рудоносном горизонте сменились на грунтово-пластовые и сформировались урановые руды (12.5–5.0 млн лет назад, Голубев и др., 2017). Режим фильтрации подземных вод из безнапорного стал безнапорно-напорным и напорным. Уран выщелачивался из элювия витимканских гранитов и поступал в рудоносный горизонт с бортов и верховьев палеооврагов.

Базальтовый вулканизм в пределах Амалатского плато протекал в четыре этапа, в период с 9.5 до 0.6 млн лет назад (Рассказов и др., 2007). Наиболее интенсивная тектономагматическая активизация проявилась в период последних двух циклов (5.0–3.0 и 1.8–0.6 млн лет назад), когда значительная часть территории Байсыханского поднятия была покрыта базальтовым покровом (хойготская свита – Q–$N_2hg$), перекрывшим мощным слоем до 285 м осадочные и вулканогенно-осадочные отложения джилиндинской свиты. Лишь в центральной части Байсыханского поднятия сохранились выходы гранитов палеозойского фундамента на поверхность. По-видимому, в этот же период произошло формирование пострудных разломов СВ простирания – Кореткондинский, Иранский и Хиагдинский (см. фиг. 1). В зоне этих тектонических нарушений амплитуда смещения по субвертикальному сместителю на некоторых месторождениях достигает 60 м. По данным опытно-фильтрационных работ, зоны разломов Кореткондинского и Хиагдинского в основном представляют собой слабопроницаемые гидравлические экраны.

На территории ХРП разведкой выявлено 17 вулканических аппаратов центрального типа (см. фиг. 1), детальное описание одного из них – вул-




**Фиг. 3.** Результаты бокового видеокаротажа в скважине на месторождении Вершинное. Приведены фотографии базальтов в пределах многолетней мерзлоты. Тип мерзлоты – мерзлый (льдистый), трещины заполнены льдом.

кан Вершинный – приведено в статье (Коченов и др., $1997_1$). Большинство вулканов погребено под покровом базальтов и на поверхности не проявлены.

С конца олигоцена и до начала формирования базальтового траппа на территории ХРП преобладал умеренно теплый гумидный климат. Короткий период – 5.5–2.5 млн лет – существовал семиаридный климат, который с начала наступления оледенения 2.5 млн лет назад сменился бореальным.

Согласно минералогическим и геохимическим исследованиям, образование фосфатных урановых руд в нижнеджилиндинском рудоносном водоносном горизонте происходило в восстановительном геохимическом барьере под влиянием сингенетических (растительный детрит) и эпигенетических (сероводород, метан, растворенное органическое вещество нефтяного ряда, поступающие из фундамента) восстановителей (Макаров и др., 1985; Кочкин и др., 2017; Тарханова и др., 2017; Дойникова и др., 2018).

## СОВРЕМЕННАЯ ИНФИЛЬТРАЦИЯ МЕТЕОГЕННЫХ ВОД В РУДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ

Как отмечено выше, ряд исследователей платобазальты и ММП принимают за абсолютный водоупор, а режим фильтрации подземных вод считают застойным. Геокриологические и гидрогеологические исследования опровергают это утверждение. По крайней мере до оледенения базальты не являлись монолитным образованием и не выступали в роли водооупора. Базальты на всю мощность сильно разрушены процессами выветривания и разбиты сетью трещин на отдельные глыбы различных размеров (фиг. 3). Каждая глыба окружена каймой осветления шириной в несколько сантиметров. Инфильтрация атмосферных вод осуществлялась через базальты практически беспрепятственно. На фотографиях, полученных с помощью бокового видеокаротажа, хорошо видны следы окисления метеогенными водами черно-зеленых базальтов в виде охр красного и желтого цвета.

В гидрогеологическом разрезе ХРП выделены четыре водоносных горизонта: в трещиноватых породах фундамента, перекрытых слабопроницаемыми отложениями глинистого элювия гранитоидов; рудоносный нижнеджилиндинский водоносный горизонт, изолированный сверху водоупорной вулканогенно-осадочной толщей болотно-озерных отложений верхнеджилиндинской подсвиты; водоносный горизонт в трещиноватых базальтах ниже подошвы ММП – базальтовый горизонт; заверша-

**Таблица 1.** Летнее опреснение подземных вод в пределах Витимского плоскогорья

| Источник, скважина | Возраст водовмещающих пород | Время года, дата | Минерализация | Ca | Mg | Na | $HCO_3$ | $SO_4$ | Cl | U | $CO_2$ (св.) | Литературный источник |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | мг/дм$^3$ | | | | | | | | | |
| Романовский | $\gamma Pz_1$ | лето | 460 | 33 | 22 | 42 | 335 | 25 | 3 | $2.3 \times 10^{-2}$ | 294 | (Маринов и др., 1988) |
| | | зима | 5328 | 256 | 382 | 547 | 3965 | 160 | 18 | $2.0 \times 10^{-1}$ | 1680 | |
| Шербахта | Kz | лето | 365 | 40 | 19 | 35 | 268 | 0 | 3 | $4.4 \times 10^{-4}$ | 634 | |
| | | зима | 1799 | 112 | 67 | 266 | 1268 | 57.6 | 28 | $4.5 \times 10^{-4}$ | – | |
| Скв. Придорожная | $K_1$ | лето | 1181 | 28 | 84 | 248 | 750 | 32 | 39 | $3.5 \times 10^{-2}$ | $H_2S$ | |
| | | зима | 1327 | 56 | 87 | 320 | 780 | 45 | 39 | $3.1 \times 10^{-2}$ | $H_2S$ | |
| 3473 (Залежь X3) (верховье палеодолины) | $N^{2-3}{}_1dz_1$ | 14.07.1987 | 233 | | 26 | | 293 | | | | 101 | (Пешков и др., 1993) |
| | | 03.12.1987 | 747 | | 104 | | 964 | | | | – | |
| 2888 (Залежь X5) (средняя часть палеодолины) | $N^{2-3}{}_1dz_1$ | 21.07.1986 | 255 | | 31 | | 329 | | | | 1050 | |
| | | 22.02.1986 | 277 | | 31 | | 342 | | | | 154 | |

ют разрез сезонные надмерзлотные воды – зона летнего оттаивания.

Многолетнемерзлые породы также не являются водоупором, о чем свидетельствуют следующие факты.

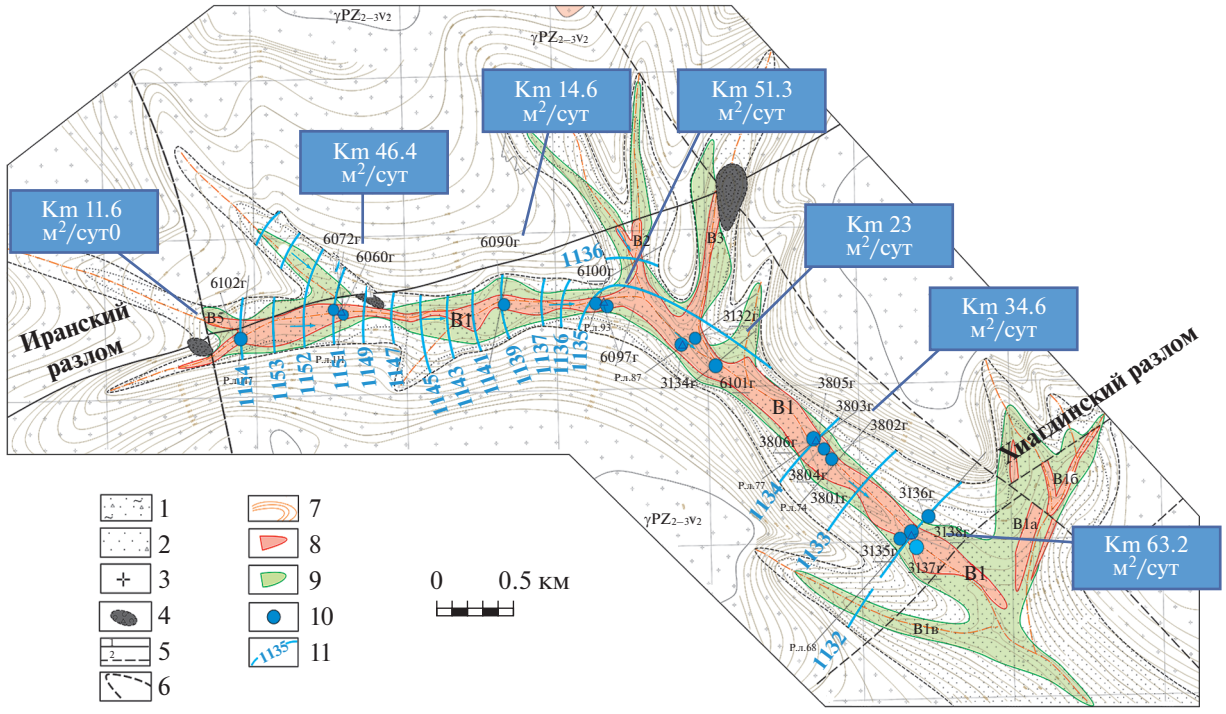
Мерзлота на территории ХРП плохо изучена. Ее мощность 40–90 м определена в пределах рудоносных палеодолин. На водоразделах между палеодолинами и в центральной части Байсыханского поднятия сведения о параметрах ММП отсутствуют. Тем не менее известно, что нормативная глубина сезонного оттаивания в данном районе по СНиП 2-02-01-83 составляет 6.0 м. На склонах южной экспозиции глубина оттаивания в летний период может достигать 10 м и более, а мощность ММП на региональном и локальных водоразделах сокращаться до величины <40 м. Таким образом, весьма вероятно появление на этих участках сезонных сквозных таликов, через которые может происходить инфильтрация атмосферных вод. Подтверждением существования этого процесса служат данные о летнем опреснении подземных вод в трещиноватых породах палеозойского фундамента и в рудоносном водоносном горизонте осадочных отложений (табл. 1).

На всех крупных залежах месторождений ХРП между гидрогеологическими скважинами установлен гидравлический уклон 0.00n, что свидетельствует о наличии замедленного, типичного для гидрогенных месторождений при глубине залегания рудных залежей до 300 м, а не застойного, режима фильтрации в рудоносном водоносном горизонте. Наиболее детально гидродинамика подземных вод изучена в пределах Залежи B1 месторождения Вершинное (фиг. 4). При протяженности залежи 5.5 км гидрогеологические скважины расположены через каждые 0.8 км. Это позволило точно установить изменение пьезометрической поверхности подземных вод по простиранию залежи в направлении от Иранского к Хиагдинскому разлому и подтвердить наличие потока подземных вод от верховьев к низовьям палеодолины B1. Гидравлический уклон здесь снижается от 0.008 до 0.001, и пьезометрическая поверхность выполаживается перед Хиагдинским разломом, т.к. зона разлома выступает в роли слабопроницаемого гидравлического барьера.

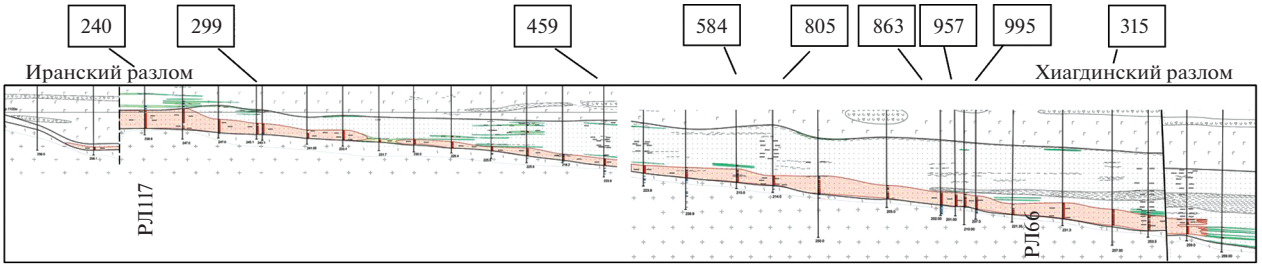
От верховья (Иранский разлом) к низовью (Хиагдинский разлом) палеодолины минерализация подземных вод увеличивается от 240 до 995 мг/дм$^3$ (фиг. 5), и гидрокарбонатно-кальциево-натриевый химический состав подземных вод становится гидрокарбонатно-магниевым, что свидетельствует о развитии инфильтрационного потока от верхней части палеоврага.

Руды хиагдинского типа по сравнению с большинством промышленных руд гидрогенных месторождений специфичны не только фосфатным составом урановых минералов (Дойникова и др., 2018), но и преобладанием среди карбонатов сидерита, тогда как наиболее распространенным минералом на месторождениях этого класса является кальцит.

Сидерит идеальный индикатор окислительных и восстановительных геохимических процессов. Изучение прозрачных шлифов под бинокулярным микроскопом показало, что в скважинах




**Фиг. 4.** Изменение уклона пьезометрической поверхности подземных вод вдоль Залежи B1 месторождения Вершинное. 1 – песчано-глинистые отложения; 2 – пески глинистые, хлидолиты, гравийники водоносного рудоносного горизонта; 3 – витимканские граниты; 4 – вулканический аппарат; 5 – разломы установленные и предполагаемые; 6 – контур палеодолины; 7 – изогипсы рельефа поверхности, м; 8 – балансовые урановые руды (> 0.01%); 9 – забалансовые урановые руды (<0.01%); 10 – гидрогеологическая скважина; 11 – гидроизопьеза и значение абсолютной отметки.

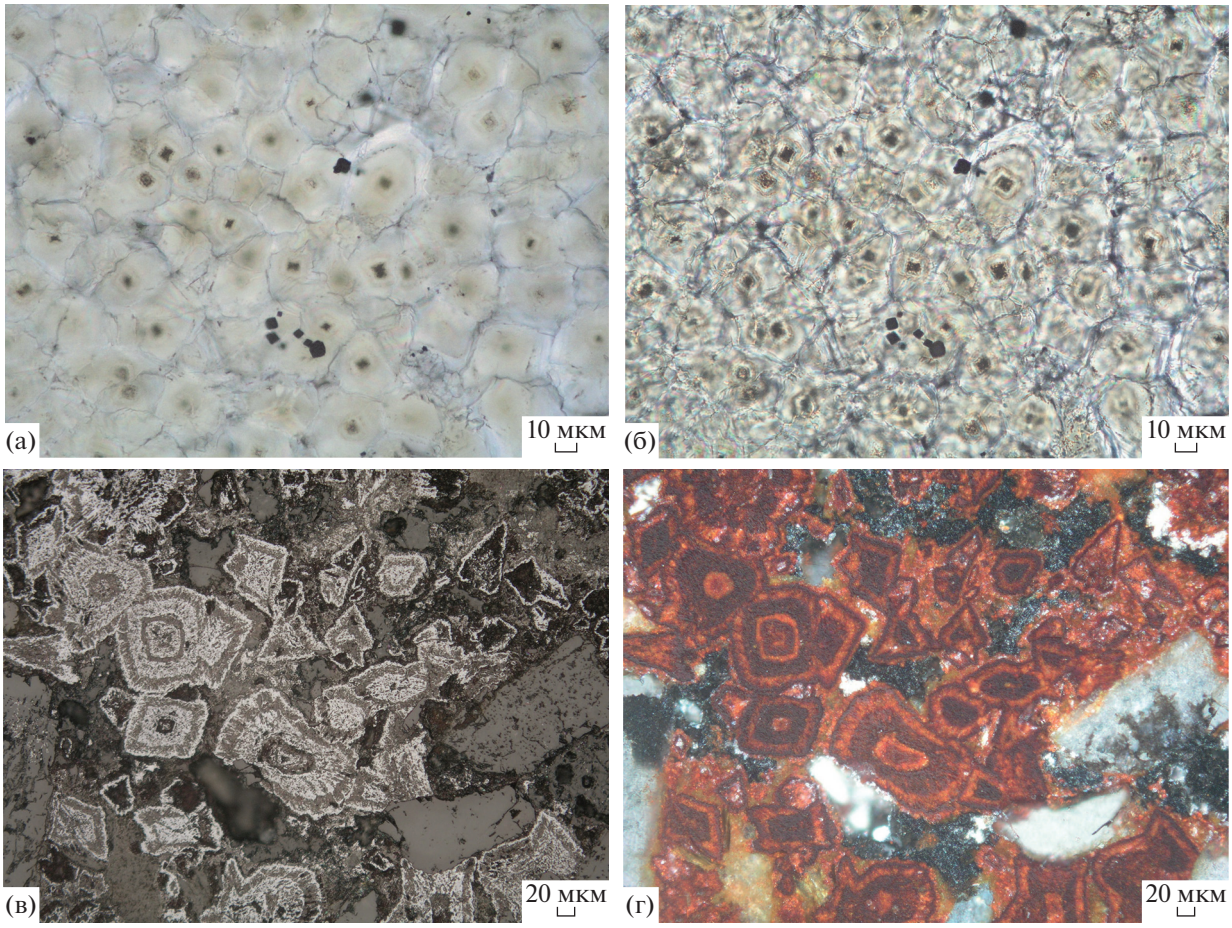



**Фиг. 5.** Возрастание минерализации подземных вод по мере погружения рудоносного водоносного горизонта (Залежь B1). В черных прямоугольных рамках – минерализация подземных вод в мг/дм$^3$.

по разведочной линии РЛ 117 в верхней части рудной Залежи B1 (см. фиг. 5) сидериты окислены (фиг. 6в, г), а в нижней части по разведочной линии РЛ 66 (см. фиг. 5) они восстановлены (фиг. 6а, б) и по содержанию макрокомпонентов имеют типичный для первичного сидерита состав (в %): MgO 3.27, FeO 50.56, CaO 3.29, MnO 1.04, $CO_2$ 41.44.

Окисленные сидериты в верховьях палеодолин являются дополнительным свидетельством развития инфильтрации атмосферных вод от их верхней части.

Еще одним доказательством существования современного инфильтрационного питания рудоносного водоносного горизонта служат данные измерения Eh в системе вода–порода, выполненные по методике А.К. Лисицина (1975) на образцах керна разведочных скважин на месторождении Дыбрынское. Исследования проведены по трем разведочным скважинам в поднятом тектоническом блоке, погружающемся в северо-восточном направлении. В этом же направлении распространяется поток подземных вод, и окислительная обстановка на глубине 95–110 м (Eh +150...+190 мВ) (фиг. 7), типичная для кислородсодержащих метеорных вод, сменяется в интервале глубин 124–150 м сильно восстановительной – Eh –420...–330 мВ, наиболее благо-




**Фиг. 6.** Первичный восстановленный сидерит с кристаллами пирита (а – в проходящем свете, б – в скрещенных николях) в сероцветных рудоносных песках из низовья Залежи В1 и кристаллы окисленного сидерита в отраженном свете (в) с псевдоморфозами гидрогематита, видимыми при съемке в скрещенных николях (г), в частично окисленных песках из верховья этой же залежи.

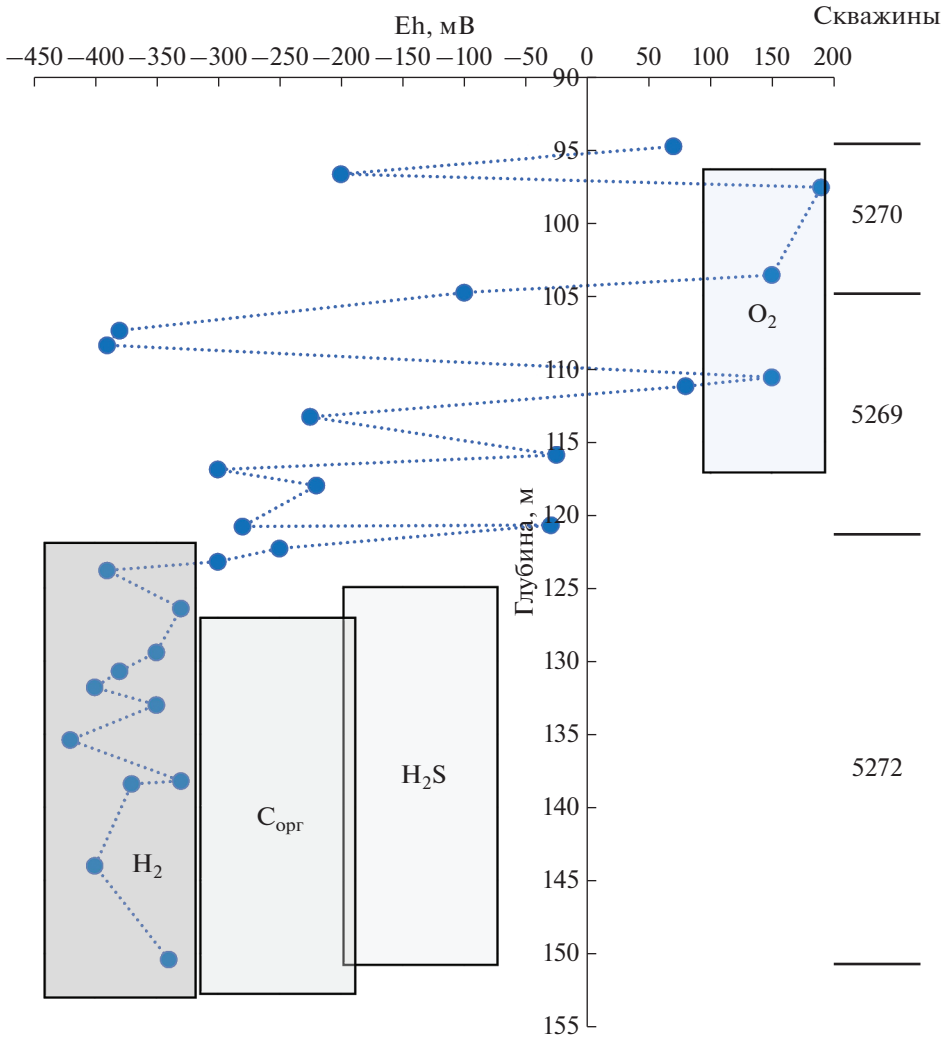
приятной для образования нингиоита (Kajitani, 1970; Solodov, 2014) и сидерита (Гаррелс, Крайст, 1968).

Таким образом, об инфильтрации метеогенных вод свидетельствует ряд факторов, проявленных в направлении от верховьев к низовьям рудоносных палеодолин: 1) наличие потока подземных вод; 2) увеличение минерализации подземных вод в этом направлении; 3) смена гидрокарбонатных кальциевых/натриевых вод гидрокарбонатно-магниевыми; 4) смена окислительных (Eh +70...+150 мВ) условий на сильно восстановительные (Eh – 400...–300 мВ); 5) появление в верховьях сульфата в количестве до 25 мг/дм$^3$ (признак окисления сульфидов), отсутствующего в нижней части палеодолин; 6) окисленные сидериты в верхней части и неизмененные их формы в низовьях палеодолин.

Приведенные фактические данные свидетельствуют о существовании современной инфильтрации метеогенных вод. Можно предположить, что и до оледенения в период формирования урановых руд 12.5–5.0 млн лет назад происходила инфильтрация атмосферных кислородсодержащих вод. В связи с этим возникает вопрос: какие процессы сдерживали инфильтрацию и способствовали формированию восстановительного геохимического барьера и сохранению урановых руд начиная с момента их зарождения по настоящее время?

## СОВРЕМЕННАЯ ЭКСФИЛЬТРАЦИЯ УГЛЕКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

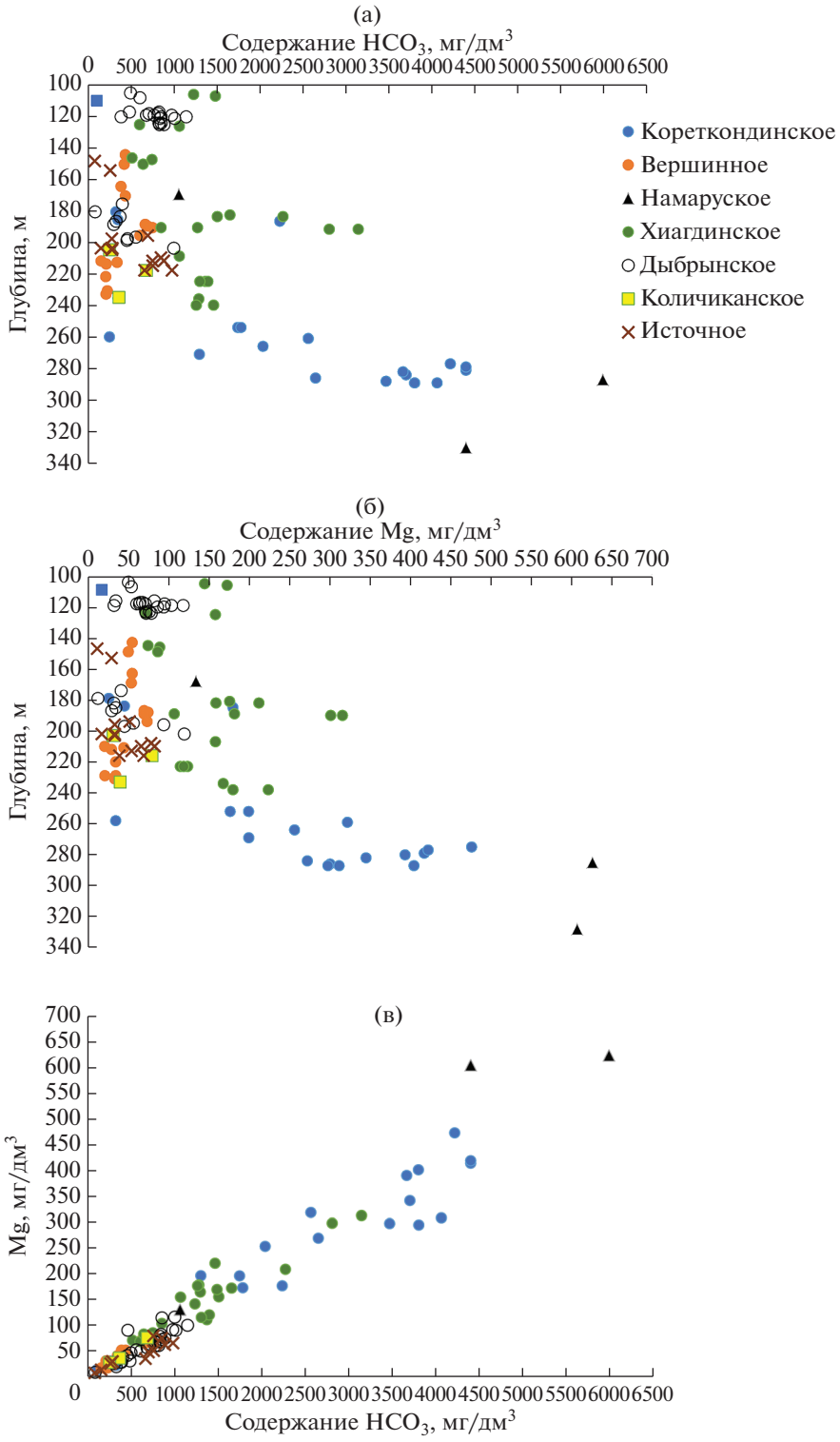
Поствулканические углекислые минеральные подземные воды широко распространены на территории Забайкалья, что типично для альпийских складчатых систем (Поляков и др., 2003). Обнаружено около 300 источников этих вод (Замана, 2017). Из них примерно 30 источников – это термальные воды (20–77°С), выявленные в горной части восточного Прибайкалья. По составу они преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные натриевые кремнистые, часто с сероводо-



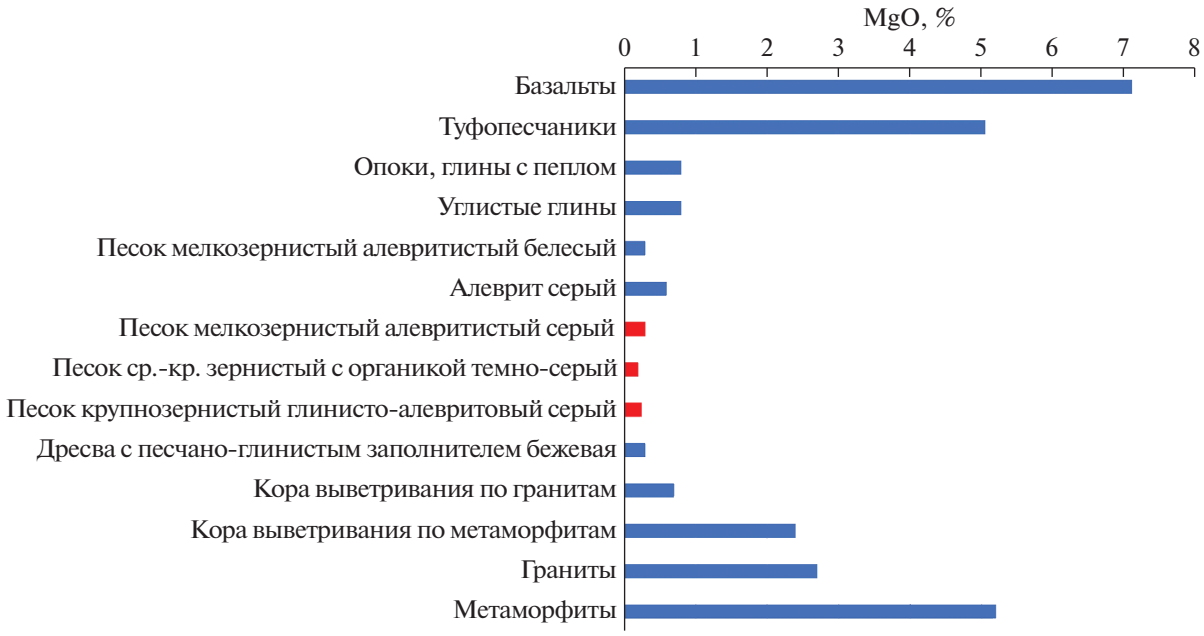

**Фиг. 7.** Возрастание с глубиной степени восстановленности гидрогеохимической среды в поднятом тектоническом блоке на месторождении Дыбрынское по данным измерения Eh в системе вода–порода (аналитик Н.И. Ганина). Прямоугольниками выделены поля распространения Eh подземных вод по литературным данным: окислительно-восстановительные системы $O_2$ и $H_2S$ по (Крайнов и др., 2004); системы $C_{орг}$ и биогенного $H_2$ по (Лисицин, 1975).

родом и слабоминерализованные (до 1 г/л). На основной площади Забайкалья, включая и Байсыханское поднятие, распространены весьма холодные углекислые подземные воды с температурой 2–6°С.

В.М. Степановым (1963) впервые на Витимском плоскогорье обнаружен необычный тип холодных углекислых подземных вод – гидрокарбонатно-магниевые. Позднее при изучении уранового месторождения Именское в Витимском урановорудном районе Б.Н. Мариновым (1974) доказано, что эти воды имеют глубинный источник происхождения. Обобщение результатов гидрогеохимического опробования гидрогеологических скважин, полученных в ходе геологоразведочных работ на месторождениях ХРП, показало, что в области распространения рядовых и богатых урановых руд преобладают подземные воды именно этого состава. Содержания $HCO_3$ и Mg закономерно возрастают с глубиной на всех месторождениях ХРП (фиг. 8а, б). Между этими компонентами существует идеальная прямая связь (фиг. 8в), что свидетельствует об их генетической взаимосвязи. Углекислый газ и, соответственно, гидрокарбонат имеют глубинное происхождение (Поляков и др, 2003; Замана, 2017). Прямая корреляционная зависимость магния от гидрокарбоната указывает на наличие эксфильтрации не только газовой, но и жидкой фазы. Причем этот процесс связан с древними (по отношению к руде) тектоническими нарушениями в осевых частях палеодолин. Концентрация свободного $CO_2$ возрастает с глубиной, достигая на глубине 330 м 3.5 г/дм$^3$. Соответственно, с ростом глубины увели-




**Фиг. 8.** Увеличение с глубиной залегания подземных вод концентрации $HCO_3$ (а) и Mg (б), прямая корреляционная зависимость содержания магния от концентрации гидрокарбоната (в) в подземных водах месторождений ХРП.




**Фиг. 9.** Изменение содержания магния в подрудных, рудных и надрудных породах по данным силикатного анализа.

чивается содержание $HCO_3$ до 6 г/дм$^3$ и Mg до 620 мг/дм$^3$. При этом связь гидрокарбоната с Ca и Na отсутствует. Кальций и натрий в подземных водах этого типа присутствуют в подчиненном количестве.

Источником магния в подземных водах, всего вероятнее, являются роговая обманка и хлориты метаморфических и изверженных пород скального основания, отличающиеся более высокой магнезиальностью (MgO 2.5–5.1%) по сравнению с рудовмещающими терригенными отложениями (MgO 0.2–0.4%) (фиг. 9).

Связь уранового оруденения с эксфильтрующимися глубинными гидрокарбонатно-магниевыми водами иллюстрирует сопоставление удельной площадной продуктивности пласта (фиг. 10а) с изменением $HCO_3$ и Mg (фиг. 10б) по простиранию Залежи В1 месторождения Вершинное. Концентрации гидрокарбоната и магния в подземных водах симбатны, что дополнительно свидетельствует об их генетической взаимосвязи. Самые богатые по содержанию урана руды (продуктивность достигает 45–50 кг/м$^2$) пространственно точно совпадают с аномально высокими содержаниями $HCO_3$ и Mg.

Рудосохраняющим фактором в отношении урановых руд являются глубинные углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды сложного состава, содержащие эпигенетические газы-восстановители (сероводород, водород, метан, углеводороды нефтяного ряда), растворенное органическое вещество (1.44–6.25 мг/дм$^3$), в составе которого определены кислые смолы, асфальтиты и кислые битумы (Макаров и др., 1985).

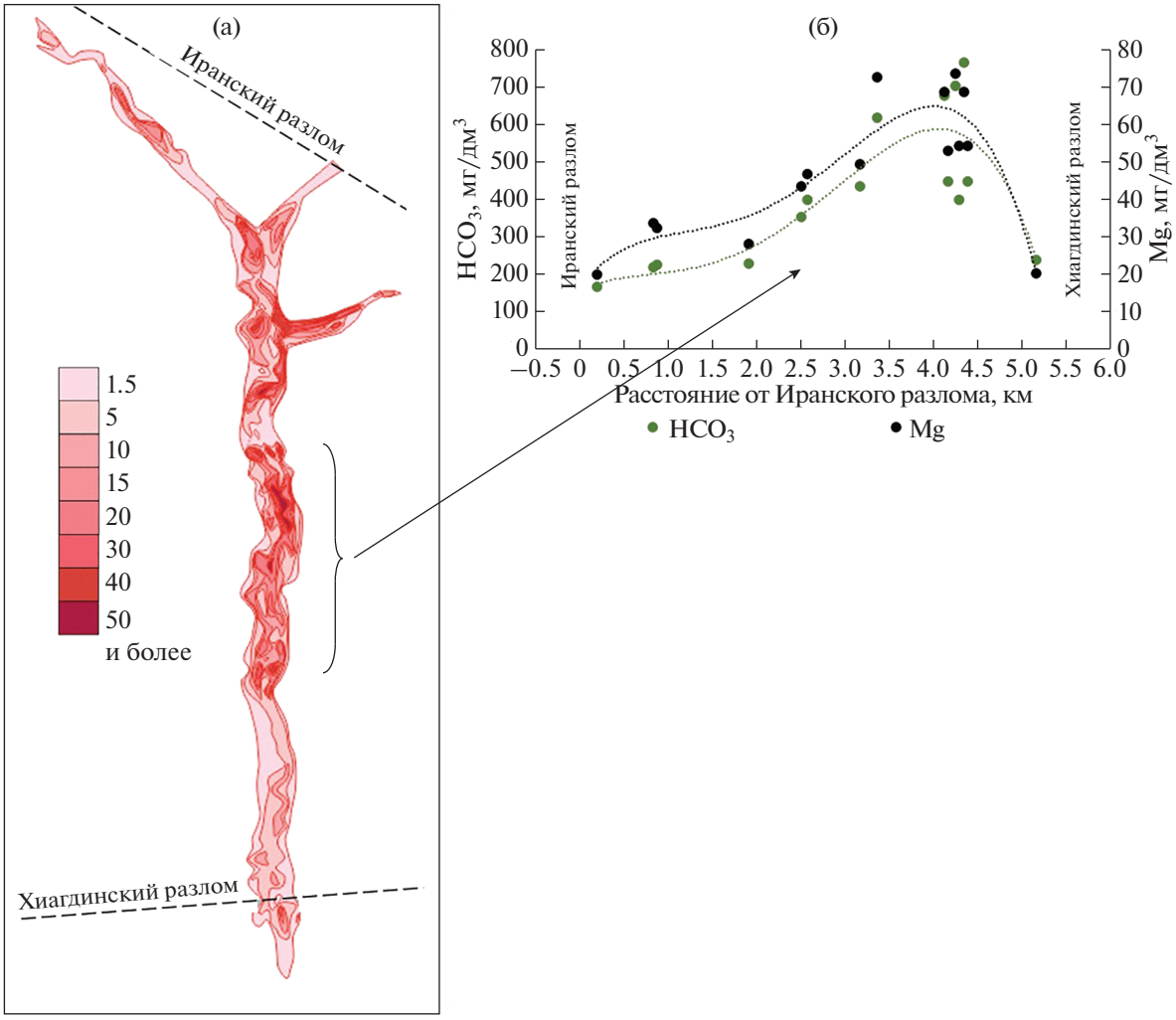
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Режим питания водоносных рудоносных горизонтов смешанный – инфильтрационно-эксфильтрационный. Количественное соотношение этих потоков не установлено. Тем не менее, исходя из соотношения площадей, можно предположить, что эксфильтрация значительно преобладает над инфильтрацией.

Об инфильтрации метеогенных вод свидетельствует ряд факторов, проявленных в направлении от верховьев к низовьям рудоносных палеодолин: 1) наличие потока подземных вод; 2) увеличение минерализации подземных вод в этом направлении; 3) смена гидрокарбонатных натриевых/кальциевых вод гидрокарбонатно-магниевыми; 4) смена окислительных (Eh +70...+150 мВ) условий на сильно восстановительные (Eh –400...–300 мВ) (фиг. 4); 5) появление в верховьях сульфата в количестве до 25 мг/дм$^3$ (признак окисления сульфидов), отсутствующего в нижней части палеодолин; 6) окисленные сидериты в верхней части и неизмененные их формы в низовьях палеодолин; 7) летнее опреснение подземных вод.

Таким образом, базальтовый трапп и многолетнемерзлые породы не являются водоупором и, соответственно, рудоконсервирующим фактором.

Рудосохраняющим фактором являются эксфильтрующиеся из фундамента глубинные гидрокарбонатные магниевые с углекислотой подземные




**Фиг. 10.** Связь богатых урановых руд с гидрокарбонатно-магниевой аномалией: а – распределение по площади Залежи В1 удельной площадной продуктивности урановых руд в кг/м$^2$; б – изменение содержания магния и гидрокарбоната в подземных водах вдоль Залежи В1 в направлении от Иранского до Хиагдинского разлома.

воды сложного состава, содержащие эпигенетические восстановители. Это еще один поисковый признак для нахождения урановых руд хиагдинского типа в Витимском ураново-рудном районе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке АО “Атомредметзолото”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Гаррелс М.Р., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 370 с.

Геотехнология урана (российский опыт): монография / Под. ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. М.: “КДУ”, “Университетская книга”, 2017. 576 с.

*Голубев В.Н., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др.* U-Pb системы и изотопный состав урана в урановом месторождении “песчаникового” (палеодолинного) типа: месторождение Дыбрын, Витимский урановорудный район, Россия // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 55. № 6. С. 467–480.

*Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Карташов П.М.* Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 24–30.

*Замана Л.В., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г.* Новые проявления углекислых вод в Юго-Восточном Забайкалье // Успехи современного естествознания. 2017. № 4. С. 78–83.

*Ильичев А.В., Данковцев Р.Ф., Лукьянова В.Т., Маринов Б.Н.* К вопросу о генезисе уранового оруденения в неогеновых палеорусловых структурах под покровом базальтов Витимского плато (Забайкалье) // Матер. по

геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1990. Вып. 125. С. 46–57.

*Коченов А.В., Халдей А.Е., Халезов А.Б., Шагарова В.Б.* Необычные случаи концентрации урана в палеодолинах // Литология и полезные ископаемые. 19971. № 3. С. 331–336.

*Коченов А.В., Халдей А.Е.* К вопросу об источниках урана в экзогенных эпигенетических месторождениях // Литология и полезные ископаемые. 19972. № 4. С. 371–378.

*Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Величкин В.И. и др.* Перераспределение железа в пострудную стадию на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля, Витимский район // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56. № 2. С.131–147.

*Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В. и др.* Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 124–140.

*Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.

*Лисицин А.К.* Гидрогеохимия рудообразования. М.: Недра, 1975. 248 с.

*Лучинин И.И., Пешков П.А., Дементьев П.К. и др.* Месторождения урана в палеодолинах Зауралья и Забайкалья // Разведка и охрана недр. № 5. 1992. С. 12–15.

*Макаров С.И., Ильичев А.В., Шуршалина М.А.* Углекислые урароносные источники южной части Витимского района (Западное Забайкалье) // Матер. по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1985. Вып. 95. С. 131–137.

*Маринов Б.Н.* К вопросу о происхождении гидрокарбонатных магниевых вод во впадинах Забайкальского типа // Геохимия. 1974. № 7. С. 1093–1099.

*Маринов Б.Н., Ильичев А.В.* О возможной роли углекислых урароносных вод в кайнозойском рудообразовании на Витимском плато (Забайкалье) // Матер. по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1988. Вып. 113. С. 90–98.

*Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др.* Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

*Пешков П.А., Грязнов В.П., Макшанинов В.В. и др.* Отчет о результатах предварительной разведки месторождений Хиагдинского рудного поля в Центральном Забайкалье с подсчетом запасов урана по состоянию на 1.05.1992. Иркутск, 1993. 246 с.

*Поляков В.А., Соколовский Л.Г.* Генезис и динамика минеральных вод Кавказа по результатам изотопно-геохимических исследований // Гидрогеология, инж. геология, обзор. М.: ООО “Геоинформмарк”, 2003. 65 с.

*Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. и др.* Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Ин-т земной коры СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2007. 193 с.

*Рихванов Л.П., Домаренко В.А., Митрофанов Е.А.* Комплексный состав руд урановых месторождений и некоторые тенденции поведения микроэлементов на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Россия) // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Алматы, 7–9 ноября 2019. Том. 2. С. 3–10.

*Степанов В.М.* Минеральные воды Северо-Западного Забайкалья // Минеральные воды Восточной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 149 с.

*Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др.* Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 7–13.

*Тарханова Г.А., Прохоров Д.А.* Генетические особенности формирования уранового оруденения “витимского” типа // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 47–59.

*Черняева Г.П., Лямина Н.А., Рассказов С.В. и др.* Биостратиграфия и условия накопления средне- и верхнемиоценовой вулканогенно-осадочной толщи Джилиндинской впадины Западного Забайкалья // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 4. С. 460–471.

*Kajitani K.* A geochemical study on the genesis of ningyoite, the special calcium uranium phosphate mineral // Econ. Geol. № 65. 1970. P. 470–480.