

УДК 553.07

Посвящается памяти
доктора геолого-минералогических наук
С.Ф. Винокурова

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ УГЛЕКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И УГЛЕВОДОРОДОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

© 2023 г. И. Н. Солодов^а, *, М. В. Нестерова^б, **

^аАкционерное общество “Атомредметзолото”, Москва, Россия

^бИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35,
Москва, 119017 Россия

*E-mail: INSolodov@armz.ru

**E-mail: Nestmv@igem.ru

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Обобщение, начиная с 1985 года, фондовых и опубликованных материалов по биогеохимическим, гидрогеохимическим, геохимическим, минералогическим исследованиям и изучению геохимии почв на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля Витимского уранового рудного района позволило установить генетическую связь глубинных холодных углекислых гидрокарбонатно-магниевого подземных вод, содержащих растворенные углеводороды (УВ), с урановым оруденением и рудосохранением. Прослежено сквозное проникновение эпигенетических УВ от зоны дезинтеграции гранитоидов фундамента через выше залегающие осадочные рудоносные и вулканогенно-осадочные породы, вплоть до перекрывающих их трещиноватых базальтов. Установлена повсеместно встречающаяся ассоциация: осветленная порода—УВ—сидериты—фосфаты урана U(IV). Углекислые гидрокарбонатно-магниевого подземные воды и аномальные содержания УВ в почвах могут быть дополнительными критериями выявления урановых месторождений витимского типа в Забайкалье.

Ключевые слова: урановое месторождение, углекислые подземные воды, углеводороды, сидерит, оруденение, рудосохранение, нефть в почвенном покрове

DOI: 10.31857/S0016777023060096, EDN: SEXUJV

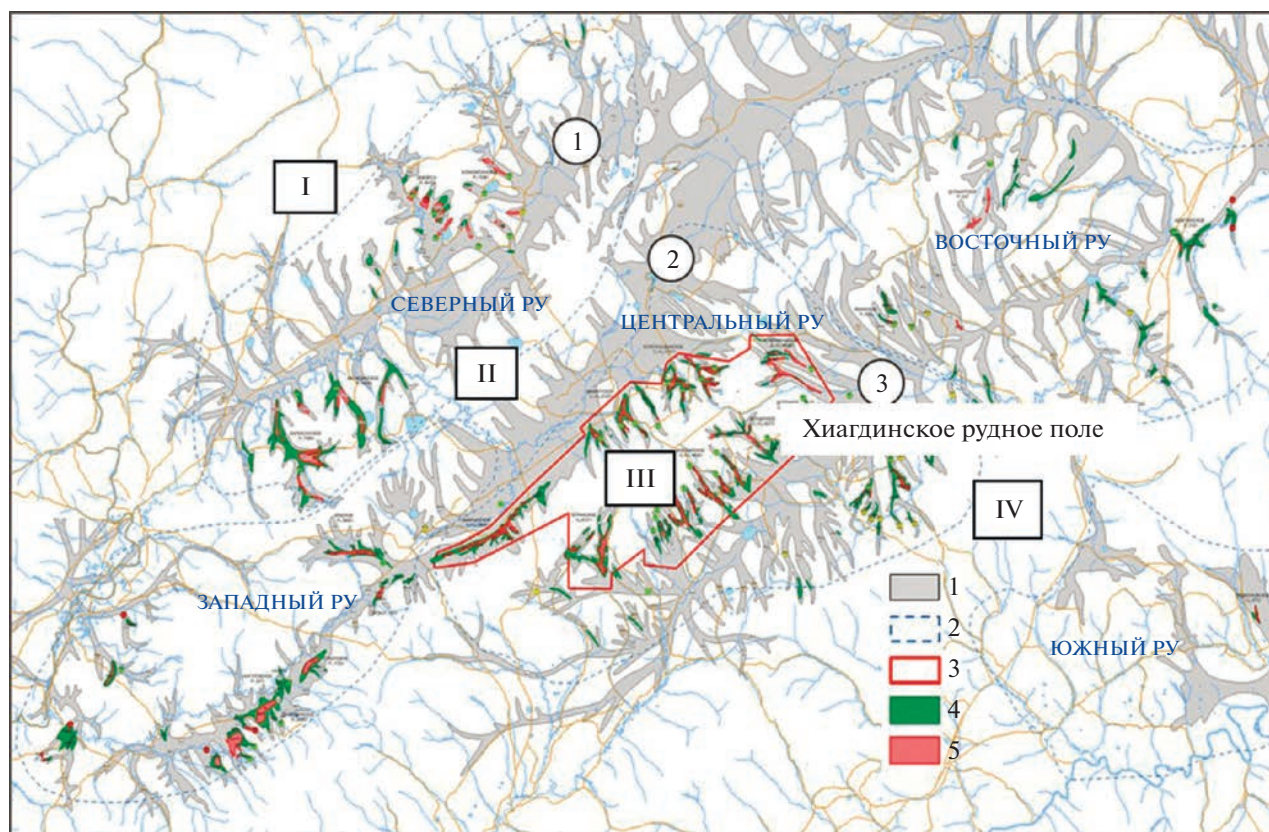
ВВЕДЕНИЕ

Забайкалье — крупнейший урановый рудный регион России, где сосредоточены 16 ураново-рудных районов, в пределах которых выявлено большое количество месторождений и рудопроявлений урана (Дзядок, Прохоров, 2021). Геологоразведочными работами выявлен Витимский урановый рудный район (УРР), состоящий из пяти рудных узлов (РУ) (фиг. 1): Западный, Северный, Восточный, Южный и Центральный (Добыча ..., 2022). Центральный РУ — Хиагдинское рудное поле (ХРП), включающее восемь месторождений на южном и северном склонах Байсыханского поднятия: Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количканское, Кореткондинское, Намаруское, Дыбынское и Тетрахское. В настоящее время в процессе освоения скважинным подземным выщелачиванием (СПВ) находятся первые четыре месторождения и подготавливается к за-

пуску в отработку СПВ в 2023 году месторождение Дыбынское.

Кроме Витимского УРР наиболее перспективными для выявления месторождений гидрогенного типа являются урановые рудные районы: Бадинский, Джидинский и Еравнинский. В их пределах возможно выявление месторождений урана двух генетических типов: в неогеновых палеодолинах (витимский тип) и в мезозойских осадочных образованиях в приразломных депрессиях с зонами пластового окисления (Дзядок, Прохоров, 2021).

На практике в качестве основных поисковых критериев выявления кайнозойского гидрогенного уранового оруденения витимского типа используются: 1) распространение в области питания водоносных горизонтов гранитоидов с повышенным содержанием урана, как источника для образования урановых руд; 2) размещение осадочных отложений в речных палеодолинах эрозивно-тектонического происхождения; 3) рыхлые отложения



Фиг. 1. Витимский УПР. Центральный рудный узел – Хиагдинское рудное поле. Палеодолины первого порядка: Хойготская (1), Аталангинская (2) и Амалатская (3) и разделяющие их Северное (I), Центральное (II) Байсыханское (III) и Ингурское (IV) поднятия. 1 – палеодолины первого, второго и третьего порядков; 2 – рудные узлы; 3 – ХРП; 4 – некондиционные урановые руды; 5 – кондиционные урановые руды.

аллювиальных, пойменных, реже озерных фаций, обогащенных углефицированной органикой и сульфидами, как концентраторы урана; 4) экзогенно-эпигенетические окислительно-восстановительные изменения рыхлых пород – наличие восстановительного геохимического барьера для формирования урановых руд. По совокупности данных критериев в Витимском УПР выявлены Аталангинская, Дутакильская и Муясинская площади (Дзядок, Прохоров, 2021).

В недавних публикациях на примере месторождения Вершинное обоснована связь уранового оруденения на месторождениях Хиагдинского рудного поля с углекислыми гидрокарбонатными магмическими подземными водами (Добыча ..., 2022; Солодов, Нестерова, 2022). В разрозненных статьях разных лет при изучении минерального состава и формирования урановых руд на месторождениях ХРП сообщается о находках углеводородов (УВ) и углеродистого вещества в зоне дезинтеграции гранитов фундамента, трещиноватых базальтах и в подстилающей их вулканогенно-осадочной толще джилдининской свиты (Мелков и др., 1985; Тарханова и др., 2014). В статье (Солодов, Карамушка, 2023) показано, что подземные

воды ХРП, относящиеся к Забайкальской провинции холодных ($1.5\text{--}4.7^\circ\text{C}$) углекислых подземных вод, содержат битумоиды, предельные и другие виды углеводородов. Неожиданным оказалось совпадение проекции урановых рудных тел на дневную поверхность с ореолами аномальных природных содержаний углеводородов нефтяного ряда в почвенном покрове на месторождениях Вершинное и Источное.

Цель данной статьи привлечь внимание специалистов в области гидрогенного уранового рудообразования к возможному появлению новых критериев выявления урановых месторождений витимского типа в Забайкалье – углекислые гидрокарбонатные магмические подземные воды и углеводороды в почвенном покрове. Решению этой проблемы в определенной степени способствовали недавно вышедшие в свет статьи и неопубликованные материалы С.Ф. Винокурова (Винокуров и др., 2016; Винокуров, 2018¹; Винокуров, 2022), памяти которого и посвящена данная работа.

¹Винокуров С. Ф. Генетическая модель формирования уранового оруденения витимского типа. 2018 (неопубликованные данные).

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ УГЛЕКИСЛЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ХИАГДИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Байсыханское поднятие — Хиагдинское рудное поле. Породы фундамента на всем его протяжении преимущественно представлены гранитоидами витимканского комплекса, среди которых преобладают порфиробластовые биотит-рогово-обманковые и среднезернистые лейкократовые разновидности (Халдей и др., 1998). Данный массив является частью гнейсово-купольной структуры, сформировавшейся в позднем палеозое. Процесс гранитизации метаморфического субстрата в позднем палеозое сопровождался привнесением урана. Воздымание, продолжавшееся в течение миоцена, привело к размыву кор выветривания на водораздельных участках и заложению на его склонах по зонам тектонических нарушений овражно-балочной сети (палеодолины 2 и 3 порядка), поперечной речным Амалатской и Аталангинской палеодолинам (см. фиг. 1).

Урановое оруденение приурочено к овражно-балочным палеоруслам, наследующим разрывные тектонические нарушения СЗ простирания, сформировавшиеся в конце олигоцена (Рассказов и др., 2007). Палеодолины заполнены слабосортированными делювиально-пролювиально-аллювиальными отложениями. В это время 17–10 Ма (Million age) преобладал умеренно теплый гумидный климат.

Органическое вещество (ОВ) крайне неравномерно распределено в рудоносной терригенной пачке (нижняя джилдиндинская подсвита — $N_1^{2-3} dz_1$), залегающей на глинистом коллювии витимканских гранитоидов ($PZ_{2-3}v$), и в вышележащей вулканогенно-осадочной толще (верхняя джилдиндинская подсвита — $N_1^{2-3} dz_2$), в которой осадочные отложения представлены болотно-озерными фациями.

Рудовмещающие осадочные образования характеризуются большим разнообразием литологического состава и содержания ОВ: в краевых частях палеодолин и овражно-балочной сети притоков преобладают делювиально-пролювиальные комплексы ($C_{орг}$ 0.5–5.0%); наиболее широко распространенные русловые фации представлены пойменными глинисто-алевритовыми песками ($C_{орг}$ 1–4%) и песками стрежневой фации с гравием и галькой ($C_{орг}$ 0.8–1.5%); пойменные, старичные фации — пески, алевриты и глины ($C_{орг}$ от 2–3 до 21–25%); болотные фации — преимущественно тонкообломочные отложения с растительным детритом, фрагментами растений и торфом ($C_{орг}$ до 20–30%) (Самович и др., 2017). Важно подчеркнуть, что наиболее богатые урановые руды с площадной удельной продуктивностью до 50–75 кг/м² локализованы в песках с гравием и галькой стрежневой фации, в которых углефицированное ОВ содержится в наименьшем количестве — $C_{орг} \sim 1\%$. В отложениях с вы-

соким содержанием $C_{орг}$ до 20–30% обнаружены локальные участки с урановой минерализацией, не имеющей промышленного значения.

В конце миоцена и в плиоцене в результате нарастания латеральных растягивающих тектонических напряжений возникли каналы для поступления на поверхность базальтовой магмы. Ее многократные излияния, закончившиеся в конце эоплейстоцена, образовали мощный покров до 150 м (хойготская свита — $Q-N_2hg$), под которым погребены осадочные (ныне рудоносные) и вулканогенно-осадочные отложения джилдиндинской свиты.

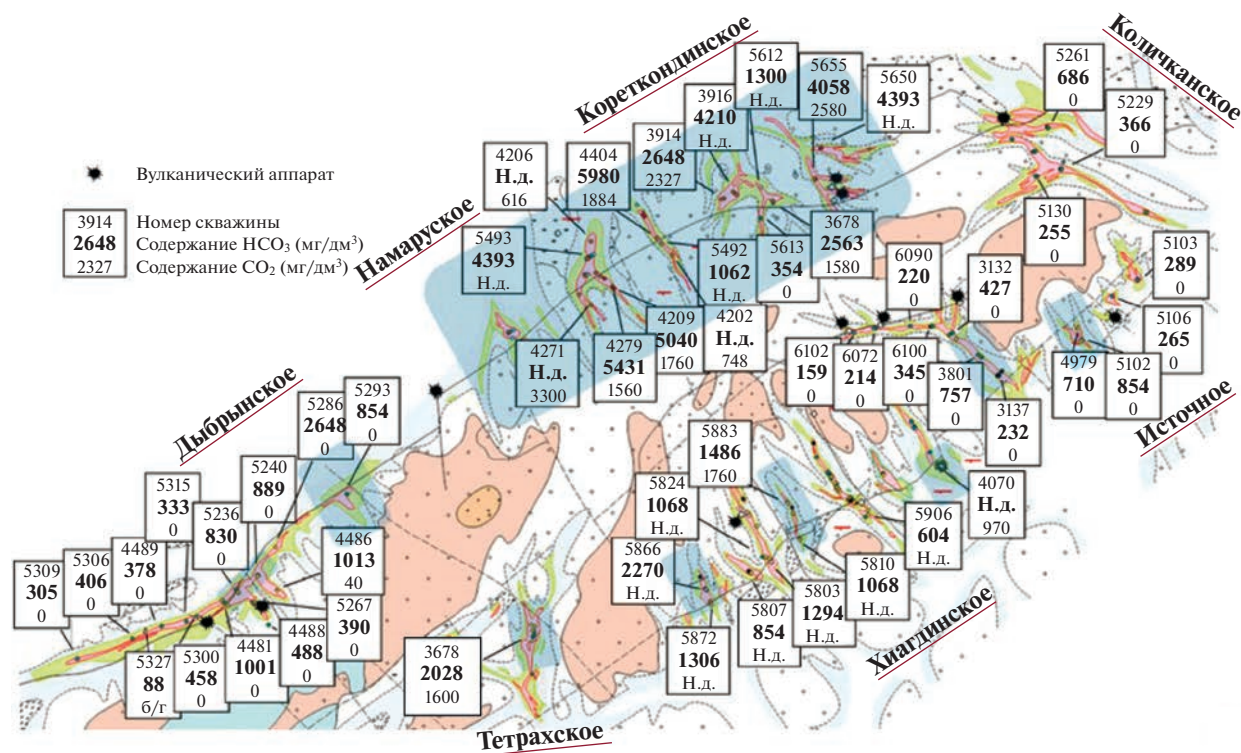
Базальтовый магматизм протекал в четыре этапа — в период с 9.5 до 0.6 Ма (Рассказов и др., 2007). Наиболее интенсивная тектономагматическая активизация проявилась в период последних двух циклов (5.0–3.0 и 1.8–0.6 Ма), когда значительная часть территории Байсханского поднятия была покрыта базальтовым покровом. Только в центральной части поднятия сохранились выходы гранитоидов на поверхность.

На территории ХРП выявлено 17 вулканических аппаратов центрального типа. Большинство вулканов погребено под покровом базальтов и на поверхности не проявлены.

В плейстоцен-голоценовый период в период с 2.5 Ма образовалась многолетняя мерзлота, распространяющаяся в настоящее время в пределах палеодолин на глубину 40–90 м. В последние 500 лет произошло несколько макроциклов и множество микроциклов оледенения и оттаивания.

Нашими исследованиями доказано (Солодов, Нестерова, 2022), что базальты разбиты трещинами и имеют глыбовое строение. До оледенения через базальты шла инфильтрация метеорных вод, что проявилось в окислении стенок трещин в базальтах и появлении в них участков желтых и красных охр. Многолетнемерзлые породы (ММП) также не являются водоупором, т. к. по данным режимных гидрогеохимических наблюдений установлено летнее опреснение подземных вод в рудоносном горизонте, что свидетельствует о существовании сезонных сквозных таликов. Во всех крупных палеодолинах установлен замедленный водообмен (Добыча ..., 2022). При этом проникновение с верховьев палеодолин в рудоносный горизонт кислородсодержащих метеорных вод не приводит к окислительному разрушению урановых руд. Ему препятствует, как мы предполагаем, поступление из фундамента восходящих углекислых подземных вод с высокой восстановительной способностью ($Eh -420 \dots -200$ мВ) (Солодов, Нестерова, 2022; Солодов, Карамушка, 2023).

Углекислые гидрокарбонатные магниевые и натриево-магниевые подземные воды повсеместно распространены на месторождениях Намаруское и Кореткондинское, где концентрации $НСО_3$ и свободного $СО_2$ достигают 6.0 и 3.6 г/дм³ соответственно (фиг. 2). На месторождениях Дыбрыньское, Тетрахское и Вершинное они обнару-



Фиг. 2. Урановые рудные залежи месторождений Хиагдинского рудного поля на склонах Байсыханского поднятия и области распространения углекислых гидрокарбонатно-магниевого подземных вод, выделенные на геолого-структурной карте светло-голубым цветом.

жены на отдельных участках рудных залежей, а на месторождении Хиагдинское на залежах Х1, Х4 и Х5 и на месторождении Источное на залежи И1. При этом на месторождении Количканское углекислые воды не встречены, и урановые руды на этом месторождении в целом бедные. Преобладают значения удельной площадной продуктивности 5–10 кг/м² (Добыча ..., 2022).

Содержания гидрокарбоната и магния в подземных водах на месторождениях ХРП закономерно увеличиваются с возрастанием глубины залегания рудных залежей от 40 до 330 м. Между этими компонентами существует идеальная прямая зависимость концентрации Mg от содержания HCO₃, что позволило предположить существование на локальных участках рудных залежей восходящего потока подземных вод по зонам тектонических нарушений кристаллического фундамента (Солодов, Нестерова, 2022).

Важно отметить, что в действительности область распространения углекислых подземных вод более обширная, т. к. содержания гидрокарбоната и свободного углекислого газа занижены при отборе проб воды на изливе скважин при эрлифтной или насосной их прокачке.

Углекислые подземные воды на Байсыханском поднятии относятся к Витимо-Олекминской области (Гидрогеология ..., 1970) Забайкальской про-

винции холодных (1.4–4.7°C) углекислых гидрокарбонатных магниевого и кальций-магниевого подземных вод. Обнаружено около 300 источников этих вод. Они хорошо изучены. В подземных водах этого типа определены растворенные органические вещества, микроэлементы, радиоактивность, изотопный состав кислорода, углерода, урана и гелия. Во всех изученных источниках обнаружены в мг/дм³: C_{орг.} 2.5–65.5; нейтральные (0.1–0.9) и кислые (0.1–1.2) битумы; гумусовые (спирторастворимые) вещества – 0.6–5.5 (Шпейзер и др., 2004). Нафтенческие кислоты не встречены.

В южной части Витимского плоскогорья в источниках углекислых вод Аршан и Муйсун обнаружено растворенное органическое вещество (1.44–6.25 мг/дм³), в составе которого определены кислые смолы, асфальтиты и кислые битумы (Макаров и др., 1985).

Также реконструированы условия формирования химического состава и растворенных органических веществ на месторождениях холодных углекислых минеральных вод Молоковка, Шиванда, Дарасун и Кука (Украинцев и др., 2021). В этих водах содержатся спирты различной структуры и дикарбоновые кислоты (табл. 1). Во всех пробах присутствуют ароматические соединения и фталаты. Сложные эфиры представлены в основном ди-(2-этилгексильным)-эфиром адипиновой кислоты.

Таблица 1. Углеводороды, обнаруженные в холодных углекислых минеральных водах, % (Украинцев и др., 2021)

Месторождение	Нормальные алканы	Разветвленные алканы	Спирты	Разветвленные спирты	Дикарбоновые кислоты	Ароматические соединения	Фталаты	Сложные эфиры	Неопред. вещества
Молоковка	4.32	14.44	11.7	0.22	0.68	5.82	3.8	55.98	3.04
Шиванда	5.51	16.54	16.91	0.62	2.38	4.43	5.35	46.59	1.7
Дарасун	5.01	19.75	6.55	0.48	0.7	2.29	2.38	58.96	3.86
Кука	2.51	10.84	8.1	0.11	0.68	3.91	3.37	68.6	1.89

Несмотря на различия в геологическом строении мест разгрузки минеральных вод, перечисленные источники связаны с гранитными массивами и приурочены к зонам тектонических разрывных нарушений СЗ простирания, так же как и углекислые воды на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля.

Происхождение углекислого газа и углеводородов в этих водах, весьма вероятно, связано с процессом гранитизации (Рябчиков, 1975; Украинцев и др., 2021; Плюснин, 2021; Пиковский, 2022), начавшимся в позднем палеозое и продолжающимся до сих пор. Присутствующие помимо углекислоты в газовой фазе метан и предельные углеводороды имеют abiогенную природу, на что указывает значение индекса ОЕР (odd-even predominance), близкое к единице (1.02–1.06). Исключение составляет источник Кука с индексом ОЕР 1.52.

Связь углеводородов с гранитами и гранитизацией метаморфических пород нередкое, хотя и остающееся дискуссионным явление. В монографии (Пиковский, 2023) приведено множество примеров нахождения залежей нефти в вулканических, магматических и метаморфических породах. Показательный пример – крупное скопление нефти в трещиноватых и выветрелых гранитах на месторождении “Белый тигр” в дельте р. Меконг на юге Вьетнама.

Особую роль в транспорте углеводородов в направлении к поверхности Земли играют глубинные разломы (Геннадиев и др., 2018₃). Такую роль в ХРП могут играть зоны разуплотнения в районе месторождений Намаруское и Кореткондинское с глубиной заложения 650 м и в осевой части (свод) Байсыханского поднятия с глубиной распространения зоны разуплотнения до 6 км (Ильичев и др., 1990).

Весьма низкие значения окислительного потенциала (E_h –420...–200 мВ; Кочкин и др., 2017₂; Солодов, Карамушка, 2023), измеренного в специально подготовленных образцах зерна методом А.К. Лисицина (1975), являются геохимической спецификой урановых руд витимского типа. Такие значения E_h не встречаются на гидрогенных урановых месторождениях Ферганской долины, Кызылкумского и Зауральского рудных районов,

Чу-Сарысуьской и Сырдарьинской провинций. На этих рудных объектах преобладают значения E_h –250...+25 мВ (Лисицин, 1975; Гидрогенные..., 1980; Лисицин и др., 1984; Солодов и др., 2005), которые создаются потенциал-задающими системами в контакте пластовой воды с углистым растительным детритом, твердыми битумами и растворенным сероводородом (Лисицин, 1975; Солодов, Карамушка, 2023).

Диапазон значений E_h –420...–200 мВ, установленный замерами окислительного потенциала в герметично упакованных пастах, приготовленных из образцов зерна с водой, подтвержден измерением окислительного потенциала *in situ* методом гидрогеохимического каротажа (Солодов и др., 2005) в гидрогеологической скважине 5263г на месторождении Дыбынское. E_h на глубине 124 м равен –340 мВ. Этот диапазон окислительного потенциала также подтверждается минеральными индикаторами. Основной рудный минерал нингиоит и часто встречающийся сидерит образуются в слабодиссоциирующей среде в интервале E_h –400...–200 мВ (Гарелс, Крайст, 1968; Kajitani, 1970).

В статье (Солодов, Карамушка, 2023) сделано предположение о возможной связи столь низких значений E_h с дисбалансом, вызванным более активной биогеохимической активностью водородных бактерий (средний балл 1.68) по сравнению со слабой активностью сульфат-редуцирующих бактерий (ср. балл 0.17) (Кочкин и др., 2017₂). То есть бактерии сульфат-редукторы не полностью потребляют атомарный водород, являющийся продуктом метаболизма водородных бактерий.

В научной литературе не найдены надежно обоснованные данные, подтвержденные измерениями E_h , объясняющие восстановительную способность растворенных жидких и газообразных УВ. Наоборот, преобладает мнение об отсутствии восстановительной способности УВ, большинство компонентов которых обладают гидрофобными свойствами и крайне низкой растворимостью в воде (Оборин и др., 2008). При этом природные УВ находятся в тесной ассоциации с множеством видов естественной подземной микрофлоры и бактериального сообщества, использующих углеводороды в качестве питательного и энергетического субстрата и образующих атомарный водород (Обо-

рин и др., 2008). Учитывая высокую проникающую способность эманационных углеводородных потоков (Геннадиев и др., 2018₃) в осадочном субстрате от зоны дезинтеграции гранитного фундамента до почвенного покрова, пара УВ + бактерии способна создавать весьма низкие значения Eh на участках преобладающей вертикальной миграции углекислого газа и УВ во всем геологическом разрезе урановых месторождений ХРП. Следует отметить, что концентраты урана углефицированные растительные остатки — неподвижны, тогда как УВ подвижны в рыхлых средах. И хотя УВ рассеяны в горных породах в виде выделений микронного размера, зато масса их значительная (Пиковский, 2023).

Примеры проявления этих УВ приводятся в следующих разделах статьи.

УГЛЕВОДОРОДЫ В ЗОНЕ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГРАНИТОВ ФУНДАМЕНТА

Позднепалеозойские гранитоиды витимканского комплекса и менее распространенные на Байсханском поднятии протерозойские граниты баргузинского комплекса являются объемным источником урана (5–8 г/т; Коченов и др., 1997₂) в залежах месторождений ХРП. Нередко эпигенетические урановые рудопоявления обнаруживаются в зоне дезинтеграции гранитов. На локальных участках розовые мелко- и крупнозернистые лейкократовые и красные биотитовые порфировидные граниты становятся белесыми в результате выщелачивания и выноса глубинными углекислыми водами железа, магния, марганца, калия и других петрогенных элементов из породообразующих алюмосиликатов.

Кора выветривания в этих породах имеет типичный для гранитоидов двучленный профиль и состоит из верхней части, обогащенной каолинитом, и нижней зоны слабой смектитизации исходных (дорудных) хлоритизированных и эпидотизированных гранодиоритов. Литолого-петрографическими исследованиями доказано, что обесцвечивание и обеление гранитоидов произошло за счет выноса перечисленных выше элементов без участия гидротермальных растворов (Кочкин и др., 2017₁; Кочкин, 2020).

На месторождении Вершинное со стенки вертикальной трещины осветленного гранита в керне разведочной скважины отобран образец. В результате его исследования при помощи растровой электронной микроскопии и в просвечивающем электронном микроскопе, совместно с рентгено-спектральным микроанализом, в глобуле уранового минерала обнаружены микронные включения не диагностированного углеродсодержащего вещества округлой формы. Как пишут авторы статьи (Тарханова и др., 2014, стр. 11): “урановый минерал как бы обволакивает углеродистую почку”.

На этом же месторождении в прибортовой части палеодолины В1 в керне скважины 6020 на

глубине 196.9 м в зоне дезинтеграции осветленного гранита на вертикальной стенке трещины (фиг. 3а, 4 и 5) обнаружена корка темно-серого и черного цвета углеродистого вещества (фиг. 3б) в ассоциации с мелкими сферолитами сидерита (фиг. 3в). Точно такой же образец углеродистого вещества отобран из керна скважины 6013 на глубине 220.3 м (фиг. 4 и 5) в тальвеге палеооврага также в зоне дезинтеграции обеленных гранитов. Изучение этого образца в растертом виде с использованием экстракции n-гексаном в Лаборатории углеродистых веществ биосферы Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова показало, что он на 96.9% состоит из легкого битума (1875 мг/кг), а полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) в составе битума содержатся в небольшом количестве — 3.1% (табл. 2). Индивидуальные ПАУ на 99% состоят из фенантрена.

УГЛЕВОДОРОДЫ В ОСАДОЧНЫХ И ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ДЖИЛИНДИНСКОЙ СВИТЫ

В рудоносном горизонте осадочных отложений нижней джилиндинской подсвиты содержание растворенных газообразных УВ в поровых растворах керна разведочных скважин на месторождениях ХРП не изучалось. При этом известны единичные примеры обнаружения предельных и непредельных углеводородов, извлеченных из керна скважин термовакуумным способом на месторождениях Уч-Кудук и Букинай в Кызылкумском УРР, с суммарной концентрацией УВ $10\text{--}80 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{кг}$ (Методы ..., 1985, стр. 272–277; Перевозчиков, Натальченко, 1985).

В схожей с ХРП геологической ситуации в южной части Восточного Прибайкалья на Усть-Селенгинском участке проявления термальных метан-содержащих углекислых подземных вод в миоценовых терригенных отложениях, залегающих на коре выветривания гранито-гнейсов, обнаружены пропитки кварцполевошпатового гравелитистого песка нефтеподобным битумом темно-коричневого и коричнево-черного цвета (Основы ..., 1993). Местами песок сцементирован битумом до песчаника. Содержание органического углерода: в битуминозном песке — 1.96%; в гранитогнейсах — 0.25%. Выход битума при его экстракции составил 4.5% от массы породы. Компонентным анализом битума установлены (%): масла — 51.65; смолы бензолные — 5.38; смолы спиртобензолные — 10.79; асфальтены — 29.28; кислоты асфальтеногенные — 2.90. Хроматография масел показала преобладание ароматических структур и присутствие смол. Ароматические УВ преобладают над метанонафтеновыми в 1.52 раза. Исследованием битума методом инфракрасной спектроскопии установлено, что образец представлен смесью высококонденсированных сильно окисленных ароматических УВ.

Очевидно, что в термальных водах растворимость и проникающая способность УВ в осадочных отложениях выше, чем при миграции в составе холодных подземных вод. Поэтому и высокая концентрация УВ в осадочных отложениях на Усть-Селенгинском участке заметна невооруженным глазом.

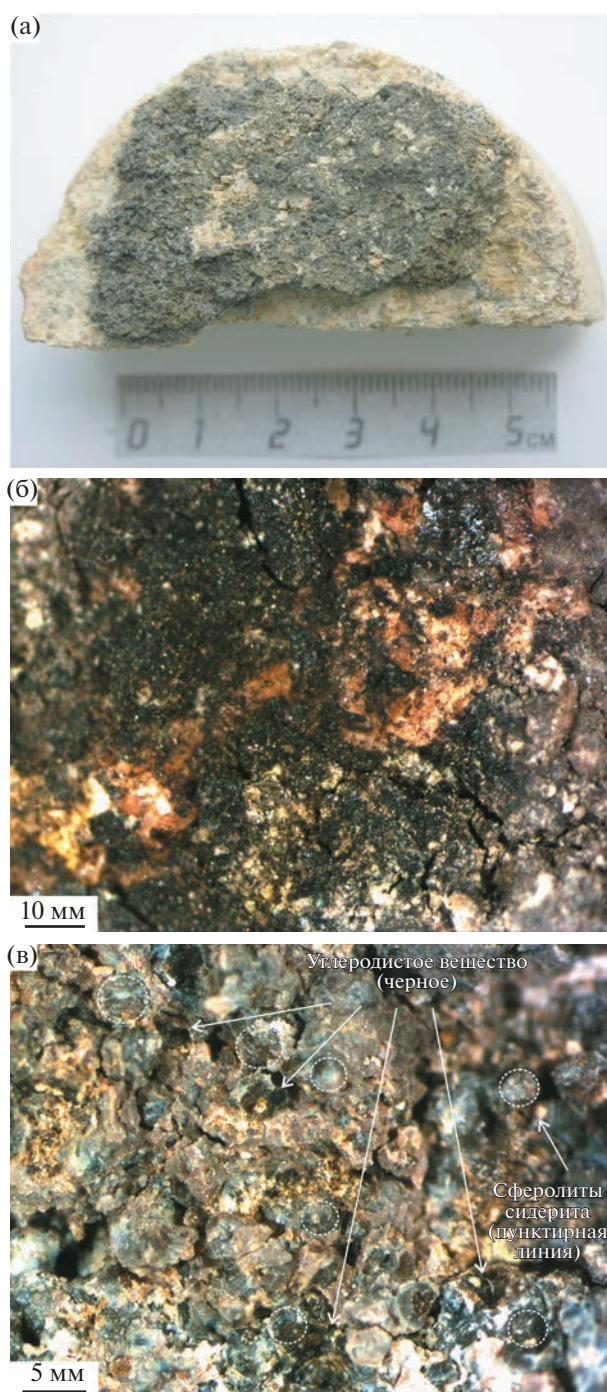
Единичные находки микровключений УВ в рассеянном виде, вероятно аллохтонного характера, присутствуют и в рудоносных горизонтах ХРП.

В верховье палеодолины В1 месторождения Вершинное в скважине 6049 (см. фиг. 4) ниже на 2.2 м подошвы базальтов в тонкослоистом темно-коричневом с углефицированным детритом алевролите обнаружено небольшое количество маслянистого битуминозного вещества (76 мг/кг) (см. табл. 2). ПАУ в его составе, занимающие по массе 9.6%, представлены примерно в равных количествах гомологами нафталина (40%) и фенантрена (52%).

Б.С. Никоновым в песчанике ниже подошвы туфов в скважине 6033 (см. фиг. 4 и 5) в глинистом цементе нелигитифицированного песчаника обнаружено углеродсодержащее вещество в двух видах: тонкие полоски и линзы; сферические образования, вероятно аллохтонного происхождения. Обе разновидности содержат вкрапленность пирита, который встречается в виде микроскопических глобулей. Скопления углеродсодержащего вещества в виде сферических образований развиты по периферии прослоев. Сферы имеют практически одинаковый размер 200–250 мкм и одинаковое зональное строение (фиг. 6). Границы сфер деформируются около крупных обломков, повторяя их очертания.

Изучение строения и состава фаз сферических образований выполнено на сканирующем электронном микроскопе “JSM-5610LV” с энерго-дисперсионной приставкой “JED-2300” без напыления препарата углеродом. Валовой состав однообразный, определялся в четырех сферах методом сканирования по площадкам примерно 150 × 150 мкм (фиг. 6). Средний состав приведен в табл. 3. В составе сфер, кроме углерода, отмечаются высокие содержания серы, железа и хрома. Сферы имеют зональное строение. Их краевая часть — черная кайма — состоит исключительно из углеродсодержащего вещества, без примесей и включений. Центральная часть сфер — это углеродсодержащее вещество с большим количеством посторонних фаз.

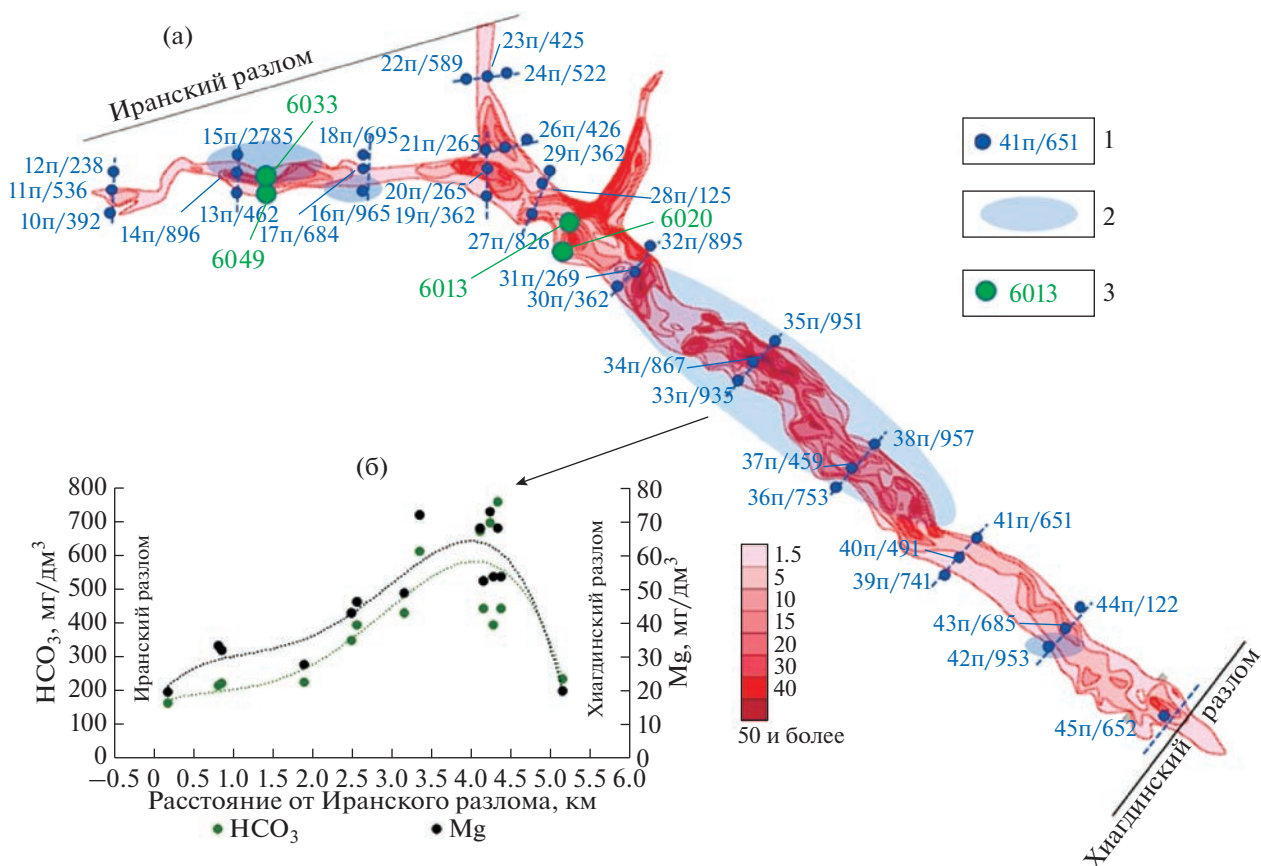
В центральной части сфер присутствуют кристаллические фазы микронных размеров, среди которых установлены пирит, хромсодержащая фаза, карбонаты и кварц. Пирит — основная фаза с четкими кристаллографическими очертаниями. Второй по значимости является хромсодержащая фаза. Она имеет расплывчатые границы с более темным углеродсодержащим веществом. При пересчете на Cr_2O_3 содержание изменяется от 5.8 до



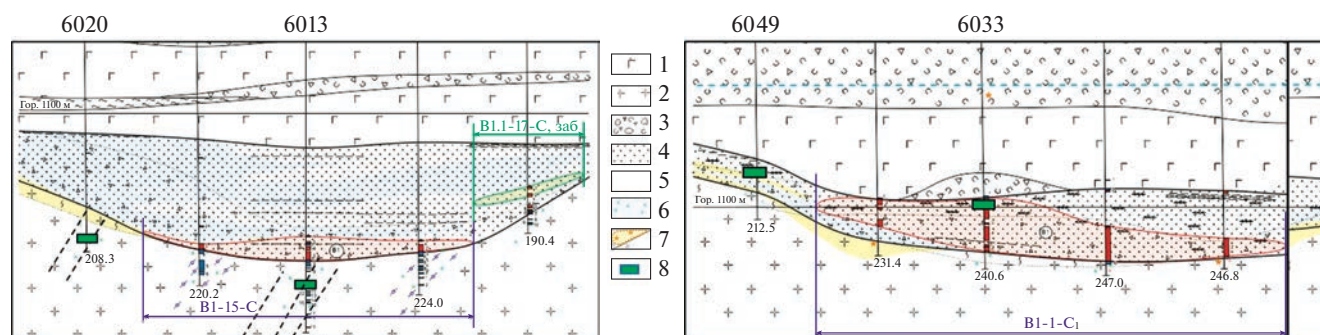
Фиг. 3. Корка углеродистого вещества в ассоциации со сферолитами сидерита на плоскости трещины осветленного гранита (а) и его микрофотографии при малом (б) и большом (в) увеличении. Образец, отобранный из скв. 6020 на глубине 196.9 м, аналогичен образцу 6013/220.3 (см. табл.2).

33.6%. Микронные зерна карбонатов и кварца — незначительная примесь.

На месторождении Дыбынское в скв. 5202 на глубине 192.3 м на 0.8 м ниже подошвы базальтов из прослоя интенсивно карбонатизированного



Фиг. 4. Масштабная нефтяная аномалия (а), совпадающая с аномалией углекислых гидрокарбонатно-магниевых подземных вод (б) и самыми богатыми урановыми рудами на карте удельной площадной продуктивности (в кг/м²) залежи В1 месторождения Вершинное. 1 – номер пробы/содержание нефти в мг/кг; 2 – область с содержанием нефти >800 мг/кг; 3 – скважина и ее номер, из керна которой отобраны образцы битуминозного вещества.



Фиг. 5. Поперечные рудно-геологические разрезы в центральной части (скв. 6013 и 6020 в разведочной линии РЛ89) и в верховье (скв. 6049 РЛ 113) рудной залежи В1. 1 – неоген-четвертичные базальты; 2 – верхнепалеозойские граниты; 3 – туфы и туфиты; 4 – алеврито-глинистые пески в нижней части пачки с щебнем и гравием; 5 – пески сероцветные; 6 – сочетание сероцветных и обеленных песков; 7 – реликтовые зоны окисления коры выветривания пород фундамента; 8 – образец углеродистого вещества.

(сидерит) разнотермического нелигифицированного песчанника отобран и изучен обломок углефицированной древесины коричневого цвета (фиг. 7). Содержащееся в нем легкое битуминозное вещество (625 мг/кг) содержит самое низкое из изученных образцов количество ПАУ (0.4%), в основном состоящее из фенантрена (96%) (см. табл. 2).

Битуминизацию углефицированных растительных остатков в кровле рудоносного горизонта можно объяснить совместно протекавшими процессами: продолжающимся преобразованием углефицированной органики на стадии раннего диагенеза и термическим воздействием излившейся базальтовой лавы и туфов на осадоч-

Таблица 2. Содержание битуминозных веществ (БВ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ)

Месторождение	Вершинное		Дыбынское
Скважина	6013	6049	5202
Глубина отбора образца, м	220.3	191.5	192.3
Описание образцов	Корки углеродистого вещества темно-серого и черного цвета на плоскостях трещин в осветленном граните	Алеврит темно-коричневый, тонкослоистый с углефицированным детритом на 2.2 м ниже подошвы базальтов	Углефицированная древесина коричневого цвета с полосами светло-коричневого цвета в сером разномзернистом карбонатизированном песчанике. На 0.8 м ниже подошвы базальтов
Битуминозные вещества (мг/кг)	1875	76	625
Тип БВ	легкий	маслянистый	легкий
Доля ПАУ в БВ (%)	3.1	9.6	0.4
ПАУ (мг/кг)	58 (100%)	7.3 (100%)	2.5 (100%)
Гомологи нафталина (C ₁₀ H ₈)	0.7 (1%)	2.9 (40%)	0.1 (4%)
Фенантрен (C ₁₄ H ₁₀)	57.3 (99%)	3.8 (52%)	2.4 (96%)
Пирен	0.002	0	0.002
Антрацен (C ₁₄ H ₁₀)	0	0	0.004
Тетрафен (бензоантрацен; C ₁₈ H ₁₂)	0.003	0.6 (8%)	0

ные отложения. Оба источника имеют автохтонный характер.

Часто встречающийся в верхней части рудоносного горизонта ниже подошвы базальтов и в теле глинистых и алевритовых отложений сидерит образовался при падении пластового давления и, соответственно, парциального давления CO₂ в железистых углекислых подземных водах. На месторождениях ХРП максимальные содержания ΣFe в мг/дм³ в подземных водах изменяются в широком диапазоне почти пропорционально содержанию гидрокарбоната: Количканское – 0.2; Источное – 1.2; Хиагдинское – 5.7; Тетрахское – 150; Дыбынское – 166; Вершинное – 240; Намаруское – 255; Кореткондинское – 780.

Образцы, в которых обнаружено битуминозное вещество, находятся в тесной ассоциации с осветленными и обеленными сероцветными и

желтоцветными терригенными отложениями. Осветление алевритов и песков, всего вероятнее, связано с длительной проработкой слабокислыми (pH ~ 5.5) углекислыми растворами, в которых конгруэнтно и инконгруэнтно растворяются Fe(II)-содержащие минералы (pH начала гидролиза Fe(II) > 6.0). Геохимическими исследованиями керна разведочных скважин на месторождениях Намаруское и Кореткондинское установлено, что обеление отложений сопровождается интенсивным извлечением из них железа, марганца, магния, молибдена и других петрогенных элементов (Никитина и др., 2012_{1,2}).

На месторождении Хиагдинское в вулканогенно-осадочной толще обнаружены твердые углеводородистые вещества – антраксолит и керит (Мелков и др., 1985). Показано, что рассеянные в этой толще фрагменты растительных остатков, прини-

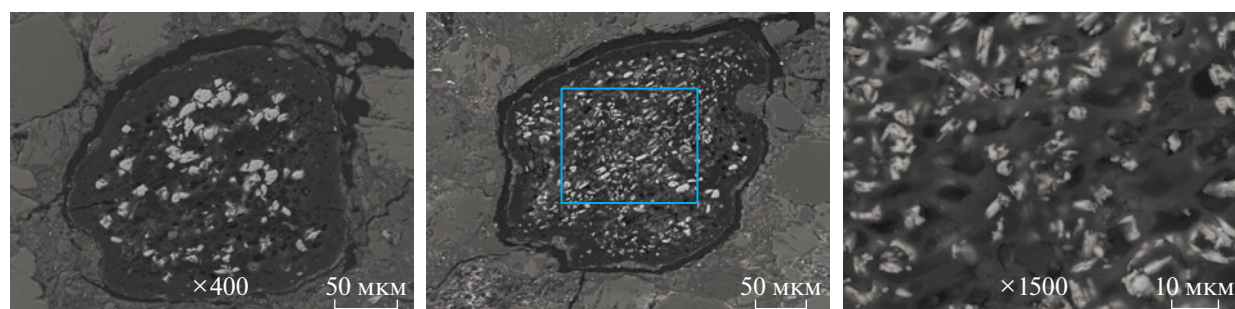
**Фиг. 6.** Сферы углеродистого вещества с детализацией внутреннего строения (шлиф 6033/213.6).

Таблица 3. Средний состав четырех сфер углеродистого вещества

Элемент	Мас. %	Ат. %
C	31.93	47.28
O	31.24	34.79
Mg	0.24	0.17
Al	2.11	1.39
Si	6.02	3.81
P	0.28	0.16
S	13.09	7.28
K	0.82	0.38
Ca	0.97	0.43
Ti	0.26	0.1
Cr	1.68	0.58
Fe	11.36	3.63

маемые за углефицированные (Успенский и др., 1985), являются псевдоморфозами заполнения, образованными твердым углеродистым веществом. Как утверждают авторы статьи (Мелков и др., 1985), УВ, не образуя крупных скоплений, широко распространены во всех литологических разностях толщи и в меньшей степени — в базальтах.

УГЛЕВОДОРОДЫ В БАЗАЛЬТАХ

На месторождении Вершинное при изучении рентгенофазовым анализом в сочетании с электронной микроскопией в белом тонком прослое (0.5 см) эпигенетически измененного на плоскостях трещин черного оливин-пироксенового базальта — в серых и белосветных новообразова-

ниях — обнаружены галлуазит, метagalлуазит, монтмориллонит, фосфаты урана и микронные выделения углеродистого вещества неустановленного состава (Тарханова и др., 2014). В переходной сероцветной зоне — между первичными черными базальтами и полностью измененными, осветленными базальтами — отмечается “...обилие выделений сидерита и кальцита...” (Тарханова и др., 2014, стр. 12).

На месторождении Октябрьское Витимского УРР при оценке баланса вещества определено, что обеление базальтов сопровождается тотальным выносом элементов в оксидной форме (%): FeO — 96; MgO — 90, CaO — 70, Fe₂O₃ — 65, Na₂O — 40, SiO₂ — 40, сопровождающееся обогащением титаном и алюминием (Коченов и др., 1997₁). В обеленных базальтах установлены обычные для месторождений ХРП содержания урана 0.0n — 0.п, концентрирующиеся исключительно в каймах осветления.

Механизм обеления базальтов носит дискуссионный характер. Авторы статьи (Коченов и др., 1997₁) относят его к гипергенному процессу, а Б.Т. Кочкин (2020) — к гидротермальному. Не вдаваясь в эту дискуссию, отметим, что однозначно имеет место наложенный процесс с участием углекислых УВ-содержащих подземных вод. На это указывает постоянно встречающаяся в геологическом разрезе на месторождениях ХРП ассоциация — осветленная матрица + УВ + сидериты + фосфаты U(IV). Сидеритизация свидетельствует о том, что восстановительное осаждение фос-



Фиг. 7. Сидерит (белое), пропитывающий древесные остатки послойными и секущими выделениями, в сером разнозернистом глинистом нелитифицированном песчанике. Прозрачно-полированный шлиф 5202/192.3 при одном никеле.

фатов урана происходило при весьма низких значениях окислительного потенциала.

УГЛЕВОДОРОДЫ В ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ

На стадии разведки в 2009–2012 гг. месторождений Источное и Вершинное при проведении почвенной съемки по ГОСТ 17.4.3.01-83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 в почвенном покрове обнаружены углеводороды нефтяного ряда. До проведения этих исследований на данной территории хозяйственная деятельность не велась. Месторождения расположены в лиственничной тайге на расстоянии 80 и 110 км от ближайших населенных пунктов Романовка и Богдарин. Т.е. техногенное загрязнение почв практически исключено.

Рельеф на территории месторождений представляет собой чередование невысоких хребтов-увалов с межгорными впадинами с абсолютными отметками 1200–1400 м и 800–1150 м. Глубина протаивания грунтов в зависимости от экспозиции склонов – 0.5–6.0 м. На возвышенных участках развиты охристые, темные и светлые горные мерзлотно-таежные торфянисто-перегнойно-глеевые почвы (фиг. 8а), а в пониженных участках рельефа преобладают низинные мерзлотно-болотные торфяные почвы (фиг. 8б).

На месторождении Источное почвенная съемка выполнена в октябре 2009 года одновременно с завершением геологоразведочных работ.

Из верхнего слоя почв “А” (см. фиг. 8а), представленного коричневатато-темно-серым средним заторфованным суглинком с растительными остатками, с шагом 150 м отобраны образцы. В них определен концентрат углеводородов нефти методом извлечения эмульгированных и растворенных нефтяных компонентов экстракцией четыреххлористым углеродом с хроматографическим их отделением от сопутствующих органических соединений других классов на колонке, заполненной оксидом алюминия. Массовая концентрация углеводородов нефти в изученных пробах определена ИК-спектрофотометрией.

Самое высокое суммарное содержание нефтяных фракций установлено в одной пробе почвы – 3600 мг/кг (фиг. 9б). В остальных 74 пробах содержание нефти изменяется от 35 до 1423 мг/кг. Т.е. углеводороды нефтяного ряда распространены по всей площади горного отвода.

Аномалии углеводородов с содержанием >500 мг/кг ориентированы в северо-западном направлении, так же как и рудные залежи месторождения, и почти совпадают в плане с их контурами (см. фиг. 9а и б). Они никак не коррелируют с рельефом поверхности и гидрографической сетью на месторождении Источное (см. фиг. 9в). Их возникновение нельзя объяснить техногенным воздействием, связанным с разведочными буровыми работами. Такие аномалии весьма локальные (десятки квадратных метров) и они закономерно распределены по пло-

щади геологоразведочных работ. Также следует обратить внимание на то, что большинство проб отобрано за пределами площади буровых работ.

Профили опробования почв на месторождении Вершинное расположены на расстоянии 500 м (см. фиг. 4). Самое высокое содержание нефти в пробе 15п 2785 мг/кг рядом со скважиной 6033, в которой обнаружены сферы углеродистого вещества (см. фиг. 6). Во всех остальных 35 пробах содержание нефти изменяется от 122 до 1244 мг/кг. УВ также определены в фоновой пробе 46п за пределами ураново-рудной залежи в количестве 132 мг/кг. Аномально высокие содержания нефти >800 мг/кг приурочены к зоне с максимальной продуктивностью урановых руд (см. фиг. 4а) и точно совпадают с гидрокарбонатно-магниевого аномалией подземных вод (см. фиг. 4б).

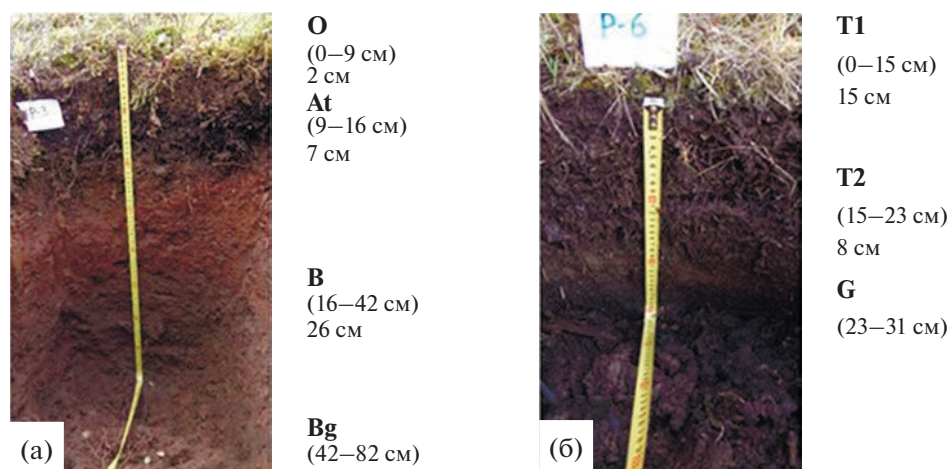
Следует отметить, что аномалии HCO_3 в подземных водах и УВ в почвах пространственно не связаны с Хиагдинским и Иранским разломами СВ-простираения, а совпадают с древними (относительно урановых руд) разрывными нарушениями СЗ-направления, которые палеодолины nasledуют.

Изучение углеводородного состояния (УВС) почв в природных ландшафтах вне зон техногенного воздействия показало, что в торфяниках часто присутствуют УВ. Торфы содержат неспецифические компоненты гумуса (торфяные липиды) и в большом количестве битумы, ПАУ, УВ газы, п-алканы, 4-ядерные соединения, нечетные гомологи алканов с суммарным содержанием УВ, близким к их содержанию в почвах на месторождениях Источное и Вершинное (Качинский и др., 2014; Геннадиев и др., 2018^{1, 2}; Пиковский, 2023). При этом отмечается, что УВС торфяников в свое время было слабо изучено из-за больших трудностей диагностики углеводородных компонентов (Геннадиев и др., 2018²).

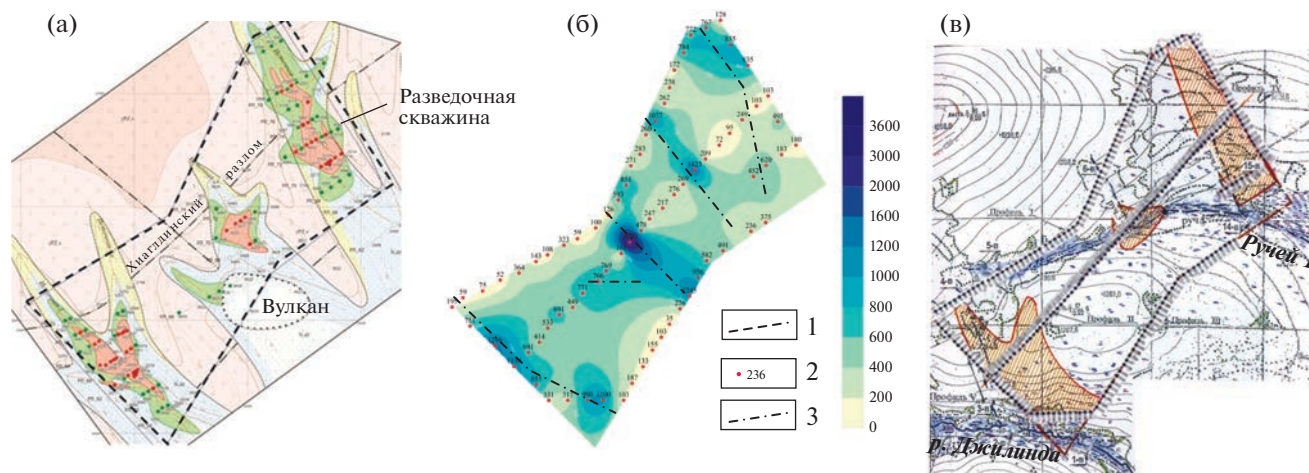
Участки техногенного загрязнения почв нефтепродуктами, возникающего при обеспечении работы буровой и иной техники, обычно имеют значительно большие содержания УВ – 10–100 г/кг (Оборин и др., 2008; Яковлев и др., 2013; Качинский и др., 2014; Околелова и др., 2019; Пиковский, 2023). Это позволяет обнаруженные на исследуемых месторождениях УВ отнести к природным образованиям.

Остается неясной установленная связь УВ аномалий с урановой рудоносностью палеодолин при наличии льдистой многолетней мерзлоты, которая считается непроницаемым экраном для углеводородов.

Атмогеохимическими исследованиями на месторождении Хиагдинское показано, что над рудными телами формируются ореолы рассеяния радона, которые уверенно обнаруживаются в почвенном воздухе (Плюснин и др., 2005). Следовательно, многолетние мерзлые породы (ММП) не являются экраном по крайней мере для этого газового компонента. В монографии



Фиг. 8. Основные типы почв на территории изученных месторождений. (а) горная мерзлотно-таежная торфянисто-перегнойно-глеевая почва. Слои: О (0–9 см) – подстилка мохово-лиственничная; At (9–16 см) – коричневатого-темно-серый средний суглинок заторфованный, растительные остатки средней степени разложения; В (16–42 см) – коричневатого-бурый средний суглинок с включениями дровины и корней растительности; Bg (42–82 см) – бурого-серо-сизый тяжелый суглинок с редкими включениями корней растительности и обильным присутствием дровины и щебня; (б) низинная мерзлотно-болотная торфяная почва. Слои: Т1 (0–15 см) и Т2 (15–23 см) – коричнево-серый и бурого-коричневый торф, рыхлый, слабой и средней степени разложения; G (23–31 см) – серо-сизый средний суглинок с обильными включениями щебня.



Фиг. 9. Рудные залежи на геолого-структурной карте (а), содержание углеводородов нефти в почвенном покрове (б), рельеф поверхности и гидрография территории (в) месторождения Источное. 1 – контур горного отвода; 2 – точки отбора проб почв и содержание нефти в мг/кг; 3 – предполагаемые разрывные нарушения.

(Основы ..., 1993) приведены различные примеры проникновения УВ через ММП и сделан вывод: ММП не являются абсолютно непроницаемыми для УВ. УВ при миграции к поверхности могут накапливаться в ММП в виде кристаллогидратов и при изменении внешних условий проникать на поверхность.

Наиболее вероятно, УВ в почвах на характерных месторождениях имеют два источника – автохтонный и аллохтонный. Второй следует отнести к эманиционному типу углеводородного состояния почв в зонах с высокой геодинамической активностью (Геннадиев и др., 2018_{2, 3}).

Район ХРП относится к территории восьмибальной сейсмической активности. Например, только в период с 01.01.2012 по 10.04.2013 в Восточном Прибайкалье зафиксировано 194 землетрясения разной магнитуды. В периоды этих событий льдистая мерзлота растрескивается и становится газопроницаемой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экзогенные эпигенетические (гидрогенные) месторождения урана палеодолинного типа Хи-агдинского рудного поля (ХРП) привлекают вни-

мание ученых в связи с тем, что рудообразование на этих месторождениях протекает в близосовременных условиях и существует уникальная возможность изучать этот процесс “вживую”. По данным U-Pb-изотопии, возраст урановых руд оценивается в 12.0–1.5 Ма (Голубев и др., 2017, 2021; Golubev et al., 2020). В статье (Солодов, Карамушка, 2023) по результатам гидрогеохимических исследований на месторождении Вершинное установлено современное накопление урана в восстановительном геохимическом барьере.

Проведенное обобщение разрозненных опубликованных и неопубликованных материалов по урановым месторождениям ХРП, начиная с 1985 года, позволяет сделать следующие выводы.

1. На урановых месторождениях ХРП обнаружено сквозное проникновение углеводородов от гранитного фундамента до почвенного покрова, связанное с широко распространенными на Байсханском поднятии восходящими холодными углекислыми гидрокарбонатно-магниевыми подземными водами, содержащими растворенные углеводороды.

2. Твердые углеводороды в рассматриваемых рудоносных терригенных отложениях представлены сингенетичными формами частичного или полного замещения углефицированной растительной органики и эпигенетичными конденсированными УВ в виде капель микронного размера.

3. Во всех типах пород и осадочных отложений просматривается ассоциация: осветленная порода–эпигенетические углеводороды–сидериты–фосфаты четырехвалентного урана.

4. Тесная пространственная связь залежей богатых урановых руд с проявлениями глубинных углекислых гидрокарбонатно-магневых вод – обладающих высокой восстановительной способностью – может рассматриваться как новый, гидрогеологический критерий выявления урановых месторождений витимского типа.

5. Пространственное совпадение проекций контуров рудных тел на дневную поверхность с аномалиями УВ в почвенном покрове может оказаться новым критерием поиска урановых месторождений витимского типа. Для обоснования этого критерия необходимо провести изучение УВ с использованием всего аналитического арсенала методов для разграничения природных и техногенных проявлений УВ, а среди природных образований установить долю афтохтонных и аллохтонных источников УВ в почвах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают особую признательность И.В. Викентьеву за рекомендации по улучшению текста статьи и рецензентам за полезные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Винокуров С.Ф., Стрелкова Е.А. Условия образования палеодолинных месторождений в осадочно-вулканогенных отложениях верхнего эоцена-нижнего олигоцена Болгарии // Геология рудн. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 171–188.
- Винокуров С.Ф. Типизация гидрогенных месторождений урана // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 113–134.
- Гаррелс М.Р., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Изд. “Мир”, 1968. 370 с.
- Геннадиев А.Н., Загородняя Ю.А., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Алканы как компоненты углеводородного состояния почв: поведение, индикационное значение // Почвоведение. 2018₁. № 1. С. 37–47.
- Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Углеводородное состояние почв в ландшафтах: генезис, типизация // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018₂. № 6. С. 3–9.
- Геннадиев А.Н., Киселева А.Ю., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Влияние геологического фактора на полимеры в почвах // Почвоведение. 2018₃. № 8. С. 977–984.
- Гидрогеология СССР. Том XXII. Бурятская ССР // М.: Недра, 1970, 432 с.
- Гидрогенные месторождения урана / Под ред. А.И. Перельмана М.: Атомиздат, 1980. 270 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 Дыбын, Витимский урановорудный район, Россия // Геология рудн. месторождений. 2013. Т. 55. № 6. С. 467–480.
- Голубев В.Н., Тарасов Н.Н., Чернышев И.В. и др. Пострудные процессы миграции урана в месторождениях “песчаникового типа”: $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ и U-Pb-изотопная систематика руд месторождения Намару, Витимский район, Северное Забайкалье // Геология рудн. месторождений. 2021. Т. 63. № 4. С. 297–310.
- Дзядок С.А., Прохоров Д.А. Перспективы выявления месторождений урана песчаникового типа в Забайкалье // Труды Пятого Международного симпозиума “Уран: геология, ресурсы, производство”. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2021, 53–61 с.
- Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / Под ред. И.Н. Солодова. М.: ZetaPrint, 2022. 183 с.
- 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) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1990. Вып. 125. С. 46–57.
- Качинский В.Л., Загородняя Ю.А., Геннадиев А.Н. Углеводородное загрязнение арктундровых почв острова Большой Ляховский (Новосибирские острова) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 155–168.
- 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., Андреева О.В. и др. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология рудн. месторождений. 2017₁. Т. 59. № 2. С. 124–140.

- Кочкин Б.Т., Солодов И.Н., Ганина Н.И., Рекун М.Н. Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля // Геология рудн. месторождений. 2017₂. Т. 59. № 5. С. 340–362.
- Кочкин Б.Т. Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология рудн. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 23–35.
- Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования. М.: Недра, 1975. 248 с.
- Лисицин А.К., Киреев А.М., Солодов И.Н. и др. Использование керн скважин для детального изучения состава и свойств подземных водных растворов // Литология и полез. ископаемые. 1984. № 3. С. 74–87.
- Макаров С.И., Ильичев А.В., Шуришалина М.А. Углекислые ураноносные источники южной части Витимского района (Западное Забайкалье) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1985. Вып. 95. С. 131–137.
- Мелков В.Г., Сергеева А.М., Сучкова И.П. и др. Твердые углеродистые вещества Хиагдинского месторождения урана в Забайкалье. Мат-лы по геологии урановых месторождений. М.: ВИМС, 1985. Вып. 96. С. 56–64.
- Методы изучения урановых месторождений в осадочных и метаморфических толщах / Под ред. Я.Н. Белевцева и В.И. Данчева. М.: Недра, 1985. 323 с.
- Никитина Е.С., Прохоров Д.А. Геологическое строение уранового месторождения Намару и минерало-геохимические особенности руд и рудовмещающих пород (Витимский ураново-рудный район) // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 2012₁. № 4. С. 26–31.
- Никитина Е.С., Прохоров Д.А. Закономерности локализации оруденения, минеральный состав руд и рудовмещающих пород уранового месторождения Кореткондинское (Витимский урановорудный район) // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2012₂. № 6. С. 44–50.
- Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.Л., Маркарова М.Ю. и др. Нефтезагрязненные биогеоценозы (Процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы) // УрО РАН, Перм. гос. ун-т; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2008. 511 с.
- Околелова А.А., Капля В.Н., Лапченков А.Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Научные ведомости. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 1. С. 76–86.
- Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений / Под ред. А.В. Петухова и И.С. Старобинца. М.: Недра, 1993. 332 с.
- Перевозчиков Г.В., Натальченко Б.И. Зона выклинивания пластового окисления экзогенных эпигенетических месторождений урана — источник локального газообразования // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1985. № 6. С. 67–70.
- Пиковский Ю.И. Минеральная нефть: развитие представлений о неорганическом происхождении месторождений нефти и газа // М.: ИНФА-М, 2022. 350 с.
- Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде // М.: ИНФА-М, 2023. 207 с.
- Плюснин А.М., Астахов Н.Е., Первалов А.В., Тайсаев Т.Т. Потоки рассеяния урана и сопутствующих элементов над гидротермальными U-рудными телами, перекрытыми покровом базальтов (на примере Хиагдинского месторождения) // Геохимия. 2005. №7. С. 763–771.
- Плюснин А.М. Формирование потока углекислого газа на территории Северо-Восточной Азии // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2021): Матер. Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Петропавловск-Камчатский, 2021. С. 47–50.
- 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.
- Рябчиков И.Д. Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 232 с.
- Самович Д.А., Дзядок С.А., Тирских С.С., Федин А.Ю. Минерально-сырьевая база Витимского урановорудного района и перспективы ее расширения // Разведка и охрана недр. 2017. № 9. С. 17–19.
- Солодов И.Н., Величкин В.И., Рубцов М.Г. и др. Гидрогеохимический каротаж: теория и практика // М.: Едиториал УРСС, 2005. 320 с.
- Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды — рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 151–162.
- Солодов И.Н., Карамушка В.П. Об эпигенетических восстановителях урана на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Разведка и охрана недр. 2023. № 2. С. 21–29.
- 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.
- Украинцев А.В., Плюснин А.М., Чернявский М.К., Луканов Д.Д. Формирование состава РОФ и РЗЭ на месторождениях углекислых вод Восточного Забайкалья // Подземная гидросфера: Матер. XXIII Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России с международным участием. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 235–239.
- Халдей А.Е., Расулова С.Д., Коченов А.В., Данковцев Р.Ф. Историко-геологические предпосылки образования ураноносных палеодолин // Отечественная геология. 1998. № 5. С. 28–31.
- Шнейзер Г.М., Родионова В.А., Минеева Л.А., Васильева Ю.К. и др. Эколого-геохимические особенности подземных минеральных вод Центральной и Восточной Азии // Успехи современного естествознания. 2004. № 2. С. 136–138.
- Яковлев А.С., Никулина Ю.Г. Экологическое нормирование допустимого остаточного содержания нефти в почвах земель разного хозяйственного значения. Ред. А.С. Яковлев, Ю.Г. Никулина // Почвоведение. 2013. № 2. С. 234–239.
- Golubev V., Chernyshev I., Kochkin B. et al. Uranium isotope variations (²³⁴U/²³⁸U and ²³⁸U/²³⁵U) and behavior of U-Pb isotope system in the Vershinnoye sandstone-type uranium deposit, Vitim uranium ore district, Russia // J. Earth Sci. 2020. V. 31. № 2. P. 11–29.
- Kajitani K. A geochemical study on the genesis of ningyoite, the special calcium uranium phosphate mineral // Econ. Geol. 1970. № 65. P. 470–480.