

Солодов И.Н. (АО «Атомредметзолото»),
Гладышев А.В., Иванов А.Г. (АО «Хиагда»)

ОПЫТ ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В КРИОЛИТО-ЗОНЕ

*Рассматриваются природные и техногенные факторы, влияющие на добычу урана методом сернокислотного скважинного подземного выщелачивания (СПВ) из урановых руд восьми месторождений Хиагдинского рудного поля в Республике Бурятия. Показан характер влияния криогенных процессов, природно-климатических, гидрогеологических и геотехнологических условий месторождений на показатели отработки рудных залежей методом СПВ. Приведены примеры внедрения новых технологий, исключающих или существенно снижающих влияние отрицательных факторов на результаты освоения месторождений СПВ. **Ключевые слова:** уран, урановые месторождения, скважинное подземное выщелачивание, технологические скважины, окислитель, многолетнемерзлые породы, криолитозона.*

Solodov I.N. (Atomredmetzoloto), Gladyshev A.V., Ivanov A.G. (Hiagda)

EXPERIENCE FOR EXTRACTION OF URANIUM BY ISL METHOD IN KRIOLITOZONE

*The article reveals natural and technogenic factors affecting mining of uranium by the acid ISL method from eight uranium deposits of Khiagdinsky ore field in the Republic of Buryatia. It shows the influence that cryogenic processes, natural and climatic, hydrogeological and geotechnological conditions of deposits have on the rates of mining by the ISL method. Examples of implementing new technologies that exclude or significantly reduce negative factors impact on the results of deposits development by ISL are given. **Keywords:** uranium, uranium deposits, in situ leaching, technological wells, oxidizer, permafrost, cryolithozone.*

Уранодобывающее предприятие АО «Хиагда», входящее в контур управления АО «Атомредметзолото», — единственный рудник скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана из 28 действующих рудников СПВ в мире [10], который ведет добычу урана из руд гидрогенных месторождений Хиагдинского рудного поля (ХРП) в криолитозоне. Промышленная площадка предприятия находится в экономически слабо освоенном Эвенкийском Баунтовском районе Республики Бурятия в 390 км северо-восточнее г. Улан-Удэ и в 220 км севернее г. Чита. Сырьевой базой АО «Хиагда» являются восемь однотипных месторождений урана (Хиагдинское, Вершинное, Источное, Количиканское, Кореткондинское, Намаруское, Дыбрыньское и Тетрахское) ХРП (рис. 1) с промышленными запасами 48 тыс. т [5]. Потенциально пригодные для освоения методом СПВ ресурсы урана Ви-

тимского ураново-рудного района, частью которого является ХРП, оцениваются в 169 тыс. т [8].

Происхождение месторождений хиагдинской группы хорошо изучено [3, 9]. С учетом этих генетических построений месторождения ХРП отнесены к классу инфильтрационных грунтово-пластового окисления палеодолинного типа, а история их формирования представляется в следующей последовательности.

В *рудоподготовительный этап* в результате палеозойского магматизма сформировался источник урана — витимканский комплекс гранитоидов. Короброобразование гидрослюдисто-монтмориллонитового, реже каолинит-монтмориллонитового типа в гумидном климате в мезозое перевело уран в гранитоидах в подвижную форму для механического переноса и водной миграции. Процессы воздымания и блоковой дифференциации в пределах Витимского плоскогорья создали условия для формирования овражно-балочной и речной сети и накопления в ней рудовмещающих средне-верхнемиоценовых осадков джилиндинской свиты.

По данным биостратиграфических исследований осадков джилиндинской свиты, изменения в них состава диатомей, спор и пыльцы в сопоставлении с результатами К-Аг датирования базальтовых лав изучены довулканические осадочные (нижнеджилиндинская подсвита) и осадочно-вулканогенные (верхнеджилиндинская подсвита) образования, сформировавшиеся в умеренно теплом гумидном климате.

Предгорно-шлейфовые и аллювиальные отложения нижнеджилиндинской подсвиты (40±70 м), вмещающей основное промышленное урановое оруденение, представлены склоновыми щебнистыми отложениями, аллювиально-пролювиальными песчано-дресвяными осадками, песками и глинами, обогащенными растительной органикой. Начало формирования подсвиты оценивается в 17 млн лет назад.

В существенно озерных отложениях с прослоями базальтов верхнеджилиндинской подсвиты выделены два периода осадконакопления, характеризующиеся различным составом водной (диатомей) и наземной (споры и пыльца) растительности. По результатам К-Аг датирования базальтоидов формирование нижней преимущественно осадочной части верхнеджилиндинской подсвиты происходило в интервале 14–12 млн лет назад, а верхней, существенно вулканогенной с озерными отложениями в основании, около 10,8–9,5 млн лет назад. Нижняя часть (40–60 м) верхнеджилиндинской подсвиты, в которой встречаются забалансовые урановые руды и руды с низкой продуктивностью, сложена озерными алевритами, алевропелитами, линзами песков, обогащенных растительной органикой, и базальтами с горизонтами туфов и туфобрекчий. Верхняя часть (30–50 м) подсвиты представлена массивными и шлаковидными базальтами с горизонтами туфов, туфобрекчий, алевритов и глин.

В период 9,5–6,0 (по разным оценкам) — 4,5 млн лет отмечается перерыв в осадконакоплении и формирование монтмориллонитовой коры выветривания в

условиях семиаридного климата. Завершают разрез плиоценовые базальтовые лавы, вулканомиктовые галечники, туфы, туфобрекчии, туфопесчаники, диатомитовые алевропелиты, пески, хлидолиты, песчано-гравийные отложения. Четвертичные осадки сложены галечниками, песками, глинами, илами и торфяниками.

Этап *рудообразования* авторами статей [3, 9] описывается следующими процессами. Инфильтрационная стадия продолжительностью около 14 млн лет с момента начала формирования гидрослюдисто-монтмориллонитовой коры выветривания витимканских гранитоидов сопровождалась выносом урана кислородсодержащими метеорными водами урана из зоны дезинтеграции. Наиболее интенсивная инфильтрация кислородных вод существовала в семиаридный климатический период (4,5–2,7 млн лет). Отложение урана в восстановительном геохимическом барьере в пролювиально-аллювиальных отложениях нижнеджилидинской подсвиты шло с момента начала формирования осадков (17 млн лет н.э.) до перекрытия базальтовым трапом в пятую, наиболее интенсивную стадию вулканизма (5–3 млн лет), и наступления бореального климата, и формирования многолетней мерзлоты (с 2,7 млн лет по настоящее время [6]) с участием сингенетических (растительная органика), и эпигенетических (газообразные сероводород, водород и углеводороды, поступавшие в рудоносный горизонт по многочисленным зонам разломов) восстановителей.

Режим фильтрации в рудоносном водоносном горизонте за время формирования от осадочной до вулканогенной стадии поменялся с безнапорного грунтового на напорно-безнапорный пластовый. Предполагается [3], что базальтовый трап и многолетнемерзлые породы (50–90 м; средняя мощность по площади ХРП–72 м), перекрыли рудоносный (нижнеджилидинская свита) и базальтовый (верхнеджилидинская свита) водоносные горизонты и выступили в роли регионального водоупора, препятствующего проникновению метеорных вод в рудоносные палеодолины (*пострудный этап*). В связи с этим на современном этапе, как полагают авторы [3], в рудоносном водоносном горизонте установился застойный режим фильтрации. В действительности в рудовмещающих отложениях палеодолин не может отсутствовать фильтрация подземных вод, т.к. при уклоне их ложа, выходящего от верховьев 100 м/км к низовьям 4÷20 м/км, без водного питания произошло бы осушение базальтового и рудоносного водоносных горизонтов, а этого не происходит. По дан-

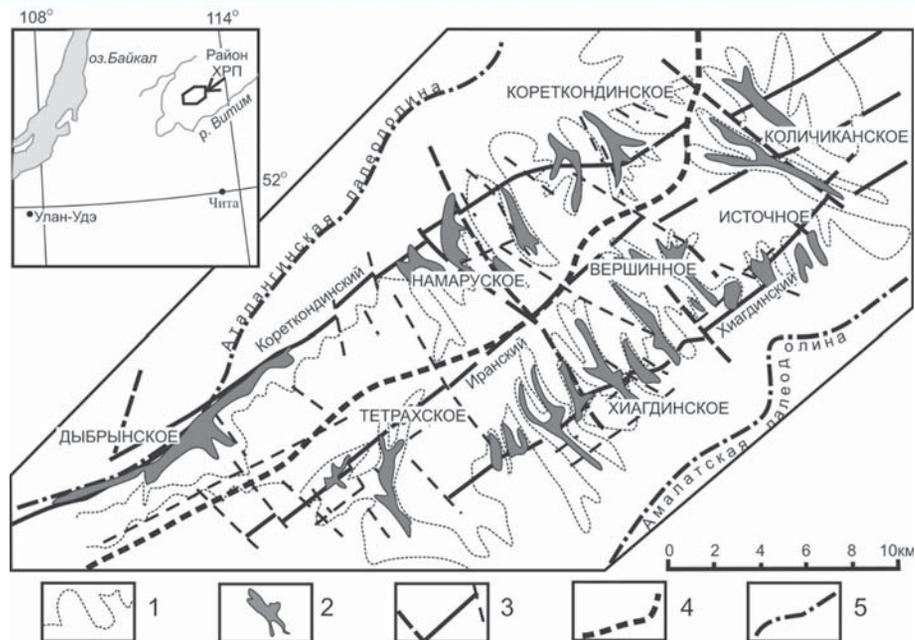


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Хиагдинского рудного поля (по материалам Б.Т. Кочкина и др., 2017): 1 — контуры палеодолин, выполненные отложениями джилидинской свиты; 2 — рудные залежи; 3 — разрывные тектонические нарушения различного порядка; 4 — ось Байсыханского поднятия; 5 — тальвеги палеодолин

ными **гидрогеологическими исследованиями** в ходе разведки известно, что из рудоносных палеодолин 2–3 порядков на склонах Байсыханского поднятия подземные воды разгружаются в стволы Аталангинскую и Амалатскую палеодолины 1-го порядка (рис. 1). При этом режим питания водоносных горизонтов в палеодолинах плохо изучен. Исследования последних лет позволяют предположить наличие инфильтрационного и эксфильтрационного питания рудоносных горизонтов с преобладанием восходящих потоков подземных вод из пород фундамента по многочисленным разрывным тектоническим нарушениям (рис. 1). Во-первых, базальтовый вулканизм и оледенение значительно сократили площадь инфильтрационного питания, которое на современном этапе возможно лишь через сквозные талики в районе небольших озер и многочисленных речных водотоков. Во-вторых, на преобладание эксфильтрационного питания указывает высокая восстановленность гидрогеохимической среды по данным геохимических исследований керн разведочных скважин и гидрогеохимических каротажных исследований в гидрогеологических скважинах [1]. Окислительный потенциал (Eh) в системе рудоносные отложения — подземные воды изменяется от -430 до -50 мВ [7]. Подтверждением наличия эксфильтрационного питания является присутствие углекислых вод с pH 5,5–6,5 в области зон разломов северо-восточного простирания, которые по мере удаления от них становятся гидрокарбонатными и близнейтральными по кислотно-щелочному показателю (pH 7,4). При этом очевидно, что базальтовый трап, многолетняя мерзлота и эксфильтрация сильно восстановленных углекислых подземных вод выступили в роли *рудосохраняющего фактора*.

Высокая восстановленность гидрогеохимической среды создает условия для сохранения нингиоитовой урановой минерализации, для образования которой в интервале pH 5,5–6,5 необходимы сильно восстановительные условия — Eh -400÷-300 мВ [11]. В связи с этим содержание U(IV) в рудах составляет 90–100 % [11]. Давно известно, что фосфаты четырехвалентного урана практически не растворимы в разбавленных растворах кислот. Промышленные содержания урана (≥ 10 мг/л) появляются в выщелачивающих растворах только при растворении фосфатов U(IV) в крепких растворах кислот с pH < 0,5 (Кац Дж., Рабинович Е., 1954). Еще одной особенностью урановых руд хиагдинского типа является низкое содержание кислото-растворимого суммарного железа (Fe(II) + Fe(III)) и практически полное отсутствие естественного окислителя Fe(III) четырехвалентного урана [7], что дополнительно указывает на высокую восстановленность рудоносной среды. Обедненность рудовмещающих проницаемых песчаных отложений железом объясняется воздействием углекислых растворов, разгружавшихся в прошлом и продолжающих разгружаться в настоящее время по разломам [4]. Процессом выщелачивания железа углекислыми растворами объясняется образование обеленных песчаных рудовмещающих отложений и восстановление терригенных отложений в зоне грунтового-пластового окисления [4].

Высокая степень восстановленности урана и железа, и отсутствие естественного окислителя Fe(III) в достаточном количестве в рудах и рудовмещающих отложениях указывало на то, что добыча урана в таких геохимических условиях без использования окислителя неэффективна. Проведенными лабораторными испытаниями в фильтрационных колонках, заполненных урановой рудой в окислительно-восстановительном состоянии близком к естественному, установлено, что выщелачивание урана растворами серной кислоты 12 г/л протекает вяло и извлечение урана из руд достигает 80 % при Ж/Т = 9. **Добавление в качестве окислителей** кислорода, перекиси водорода или нитрита увеличивает темп извлечения в 3 раза [7]. В результате этих исследований в качестве окислителя был выбран нитрит, т.к. в отличие от кислорода и перекиси водорода практически селективно окисляет Fe(II) до Fe(III), а оксидное железо также селективно переводит U(IV) в легко растворимую шестивалентную форму.

Еще один фактор, который мог бы повлиять на низкую динамику извлечения урана из руд и на отказ от применения СПВ — низкая температура подземных вод в рудоносном горизонте (2–4 °С) из-за близости мерзлоты. С момента от-

крытия месторождений ХРП в 1985 г. вплоть до 1992 г. возможность применения СПВ для обработки хиагдинских месторождений многими подвергалась сомнению. И только успешно проведенный в 1992 г. двухскважинный опыт показал перспективность использования сернокислотного СПВ для обработки этих месторождений.

Отсутствие **влияния низкой температуры подземных вод на кинетику растворения урана** в присутствии искусственного окислителя (нитрита) иллюстрируют результаты обработки Залежи Х6 Хиагдинского месторождения (рис. 2, 3, табл. 1), одной из 37 ураново-рудных залежей месторождений ХРП.

Залежь Х6 отработана с хорошими производственными показателями, не хуже обработки большинства месторождений в Южном Казахстане, Узбекистане и на месторождении Беверли в Австралии [10], где в рудоносных горизонтах идеальные температурные условия (20–45 °С) для СПВ урана и в рудах достаточно естественного окислителя Fe(III) для окисления U(IV). Проектный уровень извлечения урана (80 %) достигнут за 80 месяцев при Ж/Т 4,7 при последовательном вводе в эксплуатацию шести технологических блоков в течение 6 месяцев. Среднее содержание урана в продуктивных растворах за весь период обработки — 94 мг/л. При этом закисление рудоносных пород и обработка рудной залежи проведены в умеренном режиме кислотности выщелачивающих растворов — 14,0 и 10,9 г/л соответственно. Эти параметры ниже, чем предусматривалось проектом освоения Хиагдинского месторождения. Средние значения удельного расхода серной кислоты (71 кг H₂SO₄/кг U) и кислотоемкости (18 кг H₂SO₄/т ГРМ) типичные для кварц-полевошпатовых алюмосиликатных руд месторождений ХРП с низкой карбонатностью (0,2 %) (табл. 2–4).

Успешные результаты обработки Залежи Х6 подтверждены компьютерным геотехнологическим моделированием (рис. 3), в основе которого лежит теория физико-химической гидродинамики Н.Н. Веригина (1977) [2]. Сравнение распределения исходной удельной продуктивности (рис. 3а) с остаточным ураном в рудах на момент извлечения урана 78 % пока-

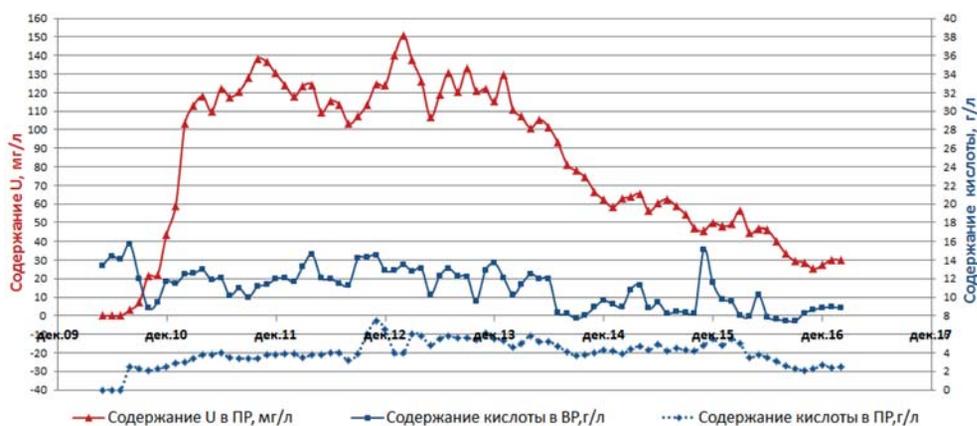


Рис. 2. Результаты обработки ураново-рудной Залежи Х6 до уровня извлечения 78 % на 01.01.2017. Сокращения: ВР — выщелачивающий раствор; ПР — продуктивный раствор

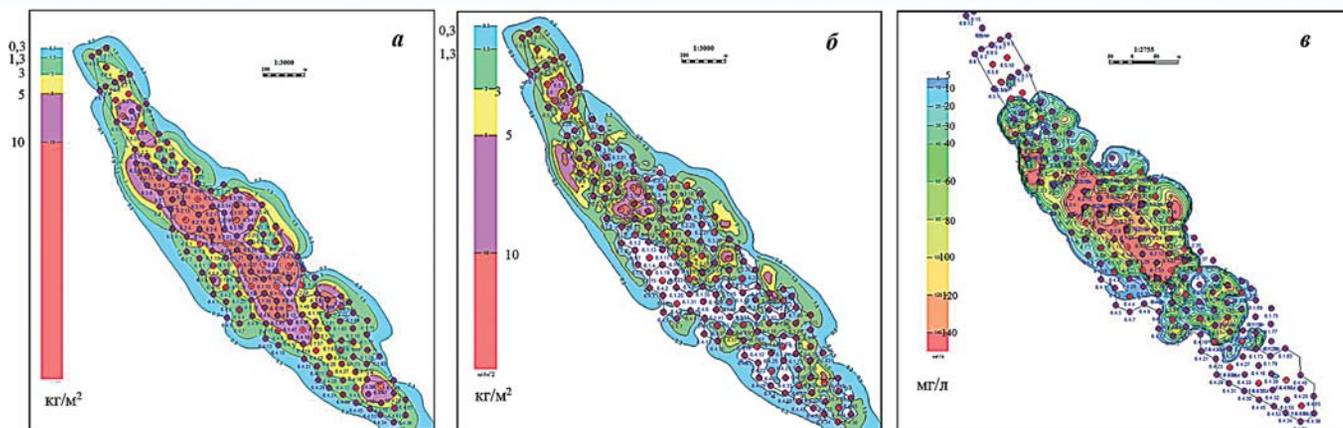


Рис. 3. Исходная (а) и остаточная (б) площадная удельная продуктивность (кг U/m²) рудной залежи Х6 и остаточные содержания урана в выщелачивающих растворах (в) в мг/л на момент извлечения урана 78 % по результатам компьютерного геотехнологического моделирования. Красные кружки — технологические скважины

Таблица 1
Параметры и результаты отработки рудной Залежи Х6

Схема вскрытия	Откачные скважины	Закачные скважины	Среднее содержание U в руде, %	Вскрытые запасы U, т	ГРМ, тыс. т	Средняя производительность ячейки, м ³ /ч	Среднее содержание серной кислоты в выщелачивающих растворах, г/л		Содержание U в продуктивных растворах, мг/л		Степень извлечения урана из руд, %	Удельный расход кислоты, кг/кг U	Кислотоемкость, кг H ₂ SO ₄ /т ГРМ	Ж/Т (м ³ /т)
							На стадии закисления	На стадии отработки	Среднее	Максимальное				
Гексагональная	43	170	0,089	1080	1920	4,8	14,0	10,9	94	150	78	71	18	4,7

Таблица 2
Рудно—геологические параметры по 8 урановым месторождениям Хиагдинского рудного поля (значения усреднены по каждому месторождению в целом по данным поисков и разведки)

Глубина залегания рудных тел, м		Рудная мощность, м		Содержание U, %		Продуктивность, кг/м ²	
диапазон	средняя	диапазон	средняя	диапазон	среднее	диапазон	средняя
150–275	208	5,2–7,6	6,3	0,034–0,079	0,050	3,5–6,2	4,8

Таблица 3
Минеральный состав рудовмещающих песчаных отложений в % (значения усреднены по каждому месторождению в целом по данным поисков и разведки)

Кварц		Плагиоклазы		Микроклин		Слюды		Карбонаты		Глины и хлорит	
диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
33,8–39,1	36,3	15,6–22,1	19	19,2–20,8	20	6,3–7,5	6,8	0,2–0,6	0,23	12,8–15,3	14,1

Таблица 4
Химический состав рудовмещающих песчаных отложений в % (значения усреднены по каждому месторождению в целом по данным поисков и разведки)

SiO ₂		Al ₂ O ₃		ΣFe		K ₂ O		S (сульфидная)		CO ₂	
диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
69,1–76,6	73,5	11,8–14,4	13,1	0,9–2,5	1,6	4,3–4,7	4,6	0,2	0,1–0,5	0,2	0,1–0,3

Таблица 5
Гидрогеологические параметры по данным опытно-фильтрационных работ на стадии разведки

Дебит скважин при освоении, м ³ /ч		Удельный дебит, л/с		Коэффициент фильтрации, м/сут		Высота столба воды в скважинах, м		Глубина залегания уровня подземных вод, м	
диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
1,9–11,1	5,25	0,1–0,5	0,28	1,4–3,7	2,09	30–120		до 140 м	

зывает, что небольшие рудные целики в конце процесса СПВ сохранились лишь в рудоносных песках в верховьях палеодолины Х6 (рис. 3б). При этом растворенный, но не извлеченный из недр уран остается в средней наиболее богатой части рудной залежи (рис. 3в). Завершение отработки Залежи Х6 еще продолжается.

Низкая температура поземных вод, обусловленная близким расположением многолетнемерзлых пород, которые сохраняются в районе ХРП в связи с отрицательной среднегодовой температурой воздуха — $-3,5^{\circ}\text{C}$, влияет и на **гидродинамические параметры движения выщелачивающих растворов** в рудоносном горизонте от закачных к откачным скважинам во время СПВ. Одной из основных причин низкой производительности эксплуатационных ячеек ($4\text{ м}^3/\text{ч}$) является высокая вязкость весьма холодных растворов. Динамическая вязкость подземных вод сильно зависит от температуры, слабо зависит (в сотых долях cP) от минерализации до 50 г/л и практически не зависит от давления при $P < 50\text{ атм}$ [7]. Из-за низкой температуры на месторождениях ХРП вязкость подземных вод ($1,75\text{ cP}$) в 2,5 раза выше, чем, например, на южноказахстанских гидрогенных месторождениях урана ($0,7\text{ cP}$). При движении выщелачивающих растворов в наземных трубопроводах в зимний период, когда температура воздуха опускается до -45 — -35°C , температура растворов может снижаться до -10°C (близко к точке замерзания водных растворов электролитов). В этом случае вязкость переохлажденных растворов может повышаться до $2,6\text{ cP}$ и возрастает гидравлическое сопротивление при входе в водоносный горизонт через фильтры закачных скважин. Коэффициент фильтрации ($Kф$) рудоносных отложений по данным опытно-фильтрационных работ на месторождениях ХРП имеет низкую величину и изменяется от 1,4 до 3,7 м/сут при среднем значении 2,09 м/сут (табл. 5). $Kф$ зависит от свойств фильтрующей жидкости и в первую очередь от динамической вязкости растворов (μ). Если $Kф$ привести к нормальной температуре (20°C), то он увеличивается до 2,5–6,4 м/сут при среднем значении 3,6 м/сут.

Соответственно и производительность эксплуатационных ячеек была бы в 1,5 раза выше — $6\text{ м}^3/\text{ч}$.

Мерзлота также влияет на техническое состояние технологических скважин. В экономических показателях рудников СПВ на сооружение и обвязку технологических скважин приходится около 70 % капитальных вложений. Операционные затраты на обеспечение работы полигонов СПВ также занимают примерно 70 % от всех эксплуатационных расходов. В связи с этим надежность конструкции скважин, обеспечивающая их безаварийную работу, — главная задача предприятий СПВ по повышению эффективности производства. При этом безаварийного сооружения и эксплуатации технологических скважин не бывает. На предприятиях СПВ аварийность составляет 3–7 % в год.

В АО «Хиагда» с самого начала образования предприятия с 1997 г. на полигонах СПВ в качестве обсадных труб используются трубы из полиэтилена низкого давления (ПНД). Полиэтилен обладает множеством недостатков:

- из-за отсутствия адгезии полиэтилена с цементом не обеспечивается гидроизоляция устьев скважин, что приводит к затеканию талых и метеорных вод в летний период года в затрубное пространство и образованию в многолетней мерзлоте наледи и смятию труб (рис. 4а);

- отсутствие сцепления (адгезии) труб ПНД с цементом — причина отсутствия надежной затрубной гидроизоляции скважин и в зоне ниже распространения многолетнемерзлых пород (ММП);

- распирающее давление внутри обсадной колонны при образовании ледяных пробок (рис. 4б);

- отсутствие осевой устойчивости у колонн из труб ПНД при соотношении диаметров бурения 250 мм и внешнего диаметра труб 160 мм происходит искривление обсадной колонны и на участках изгиба совпадающих с резьбовым соединением нарушается гидроизоляция обсадной колонны (рис. 4в);

- нарушению гидроизоляции резьбовых соединений способствует также высокий коэффициент линейного температурного расширения у труб ПНД — $0,0002\text{ м}^{\circ}\text{C}$;

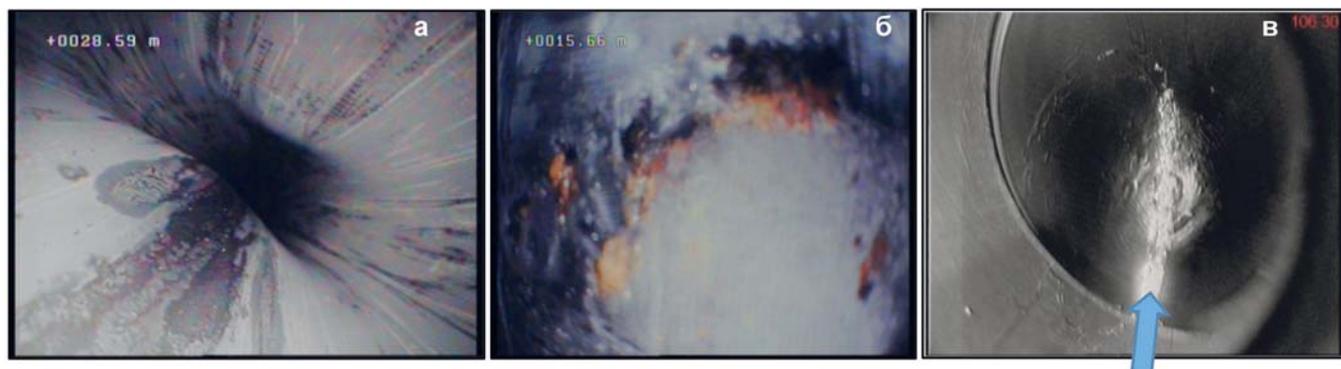


Рис. 4. Виды нарушения технического состояния технологических скважин с обсадными трубами из ПНД: а) сдавливание, смятие полиэтиленовых труб 160х18 мм на глубине 3–6 м; б) образование ледяной пробки внутри обсадных труб в зоне ММП (15 м) происходит при высоком уровне стояния подземных вод в скважине; в) приток пластовой воды из заколонного пространства (показан стрелкой) при разгерметизации резьбового соединения ниже зоны ММП (резьба коническая упорная, глубина 106,3 м)

— полиэтилен легче воды ($0,96 \text{ г/см}^3$), поэтому при обсадке его пригружают буровым снарядом или навешивают стальные трубы, что увеличивает время сооружения и стоимость скважины;

— полиэтилен изначально имеет низкую прочность на смятие — 17 МПа, а при старении в течение первых пяти лет его прочность снижается на 30 % и в дальнейшем падает обвально, из-за чего обычно срок службы труб ПНД не превышает 7 лет.

Из-за этих недостатков на рудниках СПВ в США и Австралии с самого начала применяли обсадные трубы из поливинилхлорида (ПВХ), а Казахстан и Узбекистан начали активно переходить на этот материал обсадных труб в последние 5–10 лет. В АО «Хиагда» до последнего времени эти трубы не применялись из-за суровых климатических условий. Обычные трубы ПВХ в зимнее время года при температуре воздуха ниже -25°C становятся хрупкими. Лишь в последнее время появилась возможность использовать трубы из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ) с модификаторами, повышающими ударную прочность и морозостойкость труб.

У НПВХ по сравнению с трубами из ПНД множество преимуществ. У них идеальная адгезия с цементом и клеем, что обеспечивает высокую прочность резьбовых соединений и надежную заколонную гидроизоляцию; достаточная осевая устойчивость. НПВХ тяжелее воды — плотность $1,41 \text{ г/см}^3$. Трубы НПВХ в 2,3 раза прочнее труб ПНД. Они так же, как и полиэтилен, стареют и теряют прочность, но их прочность на 5-й год эксплуатации в 2 раза выше, чем у полиэтилена. Низкий коэффициент линейного температурного расширения у труб НПВХ и использование клея Тангит полностью исключают разрыв резьбовых соединений (полиэтилен ПНД невозможно склеить никакими клеями). Низкий коэффициент линейного температурного расширения $0,00006 \text{ м/}^\circ\text{C}$ значительно снижает нагрузку на резьбу при температурных перепадах внутри колонны во время эксплуатации технологических скважин. В настоящее время в АО «Хиагда» по новой конструкции сооружено 24 скважины и ведутся режимные геофизические наблюдения за их техническим состоянием.

Выводы

Происхождение урановых месторождений Хиагдинского рудного поля и связанные с ним процессы рудообразования и рудосохранения в результате базальтового вулканизма и пострудного оледенения, пострудного восстановления и нингиоитовый минеральный состав рудной минерализации полностью отличаются эти рудные объекты от гидрогенных месторождений Центральной Азии. Отсутствие в мировой практике опыта добычи урана в криолитозоне поставило перед предприятием совершенно новые научные и практические задачи, которые либо решены, либо еще предстоит решить.

Специфические геокриологические условия в районе урановых месторождений Хиагдинского рудного поля создают определенные трудности при их обработке методом СПВ.

Тем не менее, применение в качестве окислителя нитрита позволяет значительно снизить замедляющее влияние низкой температуры подземных вод на кинетику и динамику химических реакций извлечения урана из руд разбавленными растворами серной кислоты и иметь сравнительно высокие содержания урана в продуктивных растворах и обрабатывать ураново-рудные залежи с высоким темпом.

Низкая температура подземных вод обуславливает высокую вязкость выщелачивающих растворов и, как следствие, низкую производительность эксплуатационных ячеек. Однако работы, направленные на улучшение конструкции технологических скважин, позволят снизить отрицательное влияние данного фактора на производственные показатели предприятия.

Замена материала обсадных труб (ПНД) более надежными в условиях многолетней мерзлоты трубами из поливинилхлорида позволит снизить аварийность технологических скважин и выйти на показатели, соответствующие мировому уровню, — 3–7 % выхода из строя технологических скважин в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гидрогеохимический каротаж: теория и практика* / И.Н. Солодов, В.И. Величин, М.Г. Рубцов и др. / Под ред. В.И. Величина — М.: УРСС, 2005. — 320 с.
2. *Кеслер, А.Г.* Практика применения геотехнологического моделирования при проектировании и обработке эксплуатационных блоков при добыче урана способом подземного скважинного выщелачивания / А.Г. Кеслер, А.С. Бабкин, М.В. Гуцул и др. // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сб. VII Междунар. науч.-практ. конф. — Алматы: VII МНПК-2014. — С. 129–135.
3. *Кочкин, Б.Т.* Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) / Б.Т. Кочкин, Н.Н. Тарасов, О.В. Андреева и др. // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59. — № 2. — С. 124–140.
4. *Кочкин, Б.Т.* Перераспределение железа в пострудную стадию на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля, Витимский район / Б.Т. Кочкин, Н.Н. Тарасов, В.И. Величин др. // Геология рудных месторождений. — 2014. — Т. 56. — № 2. — С. 131–147.
5. *Машковцев, Г.А.* Уран Российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута и др. — М.: ВИМС, 2010. — 850 с.
6. *Основы геокриологии. Ч.6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне* / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 2008. — 768 с.
7. *Солодов, И.Н.* Добыча урана методом СПВ в зоне распространения многолетней мерзлоты (Хиагдинское рудное поле, Россия) / И.Н. Солодов // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сб. VII Междунар. науч.-практ. конф. — Алматы: VII МНПК-2014. — С. 54–58.
8. *Солодов, И.Н.* Физико-химические геотехнологии — главный вектор развития уранодобывающей отрасли / И.Н. Солодов, А.А. Морозов // Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 5–10.
9. *Тарханова, Г.А.* Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения / Г.А. Тарханова, В.Т. Дубинчук, Н.И. Чистякова и др. // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 6. — С. 7–13.
10. *In Situ Uranium Mining: An Overview of Operations* // IAEA Nuclear Energy Series / No. NF-T-1.4. — Vienna, 2016. — 60 p.
11. *Solodov, I.N.* ISR Mining of Uranium in the Permafrost zone, Khiagda mine (Russia) / I.N. Solodov // URAM-2014. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues — IAEA CN-216. — Vienna, 2014. — P. 236–238. /CD-ROM.

© Солодов И.Н., Гладышев А.В., Иванов А.Г., 2017

Солодов Игорь Николаевич // INSolodov@armz.ru
Гладышев Андрей Владимирович // Gladishev.A.V@hiagda.ru
Иванов Александр Георгиевич // Ivanov.A.G@hiagda.ru