

На основании петрофизических данных и тектонических нарушений, установленных в процессе документации керна скважин, многочисленные тела габбро-долеритов в разрезе были совмещены в две субпараллельные дайки. В результате такой реконструкции серия кварц-настурановых жил образовала одно рудное тело. Восстановленное положение отдельных блоков пород, подверженных серии тектонических деформаций, позволило установить, что фрагменты пегматитов также совмещаются в одну протяженную зону, состоящую из серии тел разной мощности.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что тектонические движения взбросового типа, проявившиеся до формирования среднерифейского чехла, привели к многоамплитудным перемещениям блоков, а вместе с ними к перемещению и разрыву рудных тел и даек габбро-долеритов (рис. 4).

Выводы

В результате выполненных петрофизических исследований были решены следующие геологические задачи:

— получены петрофизические характеристики основных комплексов пород месторождения Столбовое, которые были использованы для уточнения геологического строения разреза, выявления областей распространения гидротермально-измененных пород и обоснования постановки комплекса геофизических исследований;

— установлены закономерные связи между физическими свойствами горных пород, их вещественным составом и литологической классификацией;

— проведены структурные построения, которые позволили по аномальным значениям магнитных характеристик габбро-долеритов восстановить первоначальное положение основных блоков кристаллического фундамента и характер тектонических движений до формирования средне-позднерифейского чехла;

— установлены закономерности в синхронности формирования структурного плана дайкового комплекса и зон урановой минерализации, что позволило наметить направления работ при поисках скрытого уранового оруденения на флангах месторождения Столбовое.

Петрофизические исследования являются важной частью методических работ, направленных на построение объемных геолого-геофизических моделей и последующей интерпретации геофизических данных.

Изучение физических свойств горных пород целесообразно проводить на каждом этапе ГРП, что позволяет уточнить комплекс поисковых методов и методик.

Проведенные исследования указывают на необходимость расширения набора изучаемых петрофизических параметров с возможностью получения новой информации о геолого-структурных особенностях объекта и условиях его образования.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам А.И. Макарову, Н.В. Леденевой, А.И. Корявко (ФГБУ «ВИМС») и А.А. Бурмистрову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь в организации и проведении исследований, а также их обсуждению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иволга, Е.Г. Петрофизические исследования при создании геофизических моделей рудных районов (на примере Вознесенского рудного района, Приморье) / Е.Г. Иволга // Тихоокеанская геология. — 2010. — Т. 29. — № 4. — С. 91–113.
2. Машковцев, Г.А. Первоочередные задачи и современные технологии геологоразведочных работ на уран / Г.А. Машковцев, О.В. Алтунин, Н.А. Гребенкин, В.В. Коротков, Т.М. Овсянникова, А.К. Ржевская // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 11. — С. 8–22.
3. Машковцев, Г.А. Уран российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. — М.: ВИМС, 2010. — С. 507–512.
4. Петров, В.А. Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматитов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) / В.А. Петров, О.В. Андреева, В.В. Полуэктов // Геология рудных месторождений. — 2014. — Т. 56. — № 2. — С. 95–117

© Ржевская А.К., Гребенкин Н.А., 2018

Ржевская Анна Кирилловна // anna.k.rehevskaya@gmail.com
Гребенкин Николай Анатольевич // grebenkin2@mail.ru

УДК 553.495

Салтыков А.С., Кутуева О.В., Авдонин Г.И. (ФГБУ «ВИМС»)

НАТУРНЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИИ «ОЦЕНОЧНЫЕ РАБОТЫ»

*Более 40 лет применяется способ исследования геотехнологических свойств водоносных рудовмещающих пластов В.А. Грабовникова, основанный на работе опытной ячейки из двух скважин. За прошедшие годы работами ВИМСа способ развит в «Оптимальную схему геотехнологического опробования», применяемую на оценочной стадии геологоразведочных работ. Не все месторождения в водонасыщенных фильтрующих средах однозначно пригодны для отработки способом СПВ. Из проведенных 36 натуральных опытов в 11 получена отрицательная оценка. В тех случаях, когда опытно-промышленной отработке предшествовало предварительное натурное геотехнологическое опробование отрицательных результатов опытно-промышленных работ не получено. Если в ходе опытного геотехнологического опробования получены технологические растворы, с «опытными концентрациями урана» >10 мг/л, рекомендуется отбирать несколько проб по 50–100 л для лабораторного изучения процесса извлечения урана из ПР. **Ключевые слова:** месторождение урана, подземное выщелачивание, натурные опыты, геотехнологическое опробование.*

Saltykov A.S., Kutueva O.V., Avdonin G.I. (VIMS)

GEOTECHNOLOGICAL FIELD EXPERIMENTS
CONDUCTED DURING THE EVALUATION STAGE

The method of researching the geotechnology properties of aquiferous ore-bearing strata based on two-well experimental cell operation was first proposed by V.A. Grabovnikov over 40 years ago and has been used in the industry ever since. Over that time extensive research and testing work by the All-Rus-

*sian Mineral Resources Science and Research Institute (VIMS) enabled the development of that method into the «Optimal geotechnological testing scheme» used during the evaluation stage of geological prospecting. Not all deposits hosted in water-saturated filter beds are definitively eligible for ISR mining. Out of the total of 36 field experiments staged so far, 11 field experiments yielded negative conclusions. It is worth noting that in case pilot ISR units operation was preceded by such geotechnological field experiments which yielded positive conclusions for the subsequent pilot-scale ISR operations. All those pilot-scale units also provided full ground for positive estimates necessary for the further industry-scale development of the deposits. In case pregnant solutions with uranium concentrations exceeding 10 mg/l are obtained during the field experiment, taking several pregnant solution samples (V = 50–100 l each) for staging subsequent laboratory uranium recovery research is recommended. **Keywords:** uranium deposit, in-situ leaching, field tests, geotechnological testing.*

Открытие в СССР с начала 1960-х годов значительного числа объектов с бедными водонасыщенными урановыми рудами привело к необходимости разработки способа скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Первые опытные работы по СПВ урана в СССР начаты на месторождениях Девладово (Украина) в ноябре 1962 г. и Учкудук (Узбекистан) в марте 1963 г.

Особенностью начального этапа развития добычи урана методом СПВ являлась ведущая роль горнодобывающей промышленности не только в эксплуатации, но и в изучении месторождений, поскольку геологи-разведчики были не готовы самостоятельно полно учесть специфику требований СПВ по сравнению с горной отработкой [2]. Скважинное подземное выщелачивание, являющееся, по сути, разновидностью гидрометаллургии, имеет при этом существенные отличия в условиях перевода в жидкое состояние полезных компонентов руды.

Во-первых, процесс проводится на месте залегания руд на материале естественной крупности. Поэтому к геотехнологическим параметрам руд кроме вещественных (минерального и гранулометрического состава) относятся и геолого-гидрогеологические (проницаемость руд и рудовмещающих пород, параметры рудной залежи и рудовмещающего пласта, глубина залегания руд, анизотропия проницаемости рудовмещающего пласта, состав и глубина залегания уровня подземных вод).

Во-вторых, невозможность одновременного вовлечения в процесс выщелачивания всего громадного объема горнорудной массы увеличивает продолжительность процесса отработки блока СПВ на несколько порядков по сравнению с временем, необходимым для перевода полезного компонента в раствор. Поэтому в процесс химического взаимодействия включается и значительная часть породообразующих, обычно медленно растворимых, минералов.

Физическое моделирование процессов ПВ в лабораторных условиях показало, что значительную часть

процессов, проходящих под землей, практически невозможно масштабировать. Особенно это касается глубины залегания руд, мощности рудного тела, продуктивного горизонта и условий подачи реагента в пласт. Диффузионные и капиллярные процессы, формирующие в природном пласте зону мощностью до нескольких первых метров, при лабораторном моделировании захватывают всю модель (грунтовый лоток) целиком, искажая картину процесса распространения технологических растворов. Таким образом, необходимо проведение опытных работ по СПВ на натурной модели, по своему пространственно-временному масштабу сопоставимой с реальным объектом отработки.

Если геологические параметры объекта удовлетворяют существующим на это время технике и технологии добычи данного полезного компонента методами СПВ, то исследуемое месторождение признается как перспективное, что служит основанием для проведения исследовательских работ.

Первоначально представлялось необходимым на стадии разведки обязательно осуществлять натурные опытно-промышленные работы (ОПР). Такие работы требовали привлечения промышленных предприятий. Участие горнодобывающих предприятий в разведке месторождений сыграло свою положительную роль в быстром и эффективном вовлечении в эксплуатацию способом ПВ целого ряда объектов. Но у промышленности были свои требования к содержанию технологической информации и к способам ее получения.

Утвердился порядок — на каждом изучаемом месторождении осуществлять (в нашей стране практически везде за счет геологоразведочных организаций) пробную эксплуатацию месторождения путем реализации фрагментов технологической сети скважин и наземного технологического комплекса по переработке продуктивных растворов (ПР). Эти работы приурочивались в основном к стадиям предварительной или детальной разведки, но иногда проводились и на поисково-оценочной стадии.

В 1955 г. в Чебаркульском районе Челябинской области было открыто месторождение урана Санарское. В 1957–1964 гг. на нем были проведены ГРП, включающие и детальные поиски. Одновременно с поисками осуществлена предварительная разведка, а в 1961–1964 гг. — детальная разведка. Отсутствие отчетливых экономических перспектив отработки месторождения горным способом обусловило проведение в 1970–1972 гг. подсчета запасов урана для условий добычи его способом СПВ с разделением на водопроницаемые и непроницаемые.

В 1969 г. на Санарском месторождении организована опытно-промышленная отработка. Работы осуществлялась цехом № 11 Малышевского РУ, входящего в тот период в Министерство среднего машиностроения (ныне Росатом), с привлечением к работе сотрудников МГРИ. Всего до 1980 г. было добыто около 300 т урана [9]. Технологические свойства руд при опытных и добычных работах характеризовались следующими параметрами: извлечение урана в растворы

из песчаных руд составило 57 % при достигнутом Ж/Т = 2,3; средняя концентрация урана (C_U) в продуктивном растворе (ПР) — 21÷54 мг/л. Однако дальнейшие работы на месторождении по экологическим причинам были прекращены.

Значения концентраций урана («истинных») для двухскважинных опытов принято приводить с учетом разбавления, т.е. концентраций, полученных в опыте («опытных») умноженных на величину дебаланса.

В 1970—1980-х годах практически на всех гидрогенных месторождениях СССР были выполнены работы по опытно-промышленной эксплуатации, причем в некоторых случаях даже на стадиях предварительной разведки [1]. Помимо значительных дополнительных расходов и увеличения сроков разведки постановка опытно-промышленных работ имела еще тот недостаток, что в случае отрицательных результатов произведенные затраты оказывались бросовыми. А в СССР по состоянию на 1988 г. из 28 случаев опытно-промышленных испытаний только 15 имели положительные результаты. В эти годы значительные научные силы были брошены на изучение процесса ПВ — во многих институтах и горно-химических комбинатах сформированы группы и лаборатории с соответствующей тематикой. Вследствие закрытости работ по урановой тематике нередко научные направления пересекались и даже дублировались.

Для упорядочивания геотехнологических исследований в геологической отрасли в 1977 г. в ВИМСе на базе отдела Гидрогеологических исследований создана специализированная лаборатория Геотехнологических и гидрогеологических исследований под руководством Б.Г. Самсонова. В задачи лаборатории входила разработка методов геотехнологических исследований для оценки возможности отработки урановых месторождений способом СПВ. Сотрудниками лаборатории (В.А. Грабовников, Г.Н. Кричевец, О.В. Кутуева) экспериментально изучались закономерности процесса ПВ, создана теоретическая математическая модель.

По мере накопления опыта натурных работ стало очевидным, что в ряде случаев необходимые исходные данные для промышленной оценки месторождений могут быть получены и более простыми и дешевыми способами.

Требуемые экономичность и оперативность могли быть достигнуты за счет трех мероприятий:

1. Отказа от технологического передела продуктивных растворов.
2. Сокращения числа опытных технологических скважин.
3. Сокращения расстояний между откачными и закачными скважинами.

Идею о возможности проведения натурных опытов по ПВ без технологической переработки продуктивных растворов выдвинул Ю.В. Культин. Уровень концентрации металла в откачных растворах может не достигнуть необходимого технологического минимума и тогда все работы, и затраты по сооружению назем-

ного технологического комплекса окажутся бесполезными, что и случалось на некоторых объектах. Если растворы окажутся продуктивными, то основные выходные параметры, отвечающие собственно подземному выщелачиванию урана из недр, могут быть получены и без их переработки.

Расстояния между опытными скважинами можно сократить по сравнению с эксплуатационной сетью без потери информации, т.к. при ПВ продвижение полезных компонентов в пласте происходит по схеме подвижного геохимического барьера. А уменьшение расстояния сокращает длительность опыта в квадратичной зависимости.

В результате проделанных исследований В.А. Грабовниковым был предложен способ исследования геотехнологических свойств водоносных рудовмещающих пластов, включающий: лабораторные исследования образцов руд исследуемого пласта; создание опытной ячейки из двух скважин; подачу в пласт выщелачивающего раствора (ВР); наблюдение за фильтрацией ВР по пласту и образованием ПР; откачку ПР при коэффициенте дебаланса дебитов откачной и закачной скважин, равном 4—10 [6, 8].

Основное достоинство методов опробования с дебалансом дебитов технологических скважин то, что площадь контура опробования не зависит от времени. Это позволяет обеспечить постоянно контура опробования недр в пространстве и времени.

Для апробации предложенного способа были проведены беспрецедентные работы — на месторождениях Бешкак и Карамурун, где уже проводились опытно-промышленные работы, были проведены и двухскважинные опыты. Полученные для двух пар опытных участков коэффициенты скорости выщелачивания урана практически совпали, при том что параметры опытных участков расходились в разы по продуктивности и по коэффициенту фильтрации [1].

В 1992 г. ВИМС выпустил (еще под эгидой Министерства геологии СССР) Методическое руководство «Оптимальная схема геотехнологических исследований», в котором для оценки пригодности конкретных объектов к отработке методом ПВ (месторождений, отдельных залежей, подготавливаемых к отработке эксплуатационных полигонов и т.д.) рекомендовано в качестве типовых считать двухскважинные опыты, иные варианты опытов определяются как целевые [4].

Натурные опыты по СПВ без технологического передела ПР предложено было определить термином «**опытное геотехнологическое опробование**» и рекомендовано в качестве основного метода геотехнологического опробования для стадии предварительной разведки месторождений. В настоящее время это стадия оценочных работ.

Примерные значения технологических параметров, позволяющие обосновать однозначно отрицательную оценку геотехнологических свойств месторождений, приведены в табл. 1 [5]. В отечественной практике накоплен значительный опыт «**опытного геотехнологического опробования**» двухскважинным способом; прове-

Таблица 1
Параметры для обоснования оценки геотехнологических свойств месторождения

| Параметры | Значение, отвечающее отрицательной оценке |
|--|---|
| Коэффициент фильтрации (по воде), м/сут. | < 0,5 |
| Средняя концентрация урана в растворах, мг/л | <20 |
| Отношение Ж/Т | >5–10 |
| Удельные затраты реагента, кг H ₂ SO ₄ /кг U | >150–200 |
| Степень извлечения урана от запасов в недрах, % | <50 |

дено не менее 36 опытов, из них 28 до 1991 г. (табл. 2) [10]. Большая часть опытов была направлена на решение типовых задач. Как видно из таблицы 2 не все месторождения в водонасыщенных фильтрующих средах однозначно пригодны для отработки способом СПВ — в 11 натуральных опытах (30 %) получен отрицательный результат. Это свидетельствует о правильности выбранного подхода — проведении предварительного натурального геотехнологического опробования.

В ряде опытов, несмотря на положительный геотехнологический результат, выявлены отрицательные побочные эффекты, которые следует учесть при постановке опытно-промышленных работ. Справедливости ради надо отметить, что неудачи некоторых опытных работ были заранее обусловлены слабой либо гидрогеологической, либо геотехнологической изученностью руд и пород.

На рудопроявлении Садовое (Украина) впервые была опробована возможность реализации двухскважинного метода. Отрицательный результат опыта скорее можно отнести к недостатку опыта в проведении подобных работ. В настоящее время месторождение Садовое считается вполне пригодным для отработки методом СПВ.

Месторождение Кызылколь (Казахстан) характеризовалось целым рядом параметров, соответствующих условиям проведения метода ПВ. Однако проведенные ОПР (блоки 1 и 2ЛГХК) в 1973–1975 гг. дали отрицательные результаты. Тогда с другими режимами выщелачивания были поставлены двухскважинные опыты — два по сернокислотному (ПВ-76Кк и 78Кк). Повышенная и крайне неравномерная карбонатность руд и пород практически исключает возможность сернокислотного выщелачивания. И естественно сернокислотные опыты также дали отрицательный результат.

Опытные работы ПВ-77Тл и ПВ-78Тл на рудопроявлении Тюлюсай (Омская обл.) дали отрицательную в геотехнологическом плане оценку опробуемым участкам, что объясняется слабой проницаемостью руд относительно рудовмещающих пород. Явная недоработка в гидрогеологическом изучении пласта и лабораторных исследованиях технологических свойств руд.

Двухскважинный опыт ПВ-79Бш на месторождении Бешкак (Казахстан) дал положительный результат, подтвердил результаты опытно-промышленных испытаний 1978 г. и правомерность использования двухскважинной схемы.

Опробование ПВ-80ТР на рудопроявлении Теплинское (Челябинская обл.) дало отрицательный результат по причине слабой проницаемости руд. Это должно было быть выяснено и без проведения опытных работ.

Сложность геологического строения и упорность руд обусловили постановку на месторождении Далматовское (Курганская обл.) четырех типовых натуральных сернокислотных опытов — ПВ-81Дл, ПВ-83Дл, ПВ-85Дл, ПВ-87Дл. Все они имели положительный исход. Кроме того, установлена зависимость средних концентраций урана в рабочих растворах и удельных затрат реагента от параметра тс/М. В настоящее время Далматовское месторождение успешно обрабатывается по сернокислотной схеме.

На месторождении Хиагдинское (Бурятия) впервые в мировой практике работы по СПВ урана выполнялись в условиях развития вечной мерзлоты. Оба сернокислотных опыта (ПВ-82Хг и ПВ-87Хг), поставленные на VI и V залежах, дали положительные результаты. В настоящее время Хиагдинское месторождение также успешно обрабатывается.

На Вятско-Камском месторождении фосфоритов с положительным результатом был проведен опыт ПВФ-83. Рабочим был раствор азотной кислоты.

На месторождении Добровольное (Курганская обл.) опыт ПВ-89Дбр проводился в условиях высокого напора пластовых вод ураноносного горизонта (+48 м). Опыт, имея положительные показатели, не был завершен, но вскрыл возможные осложнения при эксплуатации технологических скважин в условиях самоизлива. В ходе опытных работ были получены вполне промышленные по содержанию урана растворы. Средняя C_U в опыте составила 82 мг/л. Продуктивные растворы, следуя логике «**геотехнологического опробования**», не изучались на предмет извлечения урана. В настоящее время, когда встал вопрос о разведке и проведении ОПР, обратили внимание на хлоридный (Cl 7–8 г/л) состав подземных вод рудовмещающего горизонта, существенно препятствующий сорбционному извлечению урана по стандартной схеме. Возникла необходимость дополнительного изучения сорбционного передела растворов, естественно с лабораторной наработкой на пластовой воде необходимого количества ПР.

На месторождении Хараат (Монголия) натурное сернокислотное опробование проводилось в 1994 г. Продолжительность опыта составила 74 дня. Максимальная C_U в ПР 195, средняя — 80 мг/л.

Два опыта — ПВ-98Млн и ПВ-99Млн на Малиновском (Кемеровская обл.) месторождении с сернокислотными рабочими растворами дали противоречивые результаты: первый — отрицательный, второй — положительный по содержанию урана в растворе, выпол-

Таблица 2
Перечень геотехнологических опытов по двухскважинной схеме

| № | Название | Месторождение | Год | Состав ВР | Результат опыта |
|----|--------------|---------------------------|------|---|--|
| 1 | ПВ-74СР | Садовое рудопроявление | 1974 | H ₂ SO ₄ | отрицательный |
| 2 | ПВ-76Кк | Кызылколь | 1976 | H ₂ SO ₄ | отрицательный, аналогичен результатам ОПР блока 1 ЛГХК в 1973-75 гг. |
| 3 | ПВ-77Кк | Кызылколь | 1977 | NH ₄ HCO ₃ +KMnO ₄ | положительный, кольматация при данном окислителе KMnO ₄ |
| 4 | ПВ-77Тл | Тюлюсай | 1977 | H ₂ SO ₄ | отрицательный (слабопроницаемые руды и проницаемые безрудные) |
| 5 | ПВ-78Кк | Кызылколь | 1978 | H ₂ SO ₄ | отрицательный, аналогичен результатам ОПР на блоке 2 ЛГХК в 1975 г. |
| 6 | ПВ-78Тл | Тюлюсай | 1978 | H ₂ SO ₄ | отрицательный (слабопроницаемые руды и проницаемые безрудные) |
| 7 | ПВ-79Бш | Бешкак | 1979 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 8 | ПВ-80Кк | Кызылколь | 1980 | NH ₄ HCO ₃ +H ₂ O ₂ | положительный |
| 9 | ПВ-Юк | Южный Карамурун | 1980 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 10 | ПВ-80ТР | Теплинское рудопроявление | 1980 | H ₂ SO ₄ | отрицательный (слабопроницаемые руды и проницаемые безрудные) |
| 11 | ПВ-81ИР | Ирколь | 1981 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 12 | ПВ-81Дл | Далматовское | 1981 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 13 | ПВ-82Скселен | Северный Карамурун | 1982 | Na ₂ S+NaHS | первый положительный опыт по ПВ селена in situ |
| 14 | ПВ-82Зр | Заречное | 1982 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 15 | ПВ-82Хг | Хиагдинское | 1982 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 16 | ПВ-82Кх | Северный Канимех | 1982 | NH ₄ HCO ₃ +H ₂ O ₂ | положительный |
| 17 | ПВ-83Дл | Далматовское | 1983 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 18 | ПВ-83Кх | Северный Канимех | 1983 | H ₂ SO ₄ +C1 ₂ | положительный на комплексное извлечение |
| 19 | ПВФ-83 | Вятско-Камское фосфоритов | 1983 | HNO ₃ | положительный |
| 20 | ПВ-84Кх | Северный Канимех | 1984 | Na ₂ S | отрицательный, осложнения за счет аэрирования восходящего потока |
| 21 | ПВ-84Дл | Далматовское | 1984 | NH ₄ HCO ₃ +O ₂ | отрицательный из- за повышенного содержания органики |
| 22 | ПВ-85Дл | Далматовское | 1985 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 23 | ПВ-87Дл | Далматовское | 1987 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 24 | ПВБ-87Мл | Мейлысай | 1987 | NH ₄ HCO ₃ +O ₂ | положительный, требуется снижение жесткости природных вод |
| 25 | ПВК-87Мл | Мейлысай | 1987 | H ₂ SO ₄ слабокислотный+O ₂ | положительный |
| 26 | ПВ-88Дл | Далматовское | 1988 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 27 | ПВ-89ХГ | Хиагдинское | 1989 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 28 | ПВ-89Дбр | Добровольное | 1989 | H ₂ SO ₄ | положительный, возможны осложнения связанные с самоизливом |
| 29 | ISR-94W | Хараат (Монголия) | 1994 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 30 | ПВ-2000Х | Хохловское | 2000 | природные воды + O ₂ | отрицательный |
| 31 | ПВ-2000Х | Хохловское | 2000 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 32 | ПВ-98Млн | Малиновское | 1998 | H ₂ SO ₄ | отрицательный |
| 33 | ПВ-99Млн | Малиновское | 1999 | H ₂ SO ₄ | неопределенный |
| 34 | ПВ-99Щ | Щегловское | 1999 | H ₂ SO ₄ | отрицательный |
| 35 | ПВ-2008Бл | Балковское | 2008 | H ₂ SO ₄ | положительный |
| 36 | ПВ-2016 | Ньета (Танзания) | 2016 | H ₂ SO ₄ | положительный |

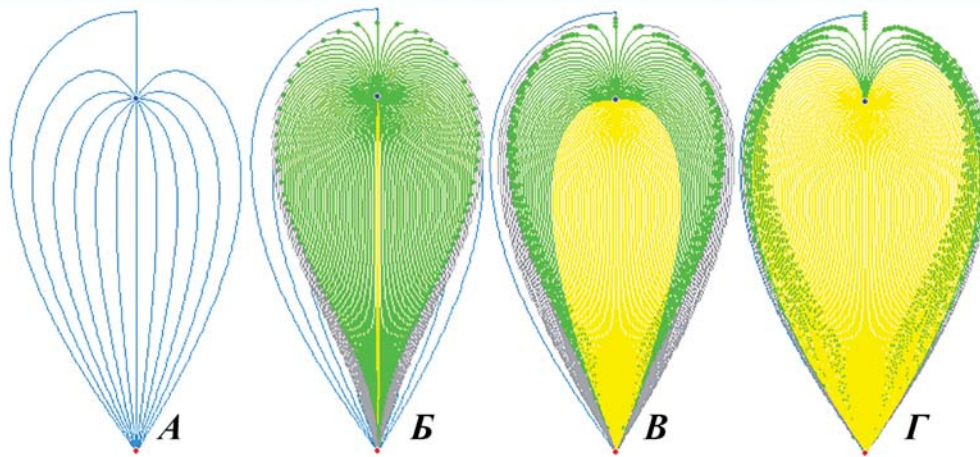


Рис. 1. Схема моделирования двухскважинного участка: А — гидродинамическая схема; Б — момент прихода первых растворов с ураном; В — извлечение 25 %; Г — извлечение 62 %. Площадь: серая — замещения пластовых вод; зеленая — закисления; желтая — выщелачивания

нен с техническими погрешностями, вызвавшими неопределенность оценки.

Вопрос о пригодности для отработки СПВ руд месторождения Щегловское (Бурятия) сернокислотный опыт (ПВ-99Щ) окончательно не закрыл. Полученный отрицательный результат по всем показателям (извлечение, содержание урана в растворах, удельный расход кислоты) связывают с неоднородностью фильтрационных свойств руд и пород участка (недостаточная геологическая изученность).

Опыт ПВ-2000Х с сернокислотными рабочими растворами на месторождении Хохловское (Курганская обл.) закончился с положительными результатами. Высокое (более 2 г/л) содержание бикарбоната в пластовых водах рудного горизонта привело к тому, что в процессе работ наблюдались: интенсивная дегазация откачиваемых растворов и кольматация откачной скважины гипсом. В дальнейшем это решалось нейтрализацией бикарбоната пластовых вод на поверхности на начальной стадии закисления пласта.

Опытные работы на месторождении Малиновское (Кемеровская обл.) проводились с целью установления возможности сернокислотного выщелачивания урана из высококислотоемких руд. В первом двухскважинном опыте ПВ-98Млн, продолжавшемся более 160 сут., содержание урана в откачиваемых не превысило первых миллиграммов на литр. Причины отрицательного результата испытаний не были установлены. Они могли иметь как природные (существенная фильтрационная контрастность руд и безрудных проницаемых пород), так и технические (несовпадение рабочих интервалов фильтров откачной и закачной скважин) причины. Второй опыт ПВ-99Млн был оценен авторами тоже отрицательно. Опыт длился 160 сут. Средняя C_U в продуктивном растворе составило 52 мг/л, максимальная C_U — 105 мг/л, степень извлечения — 21 %; удельные затраты кислоты — 303 кг/кг. В то же время содержание урана в ПР на конце опыта составило 80 мг/л, поэтому опыт ПВ-99 следует оценивать, как незавершенный. Рассчитанные на конец

опыта показатели ПВ-99Млн относятся к проблемным, что предполагает необходимость продолжения геотехнологических исследований. Результаты опытных работ на участке ПВ-99 показали, что выщелачивание кислотоёмких урановых руд Малиновского месторождения возможно. Не менее кислотоёмкие руды успешно обрабатываются на месторождении Семизбай-У АО «НАК «Казатомпром».

На основании проведенных в 2006 г. лабораторных исследований руд месторождения

Балковское (Калмыкия), были получены эмпирические коэффициенты, заложены в прогнозные математические модели «INSITU» (М.А. Мананников, ВНИИХТ) и «Экология подземных вод» (В.П. Коптелов, ЛГХК), сделаны предварительные расчеты работы участка (рис. 1), выбран режим выщелачивания. В 2008 г. геотехнологическое опробование двухскважинным методом (ПВ-2008Бл) показало принципиальную возможность отработки сернокислотным способом и хорошую сходимость с результатами математического расчета (рис. 2) [7].

Скорректированные по итогам проведенного опыта коэффициенты позволили рассчитать возможность наиболее рентабельной отработки Балковского месторождения, используя сеть скважин размером 15×70 м до извлечения 80 % с показателями Ж/Т~2 — средним C_U урана в опыте — 42 мг/л и удельным расходом кислоты — 10,9 кг/т руды [9].

В 2016 г. на урановом месторождении Ньета (Танзания) был поставлен двухскважинный опыт по сернокислотному СПВ (рис. 2). Руды близповерхностные — глубина залегания кровли рудного тела 27 м. Средняя мощность зоны минерализации 9,6 м. Среднее содержание урана 0,078 %. Расстояние между рабочими скважинами — 6 м. Концентрация кислоты в ВР поддерживалась в ходе опыта на уровне 30 г/л.

Вынос урана в ПР характеризуется первоначальным участком резкого роста значений C_U , максимумом (170 мг/л) и ветвью постепенно нисходящих значений. Среднее содержание урана в опыте — 109 мг/л. Вследствие низкого дебита откачной скважины (~1 м³/час) опыт продолжался более 8 месяцев и был остановлен незавершенным при содержании урана в ПР 125 мг/л, Ж/Т = 2,2 и извлечении ~46 % [11].

Требование ГКЗ обязательно доводить опытные работы «до достижения содержания в растворах, отвечающего промышленному минимуму» — относятся к стадии разведки. В ситуации с незавершенными опытами при производстве оценочных геологоразведочных работ геотехнологические показатели, достигшие промыш-



Рис. 2. Опытный участок ПВ-2008Бл на месторождении Балковское

ленных значений, позволяющих обосновать положительную оценку месторождения, могут быть рассчитаны за временные рамки опыта методами экстраполяции или математического моделирования [4].

Рассчитанное окончание работ на участке ПВ-2016 наступит на 458 сутки. К этому времени: Ж/Т составит 4,0; извлечение урана в ПР достигнет ~ 85 %; расход кислоты будет на уровне 70–75 кг/кг урана; среднее содержание урана в ПР на уровне 60–90 мг/л. Все показатели вполне укладываются в критерии положительной оценки, что позволяет в дальнейшем перейти к опытно-промышленным работам.

Помимо главной типовой задачи опытное натурное опробование производилось и для решения методических задач: изучение возможности и эффективности использования новых технологических растворов; добыча других, в том числе попутных, полезных компонентов; освоение глубин больше практикуемых.

Для решения методических задач было поставлено 11 двухскважинных опытов. Пять из них были проведены для изучения содовой технологической схемы выщелачивания урана.

Проведение двух опытов (ПВ-77Кк и ПВ-80Кк) по содовому выщелачиванию урана на месторождении Кызылколь показали, что руды вполне пригодны для отработки бикарбонатными растворами. Первый опыт с применением в качестве окислителя $KMnO_4$ при приемлемом результате был

осложнен кольматационными явлениями, второй опыт с пероксидом водорода дал положительный результат, что улучшило перспективы отработки этого месторождения.

В 1982 г. на месторождении Северный Канимех (Узбекистан) был получен положительный результат в опыте выщелачивания с пероксидом водорода в качестве окислителя. На месторождении Далматовское для сравнения был проведен и бикарбонатный опыт (ПВ-84Дл), где в качестве окислителя применялся кислород. Предполагается, что причиной отрицательного результата было повы-

шенное содержание в рудах органического вещества. В 1987 г. на месторождении Мейлисай с целью оценки возможности отработки способом СПВ высококарбонатных (до 7 % CO_2) проницаемых урановых руд (Кф ~ 5 м/сут) поставлены два натурных опыта с окислителем — слабосернокислотный и бикарбонатный. Оба опыта дали положительный результат. Более интенсивное извлечение урана идет по бикарбонатной технологии, но она требует специальные мероприятия по частичному снижению жесткости природных вод.

В опыте ПВ-2000Х на Хохловском месторождении предполагалось использовать естественную карбонатность вод для получения рабочих растворов. В технологическую скважину подавались пластовые воды, насыщенные кислородом. Опыт дал отрицательный результат.



Рис. 3. Опыт ПВ-2016 по СПВ урана на месторождении Ньета (Танзания)

В процессе опытов по сернокислотному и бикарбонатному выщелачиванию установлено, что селен выщелачивался только из селенидов. Самородный селен оставался на месте. С целью изучения возможности добычи селена способом СПВ проводилось два опыта. Опыт «чисто на селен» (ПВ-82СКселен) на месторождении Северный Карамурун (Казахстан) с сульфидом натрия в качестве рабочего раствора доказал возможность выщелачивания селена сульфидными растворами. При Ж/Т = 1,2 было добыто 526 кг селена (81 %).

В 1982 г. на месторождении Северный Канимех после выщелачивания из недр урана и рения растворами бикарбоната аммония с перекисью водорода (опыт ПВ-82Кх), был проведен опыт ПВ-84Кх по выщелачиванию селена растворами гидросульфида-сульфида натрия. В период опыта в зоне откачной скважины при пятикратном разбавлении щелочных растворов водой и снижении рН с 12,8 до 7,8 наблюдался коагуляционный эффект, связанный с выпадением соединений селена в осадок. В связи с этим был сделан вывод о непригодности двухскважинного опробования для изучения геотехнологических свойств селенового оруденения. В целом же опыт доказал возможность стадийного выщелачивания урана и рения, затем селена [3]. Положительный результат на комплексное извлечение урана, рения и селена получен в опыте ПВ-83Кх на месторождении Северный Канимех. На первой стадии серной кислотой выщелачивался уран. На второй — добавлялся в качестве окислителя хлор и извлекались уран, селен (до 66 %) и ванадий. В опыте доказана возможность комплексного выщелачивания из недр нескольких полезных компонентов. Сложности возникли с сохранностью оборудования из нержавеющей стали.

Для освоения глубин больших, чем практикуемые, был поставлен опыт ПВ-80ЮК на месторождении Южный Карамурун (Казахстан) на глубине 680 м. В ходе опыта был отмечен эффект температурной активации. Положительный результат опыта способствовал увеличению глубины поисков и разведки гидрогенных месторождений до 700 м.

С целью изучения возможности добычи скандия, как попутного компонента, проводился опыт ПВ-88Дл сернокислотного выщелачивания урана на Далматовском месторождении. В процессе опыта определялся вынос скандия в ПР урана.

Анализ проведенных более чем за сорокалетний период работ по опытному геотехнологическому опробованию показал, что направление на производство предварительных натуральных работ было выбрано правильно. Положительный исход опытного натурального опробования разрешает переход к опытно-промышленным испытаниям с переделом продуктивных растворов. В тех случаях, когда опытно-промышленной отработке предшествовало предварительное натурное геотехнологическое опробование, отрицательные результаты не получены.

В то же время с учетом опыта проведенных работ полезно было бы сделать некоторые рекомендации по развитию «Оптимальной схемы геотехнологических исследований».

1. Изучая в лабораторных условиях закономерности продвижения по пласту выщелачивающих растворов и извлечение в продуктивные растворы полезных компонентов необходимо совершенствовать **прогнозные математические модели**.

2. Каждому натурному опыту должен предшествовать прогнозный расчет планируемых технологических показателей. Чтобы после окончания опыта иметь возможность корректировать коэффициенты математической модели и использовать их в дальнейшем при предварительном расчете опытно-промышленных работ.

3. При получении в ходе опытного геотехнологического опробования продуктивных растворов с «опытными концентрациями урана», достигающими промышленных значений (>10 мг/л), необходимо отбирать несколько проб по 50–100 л для лабораторного изучения процесса извлечения урана из ПР.

Авторы выражают благодарность А.Ю. Ястребкову за помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бровин, К.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием / К.Г. Бровин, В.А. Грабовников, М.В. Шумилин. — Алматы: Гылым, 1997.
2. Грабовников, В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов / В.А. Грабовников. — М.: Недра, 1995.
3. Каримов, Х.К. Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан / Х.К. Каримов, Н.С. Бобонов, К.Г. Бровин, Р.И. Гольдштейн, Ю.Ф. Корсаков, А.П. Мазуркевич, Б.И. Наталченко, Е.А. Толстов, Е.М. Шмариович. — Ташкент: Фан, 1998.
4. Методические рекомендации «Оптимальная схема геотехнологических исследований» / Б.Г. Самсонов, О.В. Кутуева, А.В. Петров. — М.: ВИМС, 1992.
5. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных твердых ресурсов твердых полезных ископаемых. Радиоактивные металлы. — М.: ФГУ ГКЗ, 2007.
6. Пат. № 735752 СССР. Способ исследования геотехнологических свойств водоносных рудовмещающих пластов / В.А. Грабовников. — М.: Официальный бюллетень ГК СССР по делам изобретений и открытий, 1980. — № 19.
7. Салтыков, А.С. Применение натуральных геотехнологических исследований на месторождениях урана различных геолого-промышленных типов / А.С. Салтыков, Г.И. Авдонин, В.А. Гуров // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 12. — С. 34–42.
8. Самсонов, Б.Г. Как мы изобретали двухскважинный метод / Б.Г. Самсонов / Разные годы одной жизни. Избранное. — М.: ИП Скороходов В.А., 2012. — С. 271–275.
9. Уран Российских недр / Под ред. Г.А. Машковцева. — М.: ВИМС, 2010.
10. Ястребков, А.Ю. Методические основы геотехнологических исследований рудных месторождений (по опыту оценки урановорудных объектов) / А.Ю. Ястребков: Дисс... канд. геол.-минер. наук. — М., 2003.
11. Ястребков, А.Ю. Результаты лабораторных и натуральных геотехнологических исследований на урановом месторождении Ньета (Объединенная республика Танзания) / А.Ю. Ястребков, А.Н. Жарников, И.А. Ивлев, К.В. Маркевич, А.В. Мельников, В.Л. Константинов, Г.Ю. Попонина, А.В. Ладейщиков, О.В. Кутуева // Уран: геология, ресурсы, производство: Доклад на IV-м международном симпозиуме. 28–30.10.2017 г., М.: ВИМС, 2017.

© Салтыков А.С., Кутуева О.В., Авдонин Г.И., 2018

Салтыков Александр Сергеевич // asalt52@mail.ru
Кутуева Олимпиада Викторовна // ovkuteva@yandex.ru
Авдонин Геннадий Иванович // gosha1956@mail.ru