

Таблица 3
Оценка результатов фильтрационных испытаний

Показатель	Критерий положительной оценки	Результат испытаний
Степень извлечения урана в растворы ε , %	≥ 50	76–99
Среднее содержание урана C_{cp} , мг/л	> 20	69–1270
Отношение Ж:Т	< 10	1–4
Удельные затраты серной кислоты z , кг/кгU	$< 150–200$	4–60

Среднюю скорость фильтрации раствора (м/сут) определяли по формуле:

$$V_{cp} = \frac{14,4 \cdot \sum \Delta W_i}{F \cdot \sum \Delta t_i},$$

где F — площадь сечения фильтрационной колонки, см²; Δt_i — время накопления частной пробы выходных растворов, мин.

На рис. 4 приведен характерный график с результатами фильтрационных испытаний пробы Ф-7, отобранной в юго-западной части месторождения. Представленные графики наряду с журналом опыта являются основными документами фильтрационных испытаний. На график выносятся результаты определения в каждой из проб выходных растворов содержания урана и значений рН, а также расчетных значений степени извлечения металла в растворы. Кроме того, приводится информация об исходном содержании урана в пробе (C_p) и основные показатели опыта на момент его завершения: степень извлечения (ε), максимальное (C_{max}) и среднее (C_{cp}) содержания урана, отношение Ж:Т (f), удельные затраты реагента (z), продолжительность опыта (t) и средняя скорость фильтрации выщелачивающих растворов (V_{cp}) (рис. 4).

Почти во всех фильтрационных испытаниях степень извлечения урана составила более 85 % (табл. 2). Процесс выщелачивания характеризуется хорошей динамикой — основная доля извлекаемого урана выносится с первыми порциями растворов (рис. 4). Помимо высоких значений степени извлечения, отмечаются высокие средние содержания урана в выходных растворах (в зависимости от исходного содержания металла в пробе), а также приемлемые значения показателя удельных затрат кислоты и отношения Ж:Т.

Общая оценка результатов лабораторных геотехнологических исследований дается по итогам сопоставления полученных значений основных показателей процесса выщелачивания урана с их нормированными значениями (табл. 3), полученными на основе многолетнего опыта разведки месторождений урана для отработки методом СПВ [3, 4]. Положительная оценка результатов лабораторных испытаний дается тогда, когда все основные показатели процесса выщелачива-

ния отвечают критериям положительной оценки. Из приведенной таблицы видно, что полученные в результате фильтрационных испытаний значения степени извлечения урана и его среднего содержания в растворах существенно выше критериальных значений, а опытные показатели отношения Ж:Т и удельных затрат кислоты — существенно ниже критериальных значений (табл. 3). Таким образом, по всему перечню показателей процесса выщелачивания урана результаты фильтрационных испытаний расцениваются как положительные.

Положительные результаты геологических и гидрогеологических исследований, а также лабораторных геотехнологических испытаний разрешают переход к следующей стадии геотехнологических исследований — постановке натуральных испытаний по выщелачиванию урана на месте залегания на месторождении Ньёта. Опытные натурные испытания по СПВ урана выполнены на месторождении Ньёта в 2016 г. по двухскважинной схеме.

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, В.Г. Языков. — Алматы: Гылым, 1997.
2. Грабовников, В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов, 2-е изд. / В.А. Грабовников. — М.: Недра, 1995.
3. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Радиоактивные металлы. — М.: ФГУ ГКЗ, 2007.
4. Самсонов, Б.Г. Оптимальная схема геотехнологических исследований (Метод. рекомендации) / Б.Г. Самсонов, О.В. Кутуева, А.В. Петров. — М: ВИМС, 1992.
5. Самсонов, Б.Г. Разработка и внедрение рекомендаций по химико-аналитическому обеспечению геотехнологических опытов / Б.Г. Самсонов, О.В. Кутуева, А.В. Петров. — М.: ВИМС, 1992.

© Коллектив авторов, 2017

Ястребков Алексей Юрьевич // yastrpost@mail.ru
 Жарников Алексей Николаевич // alexeyz_73@mail.ru
 Кутуева Олимпиада Викторовна // ovkuteeva@yandex.ru
 Маркевич Константин Владимирович // kv-markevich@yandex.ru
 Ивлев Игорь Александрович // ivlevia@u1g.ru
 Мельников Андрей Владимирович // amelnikov73@gmail.com
 Константинов Василий Леонардович // konstantinov@u1g.ru

УДК 669.822:553.495

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

ПРИМЕНЕНИЕ НАТУРНЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ

Для получения ряда технологических показателей необходимо проведение опытных работ на натурной модели, по своему пространственно-временному масштабу, сопоставимой с реальным объектом отработки. Масштаб и схема натуральных исследований соответствуют стадиям проведения геологоразведочных работ. Одно- и двухскважинные опыты проводят на оценочной стадии ГРП, на стадии разведки — многоскважинные с технологиче-

ским переделом растворов. На территории РФ натурные опыты по выщелачиванию урана проводились на месторождениях следующих геолого-промышленных типов: эндогенного в вулканно-тектонических структурах складчатых областей; экзогенного в морских глинах платформенного чехла; экзогенного в водопроницаемых толщах платформенного чехла. Проведенные работы позволили расширить сырьевую урановую базу России. **Ключевые слова:** месторождение, уран, подземное выщелачивание, кучное выщелачивание, продуктивный рас-твор, натурные опыты.

Saltykov A.S., Avdonin G.I. (VIMS)

THE APPLICATION OF FIELD GEOTECHNOLOGY STUDIES FOR URANIUM DEPOSITS OF VARIOUS GEOLOGY-INDUSTRIAL TYPES

*The obtainment of some technology parameter values needed to develop prospective uranium deposits necessitates preliminary field tests on model objects which are essentially scaled-down models of actual deposits to be developed. The scope and the flow chart of the field studies are to correspond with the actual stages of the geology prospecting and development of the actual deposit. During the pre-feasibility studies single-well field tests are to be conducted while advanced feasibility studies require multiple-well field tests which in turn comprise pilot plants for the treatment of the solutions produced during the said tests. In Russia, uranium leaching field tests have been made so far on the following uranium deposit types: endogenous deposits in volcanic-tectonical orogeny areas; sedimentary cover sea clay-hosted exogenous deposits; exogenous deposits hosted in water-permeable platform cover formations. The field tests held at the said deposits brought about a significant increase of Russia's uranium resource base. **Key-words:** uranium deposit, in-situ leaching, heap leaching, pregnant solution, field tests.*

Геотехнологические исследования руд тесно увязаны со стадийностью геологоразведочных работ [10]. Последовательность в постановке целей, задач и методов геотехнологических исследований (ГТИ) обеспечивает максимальное снижение риска неоправданных затрат на каждой последующей стадии геологоразведочного процесса.

В основу геотехнологических исследований положены основные закономерности процессов *подземного* (ПВ) и *кучного* (КВ) выщелачивания. **Блоковое ПВ** (БПВ, скальное, шахтное) по способу движения реагента (просачиванию) и по лимитирующей стадии процесса, ближе к *кучному*, чем к *скважинному* выщелачиванию.

Методы КВ и ПВ отличаются от традиционных методов гидрометаллургии большей продолжительностью процесса выщелачивания и невозможностью вывода из зоны реакции уже отработанной горной массы. Естественно увеличивается и продолжительность опытных работ.

Второе существенное отличие — это большая крупность выщелачиваемого рудного материала. Для про-

цесса КВ основной лимитирующей стадией является скорость проникновения выщелачивающего реагента в кусок.

Третье существенное отличие — неравномерность условий проведения выщелачивания в отработываемом объеме. Для **скважинного ПВ** (СПВ) лимитирующей стадией является подвод реагента к месту реакции.

Процессы ПВ практически невозможно масштабировать, особенно в отношении глубины залегания руд, мощности рудного тела и продуктивного горизонта, условий подачи реагента в пласт. Диффузионные и капиллярные процессы, формирующие в природном пласте зону мощностью до нескольких метров, при лабораторном моделировании захватывают всю модель (грунтовый лоток) целиком. Поэтому для получения ряда технологических показателей необходимо проведение опытных работ на натурной модели, по своему пространственно-временному масштабу сопоставимой с реальным объектом отработки.

При натурном моделировании влияние комплекса природных факторов интегрировано отражается на ходе и результатах опыта, в то же время трудно количественно оценить вклад каждого из этих факторов в получаемые технологические показатели. В соответствии с концепцией ГКЗ и стадийной организацией геологоразведочных работ новой классификацией запасов месторождений твердых полезных ископаемых рекомендуется следующая последовательность применения натуральных геотехнологических исследований [10].

Предусматриваемые уже на стадии 3 («Оценочные работы») технологические испытания руд, оцениваемых под геотехнологические методы отработки, могут быть проведены только в натуральных условиях. В результате оценочных работ окончательно решается вопрос «пригодно-непригодно» месторождение для отработки геотехнологическими методами. Завершающий вид ГТИ: для скважинного подземного выщелачивания (СПВ) — опытное геотехнологическое опробование в массиве без технологического передела продуктивных растворов (ПР); для кучного выщелачивания (КВ) — отработка крупной технологической пробы в натуральных условиях. Опытное опробование ограничивается единичными опытами на характерных участках месторождения. К ним относятся, при вероятном положительном исходе, участки со средними условиями, а при вероятно отрицательном или неопределенном исходе — участки с максимально благоприятными условиями.

Целью ГТИ на **стадии разведки** является получение исходных данных для проектирования промышленной отработки месторождения способом ПВ или КВ. Задачами ГТИ является разработка оптимальной технологической схемы с проверкой проектных показателей, апробация систем технологического передела и рекультивации технологических растворов; уточнение геотехнологических условий месторождения. По результатам разведочных работ дается детальная эко-

номическая оценка промышленной ценности месторождения.

Натурное геотехнологическое опробование — основной вид геотехнологических исследований на этой стадии. В отличие от стадии оценки на стадии разведки предусматривается серия натуральных опытов в реальном диапазоне условий данного месторождения с технологическим переделом и рекультивацией технологических растворов. Дальнейшие опытно-промышленные исследования должны проводиться на стадии технико-экономических исследований (ТЭИ), т.е. на стадиях проектирования добывающего предприятия или при освоении месторождения. Натурные опытные работы весьма продолжительны и требуют весьма существенных затрат. Поэтому применение натуральных опытных работ идет по пути соотношения их масштаба и качества получаемой необходимой информации и ее стоимости.

По возрастанию качества и достоверности получаемой информации (и как следствие продолжительности и стоимости) опытные работы по СПВ выстраиваются в ряд: односкважинный опыт без формирования фильтрационного потока → двухскважинный опыт без сорбции и оборота растворов → одноячеечный → многоячеечный опыт с сорбцией растворов.

Натурные опытные работы по скважинному подземному выщелачиванию. Главным условием получения достоверных данных при натурном моделировании ПВ является точное определение границ объема проработки рудной массы, его локализации и обеспечение постоянства этого объема.

Односкважинный опыт — «push-pul». Метод заключается в: неоднократном закачивании в недра определенного объема ВР, выдерживании определенного времени и порционной откачке с определением концентрации реагента и выщелоченных элементов. Пуш-пульный метод в отношении однонаправленных потоков ПВ и КВ противоестественен, но за счет своей относительной дешевизны проводится для опробования отдельных участков (залежей) месторождения. Пуш-пул не проходит как вариант полупромышленных испытаний при защите запасов, т.к. не дает возможности определить параметры зоны выщелачивания и получить технологические показатели. В результате получают лишь свидетельство о принципиальной возможности закачать в пласт растворитель и растворить какое-то количество полезного компонента. Эту информацию дешевле и проще получить в лабораторных условиях.

Двухскважинный опыт. На оценочной стадии является наиболее приемлемой схемой опытного полигона. Основное назначение двухскважинных опытов — это оценка пригодности конкретных объектов (месторождений, отдельных залежей, подготавливаемых к отработке эксплуатационных полигонов и т.д.) к отработке методом ПВ [3]. Слабой стороной метода является невысокая точность определения технологических показателей и запасов, вследствие недостаточно представительного объема прорабатываемых руд и

изменения контура выщелачивания во времени. Кроме того, возникает проблема сброса ПР. Количественная оценка геотехнологических показателей может быть выполнена только на **многоскважинных опытных полигонах**, состоящих из нескольких технологических ячеек. Надежнее всего работает линейная схема из 9 технологических скважин (3 откачных и 6 закачных). Средняя откачная скважина с питающими ее закачными скважинами образуют центральную ячейку, работающую без разубоживания ПР пластовыми водами. На стадии разведки должна применяться схема опытного полигона, имеющего центральную ячейку [9]. При этом сокращение расстояний между скважинами в 2–3 раза обеспечивает уменьшение продолжительности натуральных опытов в 4–9 раз, а значит и многократное снижение стоимости опытов без потери их информативности.

Натурные опытные работы по кучному выщелачиванию. Стадию натуральных испытаний осуществляют либо на экспериментальном штабеле с массой руды 5–10 тыс. т, либо в колоннах диаметром 1,5–2 м. Высота штабеля (колонны) должна соответствовать высоте промышленного штабеля или же высоте первого слоя, если планируется многократное наращивание слоев. Опыты в колонне более экономичны и предпочтительнее, если не проводят опыты с большим по массе штабелем (от 10 тыс. т). Основной недостаток этих опытов — небольшой объем пробы руды (20–40 т) не гарантирует представительности для всего месторождения. Нельзя получить данные о реальном расходе реагента, стабильности работы штабеля, зонах с нарушенной перколяцией, устойчивости бортов.

Полупромышленные испытания на штабелях проводят на крупных месторождениях с большими запасами и особенно там, где требуется длительный период выщелачивания для крупнокусковой (–75 мм и более) руды. Основными недостатками проведения опытных испытаний КВ на штабеле являются: сложность получения представительной многотонной пробы и необходимость удаления штабеля после завершения работ. В то же время отработка экспериментального штабеля дает существенно большую информацию по: выбору типа оросителей; влиянию ряда физических факторов на сооружение штабеля; уплотнению штабеля в процессе выщелачивания; возможности поддержания выбранной интенсивности орошения. Некоторые вопросы (отсыпка штабеля, устойчивость бортов) могут быть изучены только в процессе проведения полевых исследований.

На территории Российской Федерации натурные опыты по выщелачиванию урана проводились на месторождениях следующих геолого-промышленных типов:

- эндогенного в вулканно-тектонических структурах складчатых областей (Горное, Быкогорское, месторождения Стрельцовской группы, Оловское);
- экзогенного в водопроницаемых толщах платформенного чехла (Балковское, Брикетно-Желтухин-

ское, Санарское, Далматовское, Хохловское, Малиновское, Имское, Хиагдинское, Щегловское, Репьевское);

— экзогенного в морских глинах платформенного чехла (Шаргадык).

Месторождение Быкогорское. С 1963 г. стали осваивать способы БПВ и КВ для отработки бедных руд, отнесенных к забалансовым для традиционного способа. Одновременно была решена проблема утилизации забалансовых руд в отвалах путем переработки их способом КВ. При подземной отработке забалансовых руд были испытаны и эффективно применялись разные варианты системы БПВ с этажным принудительным обрушением горного массива, различающиеся конструкцией горизонтов улавливания ПР и системой орошения рабочими растворами. За период с 1966 по 1996 г. геотехнологическими методами из бедных руд добыто более 1500 т урана [4].

Месторождение Санарское. В 1969–1970 гг. выполнены натурные опыты по возможности его отработки способом СПВ. После получения положительных результатов по рудам, залегающим в проницаемых горизонтах, была организована опытно-промышленная отработка методом СПВ. Всего было добыто около 300 т урана [5]. Содержания урана в ПР составляли 20–45 мг/л. Однако в дальнейшем по экологическим причинам работы на месторождении были прекращены.

Месторождение Имское. В 1971–1974 гг. на месторождении проведены опытные работы по скважинному, блочному и кучному способам выщелачивания. По КВ и БПВ получены положительные результаты, по СПВ — отрицательные из-за низкой проницаемости руд. На опытном блоке БПВ за 8 месяцев из замагазинированной руды с содержанием урана 0,022 % было извлечено 74,3 % урана при содержании в ПР 187 мг/л. При КВ извлечение достигло 92–95 %.

Месторождение Оловское. Выполненные в 1965 г. специалистами ПромНИИпроекта (ВНИПИпромтехнологии) технико-экономические расчеты показали, что получение урана традиционным методом (подземная добыча руды и ее переработка на гидрометаллургическом заводе) не рентабельно ввиду низкого содержания урана в руде.

В 1970–1971 гг. работами ВНИИХТа была доказана возможность переработки урановой руды методами КВ и БПВ. В лабораторных условиях из кусков руды забойной крупности серноокислыми растворами за 180 сут. было извлечено 72 % урана при расходе кислоты 17 кг/т руды.

В 1973–1975 гг. проведены полевые промышленные испытания по выщелачиванию урана из подземного блока с его сорбционным извлечением на анионит АМП и получением аммоний-уранил-трикарбоната. Общее количество отбитой горной массы (с крупностью куска до 100 мм) составило 1986 т со средним содержанием урана 0,035 %. Расход серной кислоты — 24 кг/т руды. За 13 месяцев достигнуто 74 % извлечения урана со средней концентрацией его в ПР 121 мг/л.

Извлечение урана на анионит составило 95 % [8]. ВНИПИпромтехнологии рекомендовало обрабатывать Оловское месторождение способом ПВ с предварительным разрушением горной массы и ее частичной выдачей на поверхность (17 %), где она подвергается кучному выщелачиванию. Оработка месторождения предложенным способом становится рентабельной в современных экономических условиях; себестоимость 1 кг закиси-оксида урана в кристаллах АУТК менее 30 долл. США/кг.

Месторождение Горное. В 1979–1985 гг. на месторождении проведены опыты по выщелачиванию некондиционных руд и радиометрически небогатой мелочи, показавшие, что руды благоприятны для отработки как системами БПВ с предварительным дроблением руды, так и КВ на дневной поверхности [4, 11]. Опытно-промышленная отработка подземного блока с предварительным дроблением горнорудной массы 5600 т и выщелачиванием урана инфильтрационным потоком реагентов показала высокую эффективность данной схемы. За 711 сут. извлечение урана составило 74 % при расходе серной кислоты 33 кг/т рудной массы (42 кг кислоты на 1 кг урана). Средняя концентрация урана в ПР при Ж:Т = 4,41 составила 190 мг/л. Опыт был остановлен по техническим причинам при содержании урана в ПР 110–120 мг/л, что указывает на возможность достижения более высокой степени извлечения. При КВ некондиционных руд забойной крупности с исходным содержанием 0,018 % за 109 сут. извлечение урана составило 99,3 % при расходе серной кислоты 30,6 кг/т руды.

Месторождение Малиновское. Основной задачей натурных опытных работ (2000 г.) являлось доказательство возможности серноокислотного выщелачивания урана из высококислотоемких руд — за месяц выщелачивания в статических условиях кислотоемкость руд доходила до 60 кг/т. Работы на двухскважинном участке ПВ-99 продолжались 165 суток. Уменьшение на стадии закисления концентрации кислоты в выщелачивающих растворах с предлагаемых регламентом 30 г/л до 8–20 г/л привело к увеличению периода закисления с 5 до 28 суток и перерасходу кислоты (11,4 т вместо рассчитанных 2,6 т). Неоднократное изменение концентрации кислоты в выщелачивающем растворе (ВР), то снижение до 10 г/л, то повышение до 20–40 г/л вызывало соответственно, то снижение концентрации урана до 40 мг/л, то повышение до 100 мг/л. Опытные работы были остановлены при содержании урана в ПР около 80 мг/л. Проведенный опыт показал, что выщелачивание кислотоемких урановых руд Малиновского месторождения возможно. Но стадию закисления необходимо вести в жестком кислотном режиме — 30–40 г/л со снижением концентрации кислоты на стадии выщелачивания до 20–10 г/л и с применением окислителя уже со стадии закисления. В настоящее время ТОО «Семизбай-У» АО «НАК «Казатомпром» успешно обрабатывает не менее кислотоемкие урановые руды месторождения Семизбай.

Месторождение Шегловское. Двухскважинный опыт ПВ-99 продолжительностью 100 суток (концентрация серной кислоты в ВР до 20–25 г/л и Ж:Т=1,9) дал отрицательные результаты по всем показателям (извлечение урана 2,4 %, среднее содержание его в растворах 5,6 мг/л, удельный расход кислоты на кг урана — 2842 кг). Это, возможно, связано с неоднородностью фильтрационных свойств рудной залежи. Для окончательной оценки необходимо уточнение этих свойств и при наличии участков с благоприятными условиями постановка нового опыта [11].

Месторождение Балковское. В 2008 г. натурные испытания двухскважинным методом показали принципиальную возможность отработки месторождения способом СПВ: при Ж:Т=1,0 извлечение урана достигло 49 % при удельном расходе кислоты 5,8 кг/т руды, средняя концентрация урана в ПР составила 13,7 мг/л. Результаты прогнозного математического моделирования по программе «INSITU» (ВНИИХТ) показывает, что наиболее рентабельной для отработки Балковского месторождения является сеть технологических скважин размером полуячейки 15×70 м [11].

Месторождение Репьевское. При проведении Лермонтовским ГХРУ натурального опыта по СПВ карбонатизированных руд с помощью одноячейстой (трехскважинной) схемы с применением 5 % раствора бикарбоната натрия и окислителя (перекиси водорода до 1 г/л), промышленных концентраций урана в растворе не получено. Максимальное содержание урана в растворе, установившееся через 150 часов — 2 мг/л [11].

Месторождение Далматовское. Результаты опытно-эксплуатационных работ на участке ПВ-2, начатые в 1984 г., должны были уточнить показатели, полученные при проведении двухскважинного опыта ПВ-82 и послужить основой для ТЭО строительства добывающего предприятия. Опытный участок с наращиванием объемов (до 4 работающих блоков) стабильно проработал до марта 1990 г. и был остановлен в связи с необходимостью проведения опытно-промышленных испытаний по попутному извлечению скандия и редких земель (ПВ-89), на которых были задействованы мощности поверхностного технологического комплекса. При испытаниях была установлена прямая зависимость концентраций урана и скандия от кислотности ВР. Высокая восстановительная емкость рудовмещающих пород (органического углерода — 0,5–1,5 % и сульфидной серы — 0,1–1,5 %) явилась причиной отсутствия в ПР значимых концентраций молибдена и рения. Опытные работы практически доказали возможность попутного получения скандия из урансодержащих продуктивных растворов Далматовского полигона СПВ. Но

полученный концентрат скандия содержал значительное количество тория, и дальнейшие работы были временно прекращены. В настоящий момент в АО «Далур» подготовлена к запуску опытно-промышленная установка по выделению скандия из маточников сорбции урана.

Постоянная добыча урана на опытном участке была возобновлена в 1999 г. К этому моменту при Ж:Т=1,29 и расходе серной кислоты 107,8 кг/кг урана было достигнуто извлечение 36 %. Значительные перерывы в работе опытного участка существенно исказили общую закономерность развития процесса выщелачивания — при каждом возобновлении работ блоки частично проходили стадию закисления. По расчетам перерасход серной кислоты на восстановление технологических показателей до уровня 1989 г. в четырех блоках составил 3756 т. Это завысило показатели удельной кислотоемкости по состоянию на 01.01.2001 г. по блокам на 18–45 кг/кг урана.

Опытные работы по применению перекиси водорода в качестве окислителя проводились в 2004 г. в течение трех месяцев на трех эксплуатационных гексагональных ячейках блока Ю-5 [2]. Основной целью этих работ являлось увеличение содержания урана в растворе за счет окисления Fe(II) перекисью водорода на стадии выщелачивания. В результате этих работ была определена концентрация перекиси водорода (320 мг/л активного O₂), подаваемая в ВР, содержащие до Fe_{общ} — 900 мг/л, позволяющая перевести на 70–100 % Fe(II) в Fe(III) и достичь среднего ОВП в выщелачивающих растворах 486 мв.

Месторождение Хиагдинское. Впервые в мировой практике работы по ПВ урана выполнялись в районе распространения вечномерзлых пород. На месторождении были проведены два натуральных опыта: первый ПВ-82 по двухскважинной методике и многоскважинный ПВ-89. Целевым назначением последнего было получение геотехнологических параметров для проектирования промышленного предприятия по разработке Хиагдинского месторождения способом СПВ [11].

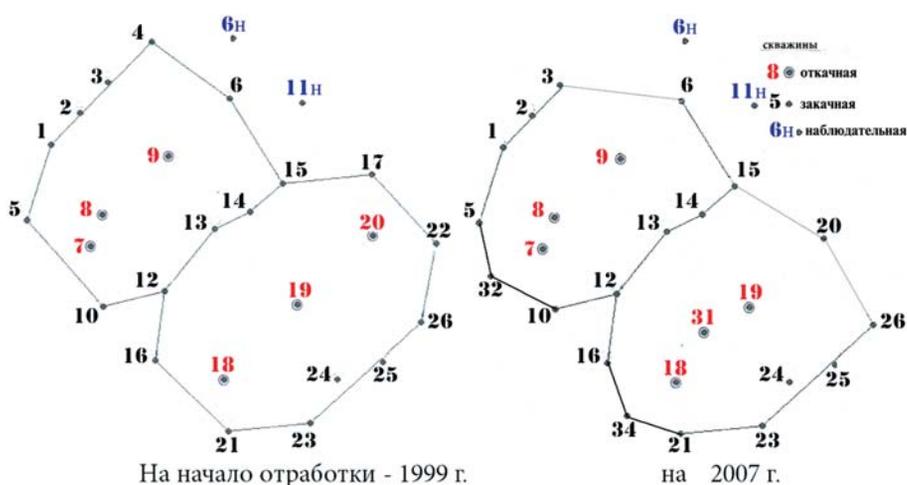


Рис. 1. Схемы расположения технологических скважин на опытном полигоне ОПВ 98

По разным причинам режим и схема отработки участка изменялись с самого начала опыта. Первые полтора месяца концентрация кислоты в выщелачивающих растворах составляла 5–8 г/л вместо 20 г/л по регламенту, в последующие три месяца — 10–15 г/л. В результате период закисления продолжался около четырех месяцев вместо двух по регламенту. С подключением закачных скважин №№ 32 и 34, расположенных за пределами опытного полигона, запасы урана по участку возросли со 139 до 147 т. На рис. 1 приведены схемы расположения технологических скважин на участке ПВ-89 в 1999 и в 2007 годах.

Вследствие крайне неравномерного распределения продуктивности на опытном участке и нарушений в его работе, носивших организационный и технический характер, полученные результаты характеризовали лишь данный участок СПВ и имевший место режим отработки. В связи с этим для экстраполяции результатов опыта на все месторождение пришлось использовать математическое моделирование.

Месторождение Хохловское. В качестве первого этапа натуральных испытаний по методике В.А. Грабовникова на Центральной залежи был проведен двухскважинный опыт по сернокислотному выщелачиванию урана (ПВ-2000) [11]. Для рудовмещающего горизонта Хохловского месторождения характерен своеобразный химизм пластовых вод — уникально высокое с позиций СПВ содержание бикарбоната — более 2 г/л.

В процессе работ наблюдались:

- интенсивная дегазация откачиваемых растворов с выделением CO_2 и выпадением карбонатных осадков в конструкциях наземной обвязки и в сбросной скважине;

- уменьшение общей производительности установки с 5–7 м³/ч до 1–2 м³/ч;

- повышенная радиоактивность выпадающих осадков за счет соосаждения радия с карбонатами кальция и магния;

- кольматация откачной скважины за счет образования гипса.

В дальнейшем было предложено применять предварительную проработку руд пластовой водой с переки-

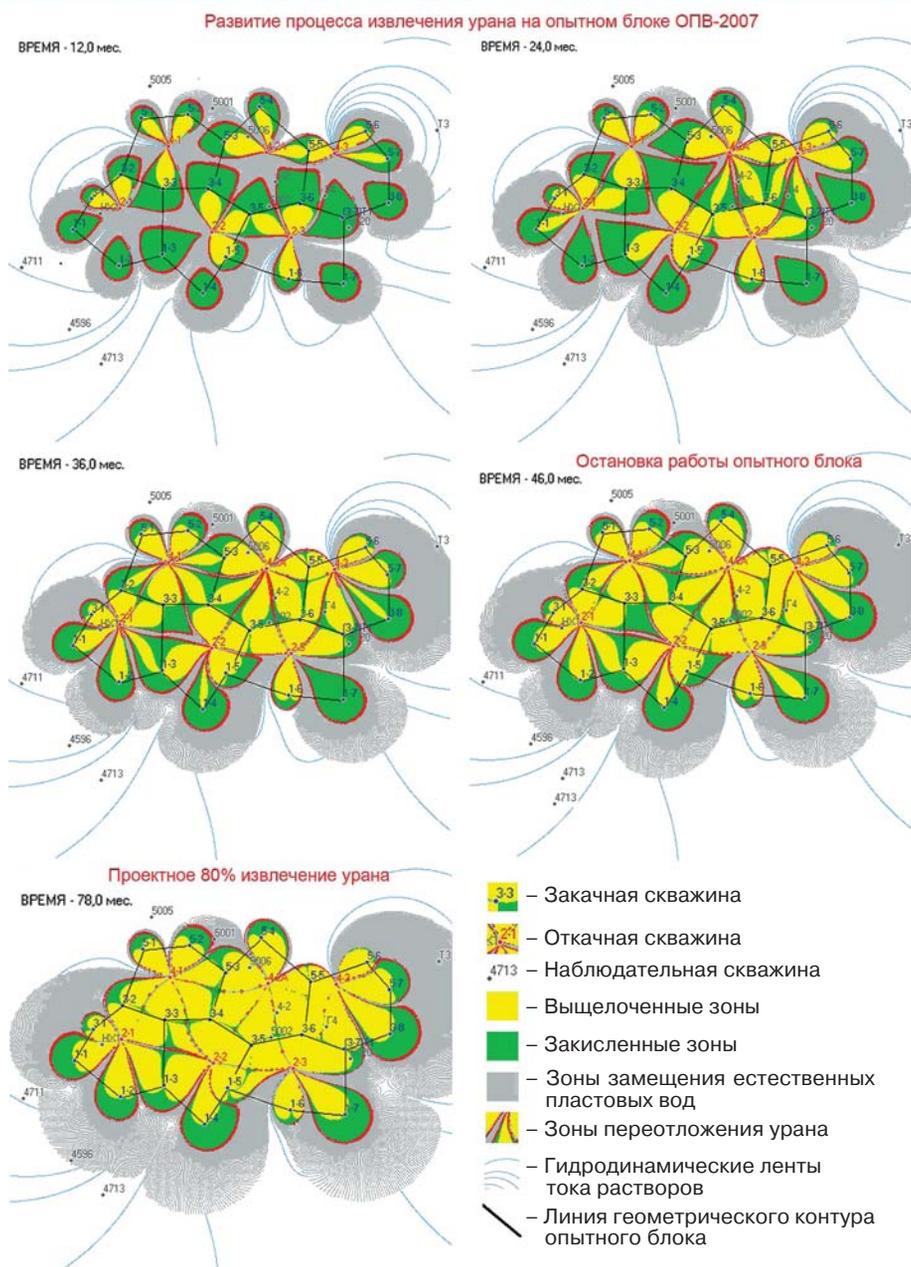


Рис. 2. Развитие процесса подземного выщелачивания урана на опытном блоке ОПВ-2007 (математическое моделирование по программе «INSITU» ВНИИХТ)

сь водорода (от 1,9 до 4,7 кг H_2O_2 /т руды), что позволяет увеличить степень извлечения урана при уменьшении удельного расхода кислоты. В результате натуральных опытных работ была доказана реальная возможность извлечения урана из руд Хохловского месторождения сернокислотными растворами с хорошими геотехнологическими показателями: — при Ж:Т = 4,75, рассчитанное извлечение урана из недр составило 87 %; удельный расход кислоты — 46 кг/кг урана и кислотоёмкость рудовмещающих пород — 18 кг/т. Для количественного определения технологических показателей, необходимых при составлении ТЭО постоянных кондиций для подсчета запасов и освоения месторождения, необходимо проведение многоскважинного опыта ПВ с полным циклом технологического

передела ПР и схемой, состоящей из шести гексагональных ячеек с радиусом 40 м. Такая схема размещения скважин, по мнению авторов, обеспечивала получение суммарной и шести дифференцированных геотехнологических характеристик процесса ПВ, с большей вероятностью совпадения геотехнологических параметров со средними показателями по месторождению. Большая глубина бурения (~ 600 м) привела к значительным отклонениям забоев скважин, что существенно осложнило гидродинамическую обстановку участка (рис. 2).

На приведенной схеме развития процесса выщелачивания видно, что вследствие асимметрии ячеек на блоке ПВ даже после 7,5 лет отработки сохраняются не проработанные кислотой застойные зоны. На завершающем этапе в работе участка ОПВ-2007 был перебив почти на полтора года. К апрелю 2017 г. на участке ОУ-2007 по данным АО «Далур» извлечение в ПР достигло 94,3 %, а в ГП 89,4 % при Ж:Т=9,6 и удельном расходе кислоты — 13,95 кг/т. Завышенный показатель извлечения, скорее всего, свидетельствуют о том, что часть урана получена из-за контура участка. Повышенный удельный расход кислоты и Ж:Т свидетельствуют о том, что объем выщелачиваемых за контуром руд не был учтен в расчетах. На момент защиты ТЭО временных кондиций для подсчета запасов (2010 г.) извлечение на участке ОПВ-2007 достигло 56 %.

В решении ГКЗ Роснедр (протокол № 2363-оп от 15.12.2010 г.) АО «Далур» рекомендовалось провести опытно-эксплуатационные работы на представительном по подсчетным и геотехнологическим параметрам оруденения участке по линейной схеме расположения скважин и уточнить основные геотехнологические показатели.

Во исполнение рекомендаций ГКЗ на месторождении был заложен ряд опытно-эксплуатационных блоков с рудами представительными по содержанию урана для месторождения в целом. В настоящее время опытно-промышленные работы не завершены. В то же время при закислении блоков регламент проведения работ был изменен, что несомненно скажется на получаемых технологических показателях.

Месторождение Добровольное. При натуральных двухскважинных геотехнологических испытаниях в силу высокого напора пластовых вод ураноносного горизонта подача рабочего раствора кислоты осуществлялась 260 суток нагнетательными насосами. Подаваемая концентрация кислоты изменялась от 10–20 до 40 г/л в конце опыта. Содержание урана в ПР при концентрации кислоты 10 г/л было равно 60–75 мг/л, а при концентрации кислоты 20 г/л — 110–140 мг/л. Опыт определен как незавершенный: Ж:Т=0,94; средняя концентрация урана в ПР — 82 мг/л; удельный расход кислоты составил около 100 кг/кг урана [7]. Концентрация скандия в ПР 160 суток из 260 была ниже чувствительности анализа. Повышение концентрации скандия до 0,76 мг/л с извлечением 2 % достигнуто только на последнем этапе опыта. Извлечение

иттрия в ПР составило около 5 % при средней концентрации 0,75 мг/л. Максимальная достигнутая концентрация редких земель не превысила 14 мг/л (средняя 5 мг/л). Следует отметить, что состав редких земель в рабочих растворах отличается от их состава в рудах и характеризуется соотношением редких земель — тяжелых (итрий-иттербий), средних (неодим, самарий, европий) и легких (церий, европий) — близким к 1:1:1. В ПР обнаружены также молибден — в среднем 1,0 мг/л, хром — до 1,95 мг/л и ванадий — в среднем 10 мг/л, рений — не обнаружен.

Месторождения Стрельцовской группы. Для более полного использования запасов недр, улучшения технико-экономических показателей на ППГХО, начиная с 1974 г., ведутся работы по кучному сернокислотному выщелачиванию забалансовых отвалов и беднобалансовых руд. За это время впервые в практике освоено круглогодичное выщелачивание отвалов. Первые штабели выщелачиваемой руды располагались на территории рудников. В штабель укладывались забалансовые руды, полученные в результате отсортировки на РКС. Извлечение урана из забалансовых руд в зависимости от состава вмещающих пород и крупности кусков руды составляло 45–70 %.

В 1990–1991 гг. на ППГХО начаты опыты по кучному выщелачиванию балансовых руд с содержанием урана до 0,15 %. В результате удалось получить извлечение урана в 60–85 %. Было установлено, что эффективнее располагать площадки для КВ непосредственно на территории ГМЗ, что позволяет одновременно выщелачивать большие объемы руды, централизовать орошение штабелей руды и сбор ПР, направить их на переработку на ГМЗ, минуя стадию получения аммоний-уранил-трикарбоната [4]. На этапе закисления концентрация кислоты поддерживается на уровне 20–25 г/л при интенсивности орошения 40–45 л/м²×час. На стадии активного выщелачивания концентрация кислоты в ВР — 3–10 г/л при непрерывном орошении — 25–30 л/м²×час. Отработку штабеля заканчивали при концентрации урана в ПР менее 15 мг/л. Время полного выщелачивания штабеля доведено до 340–350 сут. В результате исследований определено, что наиболее высокие показатели выщелачивания можно достигнуть за счет предварительного дробления руды до классов 10–5 мм. При этом извлечение урана возрастает до 80–85 % и срок кислотной обработки руды сокращается до 6–10 мес. До 2009 г. методом КВ переработано около 7,5 млн т горной массы, из которой извлечено около 1277 т урана [4]. Работы по подземному выщелачиванию на ППГХО начаты в начале 1980-х годов. За период 1986–1999 гг. отработано 9 опытно-эксплуатационных блоков на месторождениях Новогоднее, Весеннее, Юбилейное, Лучистое. Добыто при этом 393 т урана [4]. Отрабатывались как крутопадающие, так и пластообразные рудные тела. Коэффициент извлечения урана колебался от 49,3 до 88,6 %, в среднем ~ 70 %.

На основе опытных работ были выработаны критерии и проведено разделение рудных запасов для пере-

работки руды на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ) на установках кучного выщелачивания и подземного выщелачивания в блоках-магазинах:

— рядовая руда со средним содержанием 0,10–0,15 % подвергается радиометрическому обогащению с выделением 30 % отвальных хвостов с содержанием 0,010–0,015 % урана, мелкой фракции (0–25 мм), концентрата и промпродукта;

— промпродукт сортировки со средним содержанием 0,09–0,10 % урана подвергается кучному выщелачиванию на промплощадке ГМЗ с извлечением в ПР 65 %;

— бедная руда с содержанием металла в эксплуатационных запасах от 0,11 до 0,127 % магазинируется в камерах и выщелачивается в подземных условиях с извлечением урана в ПР 65–70 % при полуторогодовом цикле выщелачивания.

Месторождение Брикетно-Желтухинское. В 2005 г. для опробования выщелачиваемости руд на месте залегания сотрудники ЦФ «Горно-геологическая экспедиция» ФГУП «Урангео» выбрали односкважинный метод опробования [9]. «Главным достоинством метода» они посчитали возможность опробования различных выщелачивающих растворов в одинаковых условиях и выбора оптимального для данных природных условий. Для опробования использовались различные выщелачивающие растворы (ВР) — от широко применяемых серноокислотного и бикарбонатного до находящихся на стадии опытного или опытно-промышленного изучения кислородо-(воздухо)содержащих и фульвокислотных (ФК-комплексон). Опробование заключалось в закачке в рудное тело небольшого (2–6 м³) объема заранее приготовленного раствора, выстаивания его в недрах до 2 сут и затем откачке ПР и следующих за ним пластовых вод. Последние откачивались для промывки зоны реакции. После промывки в том же порядке

проводили опробование следующего состава (рис. 3). В результате опытных работ было установлено, что в **данных природных условиях** наиболее эффективными и универсальными показали себя растворы с растворенным кислородом перекиси водорода. При использовании этих растворов концентрация урана в выходных растворах составляла от 3 до 7 мг/л, рения — от 0,6 до 1,2 мг/л, молибдена — в среднем более 3 мг/л. Кривые выхода урана по циклам показывают, что предыдущие обработки выщелачивающими растворами одного и того же горнорудного материала оказывают значительное влияние на результаты последующих циклов. Количественно оценить это влияние невозможно, что по нашему мнению сводит на нет «главное достоинство метода».

В 2013–2015 гг. ФГУП «ИМГРЭ» провело на месторождении оценочные работы с целью определения его промышленной значимости, где рений впервые рассматривался как основной полезный компонент [5]. По скважинам проведено пуш-пульное экспресс-опробование (с закачкой 2 м³), по результатам которого определен состав наиболее эффективного выщелачивающего раствора — пластовая вода с перекисью водорода (350 мг/л активного О₂). За один цикл в скважину Т1 в течении 10 дней под давлением закачивалось 1 тыс. м³ ВР. В наблюдательных скважинах продуктивные растворы не наблюдались, т.к. радиус проникновения растворов от зачатной скважины не превышал 6,5 м, а наблюдательные скважины располагались на расстоянии 10 м. Затем проводилась откачка 2 тыс. м³. После выполнения 2 циклов опыт перенесли в скважину Т2. В результате работ были получены промышленные концентрации рения в ПР и проведены укрупненные испытания по извлечению рения из ПР (246 м³). Извлечение рения из ПР в анионит составило 98,7 %.

В целом результаты проведенных опытов лишь подтвердили результаты экспресс-опробования, принятые как исходные данные для составления ТЭО временных кондиций для подсчета запасов рения (Ж:Т=1,8 при извлечении в раствор 60 %).

Месторождение Шаргадыкское. В 2015–2016 гг. проводились опытные работы по кучному выщелачиванию комплексных редкоземельно-фосфорно-урановых руд. Для снижения затрат на опытные работы с сохранением информативности выщелачивание выполнялось в бетонных перколяторах большого диаметра (1500 мм). Это по-

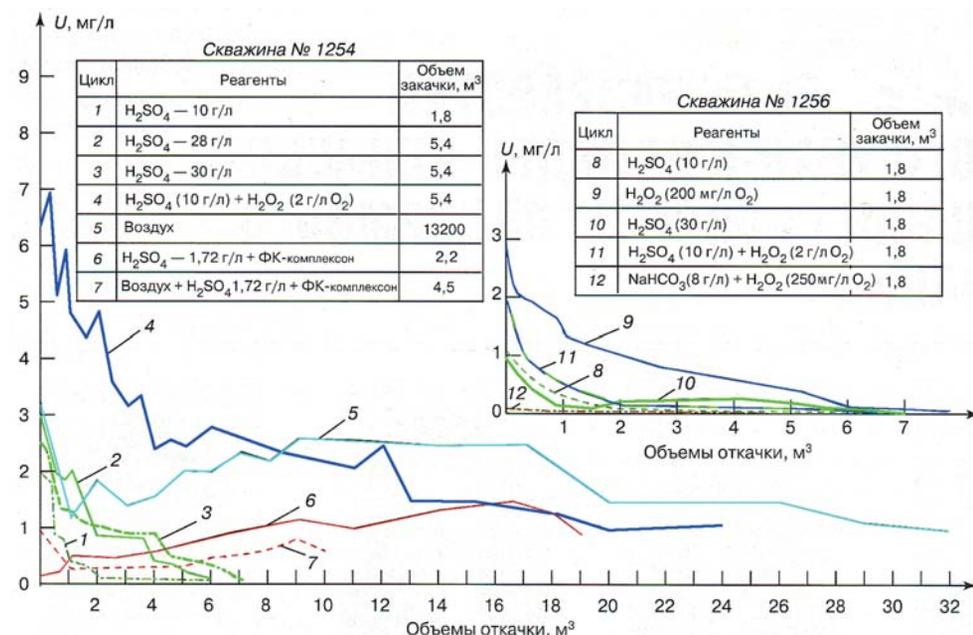


Рис. 3. Содержание урана в откачных растворах различного состава. Расположение скважин на опытных участках ОПВ-2000 и ОПВ-2007

зволило значительно сократить срок натурального опыта и уменьшить массу перерабатываемого материала до 30 т при сохранении высоты фильтрационного слоя в 4 м [1]. На опытном стенде последовательно отработались 4 колонны. Первая колонна отработана за 90 суток до общего Ж:Т = 7,0, из которых 0,64 Ж:Т — хлоридная отмывка, 6,3 Ж:Т — выщелачивание раствором кислоты около 45 л. Удельный расход в расчете на 6,2 т руды в колонне, с учетом расхода кислоты на агломерацию, составил 303 кг/т. Расход каустического магнетита — 539 кг. Из 1 т руды в ПР извлечено г: **урана** — 220; **никеля** — 325; **кобальта** — 185; **фосфора** — 102 кг (по P_2O_5); **иттрия** — 264; **церия** — 339. Средние концентрации компонентов в ПР составили, мг/л: **урана** — 35; **никеля** — 70; **кобальта** — 27; **иттрия** — 42; **церия** — 54; а **фосфора** — 16 г/л (по P_2O_5).

Проводимые в последнее время натурные опыты имеют два существенных проблемных момента, значительно снижающие их научную и практическую ценность, нередко переводя их на более низкий уровень информативности.

Во-первых, это вольное обращение с утвержденным регламентом проведения опытных и особенно опытно-промышленных работ. В советское время научные организации добычного министерства осуществляли строгий контроль за выполнением регламента проведения опыта. Любое изменение регламента требовало детального обоснования и утверждалось на уровне ГРП-комбинат-министерство. Существовало четкое понимание тесной взаимосвязи всех параметров проведения опыта с получаемыми технологическими показателями. В настоящее время наблюдается одна тенденция — любой ценой достичь заданного показателя извлечения. По ходу опытных работ меняются и концентрация выщелачивающего и окисляющего реагентов, и сам окислитель. Меняются дебиты скважин, а в некоторых случаях и сами контуры участков. В результате дорогостоящего многолетнего опыта реально мы можем утверждать лишь о возможности проведения выщелачивания и его рентабельности. Гидродинамика на участке ПВ становится настолько запутанной, что невозможно точно рассчитать контур зоны выщелачивания и закисления и, как следствие, все технологические показатели, которые относятся к выщелачиваемой ГРМ и заключенных в ней запасов. В результате и получаются извлечения урана, превышающие 100 %, из блоков с рудами у которых непосредственное извлечение (по веществу), даже в жестких условиях, не превышает 70–90 %.

Вторая проблема заключается в малом объеме контрольного бурения. Сейчас нередки случаи, когда количество контрольных скважин не превышает 2–4. Неравномерность проработки участка, заложенная в самой гидродинамике схемы расположения скважин и, как следствие, большого количества зон (переотложения, закисления, «мертвых», законтурного растекания) не позволяет, используя небольшое количество контрольных скважин, ответить на важные для дальнейшего проектирования вопросы:

- о выщелачивании урана из маломощных непроницаемых пропластков;
- о наличии непроработанных (мертвых) в контуре участка зон;
- о количестве урана, привнесенного из-за геометрического контура участка;
- о величине закисления пород над и под уровнями рабочих фильтров;
- о степени проработки коротких и длинных фильтрационных лент и т.п.

Для выяснения этих вопросов после отработки девяти скважинного полигона месторождения Мынкудук (Казахстан) в 1979 г. на площади ~ 1800–2000 м² было пробурено 34 контрольных скважины. Приблизительно тоже количество контрольных скважин было и при контрольном бурении на месторождении Северный Кара-Мурун.

Проведенные опытные натурные работы по внедрению геотехнологических методов в практику добычи урана в Российской Федерации позволили создать геотехнологическое направление в добыче урана, опирающееся на современную научную и производственную базу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин, Г.И. Лабораторные работы и натурные испытания по кучному выщелачиванию уран-редкоземельно-фосфатных руд Шаргадыкского месторождения (Калмыкия) / Г.И. Авдонин, В.А. Гуров, В.М. Грязнов, А.С. Салтыков / Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых: Тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием 17-19 ноября 2015 г. — М.: ВИМС, 2016.
2. Гордиенко, О.Е. Результаты научно-исследовательских работ по подземному выщелачиванию урана из руд различных месторождений. Уран России: Сб. докладов научно-технического совещания. Москва, 20–21 ноября 2007 / О.Е. Гордиенко, Г.И. Авдонин, Е.П. Бучихин. — М.: ФГУП «ЦНИАТОМИНФОРМ», 2008.
3. Грабовников, В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов / В.А. Грабовников. — М.: Недра, 1995.
4. Иванов, В.Г. Физико-химическая геотехнология урана на скальных месторождениях / В.Г. Иванов, Е.Н. Камнев, А.П. Смагин. — М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во МГУ, 2009.
5. Карась, С.А. Брикетно-Желтухинское месторождение рения — новый геолого-промышленный тип гидрогенных месторождений: особенности геологического строения и технология подземного выщелачивания / С.А. Карась, А.А. Кременецкий, С.Ю. Орлов, Ю.В. Культин, Т.Б. Шлычкова // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 11. — С. 20–26.
6. Культин, Ю.В. Оценка возможности разработки комплексного уран-молибден-ренийевого месторождения способом подземного выщелачивания / Ю.В. Культин, А.А. Новгородцев, А.Е. Фоменко, О.Н. Васюта, О.В. Алтунин // Горный журнал. — 2007. — № 6. — С. 47–51.
7. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Составил А.Б. Халезов и др. / Науч. ред. Г.А. Машковцев. — М.: ВИМС, 2009. — 145 с.
8. Самович, Д.А. Минерально-сырьевая база урана Восточной Сибири / Д.А. Самович, О.С. Никифоров, Л.П. Гаврилов, Е.А. Митрофанов, И.И. Царук. — Иркутск, 2007.
9. Справочник по геотехнологии урана / Под ред. Д.И. Скорварова — М., Энергоатомиздат, 1997.
10. СТО РосГео 09-001-98 Твердые полезные ископаемые и горные породы. Технологическое опробование в процессе геологоразведочных работ. Общие требования. М.: РосГео, 1998.
11. Уран Российских недр / Под ред. Г.А. Машковцева — М.: ВИМС, 2010.

© Салтыков А.С., Авдонин Г.И., 2017

Салтыков Александр Сергеевич // asalt52@mail.ru
Авдонин Геннадий Иванович // gosha1956@mail.ru