

Зона прерывистого распространения ММП занимает меньшую часть бассейна. Ее граница распространяется в широтном направлении и прерывается региональным сквозным таликом р. Печора. В пределах Ижма-Печорского бассейна имеются только современные ММП, граница реликтовых ММП совпадает с границей бассейна, не захватывая его. Мощность современных ММП в основном не превышает 50 м, лишь в северной части бассейна присутствуют участки ММП мощностью до 100 м. Вся зона прерывистого распространения ММП испещрена сквозными подрусловыми таликами притоков р. Печора и многочисленными подозерными таликами. В северной части бассейна в прибрежной зоне располагается региональная зона криопэггов. Из геокриологических процессов распространены бугры пучения и термокарстовые проявления. Бугры пучения встречены небольшим скоплением вблизи поймы р. Печора и массово рассредоточены в районе р. Сойма и ее притоков. Небольшими площадями выделены проявления термокарста, приуроченного к котловинам крупных озер и болот.

Зона массивно-островного распространения ММП окаймляет область прерывистого распространения ММП, занимает наименьший процент площади бассейна. Вдоль р. Печора ее граница протягивается далеко на север, вплоть до границы бассейна, огибая региональный талик. В области прослеживаются бугры пучения и процессы термокарста. По генезису являются схожими с аналогичными процессами в зоне прерывистого распространения ММП.

Зона островного распространения ММП занимает всю оставшуюся часть бассейна и замыкается южной границей многолетнемерзлых пород. Мощности ММП в пределах области не превышают 25 м. Сама зона представляет собой проявления мерзлых островов различных по площади и расположению. Острова ММП приурочены в основном к торфяникам и торфяным болотам. В северной части зоны, на границе с областью прерывистого распространения ММП, встречены в единичных проявлениях бугры пучения и термокарст. Геокриологические проявления приурочены к котловинам озер и болот.

Изучение геокриологических условий отдельно по гидрогеологическим структурам позволяет: наиболее точно охарактеризовать особенности криолитозоны; более подробно рассмотреть условия проявления ММП; выявить наиболее и наименее значимые, геокриологические процессы, свойственные для изучаемой территории. Обобщение такой изученности, дает более полную и яркую картину бассейна в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельмина, Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы / Н.А. Вельмина. — М.: НЕДРА, 1970.
2. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Недра, 1988. — 358 с.
3. Кудрявцев, В.А. Карта мерзлотных условий Нечерноземной зоны РСФСР, м-б 1:1 500 000 / В.А. Кудрявцев, А.В. Груздов, Н.Г. Оберман. — М.: МГУ, 1983.

© Ершов В.В., 2017

Ершов Вячеслав Вячеславович // ilfsm@mail.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК: 553.04 (678)

Ястребков А.Ю.¹, Жарников А.Н.², Кутуева О.В.³, Маркевич К.В.⁴, Ивлев И.А.¹, Мельников А.В.¹, Константинов В.Л.¹ (1 — АО «Ураниум Уан Груп», 2 — ООО «УК Полус», 3 — ФГБУ «ВИМС», 4 — RMG Gold LTD)

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЬЁТА ПО ГЕОЛОГО-ГИДРО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ И РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрена геотехнологическая оценка уранового месторождения Ньёта (Объединенная Республика Танзания), часть запасов которого предположительно пригодна для отработки методом скважинного подземного выщелачивания. Оценка выполнена по результатам проведенных в 2015 г. геологических, гидрогеологических исследований и лабораторных геотехнологических испытаний. По результатам исследований сделан вывод о проницаемости рудовмещающих пород и возможности выщелачивания урана из керновых проб слабыми серно-

кислыми растворами. Полученные результаты разрешают проведение опытных натурных испытаний по выщелачиванию урана на месте залегания. **Ключевые слова:** скважинное подземное выщелачивание урана, урановая минерализация, Танзания, лабораторные геотехнологические испытания, гидрогеологические исследования.

Yastrebkov A.Yu.¹, Zharnikov A.N.², Kutueva O.V.³, Markevich K.V.⁴, Ivlev I.A.¹, Melnikov A.V.¹, Konstantinov V.L.¹ (1 — Uranium One Group, 2 — MC Polyus LLC, 3 — VIMS, 4 — RMG Gold LTD)

EVALUATION OF URANIUM DEPOSIT NYOTA IN TERMS OF IN-SITU LEACHING BASED ON THE RESULTS OF GEOLOGICAL, HYDROGEOLOGICAL STUDIES AND LABORATORY LEACHING TESTS

The paper presents the results of assessment of uranium deposit Nyota (United Republic of Tanzania) in terms of in-situ leaching, due to the fact that a part of the deposit's resources is potentially attractive for in-situ recovery. The estimation is based on the results of geological, hydrogeological studies and laboratory leaching tests conducted in 2015. The results of the

studies confirm that both host rocks and ore are permeable and uranium can be leached from core samples using sulphuric acid solutions. The data collected does allow to proceed with in-situ leaching tests. Keywords: in-situ leaching of uranium, uranium mineralisation, Tanzania, laboratory leaching tests, hydrogeological studies.

Урановое месторождение Ньёта расположено в южной части Объединенной Республики Танзания, в провинции Рувума, в 470 км к юго-западу от г. Дар-эс-Салама. Месторождение приурочено к региональной супергруппе Кару, выполняющей грабенообразную структуру в пределах нерасчлененного массива сланцев и гнейсов средне-верхнепротерозойского возраста (рис. 1). Супергруппа Кару сложена переслаивающимися сериями континентальных отложений нижнетриасового возраста, представленных слабо литофицированными гравелитами, песчаниками и алевролитами. Залегание пород супергруппы преимущественно субгоризонтальное, а в пределах месторождения оно имеет падение с углами 1–1,5° в северо-западном направлении. Несмотря на то что общая морфология залежей достаточно простая и относительно выдержанная, их внутреннее строение очень сложное. Эта сложность обусловлена тонким переслаиванием пород разной зернистости, слабой сортировкой материала и его перемешиванием в пределах одного прослоя, изменением горизонтальной слоистости на косую. Мощность прослоев составляет от первых сантиметров до 1–2 м.

Минералого-петрографический состав пород полевошпат-кварцевый, с подчиненным количеством слюд и минералов-темноцветов. Среди полевых шпатов преобладает калиевый полевой шпат (35–45%), плагиоклазы (альбит-олигоклаз) относительно редки (10–15%). Среди слюд преобладают мусковит и реликты биотита. Темноцветные минералы в основном представлены ильменитом, магнетитом и цирконом. Зерна минералов остроугольные или слабоокатанные и образуют плотную упаковку. Интерстиции между зерен выполнены глинистыми минералами (монтмориллонит и каоли-

нит) и гидроокислами железа (гетит и гидрогетит). Гидроокислы железа, помимо присутствия в составе цемента между зерен кварца и полевых шпатов, также проникают в них по трещинам.

Урановая минерализация представлена тремя основными минеральными формами: метаотенитом, метаураноцирцитом и фосфуранилитом, которые образуют густую вкрапленность желтовато-зеленого цвета в составе слюдисто-гидрогетитового цемента и на поверхности обломочных зерен. Характерной особенностью отенит-метаотенитовой минерализации месторождения Ньёта является практически полное отсутствие в ее составе кальция, содержания которого находятся либо ниже предела обнаружения микрозонда, либо не превышают первых десятых долей процента (до 0,5%). В то же время повсеместно в составе катионов было зафиксировано замещение кальция барием, содержания которого составляют не менее 10–14%.

По данным геологоразведочных работ 2007–2012 гг. на месторождении по бортовому содержанию урана

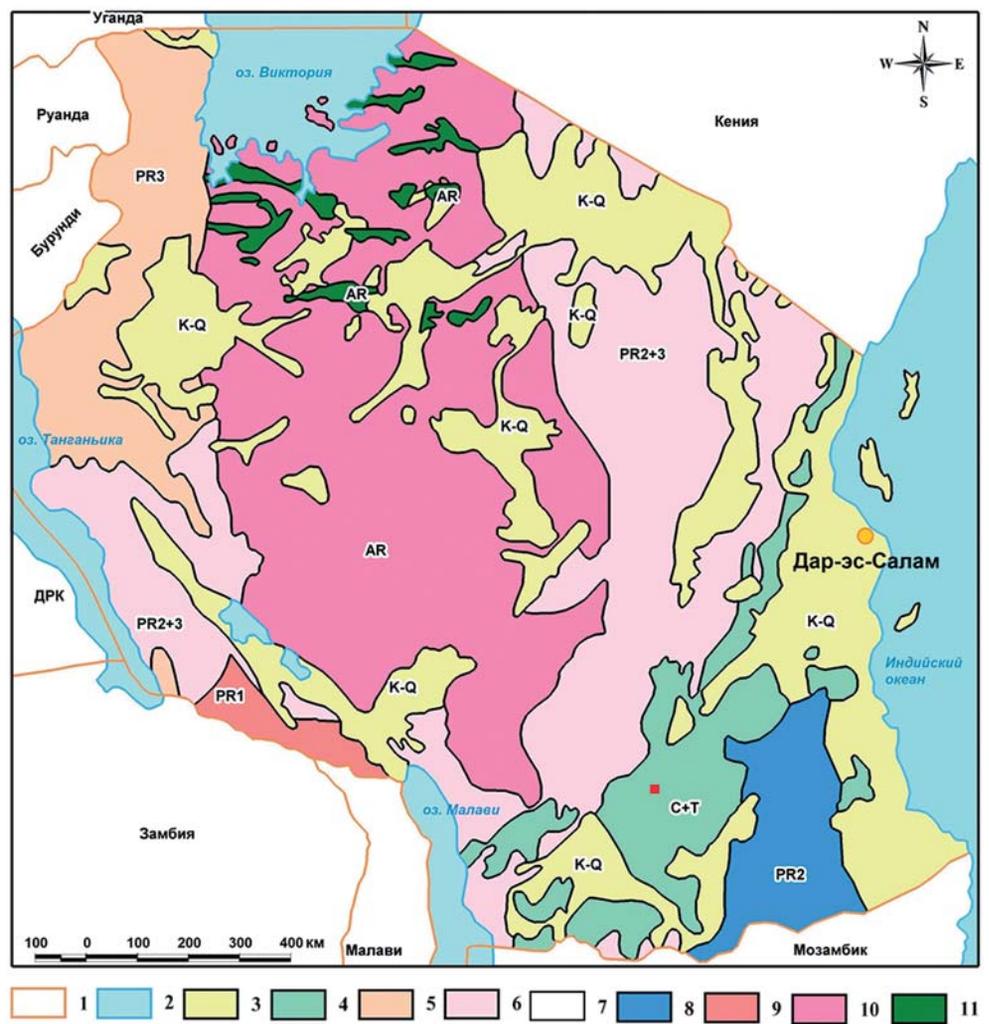


Рис. 1. Геологическая карта Танзании (по материалам сайта esis.ac.tz): 1 — границы стран; 2 — водные объекты; 3 — мел-четвертичные отложения; 4 — супергруппа Кару; 5 — верхний протерозой; 6 — нерасчлененные средне-верхнепротерозойские образования; 7 — среднепротерозойские образования; 8 — нижнепротерозойские образования; 9 — архейские образования; 10 — архейский зеленокаменный пояс

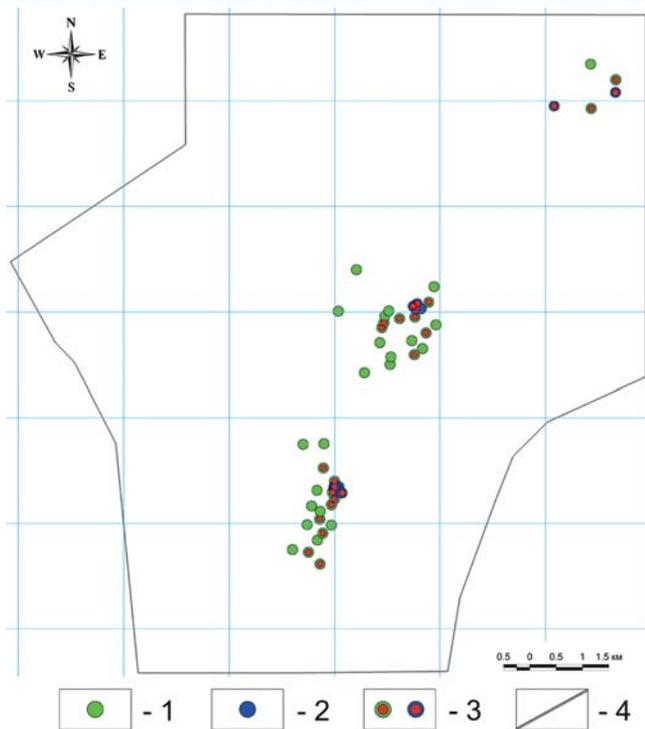


Рис. 2. Схема расположения геологоразведочных и гидрогеологических скважин, пробуренных на месторождении Ньёта в 2015 г.: 1 — геологоразведочные скважины; 2 — гидрогеологические скважины; 3 — скважины, из которых отобраны керновые пробы для лабораторных геотехнологических испытаний; 4 — границы месторождения

0,01 % оконтурены урановые залежи; внутри выделенных контуров содержания урана изменяются в диапазоне от >0,01 до 1,8 %. Залежи прослеживаются с поверхности до глубин 60–70 м, а в северной части месторождения — до глубин 150–170 м. Подземные воды залегают на глубинах от 1–2 м в долинах рек и до 40–50 м на водоразделах. Урановая минерализация месторождения Ньёта частично залегают выше, а частично ниже уровня подземных вод. Выдержанных региональных водоупоров, перекрывающих или подстилающих урановые залежи, на месторождении не выявлено, следовательно, залежи являются «висячими». Месторождение характеризуется неравновесным радиоактивным состоянием; K_{pp} изменяется как по разрезу, так и по площади от 0,2 до 2,6. Это свидетельствует о постоянном перераспределении урана в системе, которая ввиду ее неглубокого залегания является открытой для поступления атмосферных вод, обогащенных кислородом. Кроме того, отмечаются следы поступления восстановителей по тектоническим нарушениям, фиксируемым в пределах рудных залежей. Геологическое строение месторождения и условия залегания урановой минерализации навели российских специалистов на идею возможности применения скважинного подземного выщелачивания (далее СПВ) для добычи части запасов урана, приуроченных к обводненной части разреза. Урановое месторождение Ньёта является первым в Африке, которое изучается с точки зрения отработки методом СПВ.

В 2015 г. для решения ряда геологических задач на месторождении Ньёта компанией АО «Ураниум Уан Груп» проведены работы по дополнительному бурению скважин и гидрогеологические исследования. Поскольку ранее на месторождении Ньёта не проводилось геотехнологических исследований по методике, принятой для разведки месторождений урана в РФ, в 2015 г. на керновых пробах проведены лабораторные геотехнологические испытания. Далее в статье подробно изложена методика проведения лабораторных геотехнологических испытаний и обработка их результатов. Основной задачей выполненных в 2015 г. исследований в части СПВ являлось определение возможности постановки опытных натуральных испытаний по выщелачиванию урана на месте залегания.

Таким образом, урановое месторождение Ньёта характеризуется следующими *геологическими признаками*:

- на месторождении по бортовому содержанию урана 0,01 % оконтурены залежи; содержания урана внутри выделенных контуров составляют от >0,01 до 1,8 %;
- урановая минерализация залегают с поверхности до глубины 170 м, при этом она частично находится выше уровня подземных вод, а частично — в обводненной части разреза;
- урановая минерализация приурочена к бескарбонатным породам;
- перекрывающий и подстилающий водоупоры отсутствуют.

В 2015 г. в северо-восточной, центральной и юго-западной частях месторождения Ньёта компанией АО «Ураниум Уан Груп» проведены полевые работы (рис. 2). Основной объем работ сосредоточен на центральной и юго-западной частях ввиду того, что они являются наиболее представительными как для открытой отработки (центральная часть), так и для СПВ (юго-западная часть) (табл. 1). Места заложения геологоразведочных и гидрогеологических скважин выбраны в пределах границ залежей урановой минерализации, оконтуренных по бортовому содержанию урана 0,01 %.

Таблица 1
Основные виды и объемы геологоразведочных работ 2015 г.

Виды работ	Объемы работ		
	центральная часть	северо-восточная часть	юго-западная часть
Скважины колонкового бурения	27	5	32
Гидрогеологические исследования:			
одиночные откачки	7	2	7
кустовые откачки	1	—	1
Лабораторные испытания:			
статические	66	57	126
фильтрационные	5	8	13

Гидрогеологические исследования включали проведение одиночных и кустовых откачек из скважин, пробуренных в ходе работ 2015 г. Одиночные откачки выполнены в центральных и наблюдательных скважинах двух гидрогеологических кустов в центральной и юго-западной частях месторождения, а также в двух геологоразведочных скважинах, пробуренных в северо-восточной части (рис. 2, табл. 1). Гидрогеологические исследования выполнены по традиционной методике: возмущение с постоянным дебитом и последующее прослеживание динамики уровней подземных вод на стадиях понижения и восстановления. Ввиду того, что отработка месторождения предполагается как открытым горным способом, так и способом СПВ, гидрогеологические исследования проводились для общего изучения гидрогеологических условий верхней части разреза. Исходя из такой постановки глубина гидрогеологических скважин составила от 69 до 90 м, а интервалы глубин установки фильтровых колонн — от 6 до 83 м. Интервалы, к которым приурочена урановая минерализация, находились внутри опробуемой верхней части рудовмещающего водоносного комплекса. Показатели гидрогеологических свойств руд определяли по результатам пробных откачек (Q , S , q) и двух кустовых откачек (km , a). Удельные дебиты гидрогеологических скважин изменяются в пределах 0,04–1,8 л/с. Значения коэффициента водопроницаемости, определенные по результатам кустовых откачек в центральной и юго-западной частях месторождения, составили 25 и 63 м²/сут соответственно, а значения коэффициента уровня непроницаемости a составили $5,32 \cdot 10^4$ и $8,63 \cdot 10^4$ м²/сут соответственно.

Оценка *гидрогеологических признаков* показала, что урановая минерализация, залегающая ниже уровня подземных вод, приурочена к водоносному комплексу песчанников с неравномерной проницаемостью. Проницаемость песчанников по данным кустовых откачек составляет порядка 25–63 м²/сут, что свидетельствует о приемлемых фильтрационных свойствах рудовмещающего комплекса в целом. На данном этапе изучения месторождения полученных данных достаточно для принятия решения о постановке опытных работ по СПВ урана на месте залегания. В дальнейшем представляется необходимым продолжить изучение гидрогеологических свойств водоносного комплекса применительно к СПВ и отдельно определить фильтрационные свойства руд и вмещающих пород, а также показатель фильтрационной анизотропии, роль которого немаловажна в условиях «висячих» руд.

Лабораторные геотехнологические испытания выполнены в статическом и фильтрационном режимах. Статические испытания являются моделью выщелачивания урана при неподвижном контакте раствора и материала пробы; эти испытания проводятся в заведомо благоприятных по величине Ж:Т условиях. Несмотря на условность данного вида испытаний и невозможность учета условий залегания урановой минерализации, статические испытания позволяют решить конкретные задачи, а именно: определить возможность

перевода урана в слабые растворы реагентов и оценить связь исходных содержаний металла в пробах с его содержаниями в растворах по совокупности керновых проб, отобранных в разных частях месторождения. Критерием оценки результатов испытаний является обобщенная степень извлечения урана в растворы (ϵ), определенная для совокупности статических опытов.

В фильтрационных опытах моделируется подвижный контакт выщелачивающего раствора и вещества пробы. Результаты этих испытаний позволяют судить о выщелачивании урана в динамике не только по степени извлечения, но и по другим показателям: среднему содержанию урана в растворах, удельным затратам реагента, отношению Ж:Т, однако они не позволяют судить о промышленной значимости месторождения. Это возможно только по результатам натуральных опытов по выщелачиванию урана на месте залегания. Результаты фильтрационных испытаний используются для обоснования возможности (или отсутствия необходимости) постановки натуральных испытаний СПВ.

Материалом для лабораторных испытаний послужили частные и составные керновые пробы нарушенной структуры [2, 4], отобранные из геологоразведочных и гидрогеологических скважин 2015 г. бурения (рис. 2). При отборе проб руководствовались следующими основными положениями:

- а) каждая проба должна характеризовать определенные типы пород, различные по содержанию урана, цвету, литологическому составу и степени окисленности;
- б) опробование должно наиболее полно охарактеризовать урановую минерализацию в разрезе и по площади опробуемых участков, для чего отбор проб керна необходимо проводить из разных пересечений, а также максимально равномерно по площади насколько позволяет количество и расположение скважин;
- в) диапазон исходных содержаний урана в пробах должен быть максимально возможным для опробуемого участка — от тысячных долей процента до максимальных значений.

Процедура пробоподготовки включала: измельчение кернового материала до естественной крупности песчаных зерен, усреднение методом кольца и конуса и сокращение квартованием. Определение исходного содержания урана проводили на портативном рентгенофлуоресцентном анализаторе X-5000 компании Innov-X (ЮАР). Однако использование значений содержаний урана, определенных на анализаторе в исходных навесках, приводило к получению нереальных величин при расчетах степени извлечения в статических испытаниях (сотни процентов). Следовательно, перемешивание измельченного кернового материала не обеспечивало равномерности распределения урана в исходных пробах. Для определения исходных содержаний урана необходимо было применение иного метода. В качестве альтернативного подхода исходное содержание урана в навесках определяли по балансу металла в лабораторных опытах, в основу которого положена следующая формула:

$$C_S = \left(\frac{Q_R + Q_S}{m} \right),$$

где C_S — расчетное содержание урана в исходной пробе, %; Q_R — остаточное количество урана в кеке выщелачивания, мг; Q_S — количество урана, перешедшего из навески в раствор на момент достижения равновесных концентраций реагирующих веществ, т.е. по завершении опыта, мг; m — масса навески, мг.

Содержание урана в кеке выщелачивания определяли с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора; остаточное количество металла в кеке вычисляли как произведение содержания урана на массу кека. Количество урана в растворе определяли как произведение содержания в нем металла на объем раствора. Содержание урана в растворах определяли объемным ванадометрическим методом [5].

Применение описанного подхода к определению исходных содержаний урана в пробах позволило получать степени извлечения в реальном диапазоне значений. В связи с этим в дальнейшем в ходе лабораторных испытаний исходные содержания урана в пробах определяли описанным способом.

Статические лабораторные испытания выполнены с навесками руды массой 10 г, которые помещали в колбы вместимостью 250 мл, отношение Ж:Т во всех опытах задавали равным 10, а содержимое сосудов периодически перемешивали. На начальном этапе выполнен ряд прикидочных опытов для подбора наиболее эффективного выщелачивающего реагента, для чего ядерные пробы подвергали выщелачиванию дистиллированной водой, растворами серной кислоты, бикарбоната аммония с окислителем (H_2O_2) и без. По результатам этих опытов наилучшие результаты получены при использовании сернокислых растворов. Дальнейшие испытания проводили только с растворами серной кислоты в концентрациях 5, 10 и 20 г/л. В ходе испытаний отбирали пробы растворов для определения динамики выщелачивания урана, по которой судили о необходимой продолжительности статических опытов. Было установлено, что время достижения равновесных концентраций реагирующих веществ не превышает 24 часов.

Обработка результатов совокупности статических испытаний выполнена по методике, разработанной ВИМСом и основанной на балансе выщелоченного урана в каждом из статических опытов на момент их завершения, т.е. когда содержание урана в растворах C_p удовлетворяет условию $C_p = const$ [5]. Баланс урана, извлеченного в опыте, определяется как равенство количеств урана, извлеченного из навески керна и урана, содержащегося в растворе:

$$C_p \cdot W = C_T \cdot P \cdot \varepsilon$$

где C_p — содержание урана в растворе, мг/л; W — объем раствора, л; C_T — исходное содержание урана в навеске, %; P — масса навески, г; ε — степень извлечения урана из навески в раствор, %. Принимая объемный вес растворов равным 1 г/см³, отношение Ж:Т (f) для

статического опыта постоянно и определяется по формуле:

$$f = \frac{W}{P}.$$

С учетом этого, а также приведенных выше размерностей входящих в нее показателей, формула баланса урана запишется следующим образом:

$$C_p = C_T \cdot \frac{100 \cdot \varepsilon}{f}.$$

Полученная формула представляет собой зависимость концентрации урана в растворе от его исходного содержания в навеске. Данная зависимость в координатах $C_p - C_T$ — это прямая с угловым коэффициентом, равным ε/f и нулевой начальной ординатой. Такой вид опытной зависимости возможен только в случае идеально однородного вещественного состава испытуемых проб. В реальных условиях возможны отклонения разного знака от линейной формы, которые могут быть обусловлены неоднородностью вещественного состава руд. Диапазон изменения исходных содержаний урана в пробах C_T и содержаний урана в растворах C_p может составлять 2–3 порядка, поэтому обработку результатов статических испытаний удобнее проводить в логарифмических координатах $lg C_T - lg C_p$. Уравнение (2) в логарифмических координатах принимает вид:

$$lg C_p = lg C_T + lg \left(\frac{100 \cdot \varepsilon}{f} \right).$$

Обозначая

$$\frac{100 \cdot \varepsilon}{f} = a$$

получаем:

$$lg C_p = lg C_T + lga$$

где lga — начальная ордината графика, которая согласно формуле (3) зависит от степени извлечения ε и отношения Ж:Т f . В нашем случае отношение Ж:Т задавалось постоянным во всех опытах ($f = 10$), следовательно, начальная ордината определяется только степенью извлечения урана ε . В данном случае степень извлечения ε представляет собой обобщающую характеристику результатов рассматриваемой совокупности статических испытаний и определяется исходя из формулы (3) как:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot f}{100}.$$

В соответствии с описанной выше методикой выполнена совокупная обработка результатов статических испытаний для проб со всех трех частей месторождения. Такой подход позволяет оценить, являются ли эти пробы однородными по выщелачиваемости урана или нет. Обработка результатов статических испытаний выполнена путем прослеживания связи содержаний урана в исходных пробах и его содержаний в растворах статических опытов на момент их завершения.

Прослеживание выполнено для всей совокупности результатов испытаний керновых проб, отобранных с трех разных частей месторождения Ньёта, с сернокислыми растворами трех концентраций — 5, 10 и 20 г/л (рис. 3). Всего имеется 222 результата статических испытаний — 71, 73 и 78 с каждым из трех значений концентраций серной кислоты соответственно. Исходные содержания урана охватывают диапазон от 0,0015 до 0,72 % (рис. 3). Как видно, распределение содержаний урана внутри указанного диапазона более или менее равномерно, что указывает на представительность опробования как по размаху исходных содержаний урана, так и по их распределению в изучаемом диапазоне.

На приведенном рисунке для диапазона исходных содержаний урана 0,01–0,72 % видна тесная корреляционная связь ($r = 0,99$) содержаний металла в растворах с его содержаниями в исходных пробах. Такая форма графика свидетельствует о том, что во всех трех частях месторождения опробованные руды принадлежат к одному типу по выщелачиваемости. Начальная ордината аппроксимирующего графика $\lg C_p = f(\lg C_T)$ равна 1000, тогда обобщенный показатель степени извлечения для рассмотренной совокупности результатов определяется по формуле (4) как:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot f}{100} = \frac{1000 \cdot 10}{100} = 100 \%$$

Также из графика видно, что применение сернокислых растворов разных концентраций (5, 10 и 20 г/л) в статических испытаниях проб с близкими содержаниями урана дает сходные результаты. Такие результаты характеризуют урановую минерализацию как легко выщелачиваемую.

Таким образом, по результатам статических лабораторных испытаний установлены:

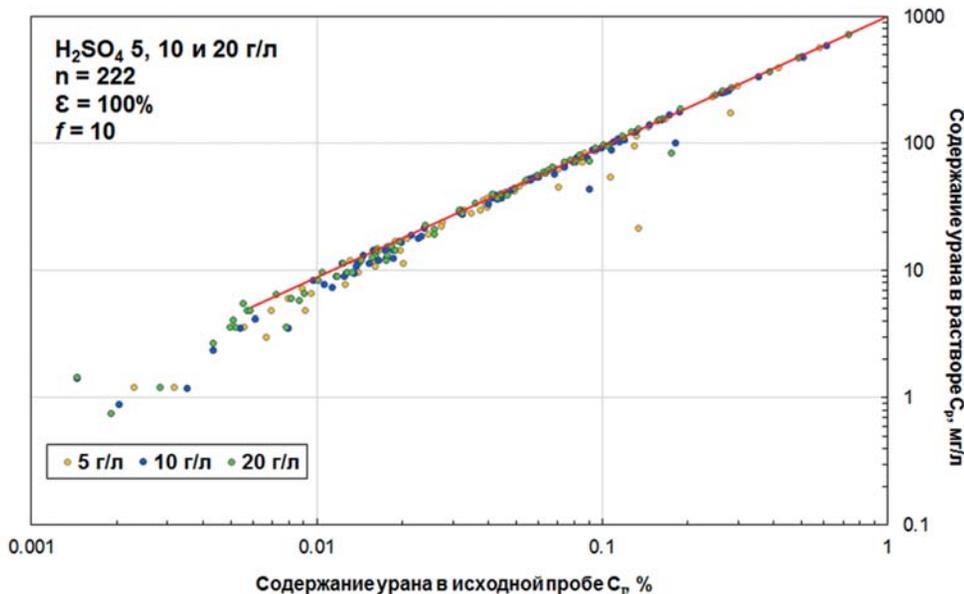


Рис. 3. Результаты статических испытаний рудных проб, отобранных в скважинах центральной, юго-западной и северо-восточной частей месторождения Ньёта, с сернокислыми растворами в концентрациях 5, 10 и 20 г/л

1) тесная корреляционная связь ($r = 0,99$) между содержаниями урана в растворах и его содержаниями в исходных пробах, которая свидетельствует об однородности испытанных проб по выщелачиваемости вне зависимости от места их отбора;

2) полное извлечение урана (100 %) сернокислыми растворами концентраций 5, 10 или 20 г/л, свидетельствующее о легко выщелачиваемом типе урановой минерализации.

Фильтрационные испытания выполнены в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [1, 2, 5]. Материалом для исследований служили керновые пробы нарушенной структуры, представлявшие отдельные пересечения, либо составленные из частных керновых проб из одной или нескольких скважин. Испытания проводили с помощью простейшего прибора — фильтрационной колонки с рудой, закрепленной вертикально на штативе. Использовали стеклянные фильтрационные колонки; длина их составляла 160 мм, диаметр 27 мм. Режим подачи рабочих растворов — восходящий, скорость фильтрации задавали в интервале 0,5–2,0 м/сут. Для выщелачивания использовали растворы серной кислоты, концентрация которой в большинстве опытов составила 20 г/л.

До начала испытаний фиксировали длину фильтрационной колонки, массу навески, исходную концентрацию выщелачивающего реагента в растворе, его pH. В опыте задавали скорость фильтрации раствора, которую поддерживали в ходе испытания. В ходе фильтрационных испытаний отбирали пробы выходных растворов одного объема, который, как правило, составлял 25 мл. В журнале опыта фиксировали: время и интервал опробования между отборами проб выходных растворов; объем пробы фильтрата; содержание урана в пробах раствора; количество урана в каждой пробе; суммарный вынос урана; pH пробы раствора; концентрацию и количество серной кислоты в пробе; количество серной кислоты в пробе и суммарное количество серной кислоты, полученное с выходными растворами с начала опыта. Исходное содержание урана в пробе определяли описанным выше балансовым расчетом на основании данных о количестве металла, извлеченного в растворы, и остаточного количества металла в кеке выщелачивания. Зная исходные содержания урана в пробах, определяли количество металла в каждой пробе и рассчитывали степень его извлечения в ка-

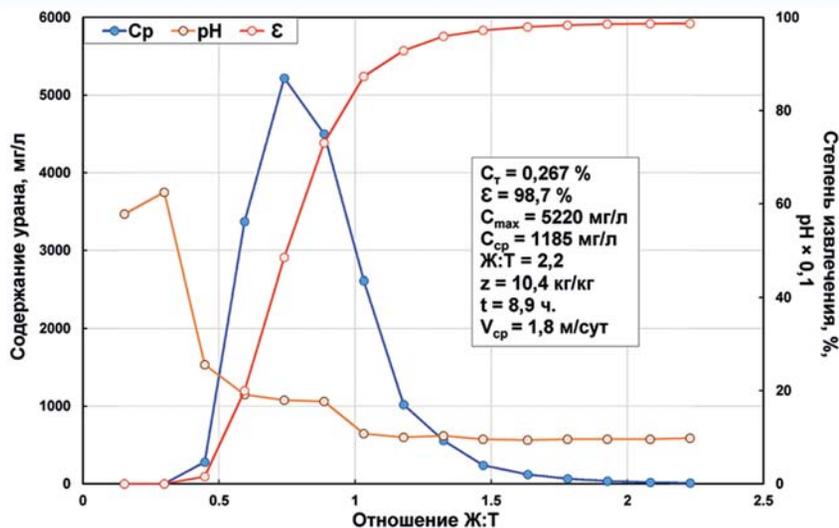


Рис. 4. Результаты фильтрационного испытания пробы Ф-7 с сернокислыми рабочими растворами в концентрации 20 г/л

ждом из опытов. Момент завершения опытов определяли по форме выходной кривой урана и по достигнутой величине степени извлечения его в раствор. Как правило, опыт считался завершенным при снижении содержания урана в выходных растворах до первых миллиграмм в литре.

Основные показатели процесса выщелачивания определяли по известным формулам [2]. Максимальное содержание урана в продуктивных растворах C_{\max} представляет собой абсолютный максимум выходной кривой концентрации. Среднее содержание урана C_{cp} (мг/л) определяли по формуле:

$$C_{cp} = \frac{\sum C_i \cdot \Delta W_i}{\sum \Delta W_i},$$

где C_i — содержание урана в частных пробах выходных растворов, мг/л; ΔW_i — объем частных проб раствора, мл.

Степень извлечения урана (%) в растворы определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\sum C_i \cdot \Delta W_i}{100 \cdot C_s \cdot P},$$

где C_s — содержание урана в исходной пробе, которое определяли балансовым расчетом по формуле (1), %; P — масса навески, г.

Принимая объемную массу раствора равной 1 г/см³, отношение Ж:Т определяли по формуле:

$$f = \frac{\sum \Delta W_i}{P}.$$

Удельные затраты кислоты (кг/кг) рассчитывали по формуле:

$$z = \frac{C_o \sum \Delta W_i - \sum C_p \cdot \Delta W_i}{\sum C_i \cdot \Delta W_i} \cdot 10^3,$$

где C_o и C_p — содержание серной кислоты в выщелачивающих и выходных растворах соответственно, г/л.

Таблица 2
Результаты фильтрационных испытаний

№№ проб	Исходное содержание урана, %	Степень извлечения урана ε, %	Максимальное содержание урана C_{\max} , мг/л	Среднее содержание урана C_{cp} , мг/л	Отношение Ж:Т	Удельные затраты кислоты z, кг/кг	Продолжительность опыта t, ч	Средняя скорость фильтрации V_{cp} , м/сут
Центральная часть месторождения								
Ф-2-1	0,498	99,4	9120	1271,9	3,9	4,3	20,3	0,91
Ф-2-2	0,088	98,1	1692	308	2,8	8,8	4,1	3,11
Ф-2-3	0,129	98,7	3324	564,6	2,3	10	3,3	3,16
Ф-2-4	0,097	97,8	2094	450,9	2,1	10,8	3,4	2,80
Ф-2-5	0,071	96,2	1572	317,7	3,8	28	22,2	1,02
Северо-восточная часть месторождения								
Ф-3-1	0,008*	87,71	162	46,53	1,46	100,3	46,82	0,14
Ф-3-2	0,017**	88,60	234	69,5	2,2	60,7	5,84	1,81
Ф-3-3	0,027**	90,99	486	164,37	1,5	34,7	22,6	0,32
Ф-3-4	0,081	93,60	660	219,8	3,47	19,7	23,9	0,68
Ф-3-5	0,014	76,32	91,2	38,9	2,7	109	6,4	1,97
Ф-3-6	0,015	81,81	240	87,7	1,4	73	3,3	1,9
Ф-3-7	0,21	97,57	1560	389,7	5,4	5,8	23	1,1
Ф-3-8	0,19	99,35	1188	503,5	3,7	6,3	8,7	1,95
Юго-западная часть месторождения								
Ф-1	0,0344	92,90	1224	223	1,43	57,8	22,3	0,51
Ф-2	0,0038	16,84	14,4	6,34	1	2135	5,2	0,95
Ф-3	0,0820	95,57	2640	727	1,17	19,1	8,6	0,58
Ф-5	0,0454	87,78	1278	286	1,39	54	47,3	0,13
Ф-6	0,2525	99,56	2868	761	3,3	16,7	26,6	0,64
Ф-7	0,2677	98,69	5220	1185	2,2	10,4	8,9	1,8
Ф-8	0,2386	96,65	6060	1089	2,1	5,3	5,2	1,8
Ф-9	0,0327	87,69	522	147	1,95	44,4	8,1	1,04
Ф-10	0,0042	47,83	42	15,3	1,3	473	6,3	0,17
Ф-11	0,0068	47,94	58,4	25,5	1,29	272,6	4,7	0,22
Ф-12	0,2306	96,19	2268	498	4,45	6,1	8,9	1,98
Ф-13	0,1647	99,12	2784	493	3,3	9,5	8,4	1,88

* испытание выполнено при концентрации серной кислоты 13 г/л.

** испытание выполнено при концентрации серной кислоты 17 г/л.

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-