

остаётся дискуссионным. Опираясь на выводы работы [10], мы полагаем, что после накопления геосинклинальной осадочной толщи и её саморазогрева в подстилающей земной коре произошло уменьшение вертикального градиента температуры и ослабление восходящего теплового потока. В то же время радиогенная теплогенерация в нижележащей области литосферы и астеносферы осталась прежней. Как следствие там возникло и ещё сохраняется глубинное повышение температуры. Сопутствующее разуплотнение материала вызвало неотектоническое воздымание орогена, продолжающееся в современную эпоху.

По понятным причинам разломы способствовали вертикальным смещениям земной коры Северо-Западного Кавказа, возникновению разновысотных ступеней и флексуридных уступов между ними. Разрывы и смещения пород верхней коры должны сопровождаться землетрясениями, преимущественно мелкофокусными. Современное преобладание на Северо-Западном Кавказе землетрясений с очагами на глубинах 5—15 км [8] можно считать фактическим подтверждением их термомеханической природы. Конечно, имеются и другие причины проявления сейсмичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варшанина Т.П., Плисенко О.А., Солодухин А.А., Коробков В.Н. Структурно подобная геодинамическая модель Краснодарского края и Республики Адыгея. Москва-Майкоп: Издат. Дом «Камертон», 2011. 128 с.
2. Ефремов Ю.В., Панов В.Д., Лурье П.М. и др. Орография, оледенение, климат Большого Кавказа: опыт комплексной характеристики и взаимосвязей. Краснодар: Кубан.гос. ун-т, 2007. 338 с.
3. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. М.: Изд-во. ИФЗ РАН, 2008. С. 191—224.
4. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л.: Недра, 1986. 180 с.
5. Несмеянов С.А. Детальное морфоструктурное районирование и новейшие шовные зоны Большого Кавказа // Проблемы геоморфологии и геологии Кавказа и Предкавказья. Краснодар, Кубан.гос. ун-т, 2001. С. 72—78.
6. Пономарёв В.С. Энергонасыщенность геологической среды // Труды Геологического института РАН. Вып. 582. М., 2008. 379 с.
7. Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. и др. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника. 2015. № 2. С. 26—49.
8. Севостьянов В.В. Уточнение исходной сейсмичности территории городов Туапсе и Новороссийск Краснодарского края. Том 1. М.: ПНИИС, 2000. 272 с.
9. Сергин С.Я., Реутов А.Л. Факторы геологического развития Западного Кавказа: постановка системного анализа // Вестник Краснодарского регионального отделения Русского географического общества. В. 7. Краснодар, 2013. С. 103—107.
10. Сергин С.Я. Системная организация процессов геологического развития Земли. Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. 360 с.
11. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Сост. М. М. Протоdjяконов, Е. И., Ильницкая, Р. И. Тедер; под ред. Н. В. Мельникова. М.: Недра, 1975. 279 с.

УДК 553.495 + 622.775(574.24)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КИСЛОТНО-БАКТЕРИАЛЬНОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ СЕМИЗБАЙ

А.К. НАРАВАС

*Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23; e-mail: gazon91@list.ru*

Рассмотрена история открытия и разведки уранового месторождения Семизбай. Определены основные параметры литолого-фильтрационной неоднородности, а также геотехнологические свойства рудовмещающих пород для скважинного подземного выщелачивания урана. Работы по кислотнo-бактериальному подземному выщелачиванию урана дали положительные результаты на двух опытных ячейках. Карбонатные руды не оказали заметного влияния на процесс подземного выщелачивания.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана; коэффициент фильтрации; серная кислота; железобактерии.

PRACTICAL EXPERIENCE OF THE ACID AND BACTERIAL UNDERGROUND LEACHING OF URANIUM AT THE SEMIZBAY FIELD

A.K. NARAVAS

*Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklaya street, 23; e-mail: gazon91@list.ru*

The discovery and investigation of the uranium field Semizbay are considered. The main parameters of lithological filtration inhomogeneity as well as geotechnological properties of the ore-bearing rocks are defined in terms of their influence on the borehole underground leaching of uranium. Works on the acid-bacterial underground leaching of uranium give positive results on two experimental cells. Carbonate ores have not significant influence on the process of the underground leaching.

Key words: underground leaching of uranium; filtration coefficient; sulfuric acid; ferrobacteria.

Результаты опытных работ по подземному выщелачиванию (ПВ) урана на месторождении Семизбай, расположенного на северо-востоке Казахстана, ранее в открытой печати не публиковались. После завершения опытных работ в 1991 г. начатые промышленные работы по ПВ урана были приостановлены. При этом крайне полезный опыт ПВ по отработке такого сложного месторождения остался неизвестен большинству специалистов урановой промышленности.

Промышленная добыча урана методом скважинного ПВ доказала свою рентабельность в отношении гидрогенных месторождений [9]. Одним из таких примеров является месторождение урана Семизбай, которое автор изучал в течение 1980–1991 гг. в составе Степногорского подразделения (ОНИС-1) ВНИИХТ (Москва, ВНИИ химической технологии) [7]. Отметим, что к этому времени был накоплен большой опыт скважинного ПВ урана на месторождениях в Чу-Сарысуйской урановорудной провинции, которые приурочены к выклиниванию зон пластового окисления (ЗПО) в проницаемых прибрежно-морских палеогеновых отложениях [10]. Среди них известны крупные месторождения урана: Канжуган, Моинкум, Торткудук и Уванас. На последнем автор изучал керн в 1978 г.

Открытие месторождения Семизбай в 1973 г. явилось достойным примером соединения науки и производства — ВНИИХТ и ЦГХК (Целинный горно-химический комбинат). Месторождение расположено на северо-востоке Казахского нагорья в пределах тектоно-эрозивной одноимённой палеодолины, наложенной на Жаман-Койтасский гранитоидный массив [7]. «Открытие месторождения Семизбай и его предварительная промышленная оценка состоялись с малыми затратами и в короткое время — в течение одного сезона» [3, с. 92].

Благодаря площадному бурению по всей палеодолине, было пробурено более 7 тыс. скважин по 108 профилям. При этом удалось собрать весьма представительный геологический материал. Автором детально изучено большинство разрезов по разведочным скважинам. Для ускорения полевой и камеральной обработки керна скважин с дальнейшей ритмостратификацией разрезов была разработана специальная система документации путём построения рельефной литологической колонки, которая применяется для анализа терригенных толщ [2, 5]. С целью массовой интерпретации геофизических ка-

ротажных кривых была рассчитана накладная палетка, которая позволила с большой достоверностью интерпретировать участки безкерна бурения [6].

На геологических разрезах отчётливо выделяются два крупных осадочных цикла нерасчленённых пород юрско-мелового возраста семизбайской свиты ($J_3 - K_1sm_1$ и $J_3 - K_1sm_2$), к которым приурочены соответственно нижний (НРГ) и верхний (ВРГ) рудоносные горизонты.

Мощность НРГ составила около 45 м, в основании он представлен базальными глинистыми галечниками, переходящими выше в гравийные и песчаные отложения, а в завершении осадочного цикла — глинами, слагающими региональный водоупор. Континентальные отложения НРГ отнесены к русловым в системе многорукавной предгорной реки, при ориентации основного русла вдоль палеодолины [7]. Гравелиты НРГ занимают около 38 %, а песчаники — 21 % объёма горизонта, состав их полевошпат-кварцевый, цвет в основном зеленовато-серый, иногда до жёлтого.

Мощность ВРГ около 30 м, в основании развиты песчано-гравийные плохо сортированные отложения, переходящие выше в глинистые. Водопроницаемая часть составляет около 10 м. Генетически отложения этого горизонта отнесены к делювиально-пролювиальному типу, при фациальном замещении от бортов к оси палеодолины [7].

Нами было установлено, что рудные залежи в обоих горизонтах контролируются типичными ЗПО [2, 9, 10], что подтверждено многочисленными построениями геологических разрезов, петрографическими исследованиями и замераами величины восстановительной ёмкости рудовмещающих пород [7].

В рудовмещающей толще распространена неравномерная вторичная карбонатизация по отношению к урановому оруденению. Однако, в более поздней публикации других авторов [4, с. 19 и 24] утверждается гидротермальный генезис урановых руд и сингенетичная карбонатизация нагретыми углекислыми водами, с чем согласиться, конечно, нельзя.

В целом для месторождения: воды напорные; коэффициент фильтрации (Кф) 1–5 м/сут. по данным опытных откачек; состав вод от хлоридно-сульфатных до хлоридно-сульфатно-натриевых; минерализация от 0,2 до 6,0 г/л; рН от 7,5 до 8,2; Eh от +5 до +137 мВ; обнаружены сульфатредуцирующие бактерии; температура пластовых вод +7 °С.

Всего было изучено более 1,5 тыс. фильтрационных проб ненарушенного керна. Проведены 15 опытных кустовых откачек, а также геофизические расходометрические работы по 43 скважинам [8]. Число частных проб при Кф 0,5 м/сут. составило 77 % от общего числа, что соответствовало оценкам доли проницаемых пород на месторождении. Величина Кф по отдельным пробам достигала 22–30 м/сут., однако среднестатистические значения соответствовали данным опытных откачек — не выше 4 м/сут. Специальные замеры показали превышение значений Кф измеренных по напластованию отложений в 10–20 раз больше, чем в крест ему. Фильтрационные свойства ВРГ оказались в целом не хуже чем в НРГ. Таким образом, фильтрационные свойства рудовмещающих пород обоих горизонтов оказались благоприятными для ПВ. При лабораторных фильтрациях проб выявлена массовая суффозия при достижении напорного градиента больше 0,7. В условиях свободного налива на действующем участке ПВ предполагался допустимый градиент в пределах 0,3–0,5.

Поскольку основные запасы урана оказались локализованы в НРГ, то и опытные работы были ориентированы на этот горизонт. При этом около 10 % руд НРГ оказались «запечатаны» в карбонатизированных плотных породах. Ранее было известно, что реальные потери руд при ПВ на месторождениях в Чу-Сарысуйской провинции составляли не менее 20 %, поэтому «карбонатными» рудами можно было пренебречь, рассчитывая на достаточно хорошие показатели в остальной части разреза.

В отношении кислотоёмкости пород нами получены следующие средние значения: в НРГ — 23 кг/т горно-рудной массы, а в ВРГ — 33 кг/т [7]. Определена зависимость проницаемости рудовмещающих пород от типа и концентрации применяемого реагента. В этой связи проведены многочисленные лабораторные опыты на ненарушенных породах в специальных фильтрационных цилиндрах. Фильтрация осуществлялась растворами серной кислоты H_2SO_4 и соды Na_2CO_3 с концентрациями 5, 10, 25 и 50 г/л. Все опыты с содой привели к заметному снижению проницаемости пород на 30 % и более. Поэтому, несмотря на наличие карбонатизированных пород в разрезе, щелочной способ ПВ был отвергнут.

Изучение зависимости изменения величины Кф от содержания серной кислоты в фильтрующем растворе показало: при концентрации кислоты 5 г/л наблюдалось стабильное повышение фильтрационных свойств пород относительно водопроницаемости в среднем на 38 %; при 10 г/л кислоты среднее увеличение Кф составило около 20 %; при 25 г/л отмечено снижение величины Кф в среднем на 23 %; наконец, растворы с концентрацией кислоты 50 г/л понизили значения Кф в среднем на 60 %. Таким образом, концентрированные растворы серной кислоты в проницаемых породах резко снижали проницаемость. Следовательно, для перевода урана в подвижную форму закислять породы НРГ высокими концентрациями кислоты означало «закольматировать» горизонт, а применение низких концентраций привело бы к чрезмерному увеличению длительности процесса

ПВ. Тогда как на упомянутых Чу-Сарысуйских месторождениях [5], наоборот, пришли к «жёстким» режимам для закисления пласта при 40–50 г/л серной кислоты, а для основной отработки 10–20 г/л.

Надо было искать выход, казалось бы, из технологического тупика. Автор предложил применить железобактерии *Thiobacillus ferrooxidans* (Th.f.), которые прекрасно живут в кислой среде [1]. Для их «питания» сульфидов железа в пласте было достаточно, а кислород им не нужен. Настораживала невысокая температура пластовых вод (+7 °С), но обнадёживало наличие сульфатредуцирующих бактерий.

Напомним, что Th.f. отнесены к тионовым бактериям, которые получают энергию в результате окисления закисного железа [1]. Оптимальные условия для их роста рН < 4,0 и температура +28 — +30 °С. Институт микробиологии АН СССР, благодаря Г.И. Каравайко, предоставил нам всего 0,5 л концентрата Th.f в виде густоватой ярко-красной жидкости, которую затем залили в оборотные растворы обеих опытных ячеек. Примерно через 2 месяца удалось разгрузить рабочие растворы с 20 г/л до 5–8 г/л серной кислоты, при этом содержание урана только росло и скоро достигло 50 мг/м³. Спустя короткое время в технологических растворах дополнительно появились достаточно высокие концентрации ванадия (40 мг/м³), скандия (0,8 мг/м³) и рения (0,1 мг/м³).

Для оценки результатов опытных работ ПВ за 3,2 года на двух ячейках (№ 1 и № 2) было разбурено 53 технологические скважины с керном. Совместно с ЦХГК был проведён полный комплекс скважинных работ по контрольному бурению. В том числе были отобраны более 2 тыс. различных проб. При этом установлено, что при рН 4 резко возросла растворимость и концентрации урана в сернокислом растворе, что соответствовало отложениям крупнее алеврита с ожидаемым Кф 0,5 м/сут. Поэтому был выделен один фильтрационно-технологический тип — «проницаемый», в который вошли гравелиты и песчаники, к которому отнесены около 70 % руд от их общего количества. Галечники не показали закисление. В результате процесса ПВ, кажущаяся повышенная «средняя» карбонатность разреза не проявилась по причине непроницаемости плотных карбонатизированных участков пород. Вертикальные растекания закисления под фильтром были выше в 1,5–2,5 раза, чем над фильтром. В целом результаты опытных работ по сернокислотному выщелачиванию урана, по общей оценке ВНИИХТа и ЦГХК, оказались удовлетворительными и подтвердили благоприятные горно-геологические условия для освоения месторождения в промышленных масштабах способом кислотно-бактериального скважинного подземного выщелачивания урана.

Недавно на месторождении Семизбай в рамках соглашения о стратегическом партнерстве между «Казатомпромом» и китайской «Гуандунской ядерно-энергетической корпорацией (China Guangdong Nuclear Power Co — CGNPC)» заработало китайско-казахское СП «Семизбай-U» (доля КНР — 49 %)¹.

¹ <http://svpressa.ru> В декабре 2011 года ТОО «Семизбай-U» исполнилось пять лет. — дата обращения 20.06.2016.

ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в геологическую микробиологию / С.И. Кузнецов, М.В.Кузнецов, Н.Н. Ляликова. М.: АН СССР, Ин-т микробиологии, 1962. 238 с.
2. Игнатов П.А. Палеогидрогеологические обстановки образования рудных месторождений. М.: ВНИИГеосистем, 2014. 140 с.
3. Как искали и добывали уран // Сб. статей — воспоминаний ветеранов атомной промышленности / Под ред. В.В. Кроткова. М.: ГЕОС, 2002. 390 с.
4. Кондратьева И.А., Боброва Л.Л. Геологическое строение и особенности рудогенеза месторождения Семизбай. Серия методическая, № 11. М.: ВИМС, 2011. 44 с.
5. Наравас А.К. Методические рекомендации по документации осадочных пород при изучении гидрогенных месторождений. Степногорск: ВНИИХТ ОНИС-1, 1984. 31 с.
6. Наравас А.К. Логнормальная палетка для расчленения геологического разреза и оценки его проницаемости по данным КС скважин месторождения Семизбай. Методические рекомендации. Степногорск: ВНИИХТ ОНИС-1, 1988. 19 с.
7. Наравас А.К. Литолого-фильтрационная неоднородность рудовмещающих пород гидрогенных урановых месторождений эрозионно-тектонических депрессий Северного Казахстана и её влияние на процессы подземного выщелачивания (на примере месторождения Семизбай). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Фонды ВНИИХТ, 1989. 199 с.
8. Наравас А.К., Данилова Л.М., Логинова Ю.В. Временное методическое руководство по проведению расходомерии и интерпретации результатов измерений на объекте 123-13. Степногорск: ВНИИХТ ОНИС-1, 1986. 25 с.
9. Разведка месторождений урана для отработки методом подземного выщелачивания / М.В. Шумилин, Н.Н. Муромцев, К.Г. Бровин и др. М.: Недра, 1985. 208 с.
10. Шахведов В.А. Крупные экзогенные эпигенетические месторождения урана (на примере месторождений в палеогеновых оложениях Чу-Сарысуйской урановорудной провинции) // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов / Под ред. Р.И. Кравцова. С.-П. Наука РАН, 1998. 324 с.