

Солодов И.Н., Полонянкина С.В., Воробьева Л.Ю. (АО «Атомредметзолото»), Носков М.Д. (СТИ НИЯУ МИФИ), Иванов А.Г. (АО «Хиагда»)

#### УСТРАНЕНИЕ ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ УРАНА ПРИ СКВАЖИННОМ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

*В опубликованной литературе вопросы, связанные с потерями и разубоживанием урана при скважинном подземном выщелачивании (СПВ) урана, практически не освещены, а методы их выявления плохо обоснованы. Целью данной публикации является рассмотрение устранимых и неустраиваемых (неизбежных) потерь и разубоживания. Показано, что неизбежные потери при правильной организации добычи продуктивных растворов не превышают нормативных, а устранимые сверхнормативные потери исключаются методом геотехнологического моделирования. Разубоживание урана в продуктивных растворах минимизируется применением системы автоматизированного проектирования и ликвидируется внедрением новых конструкций скважин. **Ключевые слова:** уран, урановые месторождения, скважинное подземное выщелачивание, нормативные и сверхнормативные потери, технологические скважины, разубоживание урана в продуктивных растворах.*

Solodov I.N., Polonyankina S.V., Vorobyova L.Yu. (Atomredmetzoloto), Noskov M.D. (STI NRNU MEPhI), Ivanov A.G. (Khiagda)

#### ELIMINATION OF URANIUM LOSSES AND DILUTION DURING BOREHOLE UNDERGROUND LEACHING

*In the published literature issues related to uranium losses and dilution during ISL are almost not covered, and the methods for their detection are poorly described. The purpose of this publication is to consider the avoidable and unavoidable losses and dilution. It is shown that the unavoidable losses in case of proper organization of pregnant solutions extraction do not exceed normative losses, and the avoidable excessive losses can be excluded by geotechnological modeling method. Dilution of uranium in pregnant solutions is minimized by using specially developed CAD system and eliminated by implementation of new construction of production wells. **Keywords:** uranium, uranium deposits, in-situ leaching (ISL), normative and excessive losses, production wells, dilution of uranium in pregnant solutions.*

Выявление, оценка и контроль потерь и разубоживания урана при скважинном подземном выщелачивании — не простая задача и до последнего времени решалась лишь частично. Появление современных методов компьютерного геолого-математического и геотехнологического моделирования, систем автоматизированного проектирования, технологий сооружения эксплуатационных скважин, геофизических методов исследований в скважинах позволили не только

обнаруживать потери и разубоживание урана, но и оценивать их размер и находить способы их минимизации и устранения, что повышает полноту извлечения полезного компонента из недр и эффективность СПВ урана.

**Потери.** В общем представлении под потерями твердого полезного ископаемого при разработке месторождений понимают потери балансовых запасов при добыче и переработке руд. Различают нормативные (проектные) и сверхнормативные потери. Сверхнормативные потери возникают, когда фактические потери превышают нормативные.

При подземном горном способе разработки урановых месторождений (ПГР) фактические потери с достаточной точностью оцениваются и контролируются по результатам опережающей добычи урана эксплуатационной разведки (с поверхности и из горных выработок) и при непосредственном извлечении урановой руды в очистном забое, а также на всех этапах обогащения и переработки руд. Потери непосредственно влияют на полноту освоения конкретного месторождения способом ПГР. При этом влияние потерь полезного ископаемого в недрах на экономику горнодобывающего предприятия не однозначно.

Методика учета потерь при проектировании систем разработки и фактического их учета в ходе отработки месторождений способом ПГР описана в фундаментальных трудах по горному делу и в технических проектах на строительство горнодобывающих предприятий.

В отличие от ПГР оценка потерь урана при скважинном подземном выщелачивании (СПВ) в статьях и в наиболее полных монографиях на эту тему [1, 2, 6, 9] либо вообще не рассматривается, либо освещена в очень упрощенной форме. А методы выявления и устранения сверхнормативных потерь вообще в публикациях отсутствуют. Объясняется это несколькими причинами.

Во-первых, при СПВ отсутствует стадия добычи руды. Процесс освоения рудной залежи начинается с переработки урановых руд на месте их залегания с применением перерабатывающих технологий, являющихся специальными видами добычных работ. Выщелачивание урана из руд протекает не в пачуках или автоклавах, как при ПГР, а в межскважинном пространстве из рудоносного проницаемого слоя (пласта). Поэтому иногда предлагаемый механический перенос методик и требований, предъявляемых к снижению потерь при ПГР, на СПВ является не корректным. Разработка месторождений способом скважинного подземного выщелачивания с точки зрения оценки потерь рассматривается как два технологически взаимосвязанных процесса [10]:

- 1) подземное выщелачивание урана из рудной массы;
- 2) первичная переработка продуктивных растворов на поверхностном комплексе.

Поэтому главные контролируемые потери при СПВ — это отклонение от нормируемого (регламентированного) извлечения урана из руд на месте залегания

ния в выщелачивающий раствор (продуктивный раствор) и извлечение урана из раствора на поверхностной перерабатывающей установке при получении готовой продукции (ГП).

При подземном выщелачивании процессы горного производства заменены перерабатывающими технологиями, поэтому оценка потерь при добыче полезных ископаемых в этом случае базируется на методических приемах из области обогащения полезных ископаемых. Основой является технологический регламент, определяющий параметры технологического процесса и неизбежные потери полезных компонентов при обогащении. На российских рудниках СПВ (АО «Далур» и АО «Хиагда») потери при извлечении урана из руд в раствор проектами предусмотрены на уровне 20 %, а потери при извлечении урана из раствора в ГП — 2÷4 %.

Следует отметить, что лабораторные методы определения степени извлечения урана из руды в раствор ( $\epsilon_{p-p}$ ; агитационное выщелачивание урана в фильтрационных колонках), как правило, завышают этот параметр. В этих экспериментах не моделируется трехмерный характер фильтрации выщелачивающих растворов от закачных к откачным скважинам [1], а также всегда присутствующий в реальных условиях фактор разубоживания при движении урансодержащего выщелачивающего раствора по безрудным проницаемым песчаным отложениям, так как мощность рудного слоя практически всегда меньше мощности проницаемых пород рудоносного горизонта. Двухскважинные методы натурных геотехнологических испытаний занижают этот параметр. Поэтому исходными данными для проектирования предприятий СПВ по параметру  $\epsilon_{p-p}$  являются результаты многоскважинных опытно-промышленных работ (ОПР). Однако и они не позволяют получить точные

значения  $\epsilon_{p-p}$  по месторождению в целом, т.к. этими испытаниями невозможно апробировать все геотехнологические условия, встречающиеся в рудных залежах месторождения или в отдельных его участках. Проблема выбора представительного участка для проведения ОПР до сих пор не решена.

Выход на проектное извлечение урана из руд конкретного месторождения — не простая задача и зависит от квалификации геотехнологов и умения применять современные технологии повышения извлечения урана из руд (эффективные конструкции скважин,



Рис. 1. График отработки рудной залежи Х6 Хиагдинского месторождения. Красная пунктирная линия — минимальное промышленное содержание урана в ПР

		Содержание урана в ПР, мг/л													
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Расход кислоты на 1 м³ ПР, кг	2,0	- 20	- 4	12	28	45	61	77	94	110	126	142	159	175	191
	2,5	- 24	- 8	8	24	41	57	73	89	106	122	138	155	171	187
	3,0	- 28	- 12	4	20	37	53	69	85	102	118	134	151	167	183
	3,5	- 33	- 16	0	16	33	49	65	81	98	114	130	146	163	179
	4,0	- 37	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	142	159	175
	4,5	- 41	- 24	- 8	8	24	41	57	73	90	106	122	138	155	171
	5,0	- 45	- 28	- 12	4	20	37	53	69	86	102	118	134	151	167
	5,5	- 49	- 32	- 16	0	16	33	49	65	81	98	114	130	147	163
	6,0	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	142	159
	6,5	- 57	- 41	- 24	- 8	8	25	41	57	73	90	106	122	138	155
	7,0	- 61	- 45	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118	134	151
	7,5	- 65	- 49	- 32	- 16	0	16	33	49	65	82	98	114	130	147
	8,0	- 69	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	143
	8,5	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	8	25	41	57	73	90	106	122	139
	9,0	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118	134
	9,5	- 81	- 65	- 49	- 32	- 16	0	17	33	49	65	82	98	114	130
	10,0	- 85	- 69	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	78	94	110	126
10,5	- 89	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	8	25	41	57	74	90	106	122	
11,0	- 93	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118	
11,5	- 97	- 81	- 65	- 48	- 32	- 16	0	17	33	49	65	82	98	114	
12,0	- 101	- 85	- 69	- 52	- 36	- 20	- 4	13	29	45	61	78	94	110	
12,5	- 105	- 89	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	9	25	41	57	74	90	106	
13,0	- 109	- 93	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	70	86	102	
13,5	- 113	- 97	- 81	- 65	- 48	- 32	- 16	0	17	33	49	66	82	98	
14,0	- 117	- 101	- 85	- 69	- 52	- 36	- 20	- 4	13	29	45	61	78	94	
14,5	- 122	- 105	- 89	- 73	- 56	- 40	- 24	- 8	9	25	41	57	74	90	

Рис. 2. Матрица определения маржинальной прибыли для определения минимальной промышленной концентрации урана в ПР, ниже которой продолжение отработки рудной залежи не рентабельно

оптимальные схемы вскрытия рудных залежей технологическими скважинами, управление процессом СПВ в недрах, окислители и т.п.) [5, 7, 8, 11].

Во-вторых, традиционные методы выявления и контроля потерь при СПВ не точные и крайне дорогостоящие. Обычно рекомендуются методы контрольного бурения с керном в сочетании с гамма-каротажем [9] или без керна с каротажем нейтронов мгновенного деления для прямого определения урана на месте залегания [4]. Предложение бурить контрольные скважины по сети плотнее сети технологических скважин [9] — это прямой путь к исключению возможности использования СПВ, так как данный метод станет не рентабельным даже при идеальных геотехнологических условиях. Гамма-каротаж для выявления потерь не применим, т.к. радий, продукты распада которого являются источником гамма-излучения, сохраняется в рудах в процессе СПВ в виде труднорастворимых соединений с сульфатом серной кислоты и дает ложные содержания урана. Извлечение радия из руд сернокислыми растворами не превышает 5 % [3].

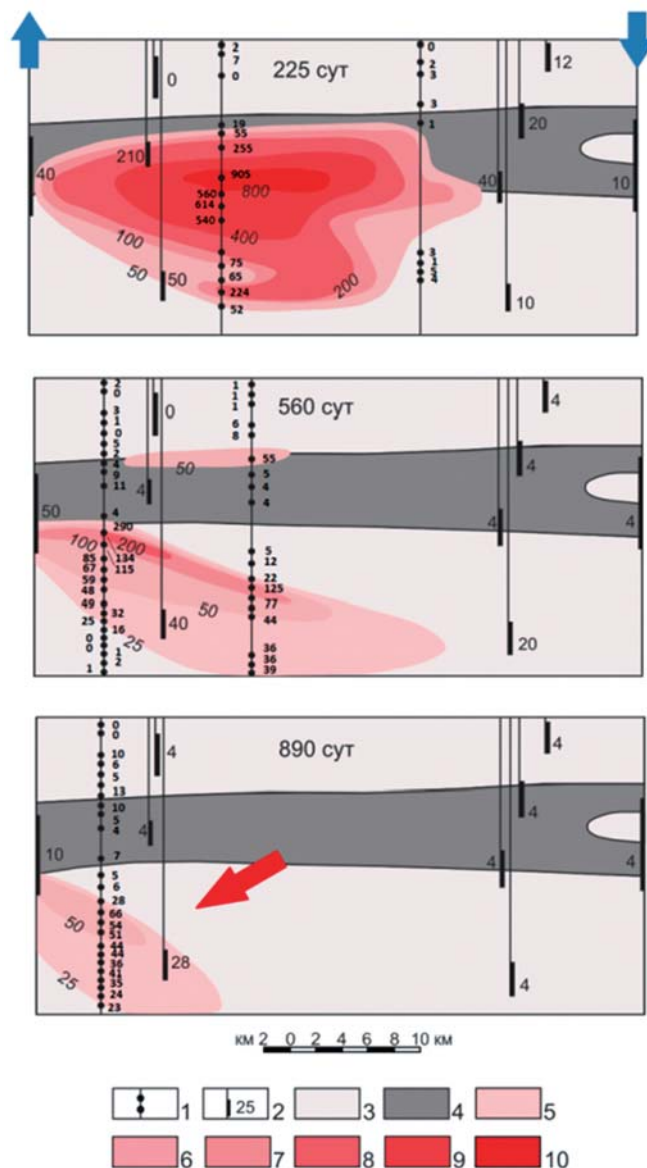
При СПВ имеют место **устраняемые и неустраняемые (неизбежные) потери урана**. К последним относятся потери, связанные с: минеральным составом урановых и нерудных минералов в рудах (ассоциация минералов урана с сульфидами и т.п.), текстурными особенностями рудоносных песков (уран в составе глинистых песков и глин); геохимическими свойствами руд (высокая степень восстановления урана и железа в рудах); водопроницаемостью рудоносных отложений (плохо извлекаемый уран в слабопроницаемых отложениях при коэффициенте фильтрации  $K_f < 1$  м/сут); выносом урана на периферию фильтрационного потока выщелачивающих растворов; ураном в остаточных сернокислых растворах после завершения отработки рудной залежи. Как правило, на практике все перечисленные неустраняемые потери в сумме не превышают величину нормативных (проектных) потерь — 20 %.

Некоторые из этих факторов освещены в выше перечисленных монографиях. Здесь же приведем примеры **неизбежных потерь** растворенного урана на заключительной стадии отработки эксплуатационных блоков и рудных залежей.

В конце отработки рудной залежи, когда содержание урана в продуктивных растворах (ПР) после активной фазы выщелачивания снижается до 5–25 мг/л возникает вопрос: когда выводить залежь из эксплуатации? Для ответа на него необходимо определить минимальное промышленное содержание урана в ПР. Это экономический параметр. На рис. 1 и 2 приведен пример определения этого параметра для конкретной залежи Х6 Хиагдинского месторождения, отработку которой ведет АО «Хиагда». Минимальное промышленное содержание урана в ПР определено с помощью технико-экономической модели (ТЭМ) [1]. В ТЭМ постоянными величинами приняты — цена реализации урана и стоимость 1 т серной кислоты, производимой АО «Хиагда» на собственном сернокислотном заводе. По результатам расчета по ТЭМ построена двухмерная ма-

трица (рис. 2), в которой переменными величинами являются содержание урана в ПР и добавляемая на доукрепление выщелачивающих растворов (ВР) серная кислота. При содержаниях урана > 15 мг/л и добавляемой серной кислоте 3 г/л дальнейшая отработка залежи является рентабельной, т.к. маргинальная прибыль с каждого кубометра ПР > 4 руб/м<sup>3</sup> (рис. 2).

Когда содержание урана в ПР ≤ 10 мг/л дальнейшая отработка залежи становится экономически не целе-



**Рис. 3. Неизбежные потери урана на периферии фильтрационного потока выщелачивающих растворов на завершающей стадии отработки эксплуатационного блока.** Распределение растворенного урана в проницаемых отложениях рудоносного горизонта: 1 — образцы песчаных отложений, из которых извлечен поровый раствор и определено содержание урана в мг/л; 2 — фильтр скважины и результаты гидрогеохимического опробования технологических и наблюдательных скважин (мг/л); 3 — безрудные проницаемые песчаные отложения; 4 — рудоносные проницаемые пески; 5–10 — поля распределения растворенного урана в мг/л: 5 — 25÷50, 6 — 50÷100, 7 — 100÷200, 8 — 200÷400, 9 — 400÷800, 10 — >800. Голубые стрелки — закачка и откачка технологических растворов. Красная стрелка указывает на неизбежные потери растворенного урана при завершении отработки эксплуатационного блока



сообразной. В результате на месте отработанной рудной залежи остается линза остаточных сернокислых растворов с таким содержанием урана. *Это и есть неизбежные потери урана при СПВ, которые являются частью суммарных нормативных потерь.*

Следующий пример иллюстрирует *неустраняемые потери* урана при его выносе на периферию фильтрационного потока выщелачивающих растворов в результате гидродинамической дисперсии (рис. 3).

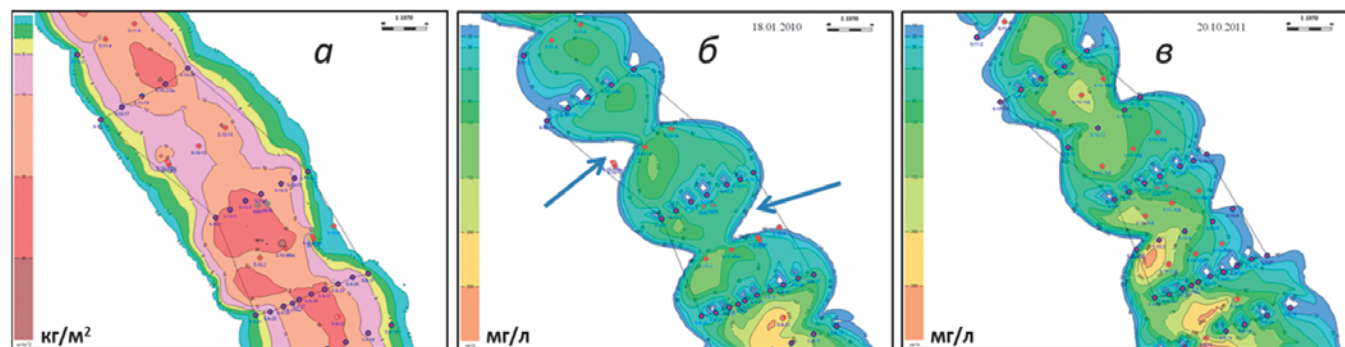
Это явление установлено в начале 1980-х годов на участке № 5 залежи № 1 месторождения Букинай (Узбекистан) методом бурения 5 контрольных скважин между закачной и откачной скважинами на начало процесса СПВ (225 сут.), в середине процесса (560 сут.) и на момент прекращения отработки эксплуатационного блока (890 сут.). Распределение растворенного урана в проницаемых отложениях рудоносного горизонта мощностью 23 м определено в закачиваемых (ВР) и откачиваемых (ПР) растворах, в семи наблюдательных скважинах с этажным расположением фильтров и в поровых растворах, извлеченных из образцов керн контрольных скважин методом вакуумирования. Мощность проницаемых песков рудного слоя — 6 м.

При СПВ скорость движения растворов в межскважинном пространстве характеризуется высокой неоднородностью: в рудоносном слое —  $0,4 \pm 1,2$  м/сут.; на периферии потока вблизи верхнего и нижнего водупоров —  $0,02 \pm 0,1$  м/сут. В начале процесса растворенный уран перемещается по рудному и нижнему слоям горизонта (рис. 3, 225 сут.). На завершающейся стадии (рис. 3, 890 сут.) он остается только в нижнем слое и не извлекается на поверхность через откачные скважины, так как отжимается к подошве горизонта более быстрым потоком в среднем рудоносном слое. Содержание растворенного урана в этой части горизонта изменяется от 23 до 66 мг/л. *Это неустраняемые потери урана в недрах, связанные с особенностями гидродинамики выщелачивающих растворов, которые (потери) также являются частью нормативных потерь.* Минимальные промышленные содержания урана на этом объекте составляли 4 мг/л.

Возможность выявлять и эффективно устранять потери при СПВ (*устраняемые потери*), не допуская появления сверхнормативных, появилась сравнительно недавно с разработкой СТИ НИЯУ МИФИ комплекса компьютерных программ для управления разработкой гидрогенных месторождений методом СПВ, подробно описанного в монографии [1].

Геотехнологическое моделирование, основанное на теории физико-химической гидродинамики, дает возможность на любой момент отработки рудной залежи иметь информацию об остаточных запасах урана в виде удельной площадной продуктивности, распространения по площади залежи серной кислоты и содержания растворенного урана в выщелачивающих растворах. Эта информация весьма полезна для принятия решения об оптимизации отработки запасов и исключения потерь урана в непрорабатываемых сернокислыми растворами рудах.

Такой пример иллюстрируют результаты оптимизации схемы вскрытия эксплуатационных блоков на залежи X5 Хиагдинского месторождения (рис. 4). На основании результатов предпроектных исследований было рекомендовано расстояние между рядами технологических скважин 60 м, между откачными скважинами в ряду 20–25 м и в закачном ряду — 12–15 м. Большое расстояние между рядами скважин для геотехнологических условий залежи X5 оказалось не приемлемым. Это привело к длительному периоду закисления рудоносного слоя (>6 мес.), большому расходу серной кислоты и низкому содержанию урана в ПР. Образовались зоны не прорабатываемых серной кислотой урановых руд (показано стрелками на рис. 4б). Это могло привести к появлению сверхнормативных потерь. Оптимизация схемы вскрытия методом геотехнологического моделирования позволила достигнуть полной проработки балансовых запасов сернокислыми растворами (рис. 4в), увеличить содержание урана в ПР, снизить расход кислоты и, как следствие, увеличить темп отработки запасов в оптимизированных 4-х эксплуатационных блоках в 3 раза. В результате затраты на сооружение дополнительных технологических



**Рис. 4. Устранение потерь балансовых запасов методом оптимизации схемы вскрытия технологическими скважинами участка рудной залежи в ходе его отработки:** а) исходная продуктивность рудоносного горизонта (кг U/m<sup>2</sup>); б) неполная проработка рудного тела выщелачивающими растворами (показано стрелками) при неоптимальной схеме вскрытия технологическими скважинами (содержание растворенного урана в мг/л); в) полная проработка рудного тела выщелачивающими растворами в результате оптимизации схемы вскрытия (содержание растворенного урана в мг/л)

скважин окупилась в первый год работы эксплуатационных блоков.

Следующий пример показывает возможность геотехнологического моделирования устранять сверхнормативные потери урана в застойных гидродинамических зонах методом реверсирования потока выщелачивающих растворов. Такие зоны обычно образуются на границе эксплуатационных ячеек при отработке рудных залежей сложной морфологии и при неоптимальной схеме вскрытия залежей технологическими скважинами. На рис. 5а приведен фрагмент распределения содержания растворенного урана по площади участка технологического блока (Центральный участок Далматовского месторождения). Скопление урана в застойной зоне между эксплуатационными ячейками достигало 150 мг/л и не извлекалось на поверхность из-за несовершенства гидродинамики потока выщелачива-

ющих растворов при гексагональной схеме вскрытия. Переоборудование закачной скважины в откачную позволило извлечь уран из застойной зоны (рис. 5б).

Еще один вид возможных сверхнормативных потерь урана — образование в конце СПВ целиков вдоль рядов откачных скважин. Это потери урана в твердой фазе. Целики также выявляются геотехнологическим моделированием. На этом этапе отработки рудной залежи (рис. 6а; Уксянский участок Далматовского месторождения) продолжать процесс выщелачивания в обычном режиме не выгодно, так как серная кислота расходуется на взаимодействие с породообразующими минералами песков, из которых уран уже выщелочен (на рис. 6а показано красными стрелками). В этом случае целесообразен переход от традиционной рядной системы отработки на однорядную систему с чередованием откачных и закачных скважин в откачном ряду. Реализация этого технического решения дает возможность полностью отработать целик при минимальных затратах серной кислоты (рис. 6б).

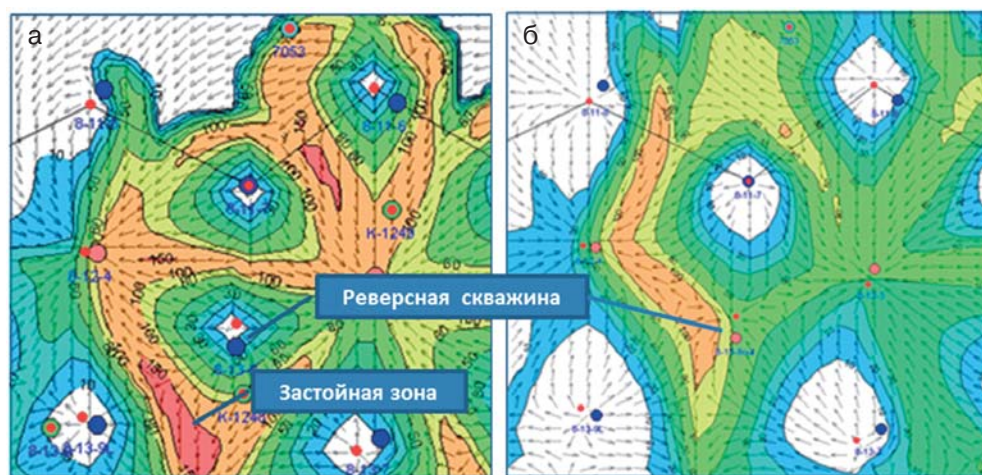


Рис. 5. Устранение потерь урана в застойной гидродинамической зоне методом реверсирования потока выщелачивающих растворов: а) скопление растворенного урана в застойной гидродинамической зоне (красная заливка) (изолинии — содержание урана в мг/л); б) извлечение урана из застойной зоны переключением закачной скважины на откачку продуктивных растворов

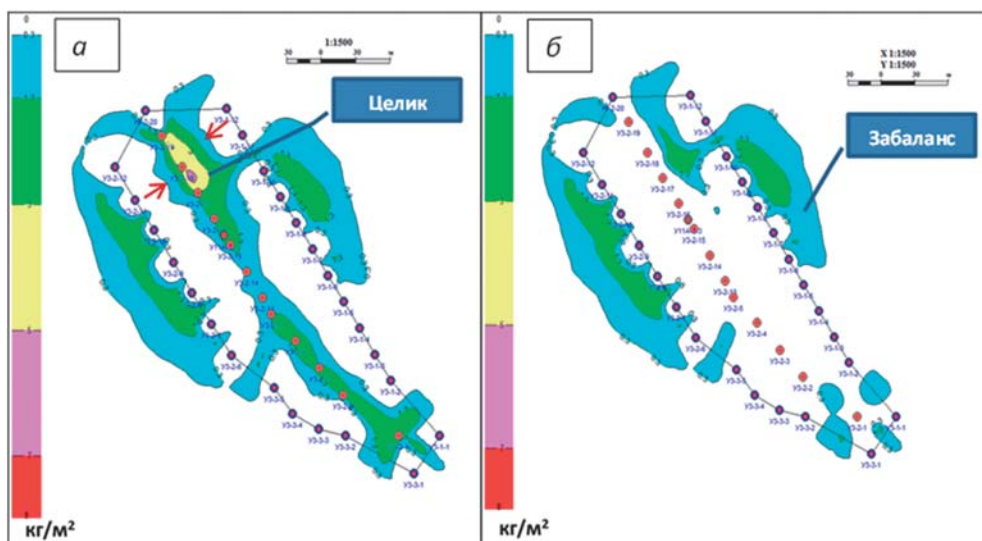


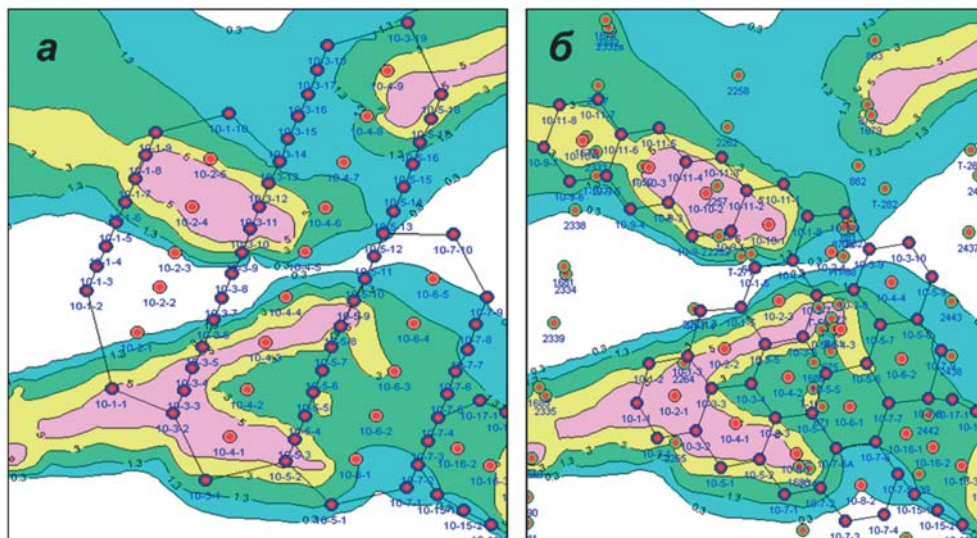
Рис. 6. Устранение потерь урана в целике, образовавшегося в конце процесса СПВ вдоль откачного ряда (а) и отработка целика однорядной системой чередующихся откачных и закачных скважин (б). Изолиниями показана остаточная продуктивность урана в кг U/m<sup>2</sup>

Результаты геотехнологического моделирования, используемого для выявления застойных гидродинамических зон и целиков балансовых руд должны завершаться бурением контрольных скважин. При этом затраты на контрольное бурение существенно минимизированы, так как геотехнологическое моделирование позволяет локализовать поиски вероятных сверхнормативных потерь урана в недрах в отличие от рекомендации бурения контрольных скважин по регулярной сети [9].

**Разубоживание.** При СПВ разубоживание обычно встречается в двух случаях: при вскрытии технологическими скважинами забалансовых или «пустых» безрудных песчаных отложений и при нарушении герметичности обсадных колонн откачных скважин. Разубоживание концентраций урана в продуктивных растворах отрицательно влияет на экономические показатели рудника СПВ.

Разубоживание урана в ПР первого типа часто про-





**Рис. 7. Минимизация разубоживания при переходе от «ручного» (а) к автоматизированному (б) проектированию схем вскрытия рудных залежей на примере блока 10-3 Далматовского месторождения. Изолиниями показана исходная продуктивность рудоносного пласта в кг U/m<sup>2</sup>**

исходило при выборе схем вскрытия рудных залежей технологическими скважинами «вручную». Внедрение автоматизированной системы проектирования (САПР ПВ) отработки эксплуатационных блоков, участков СПВ и залежей [1] в значительной степени снизило отрицательное влияние этого фактора на экономику рудников СПВ. Пример кардинального снижения разубоживания урана в ПР при переходе от «ручного» (рис. 7а) к автоматизированному (рис. 7б) проектированию приведен на рис. 7.

Второй тип разубоживания урана в продуктивных растворах связан с плохим техническим состоянием откачных (разгрузочных) скважин. Этот вид разубоживания надежно выявляется и количественно оценивается скважинными геофизическими методами — токовый каротаж в комплексе с расходометрией. Наиболее часто разгерметизация обсадных колонн встречается при использовании труб из полиэтилена низкого давления (ПНД), традиционно используемого на объектах СПВ с 1970-х годов. Трубы ПНД обладают множеством недостатков: плотность ниже плотности воды; отсутствует адгезия с цементом; у колонны обсадных труб нет осевой устойчивости; невозможно надежно герметизировать резьбовые соединения из-за отсутствия клея, обладающего адгезией с полиэтиленом. Последний недостаток исключен установкой стальных колец на резьбовые соединения, что в АО «Хиагда» полностью исключило разгерметизацию резьбовых соединений труб ПНД. Старые технологические скважины, обсаженные трубами ПНД, ремонтируются с использованием современных полимерных материалов (тампажаз участков нарушения целостности обсадных колонн) и новых технологий установки резиновых пластырей на участки нарушения гидроизоляции обсадных колонн. Полностью исключить все недостатки труб ПНД позволит переход на обсадные трубы из непластифицированного поливинилхлорида, обладающего высокой морозостойкостью и ударопрочностью [8].

### Выводы:

Рассмотрены фактические устраняемые и неустраняемые потери урана при добыче методом СПВ.

Неустраняемые потери связаны с неизвлекаемым ураном в слабопроницаемых рудоносных отложениях ( $K_f < 1$  м/сут.) и с ураном, находящимся в рудах в ассоциации с сульфидами и глинами, а также вынесенный в безрудные отложения на периферию фильтрационного потока. К неизбежным потерям также относится уран в остаточных сернокислых растворах на завершающей стадии отработки рудных залежей. Эти

потери в сумме не превышают нормативные потери (20 % от балансовых запасов).

Устраняемые потери урана, связанные с его скоплением в застойных гидродинамических зонах, появляющиеся при неоптимальной схеме вскрытия (недовскрытые запасы) в целиках в районе откачных рядов и на границе эксплуатационных ячеек, выявляются методами геотехнологического моделирования и контрольного бурения. Их устранение осуществляется с помощью методов оптимизационного геотехнологического моделирования.

Разубоживание урана в продуктивных растворах в результате проникновения заколонной воды на участках нарушения целостности обсадных колонн откачных скважин устраняется применением современных технологий ремонта скважин старой конструкции (ПНД) и переходом на новую более надежную конструкцию скважин с использованием труб НПВХ.

Применение новых технологий позволяет полностью устранять сверхнормативные потери урана и минимизировать разубоживание урана в продуктивных растворах. Доказательством этому служит отсутствие сверхнормативных потерь при освоении месторождения Далматовское, на котором балансовые запасы на 01.01.2018 методом СПВ отработаны на 72 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Геотехнология урана (российский опыт)* / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. — М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. — 576 с.
2. *Добыча урана методом подземного выщелачивания* / Под ред. В.А. Мамилова. — М.: Атомиздат, 1980. — 248 с.
3. *Карамушка, В.П.* Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд / В.П. Карамушка, Е.Н. Камнев, Р.Е. Кузин. — М.: Издво «Горная книга», 2014. — 183 с.
4. *Методы ядерно-геофизического каротажа на месторождениях урана* / Под ред. А.И. Осецкого. — СПб.: ФГУНПП «Геологоразведка», 2007. — 314 с.
5. *Пат. на изобретение №2572910* от 16.12.2015. Способ выщелачивания урана из руд / А.А. Дементьев, А.С. Бабкин, В.Н. Рычков и др.; опубл. 20.01.2016.
6. *Подземное выщелачивание полиэлементных руд* / Под ред. Н.П. Лаврова. — М.: Издательство Академии горных наук, 1998. — 446 с.

7. Солодов, И.Н. Методы интенсификации СПВ урана / И.Н. Солодов // Вестник российской академии естественных наук. — 2013. — Вып. 6-1. — С. 6–10.
8. Солодов, И.Н. Опыт добычи урана методом СПВ в криолитозоне / И.Н. Солодов, А.В. Гладышев, А.Г. Иванов // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 11. — С. 65–71.
9. Справочник по геотехнологии урана / Под ред. Д.И. Скороварова. — М.: Энергоатомиздат, 1997. — 672 с.
10. Сытенков, В.Н. Методические рекомендации по расчету потерь и разубоживания при добыче урана методом подземного выщелачивания / В.Н. Сытенков, А.В. Еремин, Д.А. Бычихина. — М.: АО «ВНИПИпромтехнологии», 2016. — 52 с.
11. Solodov, I.N. The experience of using oxidants for ancient roll-front type uranium deposits In Situ Leaching mining in the Russian Federation / I.N. Solodov // Uram-2009. IAEA. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle / 22–26 June 2009, Vena, Austria.

© Коллектив авторов, 2018

Солодов Игорь Николаевич // INSolodov@armz.ru  
 Полонянкина Светлана Викторовна // SVPolonyankina@armz.ru  
 Воробьева Лариса Юрьевна // LaYVorobyeva@armz.ru  
 Носков Михаил Дмитриевич // md\_noskov@mail.ru и nmd@ssti.ru  
 Иванов Александр Георгиевич // Ivanov.A.G@hiagda.ru

УДК 502.3/.7: 551.521

Бахур А.Е. (ФГБУ «ВИМС»)

#### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ АНОМАЛИЙ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Представлены примеры использования радиоизотопных данных для интерпретации радиоактивных аномалий в объектах окружающей среды (почва, вода). Данные о радионуклидном составе и соотношениях между изотопами урана, тория, радия, плутония, америция, стронция, цезия и других позволяют установить источник аномалии (природный или техногенный), оценить степень ее опасности для населения. **Ключевые слова:** радиоактивная аномалия, изотопы, изотопные отношения, объекты окружающей среды.*

Bakhur A.E. (VIMS)

#### INTERPRETING TECHNOGENIC AND Nontechnogenic RADIOACTIVE ANOMALIES IN ENVIRONMENTAL OBJECTS

*The article provides examples of using radioisotopic data in order to interpret radioactive anomalies in environmental objects (soils, water, etc.). The radionuclide composition and ratios of isotopes of U, Th, Ra, Pu, Am, Sr, Cs and other elements allow to recognize possible sources of an anomaly (technogenic or nontechnogenic) and assess the radiation safety. **Keywords:** environmental objects, radioactive anomalies, radionuclide composition, radioisotopic ratios.*

Актуальность проблемы расшифровки радиоактивных аномалий определяется постоянно возрастающей техногенной радиационной нагрузкой на природную среду, приобретающую масштабы национальной без-

опасности, что подчеркнуто рядом принятых в России законов, постановлений и нормативных документов.

Эта проблема будет обостряться в перспективе в связи с реализацией программ интенсивного развития атомной энергетики, объемов разведки и добычи уранового, редкометалльного и углеводородного сырья, накопления огромных объемов радиоактивных отходов разных категорий, аварийных ситуаций на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), угрозы террористических актов.

Современные спектры загрязняющих радиоактивных веществ и источники их поступления весьма разнообразны и постоянно усложняются, проявляются новые формы их нахождения и закономерности миграционных процессов в окружающей среде. Радиоактивные аномалии могут быть связаны как с природными геологическими (месторождения U, Th, редких и редкоземельных элементов, ореолы рассеяния и др.), так и с антропогенными (ядерные испытания, аварии и сбросы на предприятиях ЯТЦ, горнодобывающее и перерабатывающее производство, складирование и захоронение радиоактивных материалов и др.) факторами.

Формирование и особенности природных радиоизотопных аномалий в геологической среде хорошо изучены многими исследователями (Н.Г. Сыромятников, 1961, 1976; В.В. Чердынцев, 1969, 1973; В.И. Баранов, 1973; П.И. Чалов, 1975; А.Н. Токарев, 1975; В.И. Малышев, 1978, 1981, 1983; Н.А. Титаева, 1983, 1992; Г.П. Киселев, 2005 и др.).

Вопросам современного техногенного радиоактивного загрязнения также посвящено большое количество научных трудов (Ю.А. Израэль, 1988, 1998; Ф.И. Павлоцкая, 1986–1987; Б.Ф. Мясоедов, 1997; А.П. Ермилов, 1993, 1997; R. Falk, 1988; Ю.В. Дубасов, А.С. Кривохатский и др., 1991; Н.А. Лошилов и др., 1992; В.А. Кузнецов и др., 1993; Е.П. Петряев и др., 1993; В.Т. Дубинчук, В.А. Поляков и др., 1995, 2001; И.А. Соболев, 1995; А.И. Соболев, 1996; В.В. Мартюшов и др., 1996; Л.П. Рихванов, 1997; Ю.С. Черепнин, 2000; С.М. Вакуловский, 2001, 2005; Е.В. Резвицкий, 2007; А.И. Алексахин, 2007; А.В. Стародубов, 2007 и многие другие.

В целом радиоэкологическое состояние территории России наиболее полно охарактеризовано в работах В.И. Булатова [3], Л.П. Рихванова [4], Н.А. Титавой [5].

Однако, как правило, в большинстве работ рассматриваются либо частные случаи одного из видов загрязнения, либо определенная территория или регион, либо конкретные объекты окружающей среды. Возможности идентификации источников загрязнения с использованием соотношений изотопов плутония отмечаются лишь в работе Б.Н. Беляева и др. [2].

Таким образом, на сегодняшний день цельной комплексной системы идентификации аномалий и установления их источника пока не сложилось.

Лабораторией изотопных методов анализа ФГБУ «ВИМС» в течение нескольких десятков лет были исследованы природные объекты в известных районах