

Влияние природных факторов на гидродинамические процессы и процессы разрушения в отвалах урановых рудников

Influence of natural factors on hydrodynamic and destruction processes in dumps of uranium mines

Воробьев А.Е.¹, Юров В.М.², Портнов В.С.³

¹Российский университет дружбы народов (E-mail: fogel_al@mail.ru);

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru);

³Карагандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Мақалада уран кендерінің қалдықтары мен карьерлеріндегі гидродинамикалық процестердің жаңа модельдері ұсынылды. Алынған формулалар табиғи және лабораториялық жағдайда анықтауға болатын экологиялық маңызды параметрлерді алуға мүмкіндік береді. Сондай-ақ кендерде осы процестердің жаңа моделі ұсынылған. Нәтижелер жиынтығы тек қоршаған ортаның радиациялық ластану деңгейіне экологиялық мониторинг жасау үшін емес, сонымен қатар оларды алшақтату стратегиясын жасауға қолданылады.

New models of hydrodynamic processes in dumps and open-cast mines of the worked-out uranium mines are offered in the work. The deduced formulas allow to do an estimation of ecologically significant parameters and their definition in natural and laboratory conditions. Also there are offered new models of destruction processes of rocks in dumps and open-cast mines of the worked-out uranium mines. The received results can be used not only for ecological monitoring of the territories of the uranium mines, but also for development of the strategy for their isolation. The results of the work can be taken as a basis for forecasting of a radiating environment pollution and development of methods for isolation of radioactive waste dumps.

Введение

Экологическая обстановка территорий формируется в результате взаимодействия комплекса факторов, важнейшими из которых являются особенности компонентов природной среды и характеристика техногенного воздействия. На основе оценки экологической обстановки необходимо принятие управленческих решений по снижению негативных последствий техногенного воздействия на литосферу. Анализ современных экологических проблем показывает, что формирование неблагоприятной экологической обстановки в значительной степени обусловлено загрязнением окружающей среды. Загрязнение, в свою очередь, вызвано усилением миграции и преобразованием форм нахождения химических элементов под воздействием техногенных факторов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы загрязнения среды радиоактивными отходами отвалов и карьеров урановых рудников за счет воздействия на них атмосферных осадков, температуры и других природных факторов.

Общие положения

Добыча урановой руды производится на рудниках и открытых карьерах обычными способами и методом подземного выщелачивания. Возникновение при этом отходов и отвалов связано с осуществлением дореакторного топливного цикла (рис. 1). Основной целью геоэкологических исследований на стадии разведки, отработки и рекультивации урановых месторождений является изучение природных геоэкологических условий месторождения, под которыми понимают группу факторов, способствующих надежной изоляции технологических растворов в водоносных горизонтах ураново-полиэлементных рудных залежей [1].

Надежность изоляции технологических растворов в водоносном горизонте обеспечивается благоприятными сейсмическими, геоструктурными, литолого-фациальными, геохимическими, гидродинамическими и гидрогеохимическими природными факторами [2]. Задачи, решаемые геоэкологическими исследованиями в процессе отработки месторождения, заключаются в оценке негативного влияния уранового рудника на окружающую среду, в первую очередь на подземные и поверхностные воды.

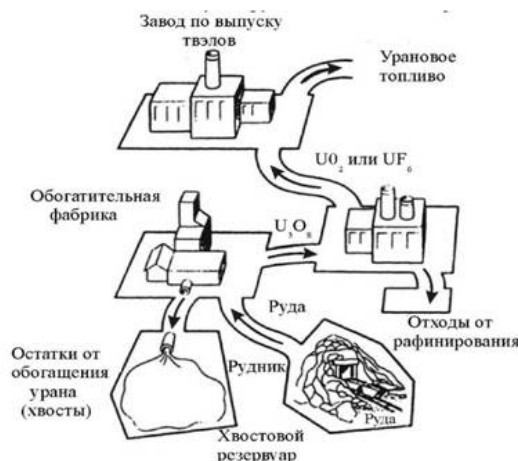


Рис. 1. Схема дореакторного топливного цикла

Под гидрогеологическими условиями месторождения понимается набор факторов, т.е. природных обстановок, способствующих формированию гидродинамических и гидрохимических особенностей подземных вод, основные из которых: число и характеристика водоносных горизонтов, их водообильность и статические уровни, направление и скорость движения подземных вод, фильтрационные свойства пород, характер гидравлической связи водоносных горизонтов, распространение, надежность (выдержанность) водоупоров, химический состав пластовых вод и их температура. Роль этих факторов среди других природных условий иллюстрируется таблицей 1.

Т а б л и ц а 1

Роль природных факторов в оценке условий отработки урановых месторождений

Факторы, влияющие на процесс природного выщелачивания	Характеристика условий выщелачивания		
	весьма благоприятных	благоприятных	неблагоприятных
1	2	3	4
Литологический состав руд	Отсортированные гравийно-песчаные отложения с примесью глинисто-алевритовых частиц, не более 10 %	Отсортированные разно-, средне- и мелкозернистые пески с примесью глинисто-алевритовых частиц, не более 20–30 %	Неотсортированные разно-, мелко- и тонкозернистые пески с содержанием глинисто-алевритовых частиц, более 20–30 %
Химический тип руд	Алюмосиликатные (содержание SiO ₂ > 80 %)	Алюмосиликатные (содержание SiO ₂ > 60–80 %)	Карбонатно-алюмосиликатные с содержанием карбонатов (по CO ₂) более 2 %
Минеральный состав руд	Урановые минералы представлены тонкодисперсными оксидами урана и коффинитом. Текстура руд эмульсионно-дисперсная	Урановые минералы представлены тонкодисперсными и точечными выделениями оксидов урана и коффинита. Текстура руд — от эмульсионно-дисперсной до вкрапленной	Урановая минерализация представлена урановыми и урансодержащими минералами, характеризующимися ассоциацией их с органическим веществом и сульфидами. Текстура руд — от эмульсионной до пятнистой
Проницаемость руд, м/сут	Высокопроницаемые руды с K _ф более 5 м/сут	Умеренно-проницаемые руды с K _ф 1–5 м/сут	Слабопроницаемые и практически непроницаемые руды с K _ф менее 1 м/сут
Отношение водопроводимости рудного тела к водопроводимости горизонта	Более 0,2	0,1–0,2	Менее 0,1

1	2	3	4
Мощность продуктивного водоносного горизонта, м	До 10	10–30	Более 30
Отношение эффективной мощности к рудной	Менее 5	5–10	Более 10
Глубина залегания рудных тел, м	До 100	100–500	Более 500–700
Продуктивность, кг/м ²	Более 5	1–5	Менее 1
Водопроницаемость руд, м ² /сут	Более 100	10–100	Менее 10
Глубина залегания уровня подземных вод, м	До 10	10–100	Более 100
Водообильность (удельный дебит) руд, л/с	Выше 0,5	0,1–0,5	Менее 0,1
Активная пористость руд, %	Более 20	10–20	Менее 10
Коэффициент фильтрационной неоднородности рудных тел	Более 0,75	0,25–0,75	Менее 0,25
Содержание карбонатов (по СО ₂) в руде, %	Менее 1	1–2	Более 2
Содержание сульфидов в руде, %	Менее 2	2–4	Более 4
Положение рудного тела в водоносном горизонте	В нижней части	В средней части	В верхней части
Ширина рудного тела, м	Более 100	50–100	Менее 50
Запасы урана в проницаемых рудах, %	Более 80	60–80	Менее 60
Температура подземных вод, °С	Более 30	10–30	Менее 10

Влияние природных факторов на отработанные урановые месторождения, хвостохранилища, отвалы, карьеры связано, в первую очередь, с доступом свободного воздуха, атмосферных осадков и значительных колебаний температуры. В то же время и факторы, перечисленные в таблице 1, имеют важное значение в гидродинамических и физико-химических процессах: скорости фильтрации растворов, массопереносе, гомогенных и гетерогенных процессах, осаждении минералов, окислительно-восстановительных и кислотно-основных процессах, сорбции и десорбции, комплексообразовании и т.п.

Серьезную экологическую опасность представляют собой хвостохранилища, отвалы, карьеры, шахты, скважины урановых месторождений.

Облучение на уранодобывающих предприятиях, а также на радиационно-зараженной территории отработанных урановых месторождений, карьеров и отвалов создают три радиационно-опасных фактора: объемная активность короткоживущих дочерних продуктов радона в окружающей среде; удельная активность долгоживущих радионуклидов ряда урана-радия в окружающей среде; мощность дозы внешнего гамма-излучения. Важнейшие характеристики основных радионуклидов представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Важнейшие радиометрические характеристики основных радионуклидов ряда урана-238

Радионуклид	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ (выход, %)		
		альфа	бетта	гамма
1	2	3	4	5
Уран-238	4,5 · 10 ⁹ лет	4,15 (23) 4,20 (77)	-	-
Торий-234	24,1 сут	-	0,103 (21) 0,193 (79)	0,063 (3,5) 0,093 (4,0)
Протактиний-234	1,18 мин	-	2,29 (98)	0,765 (0,3) 1,001 (0,6)
Уран-234	2,4 · 10 ⁵ лет	4,72 (28) 4,77 (72)	-	0,053 (0,2)

1	2	3	4	5
Торий-230	$7,7 \cdot 10^4$ лет	4,62 (24) 4,68 (76)	-	0,068 (0,6)
Радий-226	1600 лет	4,59 (5,7) 4,78 (94)	-	0,186 (4,0)
Радон-222	3,824 сут	5,49 (100)	-	-
Полоний-218	3,05 мин	6,00 (100)	-	-
Свинец-214	26,8 мин	-	0,65 (50) 0,71 (40)	0,295 (19) 0,352 (36)
Висмут-214	19,7 мин	-	1,00 (23) 1,51 (40) 3,26 (19)	0,609 (47) 1,120 (17) 1,764 (17)
Свинец-210	22,3 лет	-	0,01 (85) 0,06 (15)	0,047 (4,0)
Висмут-210	5,01 сут	-	1,16 (100)	-
Полоний-210	138 сут	5,30 (100)	-	-

Нормируемые эффективные дозы облучения персонала урановых предприятий указаны в таблице 3. Подробные рекомендации по оценке контрольных уровней среднегодовой мощности дозы всех видов излучения приведены в [3].

Требования к точности оценок доз облучения вытекают из достижения главной цели радиационного контроля, состоящей в том, чтобы надежно выявить все случаи возможного или фактического превышения установленного предела годовой дозы облучения отдельных лиц — 20 мЗв/год и осуществить соответствующие меры защиты.

Учитывая общую неопределенность дозиметрических оценок, связанную, в частности, с неопределенностью значений дозовых коэффициентов и широкими колебаниями чувствительности отдельных индивидуумов к ионизирующему излучению, нет смысла стремиться к возможно более точным оценкам доз. При хорошей организации радиационного контроля погрешность определения индивидуальных годовых доз от суммы радиационно-опасных факторов не должна превышать 50 %, с доверительной вероятностью 0,95, если ожидаемая доза $D \geq 20$ мЗв/год.

Если погрешность выше 50 %, должны быть приняты меры по увеличению объема измерений или совершенствованию системы контроля.

Т а б л и ц а 3

Нормируемые величины доз облучения персонала урановых предприятий от суммы радиационно-опасных факторов

Нормируемая величина индивидуальной эффективной дозы	Предел дозы, мЗв	
	группа А	группа В
Годовая	50	12,5
Годовая, усредненная за 5 лет	20	5
Накопленная за период 50 лет	1000	250

Природные гидродинамические процессы в отвалах урановых месторождений

Влияние природных факторов на урановые отвалы связано, в первую очередь, с доступом атмосферных осадков и последующей миграцией радиоактивных растворов [4–5].

Рассмотрим этот вопрос в рамках подхода, обозначенного нами в работах [6–8], где рассматривалась задача о просачивании цианидного раствора через пористую руду при кучном выщелачивании металлов. Суть подхода состоит в рассмотрении движения раствора сквозь рудный штабель (отвал) как движения с подвижной границей раздела фаз. С математической точки зрения краевые задачи такого типа принципиально отличны от классических задач параболического типа. Вследствие зависимости размера области переноса потока от времени к этому типу задач неприменимы классические методы разделения переменных и интегральных преобразований Фурье, так как, оставаясь в рамках классических методов математической физики, не удаётся согласовать решение уравнения с движением границы раздела фаз [9–10]. Тем не менее такой подход отвечает реальному протеканию процесса.

В работе [6] при общей постановке задачи о движении раствора в цилиндрическом капилляре нам удалось подобрать такое интегральное преобразование, которое позволило свести задачу к интегральному уравнению Вольтерра II рода и получить общее решение задачи. Мы не будем останавливаться на общем решении задачи, а сразу рассмотрим случай однородных граничных условий [7].

В этом случае краевая задача для плотности потока раствора будет выглядеть так:

$$\frac{\partial \rho(r, z, t)}{\partial t} = a^2 \left[\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) \right], \quad (1)$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{t=0} = 1, \quad (2)$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{r=R} = 1, \quad (3)$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{z=0} = 1, \quad (4)$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{z=\beta(t)} = 1. \quad (5)$$

Решение задачи (1)–(5) с учетом результатов работы [6] будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho(r, z, t) = \sum_{k=0}^{\infty} J_0(\lambda_{0k} r) \left\{ e^{-a^2 t} \left[\frac{1}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^e e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2\tau}} \cdot \left(\int_0^e J_0(\lambda_{0k} r) r dr \right) d\xi + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{RJ_0(\lambda_{0k} R)}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^e \frac{e^{-a^2 t}}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\xi + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z}{(a^2(t-\tau))^{3/2}} e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}} K_1(\tau) d\tau + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z-\beta(\tau)}{(a^2(t-\tau))^{3/2}} e^{-\frac{(z-\beta(\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}} K_2(\tau) d\tau \right] \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Мы ограничимся лишь первым членом ряда (6), поскольку остальные вносят незначительный вклад, при этом ошибка не превышает 2–3 %.

Используя граничные условия и вычисляя интегралы, получим:

$$\begin{aligned} \rho(r, z, t) = J_0\left(\frac{2r}{R}\right) e^{-a^2 t} \left\{ \frac{e^2 J_0\left(\frac{2re}{R}\right)}{16a^3} \ln t + \frac{RJ_1\left(\frac{2r}{R}\right)}{16a^3} e^{-a^2 t} \ln(t-1) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) \left(\frac{a^2}{z\pi} + \frac{a^3}{\pi^2 z\beta(t)} \right) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{[z-\beta(t)]} \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

При больших t значения $1/\sqrt{t} \rightarrow 0$, $\ln(t-1) \cdot e^{-a^2 t} \rightarrow 0$. Пренебрегая несущественными членами, получим:

$$\rho(r, z, t) = \frac{a^3}{\pi^2} J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{t}{z\beta(t)}, \quad (8)$$

Если учесть, что $z = V_{cp} t$, где V_{cp} — средняя скорость раствора, то из (8) следует

$$\rho(r, t) = const \cdot J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \quad (9)$$

где $const = a^3 / \pi^2 V_{cp}$.

Первый член в выражении (9) описывает влияние геометрии капилляра и движения раствора на плотность транспортного потока. Более того, он описывает возникновение «пробок» в потоке раствора, что хорошо видно из графика функции $\rho(r) = J_0\left(\frac{2r}{R}\right)$ (рис. 2).

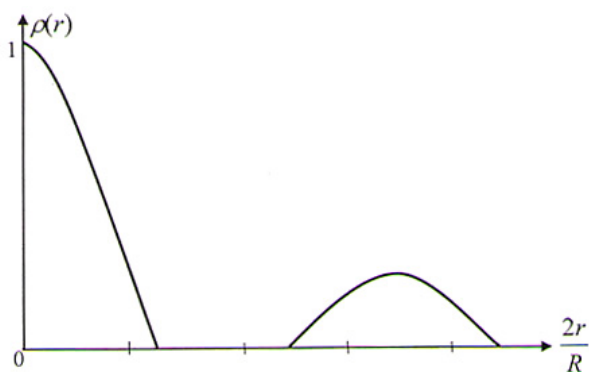


Рис. 2. График функции $\rho(r)$ при $r>0$

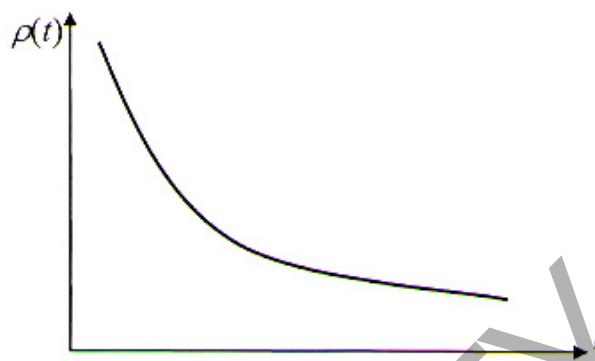


Рис. 3. Зависимость плотности потока от времени

Движение границы $\beta(t)$ чаще всего получается автомодельным, т.е. $\beta(t) = \beta_0 \sqrt{t}$ [9]. Автомодельный закон следует из уравнения баланса на границе раздела фаз. В этом случае уравнение (9) принимает вид

$$\rho(r, t) = \text{const} \cdot J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (10)$$

График функции $\rho(t)$ показан на рисунке 3.

Из рисунка 2 видно, что поток раствора, даже находящийся в свободном режиме, распадается и переходит в смешанный — свободно-заторный. Из рисунка 3 следует, что поток раствора, находящийся в свободном режиме, гиперболически убывает с течением времени. Результатом распада и убывания потока раствора, как это следует из предложенной нами модели, является хаотическое (конвективное) движение раствора даже для однородных граничных условий.

Для стационарного потока в идеальном случае, т.е. $J_0(0) = 1$, $\beta(t) = z_i(t) - z_{i+1}(t)$, из (10) следует

$$\rho(t) = \text{const} \cdot \frac{1}{z_i(t) - z_{i+1}(t)}. \quad (11)$$

Уравнение (11) впервые было получено Гринбергом [11] в рамках гидродинамической модели. Таким образом, модель Гринберга получается как частный случай нашей модели.

Природное выщелачивание урановых руд всегда сопровождается протеканием химических реакций того или иного типа. В рамках представленного выше подхода этот вопрос рассмотрен нами в работе [8]. При этом изменение концентрации радиоактивного раствора в жидкой фазе происходит за счет следующих факторов: движение радиоактивного раствора с некоторой средней скоростью, радиальное перемешивание раствора, молекулярная диффузия и собственно процесс растворения твердых частиц минералов урана.

Радиоактивный поток при $r = R$ равен $\gamma(z, t) = k(C_R)^m$. Здесь m — порядок реакции выщелачивания, k — константа скорости реакции, C_R — концентрация урана в руде. Для реакции выщелачивания $m = 1$.

При больших t значения $1/\sqrt{t} \rightarrow 0$, $\ln(t-1) \cdot e^{-a^2 t} \rightarrow 0$. Пренебрегая несущественными членами, получим:

$$\rho(r, z, t) = \frac{a^3}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{t}}{z \beta_0}. \quad (12)$$

Если учесть, что $z = V_{cp} t$, где V_{cp} — средняя скорость раствора, а параметр $a^2 = D$ равен коэффициенту диффузии, то из (12) следует

$$\rho(r, z, t) = \frac{D^{3/2}}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{V_{cp} \beta_0 \sqrt{t}}. \quad (13)$$

Реальная скорость потока в трещине $V_{cp} = V/\epsilon$, где ϵ — пористость фильтрационного сечения, V — скорость фильтрации, м/с. Пористость является важнейшей характеристикой пористых пород, руд и любых пористых тел и определяется как доля объема тела, приходящаяся на поры, или объем пор в объеме материала. Обычно при этом игнорируются замкнутые поры и учитываются

только соединенные между собой проточные поры. Они образуют поровое пространство — сложную разветвленную и нерегулярную структуру. Пористость большинства материалов находится в пределах 0,1 — 0,4. Взяв для оценки типичное для многих горных пород значение $\varepsilon = 0,25$, находим, что в 1 м^2 породы объем пор $0,25 \text{ м}^3 = 250 \text{ л}$. Пористость — безразмерная величина, она не зависит от размера частиц, составляющих пористую среду, если речь идет о геометрически подобных средах.

Для радиоактивного потока уравнение (13) переписывается в виде

$$\rho(r, z, t) = \frac{D^{3/2}}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{V \beta_0 \sqrt{t}}. \quad (14)$$

Согласно закону Дарси [12] радиоактивный поток пропорционален сечению трещины и обратно пропорционален ее длине или глубине проникновения (насыщения) раствора. Поэтому обозначая глубину насыщения через h (см) и вводя коэффициент пропорциональности A , получим из (14):

$$h(t) = A \cdot \sqrt{t}. \quad (15)$$

На рисунке 4 показаны экспериментальные результаты из работы [13], которые с хорошей точностью описываются выражением (15).

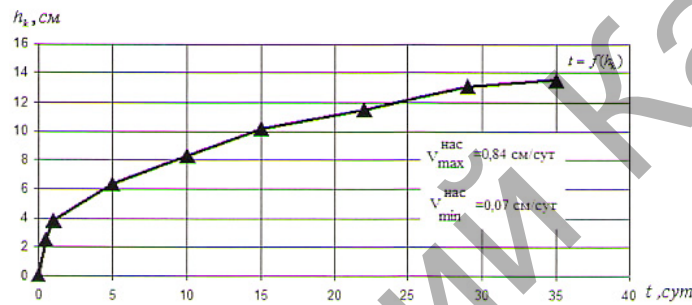


Рис. 4. Зависимость глубины насыщения руды от времени выщелачивания [13]

Отметим теперь случай, когда в пористой среде движется несколько фаз. В нашем случае это может быть смесь воздуха и радиоактивного раствора. Наличие межфазных границ требует учета капиллярных сил. Их роль в природных пластах является определяющей. Это связано с малостью пор. Так, относительная роль капиллярных сил по отношению к силе тяжести и силам вязкого сопротивления определяется отношениями, которые носят название капиллярных чисел [14]:

$$Ca_g = \frac{\rho g d^2}{\sigma}, \quad Ca = \frac{\mu V}{\sigma}, \quad (16)$$

где σ — межфазное натяжение, имеющее порядок 10 мН/м; V — скорость фильтрации, входящая в формулу (14); μ — вязкость раствора.

В каждом элементе пористой среды фазы стремятся расположиться так, как им диктуют капиллярные силы. При этом мелкие поры оказываются занятыми более смачивающей жидкостью, а крупные — менее смачивающей. Большинство природных пористых сред гидрофильны, и смачивающей жидкостью для них является вода, а несмачивающей — воздух. Детальная картина сосуществования двух фаз в поровом пространстве зависит от их количества. Его обычно характеризуют фазовыми насыщенностями s_i , $i=1,2$. Насыщенность — это доля порового пространства, занятая данной фазой, так что $s_1 + s_2 = 1$. В частности, если насыщенность несмачивающей фазы достаточно мала, меньше некоторого критического значения s_r , эта фаза должна распаться на отдельные капли, которые заперты капиллярными силами и не способны двигаться под действием обычных для пласта перепадов давления. Именно этим объясняется неизбежность защемления некоторого количества остаточного раствора.

Выше мы показали, что поток радиоактивного раствора распадается на капли при определенном соотношении аргументов функции Бесселя. Это видно и из уравнения (14): при увеличении радиуса R поры ($R \gg 2r$), т.е. когда она превращается в трещину $J_0(2r/R) \approx J_0(0) = 1$.

Поскольку скорость фильтрации V в (14) стоит в знаменателе, то в силу соотношений (16) радиоактивный поток будет уменьшаться с увеличением капиллярных сил.

Еще в 1957 г. Бродбент и Хаммерсли [15] рассмотрели общую ситуацию, возникающую при случайном распространении жидкости в среде. Позднее, рассматривая протекание жидкости в порис-

той среде, Хаммерсли [16] назвал протекание перколяцией. Процессы диффузии, такие как распространение растворимого вещества в растворителе или движение электронов в полупроводниках, хорошо понятны. Диффундирующая частица может достигать любой точки в среде. Иначе обстоит дело в случае протекания. Наиболее характерной особенностью перколяционных процессов является существование порога протекания, ниже которого процесс распространения жидкости ограничен конечной областью среды. Порог протекания в рамках теории перколяции можно определить только численными методами, и, как правило, им является вероятность протекания от узла к узлу чаще квадратной решетки. В целом теория перколяции относится к той области теоретической физики, которая исследует критические явления. В этом смысле она близка к теории катастроф [17]. В то же время задача о протекании приводит к множеству фрактальных структур.

Однако за пределами теории перколяции остается множество вопросов, о которых мы говорили выше: плотность радиоактивного потока, высота отвала, капиллярное сопротивление и много других параметров, определяющих процесс выщелачивания, который представляет сложный физико-химический, гидродинамический процесс.

Мы использовали другой подход, что отражено в названии работ [6–8] — не протекание, а просачивание. Был применен аналитический метод решения неклассической задачи диффузии, известной как задача Стефана [18]. В отличие от большинства работ по этой проблеме мы рассматриваем конечный цилиндр, что привело к ограниченной области диффузии, как и в теории перколяции. Отсюда и возникновение ряда эффектов (распад потока и т.д.), характерных для теории перколяции и теории катастроф.

Полученное нами аналитическое выражение для плотности радиоактивного потока содержит экспериментально определяемые или задаваемые параметры. Сравнение развитой теории с экспериментом показало работоспособность предложенной модели.

Какие же практические выводы следуют из предложенных моделей и формул?

Зная геометрию отвалов и карьеров, измеряя параметры потоков радиоактивных растворов в естественных условиях, можно по предложенным формулам построить геоэкологическую карту района в реальном масштабе времени и ее динамику. Это дает возможность строить стратегию природоохранительных мер по изоляции радиоактивных отходов.

Предложенная методика отличается от численного моделирования, которое может дать распределение радиоактивного потока только в данный момент времени. Численная модель дает приемлемые результаты относительно динамики процесса распределения радиоактивных потоков во времени только в случае линейной зависимости потока от времени. Однако реально такая ситуация наблюдается сравнительно редко (см. рис. 3).

Процессы разрушения горных пород и руд в отвалах и карьерах урановых рудников

Атмосферные осадки, ветер, колебания температуры разрушают горные породы в отработанных карьерах, отвалах, приводя к раскрытию радиоактивных минералов и дальнейшей их миграции по водостокам. Знание этих процессов является необходимым условием для объективного экологического мониторинга отработанных урановых месторождений.

Несмотря на давнюю историю исследования процесса разрушения, мы еще далеки от понимания физической картины этого явления в целом. Это обусловлено, прежде всего, чрезвычайной сложностью проблемы прочности материалов, не говоря уже о номенклатуре проявления этой сложности. Интерпретация явления разрушения требует привлечения специалистов по физике, химии, механике, инженеров-конструкторов. В реальных условиях процесс разрушения представляется весьма многоликим. Во многом это связано с многообразием элементарных актов разрушения, при интерпретации которых до последнего времени преобладали модельные представления, основанные на простых геометрических образах, данных Гриффитсом, Стро, Орованом и другими. Сейчас, однако, становится ясно, что физика разрушения нуждается в дальнейшем развитии основополагающих идей.

Динамическое разрушение сплошных сред — это неравновесный процесс, происходящий на различных структурно-масштабных уровнях как в пространстве, так и во времени. Эксперименты по динамическому разрушению твердых тел демонстрируют целый ряд эффектов, принципиально противоречащих классическим моделям прочности и трещиностойкости. В соответствующих классических критериях предполагается, что в процессе динамического разрыва материала энергия и импульс, идущие на образование новых поверхностей и областей разрушения, расходуются непрерывным образом. В [19] показано, что введение физической дискретности (наряду с пространственно-

геометрической), т.е. дискретного потребления энергии и импульса, необходимых для поддержания процесса динамического разрыва, позволяет разрешить ряд противоречий классической теории.

Закономерности раскрытия минеральных фаз с теоретических позиций одним из первых рассмотрел А.М.Годэн [20]. Годэном введены следующие понятия: «подчиненная фаза В» — минерал; «преобладающая фаза А» — порода; d — крупность дробленой или измельченной руды; d_3 — крупность зёрен подчиненной фазы; PA — показатель раскрытия фазы А, доля свободных частиц фазы А; PB — показатель раскрытия фазы А, доля свободных частиц фазы В. Разработанная им модель раскрытия минеральных фаз легла в основу многих последующих моделей.

Существующие аналитические модели раскрытия минеральных фаз имеют общие характерные признаки:

- руды моделируются матричными системами, зёрна минерала в которых представляют собой правильные тела одинаковых размеров, без учета петрографических характеристик руд;
- во всех формулах используется соотношение размера зерна и величины дробленого куска, от которого зависит степень раскрытия, следовательно, учитывается раскрытие лишь в узком диапазоне крупности, тогда как реальная характеристика дробленой руды представляет собой совокупность классов различной крупности;
- имеющиеся модели не учитывают различия в прочностных характеристиках слагающих руду минералов, их разную измельчаемость, что исключает применение данных моделей для оценки селективного разрушения;
- математические формулы, описывающие долю получаемых раскрытых минеральных фаз, сложны и имеют несколько переменных.

Рассмотрим процесс разрушения минералов, используя предложенный нами термодинамический подход [21]. В этой работе для эффективности разрушения горной породы получено выражение

$$\eta = \frac{kT}{C_1} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot \bar{N}, \quad (17)$$

где A — работа (энергия) разрушения; T — температура; G^0 — потенциал Гиббса массивного образца минерала; \bar{N} — среднее число элементарных носителей разрушения (пропорциональное числу дефектов), C_1 — постоянная.

Из (17) следует прямая пропорциональность от числа элементарных носителей разрушения (что и следовало ожидать), от температуры, работы (энергии) разрушения и обратно пропорциональная зависимость от энергии Гиббса.

Исследованиями, проведенными В.Д.Кузнецовым и Л.А.Шрейнером, установлена зависимость между твердостью минералов шкалы твердости Мооса и их поверхностной энергией (табл. 4). Твердость приведена в скобках первого столбца.

При измельчении минералов до размеров, близких к молекулярным, работа диспергирования, отнесенная к единице вновь образованной поверхности (удельная поверхностная энергия), составляет от $4 \cdot 10^{-4}$ до $2,7 \cdot 10^{-3}$ Дж/см².

Как видно из таблицы 4, удельная поверхностная энергия и работа диспергирования колеблются в широких пределах, что объясняется трудностями определения σ , но единая закономерность возрастания поверхностной энергии с увеличением твердости минералов и степени их дисперсности прослеживается во всех случаях.

Т а б л и ц а 4

Расчетная работа диспергирования (Дж) минералов, расположенных по шкале твердости Мооса при различной дисперсности [22]

Минерал	Принятое значение σ , 10^{-7} Дж/см ²	Удельная поверхность частиц, S, см ² /г				
		1×10^4	5×10^4	1×10^5	5×10^5	1×10^6
1	2	3	4	5	6	7
Алмаз (10)	11400	11,4	57,0	114	570	1140
	1200	1,2	6,0	12	60	120
Корунд (9)	1550	1,55	7,75	15,5	77,5	155
	7000	7,0	35,0	70,0	350	700
	1600	1,6	8,0	16,0	80	160

1	2	3	4	5	6	7
Топаз (8)	1080	1,08	5,4	10,8	54	108
	4000	4,0	20,0	40	200	400
	1200	1,2	6,0	12	60	120
Кварц (7)	780	0,78	3,9	7,8	39	78
	2200	2,2	11,0	22,0	110	220
	1000	1,0	5	10	50	100
Ортоклаз (6)	358	0,36	1,8	3,58	18	35,8
	1200	1,2	6,0	12,0	60	120
	820	0,82	4,1	8,2	41	82
Апатит (5)	176	0,19	1,0	1,86	10	186
	700	0,7	3,5	7,0	35	70
	650	0,65	3,25	6,5	32,5	65
Флюорит (4)	146	0,15	0,73	1,5	7,3	15
	400	0,4	2,0	4,0	20	40
	590	0,59	2,95	5,9	29,5	59
Кальцит (3)	78	0,08	0,39	0,78	3,9	7,8
	220	0,22	1,1	2,2	11	22
	460	0,46	2,3	4,6	23	46
Галит (2)	39	0,04	0,2	0,4	2	4
	150	0,15	0,75	1,5	7,5	15
	400	0,40	2,0	4,0	20	40
Тальк (1)	25	0,025	0,125	0,25	1,25	2,5
	80	0,08	0,4	0,80	4	8
	350	0,35	1,75	3,5	17,5	35

В таблице 5 мы приводим собранные из различных источников значения твердости по шкале Мооса для основных минералов урана.

Из таблицы 5 видно, что основные минералы урана распадаются по твердости на две группы — левый и правый столбцы таблицы. Работа разрушения для первой группы значительно больше, чем для второй. Отсюда следует вывод: вторая группа минералов урана (Урановые черни — Тюямунит) экологически опаснее первой (Уранинит — Казолит).

Как следует из формулы (17), основной вклад в работу разрушения (эффективность разрушения) вносят колебания температуры.

Атмосферные осадки также оказывают влияние на разрушение горных пород и минералов. Облегченное разрушение горных пород в присутствии воды было обнаружено П.А.Ребиндером и его сотрудниками [23]. Обсуждению различных гипотез о влиянии воды на прочность твердых тел посвящена работа [24]. Однако количественной теории этого явления пока нет.

Качественный анализ влияния воды на эффективность разрушения минералов можно провести на основе формулы (17). Вода, имея малое (по абсолютной величине) значение энергии Гиббса G^0 , приводит к уменьшению общей энергии Гиббса в системе минерал+вода в силу ее аддитивности. В соответствии с формулой (17) это увеличивает эффективность разрушения, т.е. облегчается разрушение горных пород в присутствии воды.

Таблица 5

Твердость по шкале Мооса минералов урана

Минерал	Твердость	Минерал	Твердость
Уранинит	6–7	Урановые черни	1–4
Давидит	6	Уранофан	2–3
Коффинит	5–6	Карнотит	2–2,5
Настуран	4–6,3	Торбернит	2–2,5
Браннерит	4,5–5,5	Отенит	2–2,5
Казолит	4–5	Тюямунит	1–2

Подводя итог сказанному выше, можно сделать вывод о важности знания минерального состава горных пород в отвалах, карьерах урановых рудников как для объективного экологического мониторинга, так и при разработке мероприятий по их рекультивации.

При этом используются сведения о твердости минералов, их энергии Гиббса. Однако объективную картину экологической обстановки на территории отвалов, карьеров можно воссоздать, зная энергию разрушения (диспергирования) минералов, слагающих горные породы последних. Она равна $A = \sigma \cdot S$, где σ — поверхностное натяжение минерала, S — площадь его поверхности.

Вся сложность определения работы диспергирования заключается в сложности определения поверхностного натяжения σ минерала (твердого тела). Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [25, 26], когда подвижность поверхностных атомов становится заметной. Недавно были предложены методы экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел, включая минералы [27–29]. Таким образом, возможность определения энергии диспергирования минералов по их поверхностному натяжению открывает перспективу проведения объективного экологического мониторинга территории отработанных урановых рудников.

Заключение

В настоящей работе нами предложены новые модели гидродинамических процессов в отвалах и карьерах отработанных урановых рудников. Полученные при этом формулы позволяют делать оценку экологически значимых параметров, определять их в природных и лабораторных условиях.

Предложены новые модели процессов разрушения горных пород в отвалах и карьерах отработанных урановых рудников. Полученные при этом результаты могут быть использованы не только для экологического мониторинга территорий урановых рудников, но и для выработки стратегии их рекультивации.

Совокупность полученных в настоящей работе результатов может быть положена в основу прогнозирования радиационного заражения окружающей среды и использована при выработке мер по изоляции отвалов радиоактивных отходов.

References

1. *Sednev M.V.* The methodical features of target ecological monitoring at the uranium mining enterprises // The dissertation of the candidate of geologo-mineralogical sciences. — M., 2007. — 130 p.
2. *Laverov N.P., Velichkin V.I. et. al* Isolation of the worked-out nuclear materials: geological-geochemical bases. — M.: IGEM the Russian Academy of Sciences, 2008. — 254 p.
3. Methodical instructions MI 2.6.1.11–01 «Organization of the radiating control at the uranium mines and the calculation of the radiation doses of the staffl». — M., 2004. — 29 p.
4. Radio hydro-geological researches at forecasting and searches of uranium deposits connected with bedded oxidation zones / Under G.M. Shor's edition. — L.: Subsoil, 1987. — 166 p.
5. *Driver J.* Geochemistry of natural waters. — M.: World, 1985. — 439 p.
6. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. I. The general consideration // The International journal of the applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 82–88.
7. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. II. Homogeneous boundary conditions // The International journal of the applied and basic researches, 2010. — № 7. — P. 89–95.
8. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. III. Chemical reactions // The International journal of the applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 96–102.
9. *Kartashov E.M.* Analytical methods in the theory of heat conductivity of firm bodies. — M.: Higher school, 1985. — 480 p.
10. *Greenberg G.A.* About the solution of generalized problem of Stefan on liquid freezing, and also related problems of heat conductivity, diffusion and others // ISTF. — 1967. — Vol. 37. — № 9. — P. 1598–1606.
11. *Greenberg H.* An analysis of traffic flow // Operations Research. — 1959. — Vol. 7. — P. 79–85.
12. *Charny I.A.* Bases of underground hydraulics. — M.: The state technical edition, 1956. — 260 p.
13. *Khan-Lin-Dzho.* Substantiation of saturation degree of pieces and movement dynamics of solutions at compact alkaline extraction of metals // The abstract of the candidate dissertation. — M.: RGTU, 2000. — 26 p.
14. *Barenblatt G.I., Yesipov V.M., Ryjik V.M.* Movement of liquids and gases in natural beds. — M.: Bowels, 1984. — 208 p.
15. *Broadbend S.R., Hammerslay J.M.* Percolation processes. I. Crystals and mazes // Proc. Cambridge Philos. Soc. — 1957. — Vol. 53. — P. 629–641.
16. *Hammerslay J.M.* Origins of percolation theory // Ann. Isr. Phys. Soc. — 1983. — Vol. 5. — P. 47–57.
17. *Arnold V.I.* The theory of accidents. — M.: Editornaya URSS, 2007. — 136 p.
18. *Rubinstain A.* Problem of Stefan. — Riga: Zinatne, 1967. — 242 p.
19. *Olemskoy A.I., Kaznelson A.A.* Synergy of the condensed matters. — M.: URSS, 2003. — 336 p.
20. *Goden A.M.* Flotation. — M.: The state technical edition, 1959. — 358 p.

21. *Tursunbaeva A.K., Portnov V.S., Yurov V.M.* Thermodynamics of ore crushing at the compact alkaline extraction of metals. — P. 1–3 // Bulletin ENU of L.N.Gumileva, Naturally-engineering science series. — 2010. — № 4 (77). — P. 49–80.
22. Physical properties of rocks and minerals: the Directory geophysicist / Under N.B.Dortman's edition. — M.: Bowels, 1984. — 455 p.
23. *Rebinder P.A., Shrejner L.A., Zhivach K.F.* The hardness reducers at drilling. — M.: Publishing house AN of the USSR, 1944. — 232 p.
24. *Bershtejn V.A.* Mechanical hydraulic processes and durability of firm bodies. — L.: Science, 1987. — 318 p.
25. *Hochstein A.J.* A surface tension of firm bodies and adsorption. — M.: Science, 1976. — 256 p.
26. *Roldugin V.I.* Surface physical chemistry. — Dolgoprudnyy: The Publishing House «Intellect», 2008. — 568 p.
27. *Jurov V.M., Eshchanov A.N., Kuketaev A.T.* The measurement method of the surface tension of firm bodies // Patent RK. № 57691. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
28. *Jurov V.M., Portnov V.S., Puseeva M.P.* The measurement method of the surface tension and density of the surface conditions of dielectrics // Patent RK № 58155. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
29. *Jurov V.M., Portnov V.S., Puseeva M.P.* The measurement method of the surface tension of magnetic materials // Patent RK № 58158. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.

УДК 548.736.5

Использование физических свойств минералов для оценки запасов полезных ископаемых

Use of physical properties of minerals for an estimation of minerals stocks

Выжва С.А.¹, Юров В.М.², Портнов В.С.³, Рева М.В.¹

¹Киевский национальный университет им. Т.Г.Шевченко, Украина (E-mail: MVREVA@union.KIEV.UA);

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru);

³Карагандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Мақалада тепе-теңдіксіз термодинамика және скалярлық өрістердің аналогиясы әдістері қолданылған. Минералдардың физикалық қасиеттері мен термодинамикалық параметрлерді байланыстыратын формула табылды. Минералдардың физикалық қасиеттері мен оның кен орнының бірлік көлеміндегі құрамы арасында байланыс анықталды. Есеппен анықталған пайдалы қазбаның қоры барлау нәтижелерімен сәйкес келді. Оларды салыстыру теориялық және эксперименттік нәтижелердің үйлесімдігін көрсетті.

The methods of nonequilibrium thermodynamics and the method of analogies of scalar fields are used in the article. The formulas for relating of physical properties of minerals with their thermodynamic parameters are deduced. It is determined the link between physical properties of the mineral and its content into the volume unit of the deposit. Calculations are conducted for magnetic, electric, thermal and other properties of minerals. The calculated stocks of minerals of some deposits are compared with the explored reserves. The comparison shows the good agreement between the theoretical and experimental data.

Введение

Поиски большинства полезных ископаемых чаще всего ограничивались открытием месторождений по видимым ореолам рассеяния и другим визуально наблюдаемым поисковым признакам. Фонд таких «легко открываемых» месторождений быстро сокращается. Наряду с этим в последнее время становится очевидным наличие огромного количества так называемых «трудно открываемых» месторождений. Ориентировочные расчеты показывают, что общий фонд трудно открываемых месторождений по большинству полезных ископаемых во много раз превышает ресурсы легко открываемых месторождений. К этому нужно добавить, что запасы руд открытых и даже эксплуатируемых месторождений могут существенно превышать разведанные.

В связи с этим и ранее, и в настоящее время появляются работы, связанные с оценкой запасов полезных ископаемых как на региональном уровне, так и в мировых масштабах.

Количественная оценка прогнозных запасов полезных ископаемых в месторождениях — важнейшая проблема прикладной геологии. Важные работы в этом направлении принадлежат таким учё-