

УДК 622.775

**Е.И. Рогов, А.Е. Рогов****ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ  
И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ***Показаны достижения, результаты и перспективы развития основ теории геотехнологий и их приложения к практике добычи урана в Республике Казахстан.**Ключевые слова: геотехнология, подземное скважинное выщелачивание, полезные ископаемые, уран.*

**Р**еспублика Казахстан — горнодобывающее независимое государство, в недрах которого сосредоточены огромные запасы полезных ископаемых.

На сегодняшний период из недр подземным и открытым классическими способами добывается достаточное весомое в сравнении с мировой добычей количество полезных ископаемых. По самым последним данным мировой статистики эти объемы составляют для наиболее важных компонентов [11].

Добыча основных твердых полезных ископаемых в Казахстане в тон-

нах и килограммах для золота и серебра.

Из общего числа приведенных данных по объемам добычи полезных ископаемых только уран добывается с применением принципиально новой технологией — подземного выщелачивания через скважины, пробуренные с поверхности. Все остальные твердые полезные ископаемые добываются классическими горными технологиями с подземными и открытыми горными выработками.

Следует отметить, что часть золота и серебра добывается кучным выщелачиванием (КВ).

| №№<br>пп | Полезное<br>ископаемое | 2000 г.  | 2001 г.  | 2002 г.  | 2004 г.  | 2006 г.  |
|----------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.       | Хром, т                | 728545   | 874254   | 1019100  | 1018842  | 1449100  |
| 2.       | Медь, т                | 432200   | 470000   | 431700   | 473100   | 434100   |
| 3.       | Цинк, т                | 322100   | 344700   | 286283   | 286300   | 450000   |
| 4.       | Золото, кг             | 20000    | 25010    | 26000    | 22402    | 21805    |
| 5.       | Серебро, кг            | 637000   | 755000   | 786800   | 892100   | 810060   |
| 6.       | Кобальт, т             | 280      | 200      | 190      | 300      |          |
| 7.       | Титан, т               | 11300    | 11000    | 10800    | 12000    | 12700    |
| 8.       | Ванадий, т             | 1100     | 1000     | 900      | 850      | 1200     |
| 9.       | Асбест, т              | 233200   | 178400   | 235000   | 291100   | 314700   |
| 10.      | Барит, т               | 53000    | 50000    | 48000    | 45000    | 29000    |
| 11.      | Каменный<br>уголь, т   | 72429500 | 76000000 | 70600000 | 81400000 | 79404000 |
| 12.      | Уран, т                | 2052     | 2379     | 2936     | 3143     | 6225     |
| 13.      | Барит, т               | 330000   | 340000   | 300000   | 250000   | 120000   |
| 14.      | Нефть, т               | 30647900 | 35670000 | 50600000 | 57100000 | 67000000 |
| 15.      | Железо, т              |          |          | 11505000 | 13000000 | 15000000 |

### Теория проблемы создания адаптивных к среде геотехнологий

Классические горные технологии добычи твердых полезных ископаемых вот уже на протяжении сотен лет не претерпели каких-либо принципиальных изменений. Работы во всем мире ведутся по традиционной схеме: добыча полезного ископаемого, подготовка его к обогащению, обогащение и переделы до конечного продукта, например, металла. При постоянном обеднении месторождений, ухудшении горно-геологических условий их залегания, повышении глубин разработки себестоимость добытого полезного ископаемого нелинейно по экспоненте возрастает, растут затраты на обогащение и переделы. В этой ситуации конечный продукт становится весьма дорогим и слабо конкурентным на рынке. В связи с этим в мировой практике явно прослеживается тенденция перехода от классической горной технологии к физико-химическим геотехнологиям скважинной добычи полезных ископаемых без их обогащения, т.е. — получение конечного продукта [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Наиболее продвинутыми и освоенными в этом направлении являются четыре принципиально различных геотехнологий:

- подземного скважинного выщелачивания металлов, в частности урана [2, 4, 9, 10, 17, 18, 20];
- наземного кучного выщелачивания (КВ) [2, 9, 15, 16];
- скважинной гидродобычи полезных ископаемых [5, 6, 7];
- подземного выщелачивания металлов с сохранением частично классической горной технологии [1, 2, 9].

Любая геотехнологическая система (ГТС) функционирует в конкретной среде горнодобывающего предприятия (ГДП), включающей:

- массив горных пород, нарушенный горными работами;
- поверхность земли, включающие водные и воздушные бассейны в зоне влияния горных работ;
- коллектив людей.

Если среда благоприятная для данной конкретной ГТС, то она работает удовлетворительно и наоборот при агрессивной среде, особенно в сложном массиве горных пород, ГТС становится не работоспособной и не эффективной, тогда она погибает.

Исходя из теории взаимодействия систем  $S_1$  и  $S_2$  следует, что при пересечении на  $(0-T^*)$  параметров систем  $S_1$  и  $S_2$  в пространстве  $H^k$  имеем [8]:

$$\{S_1 \cap S_2\} = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)\}, \quad (1)$$

где  $u_j(t) \in H^k$ .

Нами доказано [1, 8], что взаимодействие каждой пары параметров  $u_j(t)$  из (1), принадлежащих одновременно системам  $S_1$  и  $S_2$ , может быть оценена величиной критерия адаптивности, вычисляемом в общем виде по формуле:

$$J_j = \int_{\Omega_1} [\psi(u_j) \cdot \int_{\Omega_2} \phi(u_j) du_j] du_j, \quad (2)$$

где  $\psi(u_j)$  — функция распределения плотности вероятности параметра  $u_j$  для  $S_2$  на  $(0-T^*)$ ;  $\phi(u_j)$  — то же самое для  $u_j$  системы  $S_1$  на  $(0-T^*)$ ;  $\Omega_1, \Omega_2$  — области интегрирования, определяемые для конкретных систем либо теоретически, либо экспериментально.

Из условия следует, что чем больше величина  $N$ , тем больше число частных критериев адаптивности (2), тем сложнее и дороже удерживать пересекающиеся параметры (1) в необходимых ограничениях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , исходя из регламентирующих условий.

Рассмотрим с указанных теоретических позиций последовательно классические технологии ведения горных работ подземным шахтным и открытым способами.

Поскольку в этих технологиях везде присутствуют люди — рабочие и инженерный персонал и технологии, взаимодействующие с нарушенным горными работами массивом горных пород, сложнейшие агрегаты, и системы управления, то число  $N$  здесь необозримо велико. Если даже разбить любой рудник на ряд взаимодействующих подсистем, то порядок  $N$  составляет несколько тысяч. Так только по шахтным вентиляционным сетям  $N$  может превысить тысячу [1]. Кроме того, с постоянным обеднением содержание металла в рудах и с увеличением глубин разработки на поверхность выдаются огромные объемы пород, которые существенно ухудшают экологическую обстановку в горнодобывающих регионах.

Совершенно очевидно, что бесшахтные способы добычи полезных ископаемых исключают присутствие людей в подземных условиях или в открытых горных выработках. Только это обстоятельство существенно снижает число пересекающихся параметров  $N$  и повышает надежность технологий, исключает катастрофические отказы и делает систему более эффективной [8].

При подземном скважинном выщелачивании металлов, кроме того появляется возможность извлекать их из очень бедных руд и не выдавать на поверхность земли какие-либо отходы [2, 9, 10, 17].

В технологиях скважинной гидродобычи также люди не присутствуют в подземных условиях, но на поверхность выдается только полезные для переработки руды или другие ископаемые, что существенно снижает объемы отходов, складываемых на земле [5].

Понятно также, что невозможно сразу быстро перейти на геотехно-

логические методы бесшахтной добычи полезных ископаемых. Этот переход будет эволюционным, постепенным, но неотвратимым, т.к. в противном случае не будут обеспечены основные экономические требования к горнодобывающим предприятиям — их рентабельность и прибыльность.

За последние 10 лет, начиная с 1999 года в РК весьма быстрыми темпами наращиваются объемы подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) урана и сопутствующих ему редких элементов (рений, осмий и др.). В этой связи был придан мощный импульс развития горных наук в Казахстане в области геотехнологии металлов. К настоящему времени создается в Казахстане самостоятельная школа ученых — геотехнологов ПСВ металлов (д.т.н. В.Г. Языкков, д.т.н., проф. А.Е. Рогов, академик НАН РК Е.И. Рогов). В этом направлении издано шесть фундаментальных монографии [8, 9, 10, 17, 18, 20], опубликовано в странах дальнего и ближнего зарубежья и в Казахстане более 200 научных статей, получено 36 патентов на новые технологии ПСВ металлов.

За период 1999—2008 годы проведено в Алматы пять международных конференции по проблемам геотехнологии урана с участием ведущих стран по добыче урана (Франция, Австралия, Канада, Россия, Узбекистан и др.).

По данным докладов, озвученных на 5-й международной конференции (сентябрь 2008 г.) Казахстан к 2012 году выйдет на первое место в мире по добыче урана в количестве 10000 т/год из 50000 т добываемых в мире. Это бурное развитие нового способа ПСВ урана требует быстрых решений целого комплекса

научных проблем, которые следует считать наиболее приоритетными в области развития горных наук в Республике Казахстан, а также форсированное и качественное решение задач в области подготовки инженерных кадров.

На наш взгляд, уже сегодня получены значительные теоретические и практически необходимые результаты в области ПСВ металлов. Эти важнейшие приоритеты по фундаментальным исследованиям следующие.

1. Гидродинамические расчеты сети скважин ПСВ металлов (урана) с учетом эффективной мощности —  $\overline{M}_3$ , приведенной при отсутствии нижнего и верхнего водоупоров.

2. Оптимизация схем вскрытия пластовых месторождений с учетом приведенной эффективной мощности —  $M_3$ , продуктивности пласта —  $\overline{m}_i$ , кг/м<sup>2</sup>.

3. Оптимизация напоров на закачных и откачных скважинах с учетом рабочих характеристик насосов  $\varphi(Q)$  и статических напоров подземных вод.

4. Расчет дебитов ЗС и ОС для различных схем вскрытия с учетом наложения плоскорадиального и линейного потоков ламинарной фильтрации жидкости в пористых средах.

5. Теоретическое обоснование основополагающего параметра  $f$  — отношения жидкого к твердому с учетом растекания растворов.

6. Математическое моделирование кинетики и гидродинамики ПСВ металлов и оптимизация расхода реагентов.

7. Теоретические обоснования оптимального бортового и минимально-рентабельного содержания урана в рудах инфильтрационных месторождений.

8. Оптимизация параметров, числа и последовательности отработки блоков по критерию прибыль.

9. Теоретические основы управляемых фильтрационных потоков при КВ металлов.

Получают дальнейшее развитие крупные блоки приоритетных прикладных исследований ПСВ металлов на перспективу:

1. Разработка автоматизированной системы гидродинамических расчетов сети скважин ПСВ металлов для несовершенных скважин (отсутствие водоупоров, растекание продуктивных растворов (ПР) в плане).

2. Разработка автоматизированной системы проектирования оптимальных схем вскрытия глубоких продуктивных горизонтов пластово-инфильтрационных месторождений урана для сложных условий.

3. Разработка критериев и методов оценки устойчивости стенок технологических скважин при ПСВ металлов с учетом прочности труб и горного давления.

4. Разработка автоматизированной системы расчета оптимальных напоров на закачных скважинах с учетом гидродинамики напорных вод и прочности трубоставов в скважинах.

5. Разработка блочной структуры систем автоматизированного проектирования ПСВ и КВ в режиме постоянной адаптации к изменяющимся условиям горной среды.

6. Создание автоматизированной системы оптимального управления процессами ПСВ урана в реальном масштабе времени по векторному критерию адаптации.

Следует особо подчеркнуть острую необходимость в подготовке инженерных кадров области геотехнологии металлов. К настоящему времени выпущено около 30 горных инженеров-геотехнологов, подготовку кото-

рых, включая лекции и практические занятия, проводятся нами на базе самых последних достижений и наших научных разработок в области геотехнологии.

Конечной целью стратегии развития горных наук является создание теории горных геотехнологии (ОГГТ) при разработке полезных ископаемых, которая постоянно должна развиваться и пополняться новыми фундаментальными знаниями о поведении породного массива в процессе взаимодействия его с технологическими подсистемами, о влиянии горнодобывающих предприятий (ГДП) на внешнюю среду, создание новейших компьютерных систем с целью оптимального адаптивного управления подсистемами ГДП, стабилизации их работы.

### **Заключение**

Следует особо отметить, что указанные приоритеты в области развития горных наук полностью соответствуют инновационной программе развития отраслей горнодобывающей промышленности страны.

На базе наших собственных результатов исследований выносятся для широкой горной общественности предложения по проведению научно-исследовательских работ, внедрению технологических регламентов, расчетных моделей процессов и подсистем горнодобывающих предприятий, включая открытые горные работы подземное скважинное выщелачивание, наземное кучное выщелачивание металлов и комбинированные геотехнологии.

Спектр выполняемых работ в области проектирования:

1. Определение оптимального бортового содержания металлов в полиметаллических и монометаллических рудах, включая уран.

2. Определение минимально-промышленного содержания металлов в рудах.

3. Обоснование оптимальных технологических схем проходки горных выработок комбайнами и с применением буровзрывных работ (технологические регламенты).

4. Обоснование оптимальных технологических схем ведения горных работ при добыче любых полезных ископаемых, включая нефть (технологические регламенты).

5. Прогноз катастрофических отказов: эндогенные пожары, горные удары, взрывы пылегазовоздушных смесей, внезапные выбросы угля и газа, загазование, затопление, пожары и т.д.).

6. Прогноз экологической надежности горнодобывающих предприятий при подземных горных работах.

7. Обоснование оптимальных технологических схем ведения буровзрывных работ, адаптивных к породному массиву (технологические регламенты).

8. Обоснование оптимальных технологических схем вскрышных работ, адаптивных к среде (технологические регламенты).

9. Обоснование оптимальных технологических схем ведения очистных работ, адаптивных к породному массиву (технологические регламенты).

10. Определение экологической надежности и экологического риска функционирования горнодобывающих предприятий в конкретной среде.

11. Определение оптимальных геотехнологических параметров и характеристик для ПСВ металлов, в которые входят:

- вид ячейки и её параметры;
- напоры и дебиты закачных и откачных скважин;

- время закисления и выщелачивания металлов из блоков при подземном скважинном выщелачивании металлов и из штабеля при кучном выщелачивании металлов с капельным орошением и с управляемыми фильтрационными потоками растворов;

- содержание металла в продуктивных растворах в функции от времени;

- расход реагентов в функции от времени;

- оптимальный размер куска рудной массы в штабеле кучного выщелачивания металлов;

- оптимальная высота штабеля кучного выщелачивания металлов;

- себестоимость, капитальные затраты, прибыль и т.д.

При уже заданных (реализованных) конструктивных параметрах и характеристиках горно-добывающих предприятий и при изменяющихся условиях для всех технологий (подземные горные работы, открытые горные работы, подземное скважинное выщелачивание и кучное выщелачивание металлов) производится обоснованный расчет оптимальных по ряду критериев (включая критерии адаптации) траектории поведения любых подсистем

горно-добывающих предприятий в реальном масштабе времени по пунктам 1÷11.

В этой связи Институт горного дела им. Д.А. Кунаева в лице лаборатории основ теории технологии добычи полезных ископаемых может выполнить любую заказную научно-исследовательскую работу по любой из перечисленных выше проблем в кратчайшие сроки и с максимальной гарантией качества её на уровне не ниже мировых стандартов.

Все обоснования и расчеты производятся на базе самых последних достижений и результатов в области горных наук и основываются на оптимизационных математических моделях и моделях взаимодействия технологических систем горно-добывающих предприятий со стохастической внешней средой.

Исполнители гарантируют получение реальной прибыли, повышение надежности и безопасности горных работ, включая экологию, от оптимизации параметров и характеристик горно-добывающих предприятий при проектировании, особенно за счет адаптации их к среде на интервале функционирования.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогов Е.И., Грицко Г.И., Вылегжанин В.Н. Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной шахты. — Алма-Ата, 1979. — 208 с.

2. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. — М.: Изд. МГУ, 2001. — С. 655.

3. Перельман А.И. Геохимия. — М.: Высшая школа, 1979.

4. Аренс В.Ж., Брюховецкий О.С., Хчелян Г.Х. Скважинная гидродобыча угля. — М.: МГРА, 1995.

5. Бабичев Н.И. Технология скважинной гидродобычи полезных ископаемых. М.: МГРИ, 1981.

6. Фролов П.А., Либер Ю.В. Опытные промышленные испытания скважинной гидротехнологии на титаноциркониевых месторождениях. Горный журнал, № 1, 1995.

7. Бабичев Н.И., Николаев А.Н. Скважинная гидравлическая технология — основа высокоэкономичных малых предприятий по добыче твердых полезных ископаемых. — Горный журнал. — № 4. — 1996.

8. Рогов Е.И., Рогов С.Е., Рогов А.Е. Начала основ теории технологии добычи полезных ископаемых. — Алматы, 2001. — С. 224.

9. Язиков В.Г., Забазнов В.Л., Петров Н.Н., Рогов Е.И., Рогов А.Е. Геотехнология

урана на месторождениях Казахстана. — Алматы, 2001. — 442 с.

10. *Рогов Е.И., Язиков В.Г., Рогов А.Е.* Математическое моделирование в горном деле (Геотехнология металлов). — Алматы, 2007. — С. 214.

11. *WORLD — MJNJNG — DATA WELT — BERGBAU — DATEN L. Weber, G. Zsak* Volume/ Heft 19, Vienna/ Wien 2005, 251 p.

12. *Горные науки. Освоение и сохранение недр земли.* Под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого. — М.: Издательство Академии горных наук, 1997. — 478 с.

13. *Язиков В.Г., Абакумов А.А.* Уранодобывающая промышленность Республики Казахстан. «Мировой рынок ядерного топлива». Тезисы докладов XX ежегодной встречи международной организации урановых производителей. — Сиэтл, США, 1993. — С. 51—64.

14. *Язиков В.Г.* Урановые ресурсы Республики Казахстан. «Уран и ядерная энерге-

тика». — Лондон: Изд. Уранового института, 1993. — С. 132—137.

15. *Водолазов Л.И., Дрободенко В.П., Лобанов Д.П., Малухин Н.Г.* Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. — М.: МГГА, 2000. — 300 с.

16. *Толстов Е.А.* Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. — М.: МГУ, 1999. — 313 с.

17. *Язиков В.Г., Рогов Е.И., Забазнов В.Л., Рогов А.Е.* Геотехнология металлов. Алматы, 2005. — 457 с.

18. *Рогов А.Е., Рысланов Н.Б.* Математические основы геотехнологий. — Алматы, 2007. — 368 с.

19. *Рогов А.Е.* Имитационное математическое моделирование. — Алматы, 2007. — 96 с.

20. *Рогов А.Е., Жатканбаев Е.Е.* Кинетика подземного скважинного выщелачивания урана. — Алматы, 2009. — 203 с. **ГИАБ**

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

*Рогов Евгений Иванов* — доктор технических наук, профессор, академик НАН РК,

*Рогов Андрей Евгеньевич* — доктор технических наук, профессор, академик Международной экологической академии, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева.



#### **MINING WORLD-2012**

---



**Ольга Киреева («Горная книга»), Светлана Тимченко (Sandvik)**