

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ОТКРЫТЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра разработки месторождений полезных ископаемых

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе



А.К.Порцевский, Г.А.Катков

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
(физико-химическая)

**Гриф УМО (№ 51-79/6 от 09.09.2004.). Зарегистрировано в
Федеральном агентстве по образованию (№ 5370 от 16.11.2005.).**

для студентов специальностей
130402 (090100) «Маркшейдерское дело»
130403 (090500) «Открытые горные работы»
**130404 (090200) «Подземная разработка месторождений
полезных ископаемых»**
130406 (090400) «Шахтное и подземное строительство»
**130302 (080300) – «Поиски и разведка подземных вод и
инженерно-геологические изыскания»**
**130203 (080700) – «Технология и техника разведки месторождений
полезных ископаемых»**

Москва 2004 г.

Рабочая программа и контрольные задания

В учебном плане МГОУ, утверждённом в 2001 г. предусмотрены следующие специальные дисциплины для заочного обучения студентов:

Специальность	Дисциплина	Очный курс, часы	Количество часов, Лекц / лаб / практ	Контр. работы	Зачёт, экзамен
090100	Био- и геотехнология (ПКО ¹) VI курс	60	12/4	-	Зач.
	Био- и геотехнология (СКО ²) III курс	70	8/4	К _о Р	Зач.
090200	Геотехнология (ПКО) IV курс	130	12/8	К _о Р	Зач.
	Геотехнология (СКО) III курс	130	12/4/4	К _о Р	Экз.
090400	Геотехнология (ПКО) IV курс	130	12/8	К _о Р	Зач.
	Геотехнология (СКО) III курс	130	12/4/4	К _о Р	Экз.
090500	Геотехнология (ПКО) IV курс	130	12/8	К _о Р	Зач.
	Геотехнология (СКО) III курс	130	12/4/4	К _о Р	Экз.

В курсе «Геотехнология» студенты изучают **физико-химические способы** щадящей добычи полезных ископаемых непосредственно с земной поверхности или используя существующие подземные выработки. Полезное ископаемое извлекается в виде жидкости, расплава или газа, тем самым полезное ископаемое подвергается некоторому обогащению непосредственно в месте залегания, в твёрдом же виде добывается руда, соль или уголь лишь традиционными способами. При извлечении руды геотехнологическими методами практически отсутствует перемещение до обогатительной фабрики огромных объёмов отбитых кусков горных пород, содержащих лишь в малых долях полезный металл.

В соответствии с учебным графиком студенты-заочники должны **самостоятельно** проработать теоретический курс по указанным ниже учебникам и учебным пособиям, выполнить контрольные работы. В период установочной и экзаменационной сессии студенты **очно** прослушивают лекции, проводят лабораторные и практические занятия с преподавателем и сдают контрольные работы, зачёты, экзамены.

Рабочая программа

1. Направление исследований. Цель геотехнологии, как науки.
2. Глоссарий терминов.
3. Особенности геологического залегания.
4. Особенности добычи. Рентабельность и безопасность.
5. Объекты приложения методов. Классификация методов.

¹ ПКО – полный курс обучения - 6 лет

² СКО – сокращенный курс обучения - 4 года

6. Необходимые и специфические сведения о горной среде.
7. Растворение. Термическое воздействие. Гидравлическое разрушение. Подъём полезного ископаемого на земную поверхность.
8. Продукты геотехнологии – пульпа, рассол, раствор, расплав, газ.
9. Методы переработки продуктов – осаждение, сгущение, коагуляция и флокуляция, флотация, цементация, гальвано-извлечение, сорбция, десорбция.
10. Биосорбционная флотация, жидкостная экстракция.
11. Технологические процессы геотехнологии – разведка, вскрытие, подготовка, производство рабочих реагентов, очистная выемка, доставка, подъём, управление горным давлением, транспорт, переработка, рекультивация.
12. Оборудование предприятий, добычное оборудование.
13. Чановое и кучное выщелачивание.
14. Подземное внутримассивное выщелачивание.
15. Классификация систем разработки по способу подготовки месторождения.
16. Области применения подземного и кучного выщелачивания, геотермальной энергии.
17. Опыт выщелачивания урана в подземных камерах и в зонах обрушения

Контрольная работа

Контрольная работа выполняется студентом самостоятельно заранее или в период сессии в виде описания, пояснительной записки, без конкретных расчётов. Работа оформляется либо на отдельных листках бумаги формата А4 либо в тонкой тетради в клетку. Задание по вариантам, соответствующим последней цифре индивидуального шифра зачётки, приведено в таблице. Все необходимые сведения для выполнения контрольной работы приведены в рекомендованных по курсу литературных источниках.

Таблица

Задание на контрольную работу (К₀Р)

В а р и а н т										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Особенности добычи, геологии месторождения. Рентабельность и безопасность	Объекты приложения методов, их классификация. Области применения геотехнологии	Необходимые и специфические сведения о горной среде. Цель геотехнологии, как науки	Растворение. Термическое воздействие. Гидравлическое разрушение.	Продукты геотехнологии – пульпа, рассол, раствор, расплав, газ. Как они получают	Методы переработки – осаждение, сгущение, коагуляция и флокуляция	Методы переработки – флотация, цементация, гальвано-извлечение, сорбция, десорбция	Технологические процессы – разведка, вскрытие, подготовка. Их особенности	Технологические процессы – очистная выемка, доставка, подъём, управление горным давлением. Добычное оборудование	Классификация и суть систем разработки	

Основные положения

Введение

Основные области исследований, которыми занимается геотехнология: растворение солей, выщелачивание металлов, газификация каустобиолитов, выплавка серы, битума, вязкой нефти, скважинная гидродобыча полезных ископаемых (песков), извлечение глубинного тепла Земли.

Целью геотехнологии, как науки, является создание методов добычи и оптимизация параметров технологии, выбор вида рабочих реагентов, способов их доставки к рудному телу, управление технологическим процессом, доставка полезного ископаемого на поверхность и его дальнейшая переработка.

Основы геотехнологии заложили: Д.И.Менделеев, В.И.Вернадский, А.Е.Ферсман, Н.В.Мельников, Н.И.Бабичев, В.П.Небера, В.Ж.Аренс, Водолазов Л.И., Малухин Н.Г. и многие другие.

Масштабы добычи минерального сырья, системы производства

По мере роста промышленности возрастает потребность в добыче минерального сырья. Так, в б.СССР масштабы добычи сырья на человека составляли: в 1968 г. – 20 т/чел, в 1978 – 27, в 1988 – 39 и в 2000 г. - 125 т/чел. Для добычи потребного количества чёрных и цветных металлов в 30 млрд. т необходимо извлечь из-под земли 150 млрд. т руды и переместить около 450 млрд. т пустой породы. Такие темпы роста и масштабы добычи поражают и пугают своими *последствиями для экологии* биосферы. Снизить воздействие человека на природу может переход в горном деле от открытых систем производства к закрытым системам.

Открытая система производства представляет собой карьер или рудник или шахту, с обогатительной фабрикой и гидрометаллургическим заводом. Все они загрязняют воздух, вызывая кислотные дожди, гибель флоры и фауны, лёгочные заболевания у людей, потребляют огромное количество дефицитной пресной воды (например, для производства 1 т стали требуется 295 м³ воды, меди – 5000, алюминия – 1500, резины – 2400, пластмассы – 3000, капрона – 5000 м³ воды на 1 тонну), складывают на больших площадях пустую породу, твёрдые и жидкие хвосты обогащения.

Система отличается крайне низким выходом готовой продукции на единицу использованных минеральных ресурсов и огромными площадями изувеченной природы. Состояние технологий очистки не позволяет надеяться на самоочищение и разбавление отходов в водных и воздушных бассейнах. Выход – в переходе к полукрытым и закрытым системам производства.

Полукрытая система производства предусматривает избирательное использование отходов, организацию частичного оборота воды в замкнутом контуре, попутное извлечение некоторых ценных компонентов из минерального сырья.

Более полная очистка дорогими комплексами вредных выбросов в воздух и в воду возвращает отходы на повторное извлечение из них полезных веществ, а внедрению этих комплексов весьма способствуют жёсткие законы об установле-

нии штрафов за выбросы (в США, например, за каждый килограмм выброшенной в атмосферу серы штраф составляет в различных штатах от 2 до 20 центов).

Закрытая система производства основана на: а) комплексной переработке минерального сырья во множество полезных продуктов, суммарный вес которых иногда выше веса изначального сырья за счёт использования реагентов и вспомогательных материалов; б) извлечении ценных компонентов из твёрдых, жидких и газообразных отходов и выбросов; в) утилизации пустых пород в удобрения и строительные материалы (кирпич, черепица, керамическая плитка, пигментные красители и т.д.); г) *замене подземной и открытой добычи руды, её переработки на обогатительной фабрике на прямую переработку сырья подземным и кучным выщелачиванием*, в том числе используя биологическое, электрохимическое и сорбционное выщелачивание.

Глоссарий наиболее употребляемых в геотехнологии терминов³:

Адсорбция – поглощение вещества из раствора твёрдым поглотителем (сорбентом, ионитом, ионообменной смолой).

Адгезия – слипание поверхностей двух разнородных твёрдых тел или прилипание выпадающих осадков на твёрдой поверхности внешнего тела.

Амальгамизация – растворение металла в ртути, применяется при извлечении благородных металлов из руды и концентрата.

Анион – отрицательно заряженный ион.

Анод – положительно заряженный электрод.

Аэрация – пропускание пузырьков воздуха через слой раствора для улучшения растворения металлов.

Бактерии – микроскопические одноклеточные организмы, размножающиеся делением и используемые при выщелачивании компонентов из руд и для осаждения растворённых компонентов из продуктивных растворов.

Восстановление – процесс присоединения электронов атомом или ионом (противоположен окислению).

Восстановитель – атом или ион, отдающий электрон.

Гель – дисперсная система, обладающая некоторыми свойствами твёрдых тел (упругость, прочность, способность сохранять форму).

Гидролиз солей – такое взаимодействие их с водой, при котором образуется кислота и основание, обычно выпадающее в осадок.

Гидрометаллургия – извлечение металлов в готовую продукцию из руды и концентратов различными водными растворами.

Депрессирование – подавление особыми веществами растворения некоторых металлов при селективном растворении или сорбции многокомпонентного сырья.

Десорбция – удаление поглощённых веществ из частичек сорбента или ионита.

Диализ – освобождение коллоидных и органических растворов от присутствия в них минеральных веществ за счёт пропускания их через полупроницаемую мембрану.

³ Водолазов Л.И., Дробаденко В.П., Лобанов Д.П., Малухин Н.Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. - М.: изд. МГГА, 1999, 300 с.

Диспергирование – тонкое измельчение твёрдых или жидких продуктов в какой-то среде.

Диссоциация – распадение молекул на несколько более простых ионов.

Ингибитор – вещество для замедления скорости химической реакции (противоположно катализатору).

Инфильтрация – просачивание растворов через инородное тело под действием сил гравитации.

Ион – электрически заряженная частица, образующаяся при потере (ион с плюсом) или приобретении избыточных электронов атомами (ион с минусом).

Иониты – твёрдые, нерастворимые вещества, способные обменивать свои ионы на ионы внешней среды.

Катализатор – вещество для повышения скорости химической реакции (противоположно ингибитору).

Катион – положительно заряженный ион.

Катиониты – твёрдые, нерастворимые вещества, способные обменивать свои катионы на ионы внешней среды

Катод – отрицательный электрод.

Коллоидный раствор – дисперсная система, промежуточная между истинными растворами и грубодисперсными суспензиями, эмульсиями. Золь – жидкий коллоид, гель – студнеобразный коллоид.

Мембрана – тонкая пограничная структура, проницаемая для некоторых веществ.

Микробы – общее название всех микроорганизмов (бактерий, водоросли, простейшие организмы).

Окисление – процесс отдачи электронов (противоположен восстановлению).

Перколяция – просачивание раствора через значительный слой раздробленной руды, используется при кучном выщелачивании и при обогащении при скорости просачивания от 2 до 8 см/час. Перколяторы – специальные чаны с подающим рабочий раствор и отводящим продуктивный раствор трубопроводом.

Поляризация атома – смещение орбиты электронов оболочки атома относительно атомного ядра под действием внешнего электрического поля.

Поляризация диэлектрика – относительное смещение противоположно заряженных частиц, входящих в состав атома или молекул диэлектрика, под действием внешнего электрического поля.

Потенциал – величина, характеризующая силовое поле (электрическое, ионное и пр.) в данной точке.

Пульпа – жидкость с находящимися в ней твёрдыми частицами минерального сырья.

Регенерация – превращение отработанных продуктов в исходные, для повторного использования.

Сегрегация – разделение горной массы по гранулометрическому составу или объёмному весу или содержанию полезного компонента.

Сорбент – поглотитель вещества.

Сорбция – поглощение твёрдыми телами металлов из растворов и пульпы.

Суспензия – взвесь или дисперсная система, состоящая из двух фаз (жидкой и твёрдой) и где твёрдые частицы распределены в жидкости.

Флотация – удаление заряженных осадков (ионов), например, пузырьками воздуха в колонках.

Хвосты обогащения – раздробленный продукт переработки руды с низким содержанием полезного компонента, направляется в отстойники для хранения или захоронения.

Экстракция – поглощение вещества из раствора жидкими поглотителями, чаще всего органического типа.

Электролиз – разложение вещества при прохождении через него постоянного электрического тока.

Электрофорез – перемещение заряженных коллоидных частиц под действием внешнего электрического поля.

Таблица 1

Объекты приложения методов геотехнологии

Метод	Освоенные месторождения	Исследуемые месторождения
Подземное растворение	Каменная, калийная соль	Бишофит, сода, глауберова соль
Подземное выщелачивание	Медь, золото, уран	Марганец, сульфидная медь, свинец, цинк, никель, титан, фосфориты, известняк
Подземная газификация	Каменный и бурый уголь	Сера, битум, горючие сланцы, мышьяк, ртуть
Скважинная гидродобыча	Фосфориты, строительные пески, железо, золото	Титан, золото, алмазы, уголь, кассетерит, фосфориты, бокситы
Добыча из подземных вод	Йод, бор, уран, стронций	Шахтные воды рудников, нефтепромыслов
Извлечение тепла Земли	Природные парогидротермы (гейзеры)	Тепло «сухих» горных пород

Благодаря геотехнологии становится **рентабельной** добыча полезных ископаемых на забалансовых месторождениях и участках существующих рудников, на отвалах бедной руды, хвостохранилищах, из шахтной воды.

В США, например, по сравнению с традиционным горным способом (открытая и подземная разработка с переработкой руды на заводе) при равной производительности по урану способ подземного выщелачивания (ПВ) считается экономически более выгодным оттого, что требует меньших капитальных вложений, меньшего периода ввода предприятия в эксплуатацию, исключает строительство рудоперерабатывающего завода. При этом удельные капитальные затраты на 1 кг урана при подземном выщелачивании составляют 17,6 долл., при традиционном способе – не ниже 44 долл., а стоимость 1 кг готовой продукции – соответственно 26,2 и 68 долл.

При ПВ извлекается не только уран содержанием от 0,01% (при традиционной добыче бортовое содержание втрое выше), но попутно извлекаются редкие и редкоземельные элементы, на которые отмечается большой дефицит на мировом рынке (особенно высока цена на скандий).

В настоящее время бурно развивается **микробиологическая геотехнология** (бактериальное выщелачивание с помощью микроорганизмов), однако исследова-

тельские разработки не используются в промышленных условиях пока не решена задача получения культур, устойчивых к неблагоприятным факторам среды и работающие в экстремальных условиях.

Сегодня химики в лаборатории *могут извлечь из руды любой полезный компонент*, но сложность именно в промышленном извлечении, поэтому важен не только поиск реагентов, катализаторов и химических технологий, но и решение всех сопутствующих процессов – бурение, доставка реагентов к рудному телу и доставка полезного ископаемого на поверхность, управление технологическим процессом... В горнодобывающей промышленности наибольший экономический эффект приносят новшества, привнесённые в технологию не добычи руды, а именно обогащения её, т.е. на стадии превращения сырья в товарную продукцию, именно поэтому геотехнология, сочетающая как добычу, так и переработку сырья на месте залегания в продукт, имеет такую *высокую рентабельность*.

Для решения проблемы извлечения из недр сырья необходима разработка критериев оценки и анализа месторождений с точки зрения геотехнологии. Оборудование должно отвечать требованиям: точность, простота и надёжность, безотходность, малая энергоёмкость, высокая производительность и малая себестоимость... **Рудоносные пласты желательно, чтобы были водопроницаемыми**, а подстилающие пласты - с естественным или искусственным (барражным – см. системы разработки при скважинном выщелачивании) водоупорным основанием.

Геология

Поскольку все рудные месторождения, так или иначе, формировались водными растворами, то важно увидеть взаимосвязь этих вод с типами месторождений (см. таблицу 2). Причинами рудообразования могут быть физические и химические факторы. Типичные физические причины – изменения температуры и давления, гравитационная дифференциация вещества. Химические причины – вещественные взаимодействия, происходящие в изобарно-изотермических условиях.

Наибольшее значение для геотехнологических методов имеют *гидравлические свойства горного массива*. Фильтрационные свойства обеспечиваются пустотностью, проницаемостью и способностью смачиваться различными жидкостями. Бывает общая и **динамическая пористость** горного массива, динамическая учитывает лишь те пустоты, по которым может фильтроваться жидкость, проницаемость этих пор зависит от степени открытости поровых каналов, формы и размера частиц, сложности и извилистости пути течения. Физическое свойство пород пропускать через себя жидкость и газ характеризуется **коэффициентом проницаемости K_n** (дарси) и **коэффициентом фильтрации K_f** (м/сутки):

$$K_f = \frac{K_n \rho_{ж}}{\mu},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/см³; μ – вязкость жидкости.

Коэффициент фильтрации численно равен скорости фильтрации жидкости при **напорном градиенте** (значение потери напора, т.е. давления, на единицу пути фильтрации жидкости), равном единице. В геотехнологии проницаемость обязательно проверяется опытными нагнетаниями и откачками воды в скважинах.

Взаимосвязь основных генетических типов рудообразующих растворов
и рудных месторождений⁴

Растворы, участвующие в рудообразовании	Гидросфера	Поверхностная	Подземная			
	Генетические серии	Экзогенная			Эндогенная	
	Гидравлические системы	Открытые безнапорные	Закрытые элизионные	Открытые инфильтрационные	Закрытые термоэлизионные	Закрытые магматические
	Генетические типы вод	Поверхностные иловые	Захороненные (седиментационные)	Инфильтрационные	Возрожденные (метаморфогенные)	Перворожжденные (ювенильные)
Месторождения	Генетические серии	Экзогенная			Эндогенная	
	Отношение оруденения к вмещающей породе	Сингенетичное	Эпигенетичное			Сингенетичное
	Генетические типы вод	Осадочные седиментационно-диагенетические	Гидрогенные		Метаморфогенные	Магматогенные
	Элизионные		Инфильтрационные			
		Гидротермальные				

К гидравлическим также относятся свойства пород вмещать и удерживать воду – **влагоёмкость**, отдавать воду путём свободного вытекания – **водоотдача**, входить в молекулярное взаимодействие с жидкостями – **смачиваемость**, концентрировать на своей поверхности различные вещества из газов и жидкости – **адсорбция**, поглощать эти вещества – **абсорбция**.

Тепловые свойства горных пород лежат в основе геотехнологических методов перевода твёрдых веществ в жидкую и газообразную фазу с увеличением температуры: плавление, испарение, кристаллизация, конденсация, сублимация (способность вещества переходить напрямую из твёрдой фазы в газовую). Тепловые свойства характеризуются знакомыми каждому параметрами - теплопроводностью, теплоёмкостью, тепловым расширением и сжатием.

⁴ Подземное выщелачивание полиэлементных руд. Под ред. Н.П.Лаверова. - М.: изд. АГН, 1998, 448 с.

Электромагнитные свойства имеют значения для обогащения сырья на фабриках, но практически не используются на стадии добычи. Механические свойства, прежде всего прочность и крепость имеют значения для расчётов параметров бурения закачных и откачных скважин.

Успех геотехнологии зависит от **физико-геологических факторов** залегания полезных ископаемых. Внутренние факторы определяют способность химических элементов переходить в подвижное состояние, к внешним факторам относятся параметры среды – температура, давление, кислотность среды. Химический состав, плотность и вязкость подземных вод определяют скорость и площадь распространения по залежи рабочих реагентов, условия питания и разгрузки вод определяют размер утечек рабочих растворов: близость участков питания и разгрузки подземных вод существенно затрудняют выщелачивание. Так как комплекс природных факторов, только благотворно влияющих на добычу, не встречается, то **горный массив необходимо заранее подготовить к добыче**, устранив некоторые неблагоприятные факторы.

Требования методов ФХГ к физико-геологической среде:

1) **к качеству полезного ископаемого** – минимальное промышленное содержание (оно существенно ниже, чем при традиционной подземной или открытой добыче), минимальная величина промышленного извлечения полезного компонента (извлечение здесь значительно выше, чем при традиционной выемке), проницаемость горного массива и т.д.;

2) **к горно-геологическим условиям залегания** - максимальная глубина залегания (возможность бурения скважин с земной поверхности), физические свойства горных пород, минимальная мощность залежи (определяет точность бурения скважин), минимальная мощность непроницаемых подстилающих и покрывающих пород, гидрогеологические условия, угол падения пласта, тектонические нарушения, степень неоднородности, изменчивость показателей и т.д.

На основе технико-экономического обоснования, с учётом требований ФХГ, определяются кондиции месторождения, одна из основных - **продуктивность пласта**, т.е. извлечение полезного компонента с 1 м² площади.

Для принятия решения о способах добычи необходимо собрать сведения об условиях залегания месторождения, о горной среде (см. табл. 3 и 4).

Таблица 3

Характеристика горной среды и способы её изучения

Характеристика рудного тела и вмещающих пород	Способ определения
<i>Состояние:</i> положение залежи, мощность, обводнённость, устойчивость массива	Бурение разведочных скважин, гидрогеологические и геофизические исследования
<i>Состав:</i> минеральный, химический, гранулометрический, состав и рН пластовых вод	Лабораторные исследования
<i>Свойства:</i> проницаемость, размываемость, вязкость, пластичность, размокаемость, влагоёмкость, влагоотдача, хрупкость, крепость, модуль Юнга	Натурные и лабораторные исследования

Зависимость геотехнологических методов от характеристики горной среды

Геотехнологические свойства ПИ	Характеристика месторождения			
	Сплошные крупные скопления ПИ	Залежи содержат рассеянные включения ПИ		
		проницаемые	слабопроницаемые	
		Пористые и рыхлые	Трещиноватые и кавернозные	Связные и скальные
1.Способность образования газовых систем (гореть, возгораться, разлагаться)	Уголь, известняк	Битум, нефть	Сера, известняк	Сланцы, реалгар, киноварь, сидерит
2.Способность образования жидких систем: а) плавлением	Бишофит, карналлит, асфальтит	Битум, тяжёлая нефть	Сера, озокерит, битум	Сера, битум
б) растворением в воде	Каменная, калийная соль, бишофит	сода	нет	Нет
в) химической реакцией	уголь	Уран, полиметаллы, железо, озокерит, марганец, золото	полиметаллы	Уран, мышьяк, медь, никель, свинец, цинк, сланцы
3.Способность отдавать тепло Земли	Сухие горные породы	нет	Природные парогидротермиты	нет
4.Способность к образованию подвижных механических гидросмесей (плывунов)	Уголь, песок	Россыпные месторождения металлов, фосфоритов, янтаря	нет	Бокситы, марганец, железные и урановые руды
5.Подземные воды	рассолы	нет	Растворы (йода, брома...)	нет

Неоднородность ПИ и вмещающих пород, как по площади, так и по вертикали, не позволяет достоверно оценить лабораторными методами проницаемость, водоотдачу, фильтрационные и другие свойства, влияющие на подземную технологию, поэтому эти свойства обязательно надо перепроверять натурными исследованиями.

При изучении гидравлических свойств горного массива обращают особое внимание на оценку пористости и проницаемости среды. Для этого в натуральных условиях производят опытные нагнетания и откачки воды в скважинах.

Тепловые свойства ПИ имеют значение при воздействии на массив, с целью перехода ПИ из твёрдой в жидкую или газообразную фазу – плавление, испарение, сублимация (способность переходить из твёрдой фазы в газообразную), кри-

сталлизация и конденсация (способность переходить из газообразной фазы в твёрдое или жидкое состояние).

К электрическим свойствам относятся – электропроводность, электрическая прочность, поляризация.

К магнитным свойствам относятся – магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность.

К механическим свойствам относятся – прочность, твёрдость, вязкость, упругость, пластичность, плотность и др.

Особенностью геологоразведочных работ является объём и детальность изучения физико-химических свойств массива с химическим, минералогическим, литологическим, физическим и технологическим **опробованием полезного ископаемого** – опробуется огромное количество кернов всех скважин и производятся промышленные испытания геотехнологии и её режима на опытной установке в естественных условиях, причём гидрогеологические исследования при нагнетании и откачки раствора являются первостепенными.

В результате геологоразведочных работ составляется паспорт и геолого-технологическая карточка на каждую добычную скважину, технологический план разрабатываемого участка и разрез к нему, геолого-маркшейдерские планы и разрезы, гидрогеологические планы и разрезы.

Паспорт добычной скважины содержит: сведения о конструкции скважины, технологии бурения и выходе керна, сроках проходки, полное геологическое описание с выделением всех типов пород, результаты опробования, данные о физико-химических свойствах, о трещиноватости, результаты гидрогеологических исследований, акты на заложение, закрытие, обсадку, цементацию и контрольные замеры скважины.

Геолого-технологическая **карточка** скважины, прилагаемая к её паспорту, наглядно (в табличной форме) отражает основные геологические и технологические показатели скважины.

На геолого-маркшейдерских и гидрогеологических планах и разрезах наносятся все скважины разрабатываемого участка с их характеристиками, контуры эксплуатационных блоков с запасами полезного ископаемого и количеством извлечения его, т.е. производится учёт запасов и их движения.

При геологоразведочных работах должны быть выявлены:

- форма, размеры и строение залежи, глубина залегания, тектонические особенности, содержание ПИ, его запасы, мощность, состав минералов, изменчивость качественных и количественных характеристик;
- особенности покрывающих и подстилающих пород;
- гидрогеологические параметры водоносных горизонтов;
- газоносность залежи, химический состав газов, их взрываемость;
- экономика и природные условия района месторождения.

Классификация методов

физико-химической геотехнологии (ФХГ)

Эти методы основаны *на переводе полезного ископаемого (ПИ) в подвижное состояние*, осуществляемых на месте его залегания, посредством химических, тепловых, массообменных, бактериальных и гидродинамических процессов (см. табл. 5).

Классификация методов ФХГ
по процессам перевода ПИ в подвижное состояние

Подвижное состояние ПИ	Способы перевода ПИ в подвижное состояние		
	Физические	Химические	Комбинированные: физико-химические, химико-бактериальные
Газообразное	Воздействие температуры, давления (сублимация, перегонка, отбор тепла)	Окисление, разложение (сжигание, обжиг)	Химические реакции с участием физических полей, бактериального воздействия
Жидкое (расплав, раствор)	Воздействие температуры, давления (плавление, перегонка, нагрев)	Выщелачивание и растворение с образованием молекулярных растворов	Растворение, выщелачивание и гидрогенизация с участием физических полей, бактериального воздействия
Гидромеханическая смесь	Гидро-пневмо-разрушение	Растворение связующего вещества	Диспергирование поверхностно-активными веществами, химическими реагентами, физическими полями, бактериями

Химические методы основаны:

а) на подземном растворении водой каменной, калийной, магниевой и урановой солей, сульфатов и сульфаткарбонатов, соды, буры;

б) на подземном выщелачивании растворами кислот – серной (целестин, азурит, куприт, некоторые урановые минералы), соляной (сфалерит, молибденит, уранит) и азотной (аргентит, висмутин, сфалерит), щелочей (бокситы, антимонит); растворами солей – сернистого натрия, хлоритого железа, цианистого калия (золото...);

в) на подземной термохимической переработке ПИ сжиганием (подземная газификация угля, сланца, нефти) и обжигом (пирит, халькопирит, антимонит).

Физические методы основаны:

а) на подземной выплавке (серы, озокерита) и возгонке (реальгара, киновари);

б) на разрушении рыхлых пород струёй воды (скважинная гидродобыча и др.) и превращение их в пльвуны вибрацией или другими методами.

Комбинированные методы основаны на одновременном использовании как химических, так и физических процессов, например, выщелачивание металлов в электрическом или магнитном поле, а также бактериальное выщелачивание.

Растворение ПИ – сложный процесс, известны два вида:

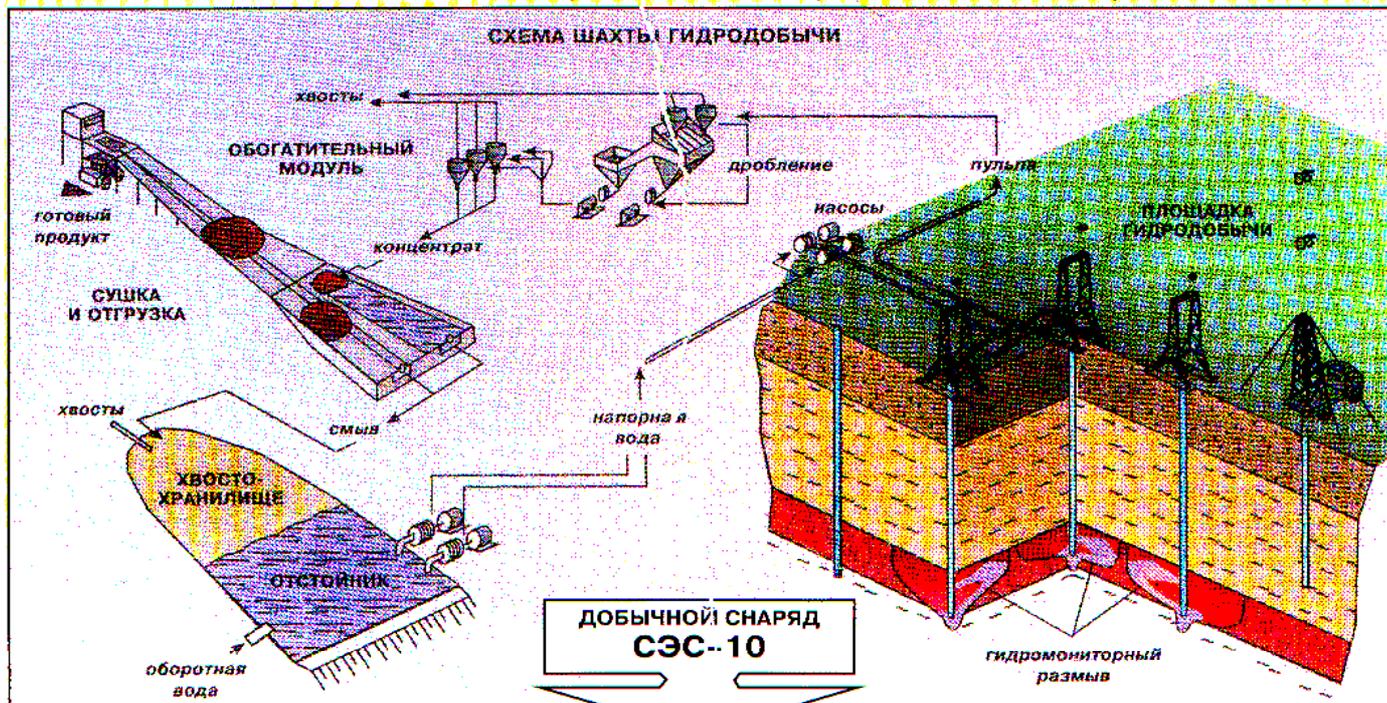
- растворение без нарушения химического состава ПИ (в результате диффузии и межмолекулярного взаимодействия) лежит в основе скважинной добычи растворимых в воде солей – галита, сильвинита, бишоферита и др.;

- растворение с изменением данного химического состава вещества и переводом его в раствор методом выщелачивания кислотами (серная, соляная, азотная, фосфорная, сернистая) и растворами солей (соды, сернистого натрия, сернокислотных солей щелочных металлов).

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГИДРОДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ЧЕРЕЗ СКВАЖИНЫ

Зарекомендовала себя в практических приложениях к добыче разнообразных видов сырья как в России, так и за рубежом.

В течение последних 15 лет сотрудники фирмы "Геотехнология" накопили большой опыт в проектировании, изготовлении гидродобычного оборудования и его использовании в различных операциях добычных работ.

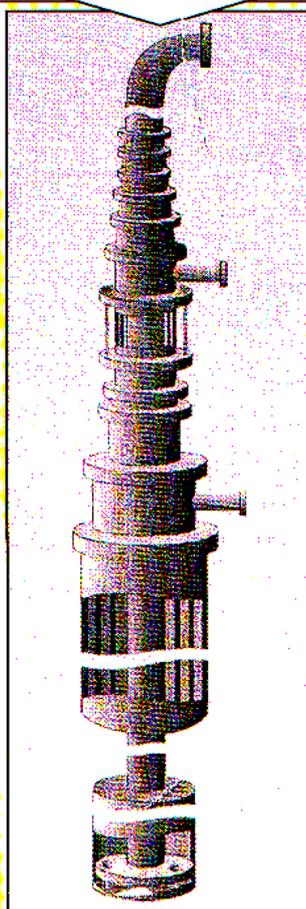
**Fe**

Скважинное гидравлическое опробование на железорудных месторождениях КМА (1980е годы). Объем проб, поднятых с глубин до 800 м, составил 1000 т и более.

Опытная добыча запланирована на 1996 г.
Опытная добыча на Яковлевском месторождении КМА запланирована на 1996 г. (совместный проект с институтом "Центрогипроруда").

TiZr

Опытно-промышленная гидродобыча на титан-цирконовых россыпях Западной Сибири, 1990е годы.
Опробование на Туганском, Лукояновском, Жана-Аркалыкском, Унечском месторождениях.

**Опытная добыча алмазов**

на месторождении им. Ломоносова Архангельской обл., 1994-96. Проектируется скважинная добыча алмазов на трубках Индии.

Опытная добыча

на Орловском месторождении Казахстана, 1992 г. Проектируется добыча лигнитов в Индии и антрацитов в Приморье, 1995-96 г.

Скважинная гидродобыча кварцевых песков

на месторождении Колубара, Югославия, 1990е годы.

Интенсификация процессов подземного выщелачивания

на урановых месторождениях Средней Азии (Шевченко, Навои), 1980е годы.

Термическое воздействие на горные породы изменяет агрегатное состояние вещества в форму, удобную для доставки ПИ к скважине и на поверхность (в виде жидкости или газа), а также физические свойства (например, уменьшение вязкости), улучшая условия фильтрации ПИ к добычным скважинам. Нагрев горного массива осуществляется теплоносителями (дымовые газы, пар, горячая вода), воздействием электромагнитного поля, окислением химически активных минералов, за счёт тепла, выделяемого при ядерной реакции.

При **гидравлическом разрушении** происходит нарушение связей в горной породе и образование взвеси – из воды и твёрдых частиц. Разрушают породы гидромониторной струёй, желательна пульсирующей, вызывающей вибрацию массива.

Подъём минерального сырья из недр в самом общем случае может производиться за счёт энергии нагнетания активного реагента (например, при растворении солей), или за счёт энергии сжатого воздуха, газа (например, при выплавке серы), или погружными насосами и нагнетательными эрлифтами. Процесс подъёма продуктивного раствора (флюидов) происходит за счёт затрачивания определённой энергии нагнетания, баланс же энергии добычной скважины таков:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} + \mathcal{E}_{\text{в}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 \quad ,$$

где $\mathcal{E}_{\text{пл}}$ – пластовая энергия (естественный гидростатический напор); $\mathcal{E}_{\text{в}}$ – энергия нагнетания, вводимая в скважину; \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 – соответственно энергия, затрачиваемая на трение, подъём и вынос жидкости из скважины.

Физико-химические **основы геотехнологических процессов** - перевода твёрдого полезного ископаемого в жидкую или газообразную фазу, движения растворов от скважины к скважине, подъёма на поверхность – заключаются в изменении химического состава, физических свойств ископаемого.

В скорости протекания химической реакции важное значение имеет концентрация реагирующих веществ и температура среды (особенно для процесса газификации угля). Процесс растворения, выборочного выщелачивания полезного ископаемого – очень сложный **химический процесс**, в основе его могут лежать: а) обменные реакции (обмен ионами) при взаимодействии окислов или солей металла с кислотами; б) окислительно-восстановительные реакции – передача электронов от одного вещества к другому; в) реакции с образованием комплексных соединений, например, цианирование руд. Сводные таблицы реагентов, разлагающих минералы, приведены в Приложении к настоящему пособию. **Концентрация реагентов** должна иметь разумные границы – обеспечивать оптимальную скорость растворения, невысокую стоимость и не оказывать необратимо негативного влияния на окружающую среду.

Нагрев горных пород приводит к уменьшению вязкости среды и улучшению фильтрации растворов от скважин к скважинам, он осуществляется путём закачивания в скважины дыма, пара, горячей воды, а также за счёт тепла, выделяемого при окислительной реакции химических реагентов или, например, при взрыве.

Процессы сдвижения и гидроразрыва

Управление горным давлением в технологическом процессе добычи осуществляется выбором параметров технологии, системой расположения, закладки выработок, порядком, временем отработки и т.д. Специфика изучения устойчивости недр для нужд геотехнологии можно вести (на неосвоенных месторождениях)

только через скважины путём ультразвуковой или электромагнитной локации или наблюдая за сдвижением поверхности. **Безлюдная выемка позволяет снизить запас устойчивости целиков и выработок**, но показатели сдвижения земной поверхности должны быть не выше нормативных значений, независимо от методов извлечения руды из недр.

Гидравлический разрыв пласта – один из способов создания фильтрационных каналов в горном массиве, по которым затем будет нагнетаться химически активный реагент. Он создаёт путём нагнетания воды в пласт под большим давлением. Гидроразрыв часто используется при добыче нефти, газа, серы, сланцев, и его можно использовать везде для повышения фильтрационных свойств массива, создания в нём трещин.

В процессе **гидравлического разрушения** происходит нарушение связей в глинистых и рыхлых песчаных породах. Вода взвешивает частицы породы, уменьшает внутреннее трение, и вся масса приобретает свойства пловуна - перемещаться в направлении фильтрационного потока. При взрывном встряхивании, вибрировании и других механических воздействиях водонасыщенные пески, супеси и суглинки способны терять внутренние связи, расплываться и течь по направлению движения воды. Высоконапорное гидравлическое воздействие⁵ (ВГВ) на горный массив увеличивает производительность технологических скважин, создаёт непроницаемые экраны, протяжённые коллекторы, дегазацию угольных месторождений, используется при подземной газификации углей, извлечении геотермальной энергии, для создания ёмкостей подземного захоронения радиоактивных отходов. В скважину под большим давлением закачивается вязкая жидкость, которая раскрывает старые и создаёт новые трещины и полости, для удержания трещин в раскрытом состоянии в них закачивается песок либо другой расклинивающий материал, не препятствующий фильтрации жидкости. Контакты между зёрнами в результате ВГВ теряют старые структурные связи и возникают новые (в расчётах они представляются как пружинки с малой жёсткостью), практически не препятствующие сквозному фильтрационному потоку.

Другой вариант ослабления структурных связей – достигается добавлением в водонасыщенные породы поверхностно-активные вещества (**ПАВ**) с высокой способностью к смачиванию, такой же эффект можно получить, используя микроорганизмы, разлагающие своими экскрементами цементирующее вещество слабосвязных пород. Гидромониторной струёй практически можно разрушить породы любой крепости, но применяют этот метод при добыче песков, супесей, глинистых песчаников, алевролитов и реже при разработке угля, аргиллитов, мергелей, сланцев, известняковых песчаников.

Движение рабочих агентов и продуктивных растворов осуществляется за счёт гидродинамического градиента давления, гидростатического напора, конвективных (температурных), гравитационных и диффузионных сил. В пограничном слое двух фаз (на границе твёрдого вещества и жидкости) происходит межмолекулярная диффузия (она зависит от сил поверхностного натяжения), а далее раствор протекает по порам, подталкиваемый давлением жидкости. **Поверхностное натяжение** – это свободная энергия единицы поверхности жидкости и зависит от

⁵ Научный отчёт «Методика расчёта режима образования горизонтальных экранов в слабосцементированных средах, насыщенных поровой жидкостью». Руководитель темы К.Н.Кошколда. М.: ВНИПИпромтехнологии, 1987.

величины полярности двух фаз, и чем сильнее по полярности отличаются друг от друга соприкасающиеся фазы вещества, тем больше будет поверхностное натяжение на границе их раздела. Вода – наиболее полярная жидкость, воздух менее полярен. С ростом температуры и гидравлического давления межмолекулярные связи слабеют, и уменьшается поверхностное натяжение, т.е. растёт способность к *смачиванию*. Чтобы отделить продуктивный флюид от породы (удерживаемый поверхностным натяжением), необходимо преодолеть силы прилипания – этому способствует напор жидкости или применение *ПАВ* и гидрофилизаторов, повышающих смачиваемость рабочего агента. *Капиллярные силы* и силы гидравлического сопротивления, зависящие от скорости потока и вязкости флюидов, препятствуют движению флюидов, и чем меньше диаметр пор и ниже трещиноватость, тем выше сопротивление. При этом величина перепада давления, необходимая для преодоления капиллярных сил, тем больше - чем меньше размер порового канала и чем больше поверхностное натяжение.

Сдвигения. Геотехнологические методы подразделяются по **степени влияния горного давления**, на две группы. Первая группа – методы селективной выемки, когда извлекаются из недр от 1% (выщелачивание) до 15-20% объёма пород, тогда горное давление не приводит к обрушениям и сдвигения, хотя при подземной выплавке серы, газификации угля - ослабленный скелет пород может разрушиться и учёт сдвижений необходим. Вторая группа – методы валовой выемки продуктивного пласта, когда остаётся выработанное пространство, заполненное или газами, жидкостью или обрушенными породами; в этом случае учёт горного давления и сдвижений обязателен. Лишь при скважинной гидродобыче разрушение межкамерных целиков горным давлением способствует добыче песков. Используя *гидравлический разрыв* избыточным давлением жидкости - можно добиться хрупкого разрушения пород, расширить природные и образовать новые трещины в массиве, тем повысить дебит добычных газовых и нефтяных скважин, повысить зону растворения выщелачиваемой руды. В США примерно в 40% скважин на газо- и нефтедобыче применяется гидроразрыв.

Продукты физико-химической геотехнологии:

- **водные пульпы**, получаемые при скважинной гидродобыче рыхлых песчано-глинистых отложений, угля, янтаря, алмазов, золота, минералов чёрных и цветных металлов (соотношение жидкого к твёрдому от 3 до 10 к одному);
- **рассолы** скважинного подземного растворения водой NaCl , KCl , Na_2CO_3 и других водорастворимых солей, например, соли магния, лития;
- **продукционные растворы** подземного и кучного выщелачивания урана, меди, золота и других металлов растворами кислот, щелочей и солей;
- **расплавы**, получаемые при скважинной подземной выплавке серы, озокерита горячей водой, парой;
- **газы** от подземной газификации угля, серы, подземной возгонки ртути, сурьмы и других легколетучих компонентов.

Переработка полученных в результате растворения, выщелачивания растворов проводится сорбционно-экстракционными методами, цементацией, химическим осаждением.

Сводка неорганических реагентов, разлагающих минералы приведена в таблицах 1 и 2 (см. Приложение к данному пособию).

Методы переработки продуктивных растворов:

- **химическое осаждение** металлов (меди, урана, других цветных металлов) с использованием, например, извести, аммиачной воды, сернистым натрием, сероводородом, солями карбонатов или сульфатов;
- **сгущение** и фильтрование путём перемешивания и отсасывания диафрагмовым насосом через фильтры густые осадки (сгуститель);
- **коагуляция и флокуляция** – образование химических осадков из катионно-анионных электролитов или с использованием водорастворимых катионно-анионных полимеров в электрическом поле;
- **флотация** заряженных осадков (ионов) пузырьками воздуха в колонках;
- **цементация** - осаждение заряженных ионов на поверхности некоторых заряженных металлов (железо, цинк, медь, магний, алюминий и др.);
- **гальванохимическое извлечение**, то же что и цементация, но с использованием гальванопар (железо-кокс, алюминий-кокс, железо-медь);
- **сорбция** – осаждение металлов на синтетических и природных ионнообменниках-сорбентах: полимерные смолы (катиониты и аниониты);
- **десорбция** – промывка сорбента кислотами или щелочами.

Таблица 6

Способы удаления металлов из растворов

Металлы	Способы флотации	Металлы	Способы флотации
Ag	Ионная	Cu	Ионная
As(III)	Сорбционно-коллоидная	Cu	Осадительная
As(V)	Сорбционно-коллоидная	Cu	Сорбционная
As(V)	Сорбционная	Ge	Ионная
Au	Ионная	Ge	Сорбционно-коллоидная
Au	Сорбционная	Ni	Ионная
Cd	Ионная	Pb	Сорбционно-коллоидная
Cd	Биосорбционная	Pb	Осадительная
Cd	Биосорбционная	Pb	Сорбционная
Co	Ионная	Zn	Ионная
Cr(III)	Осадительная	Zn	Осадительная
Cr(VI)	Ионная	Zn	Сорбционная
Cr(VI)	Сорбционная	Zn	Сорбционная

Биосорбционная флотация – удаление из растворов тяжёлых металлов (наилучшие результаты с кадмием), с помощью микроорганизмов: бактерии, грибки, дрожжи, водоросли и активный ил.

Жидкостная экстракция – извлечение металлов (медь, уран, золото) из водных растворов с помощью органических растворов: фосфорсодержащие кислоты, аммониевые основания, керосин.

Оборудование предприятий: а) для сооружения скважин; б) для производства рабочего реагента; в) для поверхностного обслуживания скважин; г) для добычи и подъёма продукта; д) для транспортирования первичной переработки про-

дуктов добычи на поверхности; е) для контроля за технологическими процессами (АСУ).

Добычное оборудование бывает двух типов: а) для отделения от массива и доставки полезного компонента к скважине (перфорированные трубы, гидромониторы, скважинные нагреватели, вибраторы, излучатели); б) для подъёма его на поверхность (подъёмники, эрлифт с компрессором, гидроэлеваторы, погружные насосы, обсадные трубы).

Таблица 7

Технологические процессы геотехнологии

Процессы, операции	Цель, способы осуществления
Эксплуатационная разведка	Уточнение физико-химической обстановки руды и пород, гидрогеологических параметров скважин, уточнение контура, распределения запасов,
Вскрытие	Бурение, оборудование добычных скважин
Подготовка	Прокладка подъездных дорог, сети электроснабжения, участковых трубопроводов, насосных
Производство рабочих реагентов	Обеспечение бесперебойной доставки к скважинам необходимых реагентов
Очистная выемка, доставка, подъём	Перевод полезного компонента в подвижное состояние, управление закачкой реагентов и выдачей продукта на поверхность
Управление горным давлением	Контроль земной поверхности и управление сдвижением горных пород
Транспорт	Гидротранспортирование добытого продукта на фабрику и на склад
Переработка и складирование	Переработка добытого продукта на фабрике, размещение в хранилищах отходов и концентратов продукта
Рекультивация	Восстановление ценности поверхности земли

Главные *требования к вскрытию* месторождения скважинами: высокая скорость и степень механизации бурения скважин, обсадки трубами.

Обычное буровое оборудование – модернизированный станок СБШ для бурения скважин глубиной до 400 м, диаметр скважины зависит от конструкции её оборудования, обычно не более 320 мм.

При бурении и закачных и откачных скважин часто используется глинистый буровой раствор, который застывает непроницаемой коркой толщиной 3-12 мм на стенках, что, к сожалению, снижает приёмистость (дебит) скважин, особенно закачных, на 70-80%. Поэтому разработан специальный пневмоимпульсный способ разрушения этой корки (кольматанта): в скважину опускают пневмоизлучатель⁶, который испускает акустические импульсы определённой частоты и амплитуды.

⁶ Толстов Е.А. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. - М.: изд. МГГУ, 1999, 314 с.

Классификация систем разработки по способу подготовки месторождения

Класс	Название системы разработки	Технологическая схема
I	Скважинами-камерами	Отдельными скважинами
		Сдвоенными скважинами
II	Взаимодействующими скважинами	Рядами
		Ячейками
III	Скважинами и подземными выработками	Скважинами с поверхности и выработками
		Выработками и скважинами из них
IV	Традиционная	Орошение магазина
		Орошение отработанных блоков
V	Кучное выщелачивание	Орошение кучи
		Орошение слоями

Области применения подземного выщелачивания: месторождения в сильно обводнённых и неустойчивых осадочных породах, руды зон окисления сульфидных месторождений, забалансовые участки, глубокозалегающие залежи с бедной рудой, отвалы и хвостохранилища.

Скважинное выщелачивание (см. рис. 1)

Уран и сопутствующие ему элементы (молибден, рений, селен, ванадий, скандий, иттрий, некоторые лантаноиды) выщелачиваются **сернокислотным** (H_2SO_4 – серная кислота) или, реже в СНГ и чаще в США, **бикарбонатным** (бикарбонат аммония или натрия с окислителем – перекисью водорода) способом. В кислотной среде из «пустых» вмещающих пород попутно вымываются в раствор элементы - алюминий, кальций, магний, марганец, никель, кобальт, железо, фосфор, цинк, медь частично свинец, ниобий, бериллий, кадмий (при снижении щелочного барьера – до $pH=6$), а также ванадий, индий, хром, галлий, торий, стронций, барий, радий (при снижении до $pH=1$). При бикарбонатном же выщелачивании происходит лишь ничтожное вымывание свинца, меди, кадмия, бериллия. Интенсивность бикарбонатного выщелачивания, например, урана в 1.5-3 раза ниже сернокислотного, но является более экологически чистым способом и используется лишь на карбонатных рудах.

Расстояние между рядами закачных и откачных скважин колеблется от 10 до 50 м в зависимости, главным образом, от проницаемости рудовмещающих пород.

Основные природные условия:

- ширина рудных залежей и глубина их залегания от поверхности;
- мощность рудовмещающих пластов;
- коэффициенты фильтрации рудных залежей и подстилающих пород;
- морфология рудных залежей;
- состав руд и пород;
- тип раствороподъёма;
- отношение числа откачных скважин к закачным в эксплуатационном блоке.

Обычно закачные скважины сооружают *безнапорными* с приёмистостью 2-5 м³/сут, а *откачные* – *высоконапорными* с дебитом до 10-15 м³/сут, поэтому желательно на одну откачную скважину иметь две-три закачные.

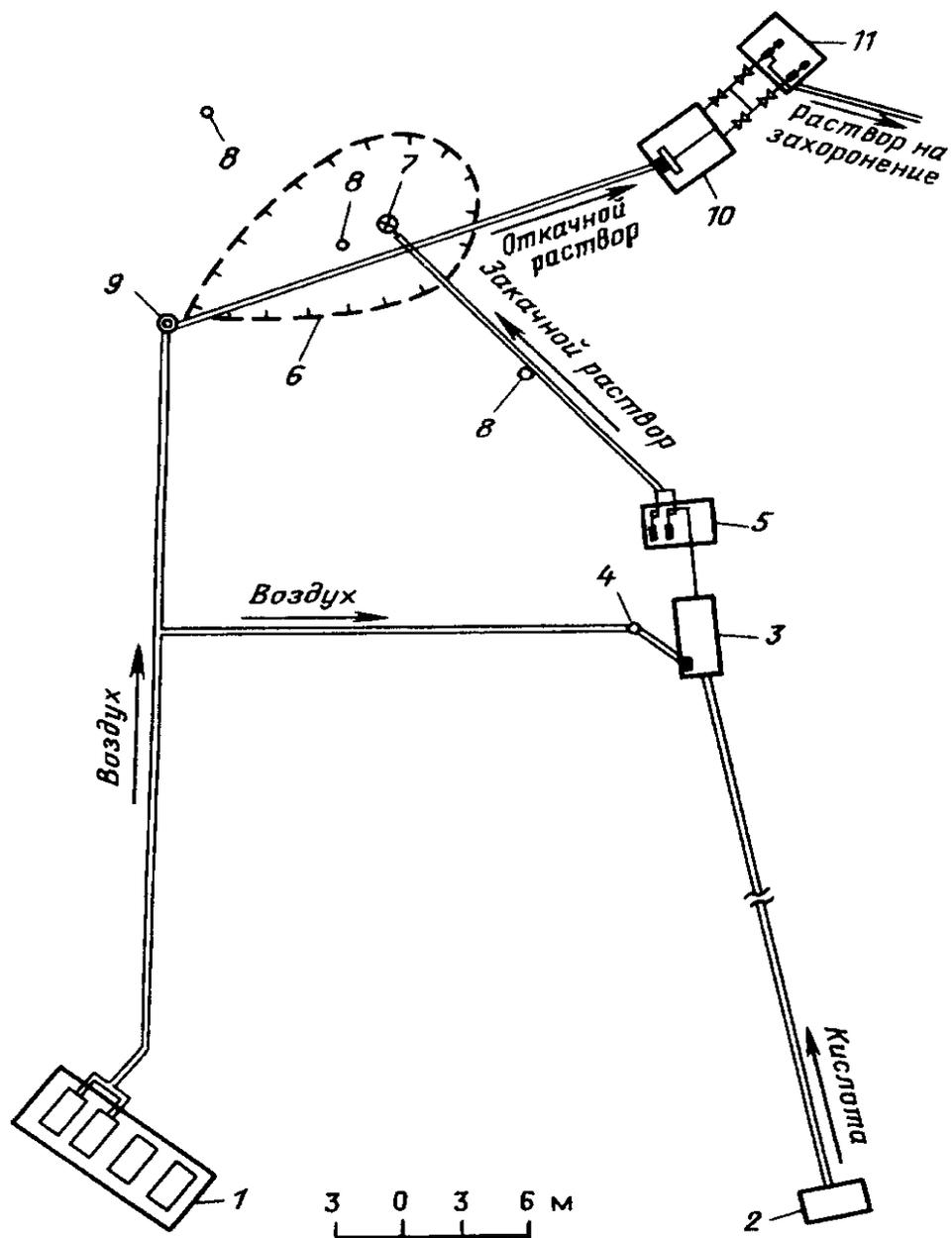


Рис. 1. План и технологическая схема двухскважинного геотехнологического опробования:

1 – дизельная и компрессорная; 2 – склад кислоты; 3 – кислотосмеситель; 4 – скважина водоснабжения; 5 – насосная закачных растворов; 6 – контур выщелачивания; 7 – закачная скважина; 8 – наблюдательные скважины; 9 – откачная скважина; 10 – сборная ёмкость; 11 – насосный узел откачных растворов

Системы разработки скважинного подземного выщелачивания

1. Рядные системы разработки (см. рис. 2)

- однорядная для отработки узких в плане (до 50 м) рудных тел, залегающих на глубине до 300 м;
- многорядная продольная или поперечная для отработки рудных залежей шириной 50-150 м и более 150 м;
- многорядная блочная для отработки рудных залежей с исключительно сложной конфигурацией.

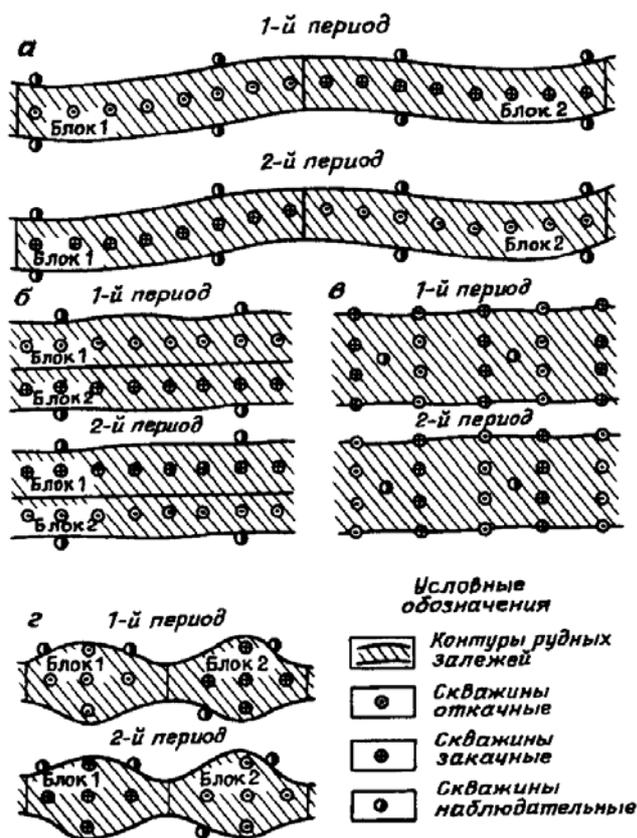


Рис. 2. Рядные системы разработки:

а – однорядная; б – многорядная продольная; в – многорядная поперечная; г – многорядная блочная

Особенности:

- отработка залежей с любым коэффициентом рудоносности;
- наблюдательные скважины по периферии залежи служат для фиксирования появления продуктивного раствора, после чего начинается его откачка;
- сначала в скважины закачивается рабочий раствор, например, в течение 15-20 суток, затем из них же откачивают продуктивный раствор, например, в течение 30-40 суток.

2. Этажные системы разработки (см. рис. 3)

- с однорядным совмещённым этажным расположением скважин для отработки узких в плане (до 50 м) рудных тел, залегающих до глубины 300 м;
- с квадратным совмещённым этажным расположением скважин для отработки рудных тел шириной более 50 м и мощностью более 15 м, залегающих на глубине до 300 м;
- с прямоугольным этажным расположением скважин для отработки рудных тел шириной более 50 м и мощностью 10-15 м.

Особенности:

- применяется при большой разнице коэффициентов фильтрации руды и пород;
- малоэффективна при наличии в залежи глинистых пропластков и при небольшой мощности самой залежи (до 10-15 м).

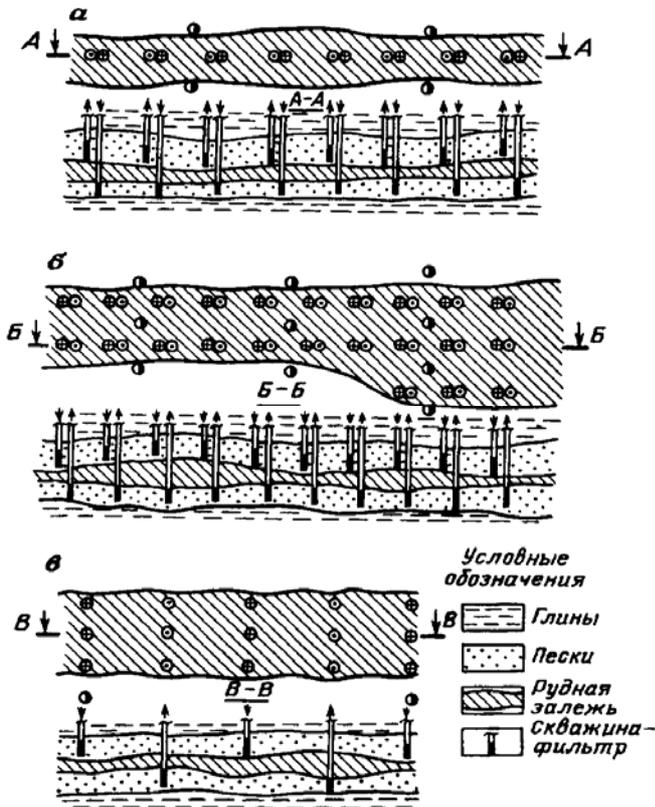


Рис. 3. Этажные системы разработки:
 а – с однорядным совмещённым расположением скважин; б – с квадратным совмещённым расположением скважин; в – с прямоугольным расположением скважин

3. Прямоугольные системы разработки (см. рис. 4)

- с продольным расположением скважин для отработки залежей шириной от 50 до 200 м;
- с поперечным расположением рядов скважин для отработки залежей шириной более 200 м;
- с опережающей отработкой краевых участков широких залежей (более 300 м) с низкими коэффициентами фильтрации руды и пород до 5-6 м/сут;
- с опережающей отработкой центральных участков широких залежей (более 300 м) с большими коэффициентами фильтрации руды и пород и при подаче рабочих растворов в недра под высоким давлением.

Особенности:

- обычно на каждую откачную скважину приходится по две закачные;
- все скважины расположены в вершинах прямоугольников, ромбов.

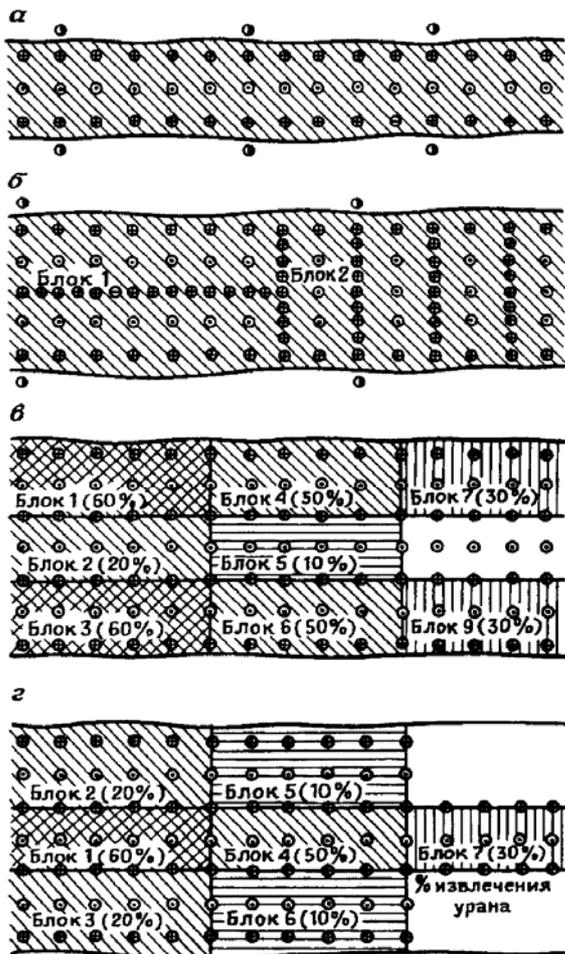


Рис. 4. Прямоугольные системы разработки:

а – с продольным расположением скважин; б – с поперечным расположением скважин; в – с опережающей обработкой краевых участков; г – с опережающей обработкой центральных участков

4. Ячеистые системы (см. рис. 5)

- трёхгранная (четырёхскважинная) с отношением числа откачных скважин к закачным менее 1:1;
- четырёхгранная (пятискважинная) с отношением числа откачных скважин к закачным около 1:1;
- шестигранная (шестискважинная) с отношением числа откачных скважин к закачным более 1:2;
- шестигранная с дополнительными закачными скважинами (тринадцатискважинная) с отношением числа откачных скважин к закачным не менее 1:5.

Особенность: обычно на каждую откачную скважину приходится по две-три и более закачных.

5. Барражные системы разработки (см. рис. 6)

Особенности:

барражные системы изначально предназначались для ограничения растекания продуктивного раствора за пределы рудной залежи – созданием вертикальных и горизонтальных барьеров путём бурения специальных барражных скважин, в которые нагнетались твердеющие растворы на основе цемента, гудрона, воска и т.п. Эти способы нагнетания существенно удорожали добычу и теперь почти не применяются, а завесы создаются рядами откачных скважин или гидрозавесой с отдельными закачными и откачными скважинами.

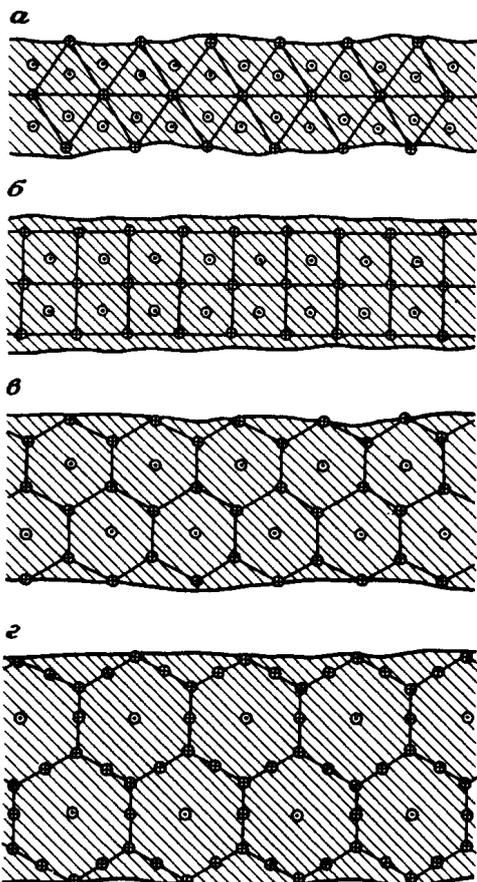


Рис. 5. Ячеистые системы разработки:

а – трёхгранная; б – четырёхгранная; в – шестигранная; шестигранная с дополнительными закачными скважинами

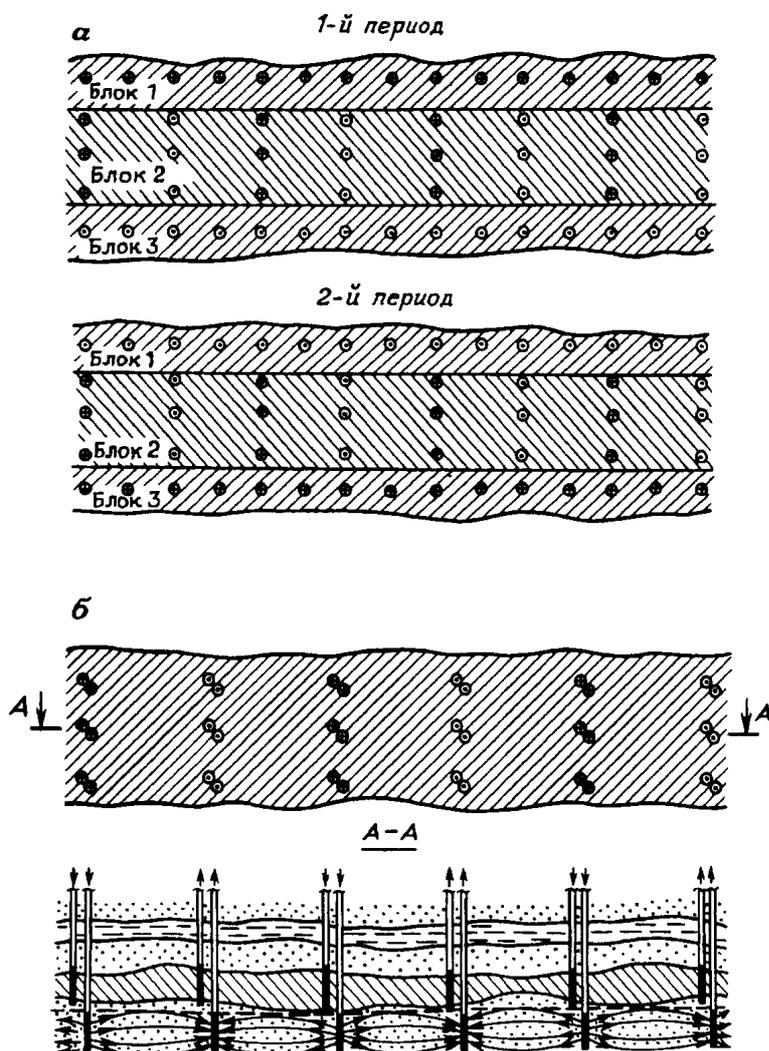


Рис. 6. Барражные системы разработки:

а – с созданием по периметру залежи цепочки однорядных откачных скважин; б – с созданием горизонтальных гидрозавес в подстилающем пласте

6. Комбинированная система разработки – сочетание разных систем разработки.

Подъём продуктивных растворов по скважинам

Может осуществляться: гидроэлеваторами, погружными насосами и эрлифтами.

Принцип действия **гидроэлеватора** (водоструйной установки) основан на выталкивании продуктивного раствора потоком жидкости, закачанной в скважину с поверхности под давлением до 5 атм, желательнее, чтобы эти жидкости не растворялись друг в друге. При подземном выщелачивании не может применяться вода из-за недопустимого разбавления продуктивного раствора, а использование рабочего раствора может значительно снизить эффективность откачки.

Погружные насосы должны быть коррозионно-стойкими в кислотной среде, безотказными и не должны сильно нагревать продуктивный раствор, также должна быть надёжная защита силового кабеля.

Принцип действия **эрлифта** такой же, как у гидроэлеватора, только в скважину подаётся под давлением не жидкость, а воздух (см. рис. 7). Эрлифт может использоваться в любых условиях и в любой агрессивной среде. Эрлифты различаются по месту расположения воздуховода в скважине, ведь давлением воздуха можно и закупорить скважину, снизить поступление в неё раствора, поэтому воздуховод расположен выше глубины погружения скважины. Для того, чтобы эрлифт заработал, необходимо иметь давление на компрессоре, превышающее давление столба жидкости от места ввода воздуховода до уровня её в подъёмной трубе (статический уровень раствора). Производительность эрлифта зависит от диаметра подъёмной трубы и от скорости подачи воздуха (расход воздуха) в смеситель эрлифта.

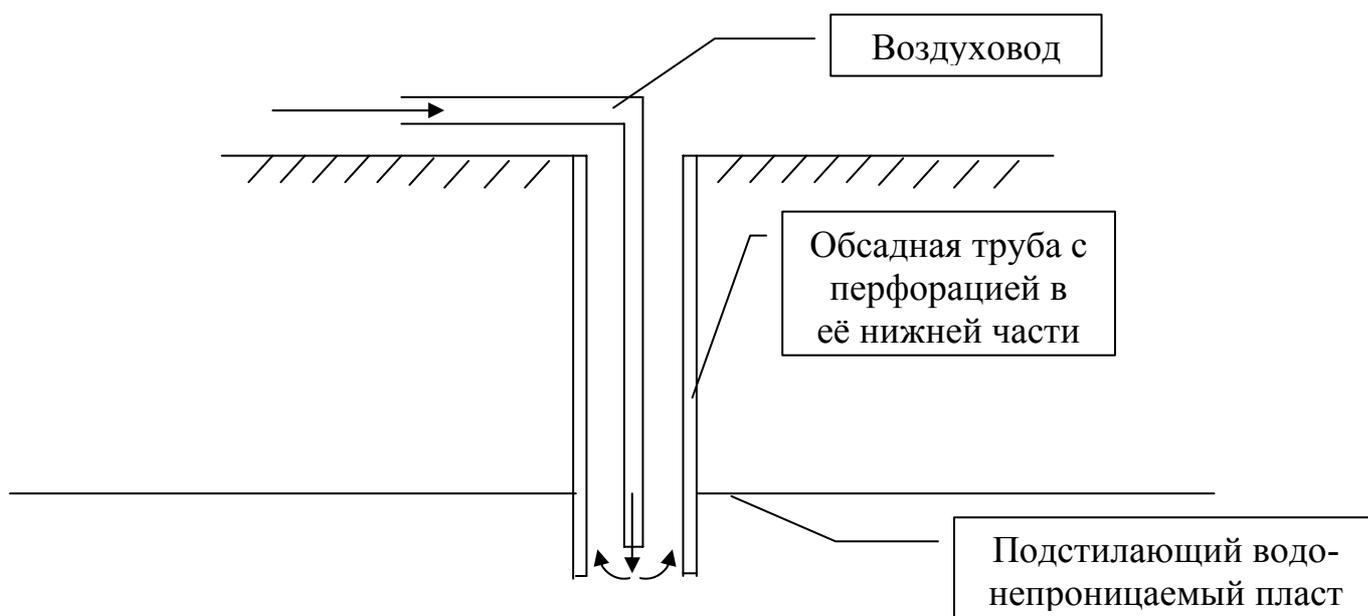


Рис. 7. Схема подъёма нагнетательным эрлифтом

Чановое и кучное выщелачивание⁷

Кучное и чановое выщелачивание чаще используется при извлечении золота, урана, меди, молибдена и цинка из бедных руд.

При кучном выщелачивании и обогащении *перколяцией* случается замедление просачивания растворов по следующим причинам: а) уменьшение крупности частиц руды вследствие их выщелачивания; б) наличие глинистых частиц в рудной массе; в) при увеличении высоты слоя рудной массы сверх допустимой величины.

На практике применяются следующие приёмы повышения скорости перколяции: а) насыщение раствора воздухом (аэрация); б) отсасывание раствора вакуумным насосом; в) предварительная агломерация (слипание мелких частиц в более крупные при их смачивании водой) рудного материала.

Для связывания глинистых и пылевидных частиц в агломерат (окомкование) штабель предварительно смачивают водой или рабочим раствором до влажности 6-12% или, другой вариант - добавление в раздробленный материал портландцемента в количестве до 5 кг/т или извести, активной золы, силиката кальция.

Самое сложное в чановом выщелачивании - это выгрузка переработанного материала. Выгрузка чана-перколятора (диаметром от 6 до 20 м и высотой от 2 до 4 м) бывает сухой и гидравлической. Сухая разгрузка осуществляется через люки, расположенные в нижней части чана, обычным размером 400x400 мм: вручную лопатами, специальным грибковым вращающимся экскаватором (в ЮАР), реже скрепером. Гидравлическая разгрузка производится следующим образом: сначала восходящим потоком воды материал взрыхляется, затем смывается в зумпф откачивающего насоса.

Процесс кучного выщелачивания включает следующие операции: а) добычу минерального сырья на руднике или карьере; б) дробление сырья до крупности 12-25 мм; в) сооружение площадки под небольшим уклоном и отсыпка штабеля высотой 3-12 м; г) орошение и дренирование раствора. Далее продуктивный раствор поступает на гидрометаллургический завод, где из раствора извлекаются ценные компоненты.

Основание штабеля обычно состоит из глиняного фундамента толщиной от 30 до 60 см и один-три слоя плёнки-геомембраны на основе хлорсульфированного полиэтилена, полихлорвинила, гипалона, бутиловой резины и др., по периметру штабеля иногда создаётся гидроизоляционный экран-вал высотой до 20 см.

Для сбора продуктивного раствора в основании штабеля сооружают дренажную канаву с уклоном в приёмный зумпф, откуда раствор уже откачивается в трубопровод.

На кучное выщелачивание очень большое влияние оказывает климат: а) при сильном ветре и в засушливых районах штабель покрывают плёнкой для снижения выветривания и испарения; б) в дождливых районах потоки воды вымывают из штабеля шлам (мелкие частицы пород), который приходится осаждать на площадке осветления; в) при низких температурах выщелачивание производится в бетонированных траншеях (как бы силосных ямах глубиной до 20 м), где выщела-

⁷ Водолазов Л.И., Дробаденко В.П., Лобанов Д.П., Малухин Н.Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. - М.: изд. МГГА, 1999, 300 с.

чивание производится или подогретым рабочим раствором или же применяется добавление в штабель сульфидов, которые при окислении выделяют тепло.

Системы орошения рудных штабелей (см. рис. 8)

1. Прудковая система: на поверхности штабеля выкапывают неглубокие ямки, куда укладывают и затем засыпают перфорированные трубы, система часто используется в засушливом климате для снижения испарения.

2. Орошение через напорные шланговые распределители (перфорированные трубы), укладываемые непосредственно на поверхность штабеля.

3. Орошение через вращательные разбрызгиватели (со смешными названиями - виглеры и вобблеры), установленные на стальных стойках высотой не более 1,2 м.

4. Орошение через нагнетательные капельные оросительные системы (эмиттеры) или газонные дождевальные установки.

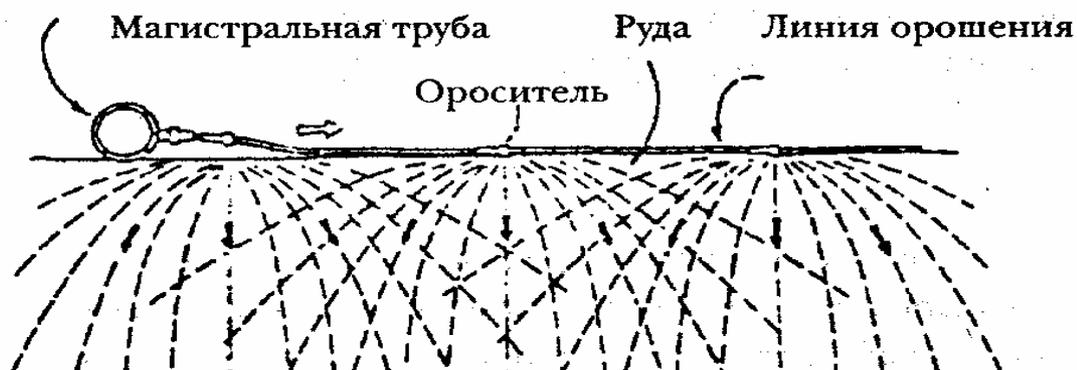


Рис. 8. Схема орошения штабеля при кучном выщелачивании

Подземное внутримассивное выщелачивание

Суть – рудная залежь разбивается на этажи, блоки и камеры. В центре камеры проходится отрезной восстающий (например, секционным взрыванием) и затем – компенсационная щель (её объём должен обеспечить разрыхление отбитой руды на 15-20%, т.е. до коэффициента разрыхления $K_p=1,2$), в днище заранее формируются дучки для приёма отбитой руды из компенсационной щели и бурятся дренажные скважины. Руда в камере отбивается от массива взрывными скважинами из этажных или подэтажных буровых выработок. С вышерасположенного горизонта бурятся оросительные скважины, по которым и подаётся рабочий раствор в камеру. Продуктивный раствор улавливается на днище камеры в дренажные скважины, оборудованные, например, электровакуумной установкой.

Размеры камер могут быть практически любыми технологически оправданными, ведь обрушения пород исключены уже тем, что отбитая руда не выпускается из камеры, а заполняет всё её пространство. Между соседними камерами, по этой же причине, можно вообще не оставлять целики.

Такая технология добычи, по сравнению с традиционной, имеет массу *преимуществ*:

- втрое и более число раз уменьшается объём нарезных работ;

- в пять раз уменьшается объём транспортируемой рудной массы из камеры, фактически вывозится только объём компенсационной щели (около 85% от объёма камеры);
- извлекаются металлы даже из бедных руд (например, таким образом добывается уран содержанием 0.01%, хотя бортовое содержание его при традиционной добыче втрое выше), попутно можно выщелачивать из руды многие полезные компоненты;
- не требуется закладка камер, отсутствуют отвалы пород и хвостохранилища на поверхности, можно отказаться от рудных целиков;
- сокращается число рабочих, занятых на добыче руды (на 40%), не требуется на весь срок отработки камеры буровое и погрузочно-доставочное оборудование (только на начальный период - подготовки и разрыхления массива);
- за счёт снижения затрат на зарплату, оборудование, энергию и материалы себестоимость добычи снижается на 20-50%, а себестоимость добычи конечного металла, например, урана – почти вдвое (за счёт отказа от услуг обогатительной фабрики и гидрометаллургического завода) и т.д.

Возобновляемые природные источники энергии

С глубиной температура горных пород повышается, а сезонные колебания атмосферной температуры на поверхности Земли на глубине 20-25 м уже отсутствуют. Температура, удовлетворяющая требованиям теплоснабжения, составляет 100⁰С, такая температура пород уже на глубине 2 км в молодых породах Кавказа, на глубине 3,5 км под Санкт-Петербургом. Термальные же воды (с температурой более 45⁰С) могут находиться и на более близком к поверхности расстоянии. На территории России прогнозные запасы геотермальных запасов на доступных глубинах (до 6 км) в 4-6 раз превышают запасы угля, нефти и газа вместе взятых. Технически и экономически *целесообразно* за счёт этого тепла уже сегодня обеспечивать нужды в горячем теплоснабжении на 88% и отопления – на 55% территории России. Приповерхностные системы геотермального теплоснабжения уже во множестве построены в США, Германии, Швейцарии, Англии, Франции и Японии, в России построены только две установки в Ярославской области. С 70-х годов в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) и научно-исследовательских лабораториях других стран разрабатываются проекты создания на глубинах искусственных геотермальных *коллекторов* (зон фильтрации теплоносителя) в виде вертикальных трещин гидроразрыва слабопроницаемого горячего массива пород. Положительные результаты получены в Нью-Мексико (США), в Корнуолле (Англия), в ФРГ, Японии, Швеции и во Франции, а также под г. Выборг и на Северном Кавказе (Россия). С 60-х годов стали строить геотермальные электростанции на месторождениях природной горячей воды и пара, особенно много таких электростанций в США, на Филиппинах, в Италии, Мексике, Индонезии. Себестоимость выработки электроэнергии на таких станциях ниже традиционной, на топливных энергоустановках, в 4-5 раз. В России мало мест, пригодных для строительства геотермальных электростанций, но практически везде можно энергию термальных подземных вод использовать, с подогревом или без него, для теплоснабжения домов, бассейнов, купален, теплиц, прудов для разведения рыб. Особенно богаты гидротермальными ресурсами районы России с молодыми горными массивами (Кавказ, Урал, Забайкалье, Дальний Восток). Даже

для Московской области была выявлена экономически целесообразная область использования геотермальных ресурсов: при температуре пород, воды в 30⁰С – глубина скважин должна быть не более 1,5 км, а при температуре 50⁰С – глубина не более 2,5 км, при этом срок окупаемости инвестиций составляет не более 6-8 лет. **О такой рентабельности в добывающих отраслях промышленности можно лишь мечтать.**

Таблица 9

Мировое производство электроэнергии за счёт возобновляемых природных источников энергии (World Energy Council, 1995)

Тип электростанций	Установленная мощность		Годовое производство	
	МВт	%	ГВт час	%
Геотермальные	6556	62	37976	86
Ветровые	3514	33	4878	11
Солнечные	366	3	897	2
Приливные	261	2	601	1
Всего	10600	100	11352	100

Геотермальные ресурсы – это запасы природной и техногенной горячей воды, которые добываются методами геотехнологии и используются для нужд населения (таблица 10).

Таблица 10

Основные направления прямого использования геотермальной энергии в мире

№	Направления прямого использования	В % от общего
1	Теплоснабжение объектов	33
2	Бассейны	15
3	Разведение рыб	13
4	Теплично-парниковые хозяйства	12
5	Использование тепловых насосов	12
6	Промышленность	10
7	Кондиционирование	1
8	Сушка сельхозпродуктов	1
9	Другие цели	3

Опыт выщелачивания урана в подземных камерах и в зонах обрушения

Шахтное выщелачивание урана активно применялось на Быкогорском месторождении (Северный Кавказ), месторождениях Стрельцовской группы (Забайкалье), месторождениях Чаркесар II (Узбекистан), Кызыл-Сай, Восток, Звёздное (все - в Казахстане), месторождениях Ронненбургского поля и Кёнигштайн (все – в Германии).

Для обоснования качества дробления выщелачиваемой руды прежде всего рассматривается комплексное влияние природных факторов на кинетику процесса и другие физико-химические явления во взаимосвязи с механизмом действия взрыва в горном массиве, при этом минимально-допустимая величина коэффициента разрыхления для условий выщелачивания составляет $K_p=1,1-1,2$.

Процесс выщелачивания в общем виде описывается следующим уравнением:

$$G = \frac{D(C_n - C_o)}{\delta_o}$$

где G – количество вещества, перешедшего в раствор в единицу времени, кг/сут.; D – коэффициент диффузии; C_n – концентрация насыщения раствора; C_o – фактическая концентрация раствора в данный момент времени; δ_o – толщина пограничного диффузионного слоя, см.

При скорости движения растворителя, соответствующей естественной конвекции, толщина $\delta_o = 0,03-0,035$ см, с увеличением же скорости движения растворителя толщина δ_o уменьшается. С увеличением степени дробления руды ширина межкускового пространства становится сопоставимой с толщиной диффузионного слоя δ_o , что затрудняет движение растворителя под действием только гравитационных сил (*инфильтрация*), поэтому чрезмерно дробить руду нецелесообразно. Обычно блок к выщелачиванию готовят взрыванием руды в «зажатой среде», но при этом, помимо образования большого количества мелких фракций, понижается коэффициент разрыхления замагазинированной руды, уменьшается межкусковое расстояние, что снова снижает инфильтрацию растворителя.

Определение параметров дробления руды

Наиболее эффективной является скважинная отбойка руды в зажатой среде с применением короткозамедленного взрывания, в ходе которого происходит наложение волн сжатия и растяжения, и улучшается качество дробление руд.

Для плотных руд с массивной текстурой, для которых характерно равномерное распределение урановой минерализации в массиве, наилучшая полнота извлечения обеспечивалась при дроблении руды с выходом фракций **не крупнее 150 мм**.

Для руд с интенсивной трещиноватостью, прожилковой текстурой, фельзитовой слабоцементированной структурой и неравномерным распределением урана в кусках различной крупности – требуется такое дробление, чтобы вскрывалась минерализация и увеличивалась проницаемость рудного массива, наилучшая полнота извлечения обеспечивалась при дроблении руды с выходом фракций **не крупнее 300 мм**, т.к. в более крупных кусках содержится незначительное количество урана.

Повышенный выход крупных фракций удлиняет процесс выщелачивания урана, что приводит к росту расхода кислоты и увеличению затрат на поддержание горных выработок. Чрезмерно мелкое дробление руды тоже нежелательно, т.к. оно тоже приводит к повышенному расходу кислоты и сопровождается ростом затрат на буровые и взрывные работы.

Установлено, что при **расходе ВВ около 1 кг/м³** массива обеспечивается оптимальная полнота извлечения урана, при этом расстояние между веерами составляет **3 м**, а между скважинами в веере 2,5-3 м в зависимости от крепости и трещиноватости руды. Расположение компенсационной щели определяется из условия максимально допустимого расстояния от щели до последнего ряда взрывных скважин и принимается не более **25 м**, ширина щели принимается по расчёту – для обеспечения минимального коэффициента разрыхления **$K_p=1,15-1,18$** , но не менее **5 м**.

Необходимое время **проветривания района массового взрыва** производится по формуле С.И.Луговского:

$$T = \frac{50 Z \sqrt{i A W}}{Q}$$

где **T** – время, необходимое для проветривания выработок от ядовитых продуктов взрыва, час.;

Z – коэффициент запаса воздуха, равен 1,1-1,5;

i – коэффициент учитывающий место расположения взрыва, равен 0,125-0,130;

A – расход одновременно взрываемого ВВ, кг;

W – суммарный объём загазированных выработок в направлении исходящего потока воздуха от места взрыва, м³;

Q – количество свежего воздуха, направляемого на проветривание к месту взрыва, м³/мин.

В первоначальный период освоения метода шахтного выщелачивания проводились сравнительные испытания **сернокислотного** (3% H₂SO₄) и **бикарбонатного** (5 г/л магния в HCO₃) выщелачивания урана. Оказалось, что бикарбонатное выщелачивание неэффективно: процесс извлечения урана в раствор происходит в 2,6 раза медленнее, чем при сернокислотном выщелачивании, извлечение составляет всего 40%, а расход раствора к весу руды **Ж:Т=1:1**.

Варианты подготовки блока к шахтному выщелачиванию

Ранее на Быкогорском месторождении (Северный Кавказ) добыча велась двумя вариантами: а) восходящими горизонтальными слоями с закладкой пустыми породами (производительность блока 400 т/мес) и б) мелкошпуровой отбойкой с магазинированием руды (производительность 580 т/мес). При выщелачивании ставилась задача резкого, в 4-5 раз, увеличения производительности труда по сравнению с традиционным методом (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные показатели себестоимости и производительности труда

Показатели	Традиционный метод (для балансовой руды)	Выщелачивание (для забалансовой руды)
Себестоимость извлечения 1 м ³ запасов, у.е.	23-11	3-65
Производительность труда, м ³ /см:		
-забойной группы	2,31	8,11
-по горному цеху	1,25	4,48
Себестоимость, франко-люк, %	100	113,0
Себестоимость переработки на ГМЗ, %	100	15,7
Общая себестоимость переработки урана, %	100	91

Итак, блоки на первой стадии обрабатывались системой с мелкошпуровой отбойкой и магазинированием руды, размеры блока составляли 30 м по высоте, 27 м по длине и 1,8-4,0 м по ширине. Бурение шпуров диаметром 35-38 мм и глубиной 1,6-1,8 м осуществлялось телескопными перфораторами ПТ-45. После полной отбойки запасов блока, на второй стадии, производилось выщелачивание замагазинированной руды. Выщелачиванию подвергалась руда со средним содержанием урана 0,019%, рабочий раствор содержал 3% серной кислоты и подавался в количестве 7-10 м³/час в систему орошения, расположенную над магазином руды. Орошение производилось циклично: через 8-10 часов орошение прекращалось и блок отстаивался в течении 12-14 часов, затем цикл повторялся. Обогащённый ураном раствор по гидроизоляционному слою почвы подблоковой выработки самотёком поступал в ёмкость, откуда насосами 2К-6 откачивался на земную поверхность. При этом были получены следующие показатели:

- средняя концентрация урана в продуктивном растворе 185 мг/л;
- извлечение урана в раствор 65,4%;
- механические потери раствора 13,5%;
- активное время выщелачивания (время орошения) 350 часов;
- расход серной кислоты на реакцию 2,8% от веса руды;
- остаточное содержание урана в замагазинированной руде после выщелачивания 0,0045%.

В дальнейшем на месторождении перешли к подготовке блоков объёмом порядка 100 тыс. т - отбойкой глубоких вертикальных нисходящих скважин диаметром 100 мм и магазинированием руды. Горные работы включали:

- проходку горно-подготовительных выработок (выработки откаточного горизонта, короткие восстающие: между выработками вентиляционного горизонта и монтажным слоем, между выработками откаточного горизонта и гидроизоляционным слоем; короткие рудоспуски между гидроизоляционным слоем и откаточными выработками);
- производство нарезных работ;
- проходку отрезного восстающего;
- оформление гидроизоляции днища;
- подготовку компенсационного пространства (широкой отрезной щели, т.к. частичный выпуск отбитой руды из камеры не предусматривается);
- разбуривание массива руды глубокими скважинами и проведение массового взрыва;
- монтаж технологического оборудования для выщелачивания в монтажном слое – поверх замагазинированной руды.

В верхней части камер (*верхняя подсечка*) проводились горизонтальные выработки для бурения взрывных скважин, и эти выработки в дальнейшем использовались для монтажа оросительной сети подачи рабочего раствора на отбитую руду. В нижней части камер (*нижняя подсечка*) почве единой выработки размером на всё днище камеры придавался уклон в сторону рудоспусков, служащих для стока продуктивного раствора на откаточную выработку. Для предотвращения утечки раствора через днище блока, минуя рудоспуски, выполнялись работы по гидроизоляции всей площади нижней подсечки блока – на почву укладывались листы пластиката толщиной 3-4 мм, которые сваривались между собой. **Под листы пластиката и на них** отсыпались слои предохранительной песчаной подушки 300 мм. На гидроизоляционный слой **заранее** мелкошпуровой отбойкой обрушался слой руды толщиной 1,2-1,4 м. Лишь после этого производилось проходка отрезного восстающего, щели и очистные работы.

Достоинства такого, **первого варианта подготовки блока**, следующие:

- возможность наиболее полного улавливания продуктивного раствора при отсутствии водоупора в днище блока;
- исключение разубоживания продуктивного раствора шахтными водами;
- незначительные энергетические затраты на улавливание и откачку раствора.

Недостатки:

- значительный объём нарезных работ в верхней и нижней подсечке блока;
- большая трудоёмкость и себестоимость по устройству гидроизоляции днища;
- высокие потери продуктивного раствора при боковом его растекании в трещиноватых породах;

- опасные условия труда при работах на нижней и верхней подсечке - при обслуживании оросительной сети (после отбойки руды в камере), при проходке подсечной выработки и оформлении гидроизоляции днища блока.

Второй вариант подготовки блока к выщелачиванию заключался в следующем. Изменилась схема нарезки днища блока – проводились две вдоль и две поперёк днища камеры горизонтальные выработки сечением 9 м² с гидроизоляцией почвы и с уклоном почвы в сторону двух коротких рудоспусков.

Достоинства:

- значительное сокращение нарезных работ по оформлению нижней подсечки;
- исключение опасных работ по оформлению сплошной гидроизоляции днища блока.

Недостаток: работы по сооружению верхней подсечки и оформлению монтажного слоя те же, что и в первом варианте.

Третий вариант подготовки блока к выщелачиванию заключался в следующем. В верхней части и нижней части блока проходятся по одному буровому штреку, из которых веерами длинных нисходящих и восходящих скважин обуливается вся камеры, причём под верхним буровым штреком оставляется целик толщиной от 7 до 12 м, а в самом буровом штреке впоследствии монтируется оросительная сеть и рабочий раствор в камеру подаётся - либо по уже использованным буровым скважинам. Либо по пробуренным перепускным скважинам. В нижнем буровом штреке оформляется гидроизоляционный слой.

Достоинства:

- значительное сокращение нарезных работ по оформлению верхней и нижней подсечки;
- исключение опасных работ при монтаже и эксплуатации оросительного слоя на замагазинированной руде.

Недостаток: высокие потери продуктивного раствора в днище блока.

Четвёртый вариант подготовки блока к выщелачиванию заключался в следующем (рис. 1). Верхняя подсечка осталась неизменной, как в третьем варианте, но в днище блока в буровом штреке не оформлялся гидроизоляционный слой, а производилась мелкошпуровая отбойка для усиленного измельчения руды (зона концентрированного взрыва). В целике между днищем камеры и откаточными выработками толщиной не менее 5 м бурились веера дренажных скважин, через которые продуктивный раствор и извлекался из блока.

Достоинства:

- незначительный объём нарезных работ;
- исключение работ по гидроизоляции днища;
- улучшение санитарно-гигиенических условий и безопасности труда горнорабочих.

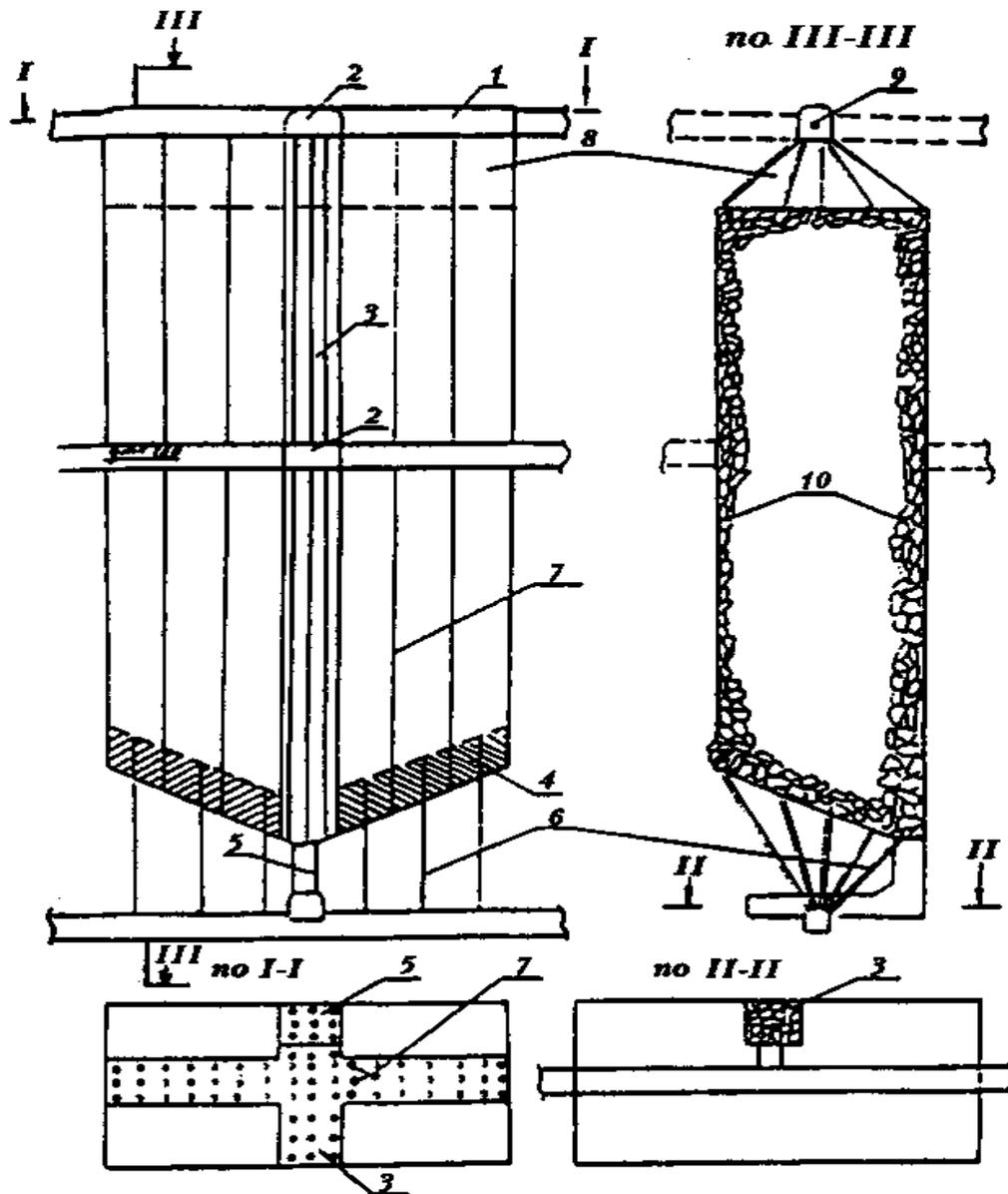


Рис. 1. Схема подготовки блока без гидрослоя с оформлением днища камеры взрывными скважинами:

1 – монтажный слой; 2 – подсечка щели; 3 – отрезная щель; 4 – зона концентрированного взрыва; 5 – отрезной восстающий; 6 – дренажные скважины; 7 – взрывные скважины; 8 – целик в потолочине блока; 9 – оросительная сеть; 10 – замагазинированная руда

Недостатки:

- большой объём бурения дренажных скважин;
- потери примерно 20% продуктивного раствора.

В четвёртом варианте возможно обустройство длинными, до 100 м, нисходящими веерами скважин из верхнего бурового штрека – всего объёма камеры.

Сравнительны показатели четырёх вариантов подготовки приведены в табл. 2.

Трудовые затраты по вариантам подготовки блока к выщелачиванию

Виды работ	Ед. изм.	Объём работ, по вариантам				Общие трудовые затраты, по вариантам, ч/см			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Параметры блока: Площадь	м ²	700							
Высота	м	50							
Объём	тыс.т	77							
Отбойка монтажного слоя	м ³	2100	2100	-	-	257,7	257,7	-	-
Отбойка гидрослоя	м ³	2100	-	-	-	257,7	-	-	-
Проходка монтажного штрека	м ³	-	-	630	630	-	-	105,0	105,0
Проходка нижнего бурового штрека	м ³	-	820	820	-	-	57,2	57,2	-
Подсечка отрезной щели	м ³	130	400	400	200	21,7	66,7	66,7	33,4
Проходка восстающих	п.м.	100	100	200	-	201,3	201,8	40,3	-
Откатка из отрезной щели	м ³	2200	4000	6000	6500	184,4	244,4	366,5	397,1
Проходка подблочного штрека	м ³	210	210	210	210	61,2	61,2	61,2	61,2
Итого горно-подготовительные работы:						934,0	822,5	696,9	596,7
Бурение взрывных скважин	п.м.	6000	6500	7000	8000	379,8	411,4	338,9	400,2
Бурение дренажных скважин	п.м.	-	500	500	500	-	37,5	37,5	37,5
Бурение перепускных скважин	п.м.	-	100	100	300	-	7,5	7,5	22,5
Итого буровые работы:		6000	7100	7600	8800	379,8	456,4	488,9	460,2
Доставка песка, выравнивание слоёв, укладка и сварка листов пластика	м ²	700	-	-	-	94,0	-	-	-
Мелкошпуровая отбойка	м ³	1000	-	-	-	51,9	-	-	-
Итого устройство гидроизоляции:			-	-	-	145,9	-	-	-
Разравнивание руды на монтажном слое	м ³	1500	1500	-	-	25,5	20,5	-	-
ВСЕГО:						1486,2	1344,9	1130,8	1056,9

Сравнительные показатели подготовки блока к выщелачиванию позволили разграничить их области применения:

- первый вариант может быть использован в крепких породах с $f > 10$ и при отсутствии возможности улавливания раствора другим способом;
- второй вариант – в менее устойчивых, но крепких породах с $f > 10$;
- третий вариант – в произвольных горно-геологических условиях и крепких породах с $f > 8$;
- четвёртый вариант – в любых горно-геологических условиях.

Наиболее экономически эффективным оказался четвёртый вариант подготовки.

Выщелачивание урана из горнорудного массива

Основные условия эффективного выщелачивания следующие:

- растворитель избирательно растворяет урановые минералы, но не затрагивает значительно породы;
- растворитель и получаемый раствор не коагулирует (закупоривает) поры и капилляры в выщелачиваемой руде, т.е. не закрывает поры вымываемыми твёрдыми частичками;
- процесс перевода урана в раствор протекает относительно быстро и при обычной температуре среды;
- внутри массива должны существовать условия для инфильтрационной фильтрации (под действием сил гравитации);
- миграция растворов за пределы замагазинированной руды должна быть минимальна.

Все эти условия уточняются на стадии предварительной оценки месторождения по горно- и гидро-геологическим условиям, с учётом вещественного и химического состава исходной руды и результатов технологического опробования процесса выщелачивания.

Процесс формирования продуктивных растворов

В начальный период промышленного выщелачивания для орошения подаётся **5%** раствор серной кислоты, затем, по мере повышения кислотности в получаемом растворе, концентрация кислоты снижается до **2%**. Плотность орошения составляет **40-65 литров/м² в час**. Для обрабатываемых блоков составляется технологические карты, в которых указывается концентрация реагента, количество подаваемого раствора по времени.

Опыт выщелачивания показал, что рост содержания урана в продуктивных растворах мало зависит от кислотности рабочего раствора (в диапазоне от 0,1% до 5%), с увеличением кислотности незначительно снижается лишь необходимая продолжительность орошения. Продолжительность движения раствора через замагазинированную руду с коэффициентом разрыхления $K_p = 1,6$ и $1,2$ при одинаковой интенсивности орошения колеблется соответственно от 30 м/час до 5-6 м/час.

Закачка раствора осуществляется по магистральным трубопроводам из нержавеющей стали диаметром 133 мм, а разводка по блокам выполняется из полиэтиленовых труб диаметром 100-125 мм.

Схема обустройства горной выработки приведена на рис. 2.

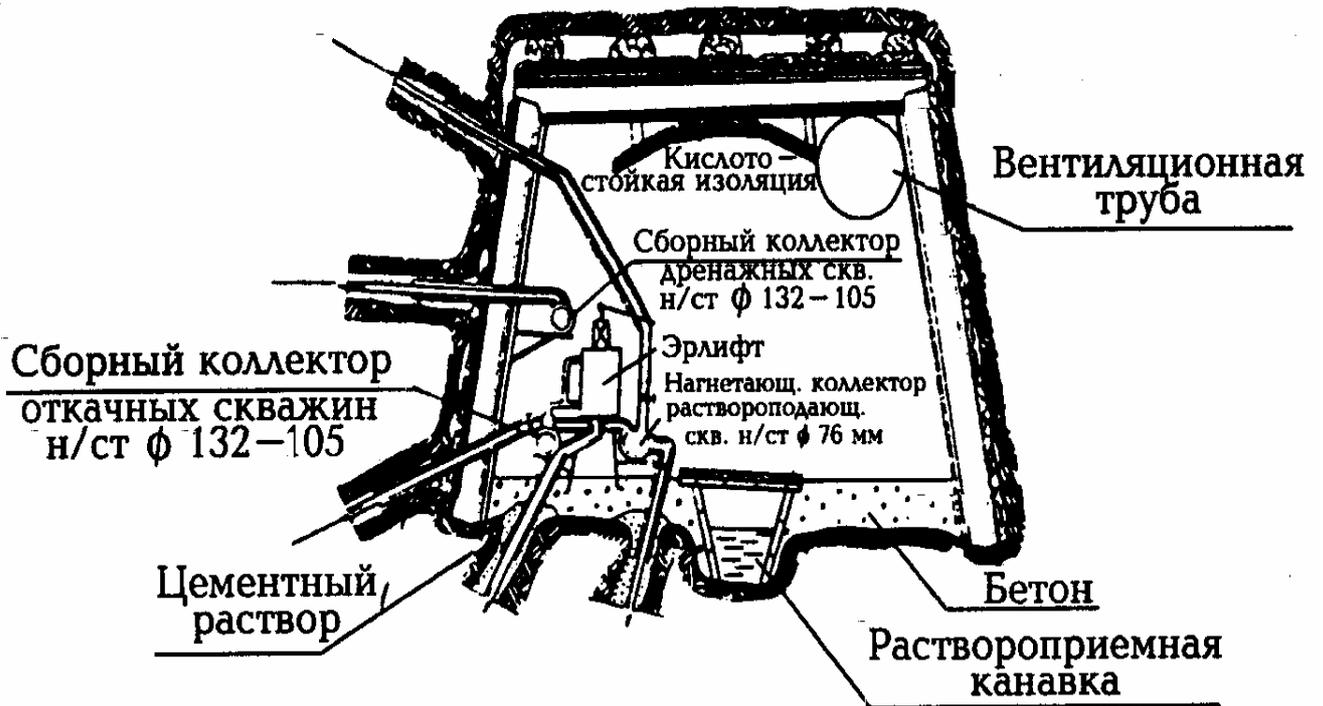


Рис. 2. Схема размещения технологического оборудования в горной выработке и обустройство устьев нагнетательных и дренажных скважин

В результате комплексных исследований предложена следующая технологическая **схема организации выщелачивания замагазинированной руды** (рис. 3).

1. Лабораторным или опытным путём определяется общий расход кислоты на 1 кг расчётного извлечения урана (средний расход кислоты составляет 90-100 кг/кг извлекаемого урана в раствор).

2. На первой стадии выщелачивается уран из легкодоступных минеральных форм из рудной мелочи (расход кислоты 50-80 г/кг при кислотности от 0,5 до 2,5%). Интенсивность орошения определяется кислотностью раствора.

3. На второй стадии выщелачиваются труднодоступные минералы урана. Расход кислоты увеличивается до 120 кг/кг урана в растворе при одновременном увеличении интенсивности орошения и уменьшении кислотности до 1,2%.

4. На третьей стадии выщелачивается зона пропитки, где содержится всего 6% урана. На этой стадии увеличивается расход кислоты до 150 кг/кг только за счёт увеличения интенсивности орошения.

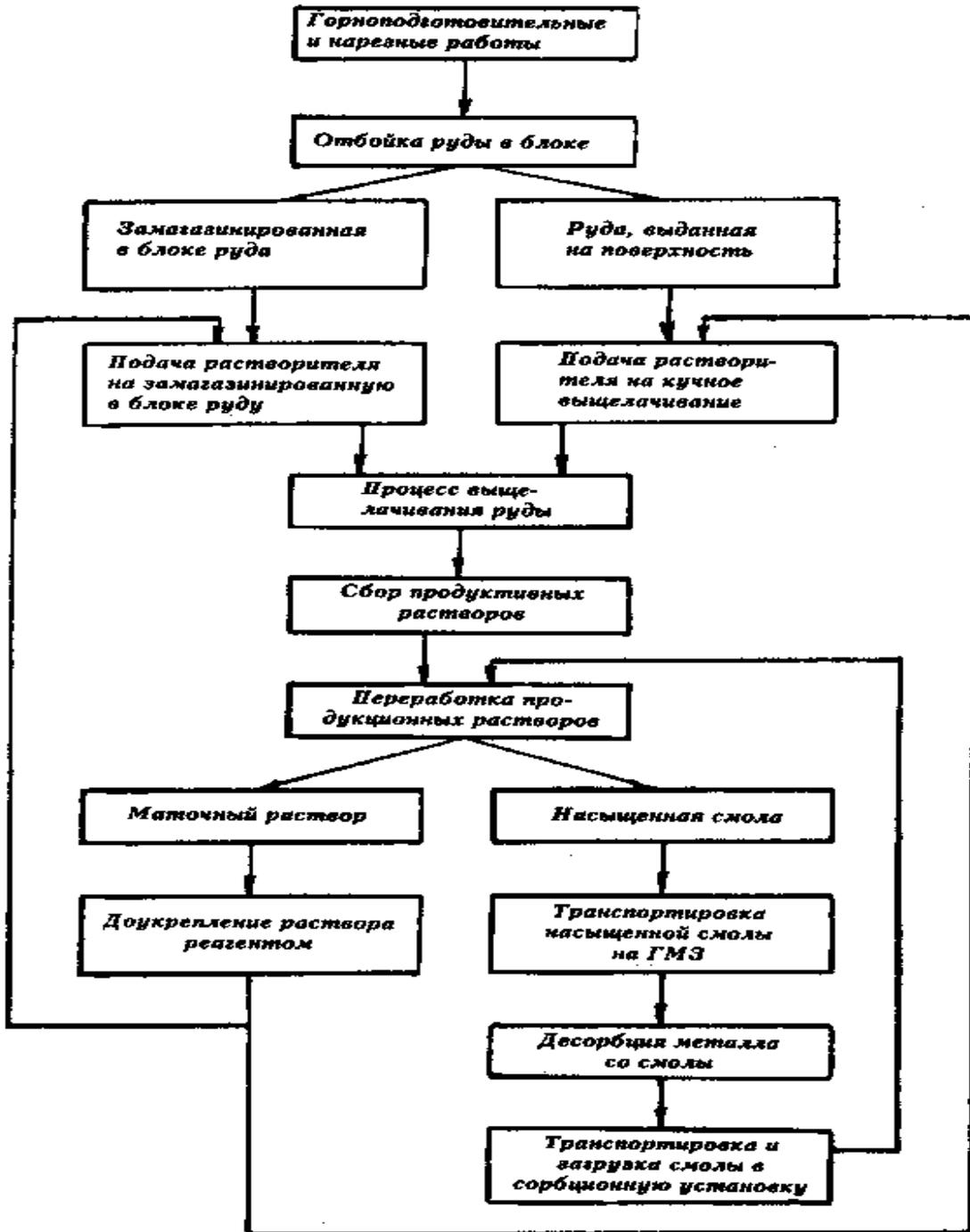


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема выщелачивания урана из руды, переработки и подготовки растворов

Три периода процесса выщелачивания

Первый период – начало выщелачивания (период закисления блока 1,0-1,5 месяцев), он характеризуется нарастанием содержания урана в продуктивных растворах и собираемых ЭВУ (электровакуумной установкой – см. рис. 4).

Второй период – интенсивный процесс переотложения урана, когда его содержание в продуктивном растворе снижается, что обычно случается к третьему месяцу выщелачивания, на стенках выработок, дренажных скважин и ёмкости ЭВУ образуются налёты, содержащие 1,6-6,2% урана. Разница содержания урана в продуктивном растворе и в собираемом ЭВУ достигает 30%.

Третий период - интенсивный процесс снижения содержания урана в продуктивном растворе при более высоком содержании урана в ёмкости ЭВУ, обычно происходит через 5,5 месяцев после начала выщелачивания. С этого времени начинается активное растворение осадков и налёта урана, образовавшихся во втором периоде.

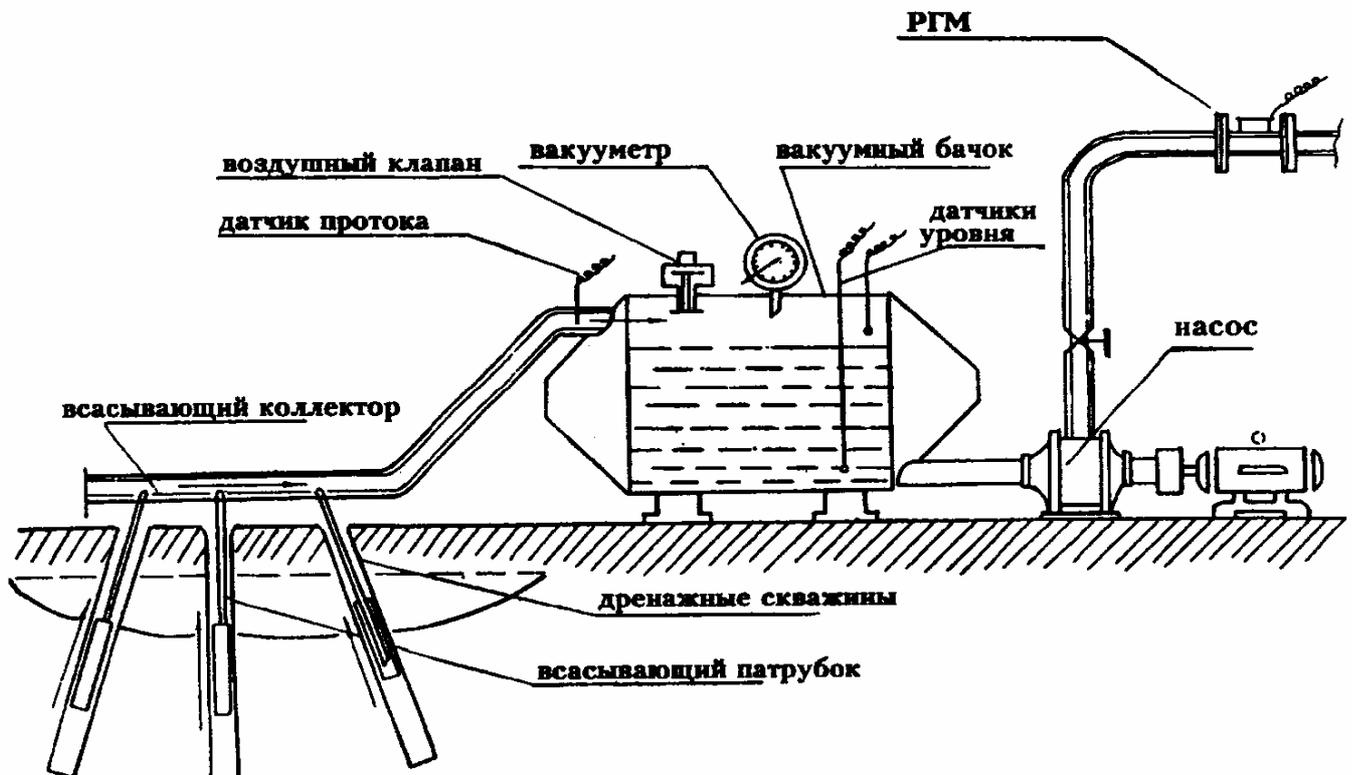


Рис. 4. Схема электровакуумной установки

Для снижения интенсивности переотложения урана в осадки следует во втором периоде снижать концентрацию серной кислоты до 0,1-0,2% с последующим нарастанием до 1%. Выстаивание блока без орошения более 10 суток приводит к **кольматации** (закупорке) пор и снижению содержания урана в продуктивном растворе на 20-30%, поэтому принимается пульсирующая схема подачи раствора с интервалами подачи и прекращения орошения в 2-3 часа.

Промышленная добыча урана выщелачиванием показала¹, что рост со-

¹ Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В., Абдульманов И.Г. Горно-химическая технология добычи урана. - М., изд. Геос, 2001, 368 с.

держания урана в продуктивном растворе мало зависит от кислотности рабочего раствора. При степени дробления руды 25-300 мм при взрыве урановые минералы подвергаются естественной дезинтеграции, при этом в мелкой фракции до 70 мм - содержится 70% урана, во фракции 70-300 мм – до 30% и во фракции 150-300 мм – всего 6% урана. Учитывая такое распределение урана по классам крупности, была разработана технология его извлечения, обеспечивающая минимальный расход кислоты. Было установлено, что встряхивание взрывами и выстаивание блока без орошения не увеличивают полноту извлечения, но сильно удлиняют процесс выщелачивания во времени. Увеличение расхода кислоты на 1 кг извлекаемого урана в начальной стадии не влияет в целом на полноту извлечения и лишь незначительно ускоряет процесс выщелачивания – см. табл. 3.

Таблица 3

Основные параметры технологического процесса шахтного выщелачивания урана

Стадия	Продолжительность периода, сутки	Продолжительность орошения, часы в сутки	Расход серной кислоты, кг/кг урана	Кислотность выщелачивающего раствора, %	Извлечение урана от общего, %
I	60-80	4-6	80	2,5	25-35
II	200-250	4-6	120	1,2	45-55
III	250-300	4-6	150	1,2	15-25

Закачка растворов в блок осуществляется по магистральным трубопроводам из нержавеющей стали диаметром 133 мм, а разводка по блоку осуществляется полиэтиленовыми трубами диаметром 100-125 мм. Оросители представляют собой перфорированную полиэтиленовую трубу диаметром 30-40 мм. Схема чередования активного орошения и выстаивания блока в течение 10-15 суток приводила к падению содержания урана в продуктивном растворе на 20-30% из-за частичного закрытия пор и трещин вторичными минеральными образованиями. При пульсирующей схеме подачи растворов, с интервалом орошения и выстаивания 2-3 часа, этот недостаток ликвидировался.

Весь закачиваемый в блок раствор перепускался на нижний горизонт и откачивался из депрессионной воронки на уровне трещинных вод. Улавливание таким способом продуктивного раствора, несмотря на высокое разубоживание его шахтными водами (до 40%), явилось более эффективным решением.

Для улавливания растворов на уровне трещинных вод бурились вкрест простирания рудных тел специальные дренажные скважины на глубину порядка 10-11 м от почвы выработки, с учётом угла растекания раствора (для трещиноватых пород он составляет 75°). Уровень трещинных вод находился под почвой выработок на глубине 2,8-4 м в зависимости от размеров камер в плане (рис. 14). В каждой дренажной скважине оборудовался всасывающий патрубок (на 1-2 м выше уровня забоя скважин), которые монтировались в

сеть для мощных электровакуумных установок подъёма раствора производительностью не менее 6-8 м³/час. Под каждым блоком монтировалось 4-5 электровакуумных насосов типа ХНЗ. Из центрального растворосборника ёмкостью 160 м³ растворы насосами типа 8МСК откачивались по трубам из нержавеющей стали диаметром 133 мм на поверхность в химцех рудника для дальнейшей переработки.

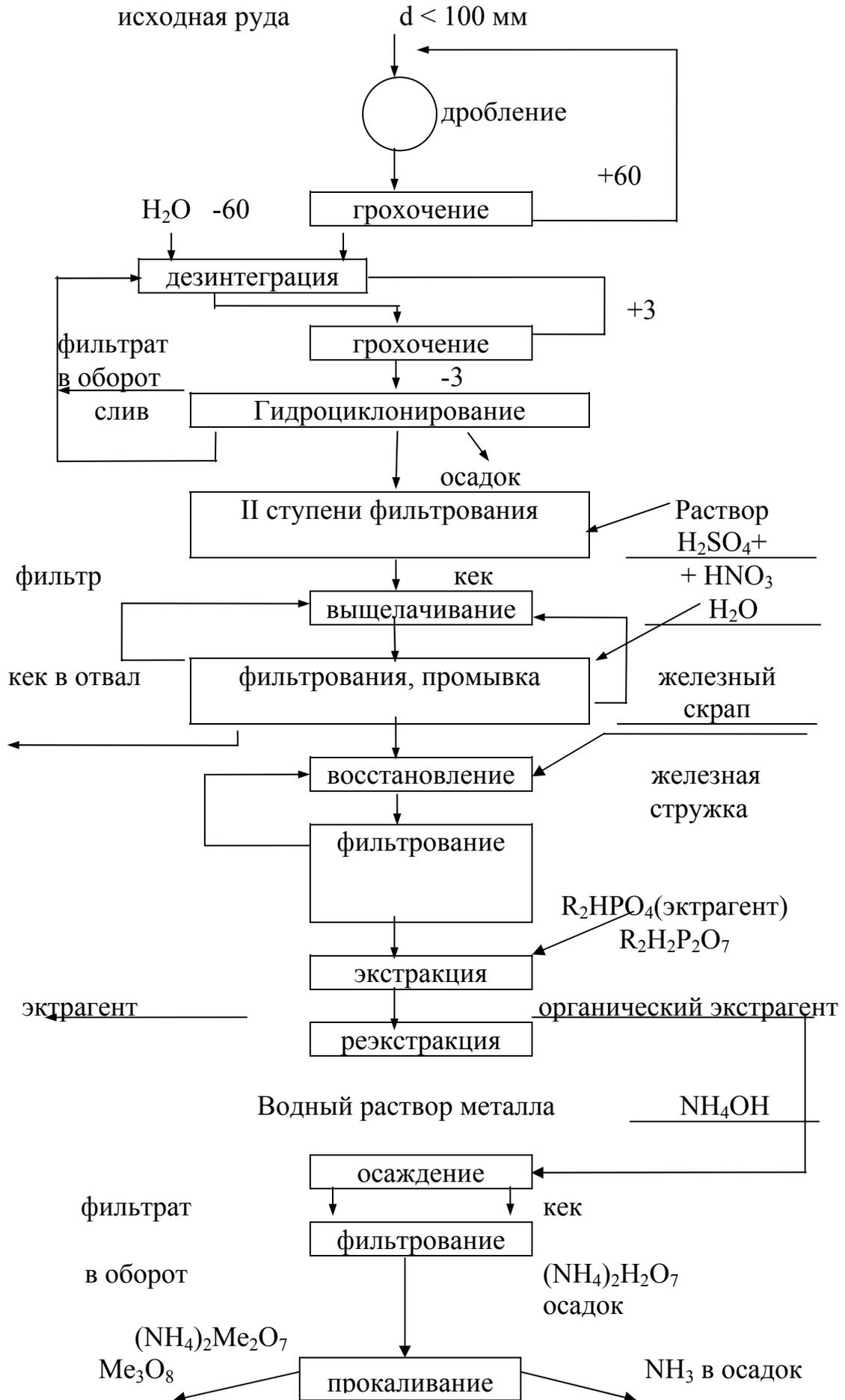
Удельный расход ГПР на подготовку 1000 т руды составляет 8-12 пог.м. Затраты по выщелачиванию урана из беднотоварных и забалансовых руд с получением на технологической установке готовой продукции в кристаллах с содержанием урана 40% составили: на материалы - 25% (в том числе на серную кислоту - 20%), на электроэнергию - 4,1%, трудовые затраты - 8,7%, погашение ГПР - 34,4%. Удельный расход основных материалов и энергетических затрат на 1 кг урана по ШВ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расход основных материалов и энергетические затраты

Серная кислота кг/кг	Электроэнергия, кВт.ч/кг	Тепловая энергия, Гкал/кг	Сжатый воздух, м ³ /кг	Смола кг/кг	ВВ, кг/кг	Соль углекислотная, аммонийная, кг/кг	Сульфат аммония, кг/кг
50	90	0,025	1430	0,049	0,23	0,0038	0,002

На действующих предприятиях **рационально сочетать традиционную отработку с шахтным выщелачиванием (ШВ)** – см. табл. 5: извлекая богатые руды традиционными вариантами из очистных блоков с направлением их на горнометаллургический завод (ГМЗ) для дальнейшей переработки, предварительно раздробленные рядовые и бедные руды подвергать выщелачиванию на месте залегания, а извлекаемые рядовые и бедные руды направлять в зоны обрушения и выщелачивать их уже в этих местах.



Основные показатели отработки руд по группе блоков
Стрельцовского рудного поля

Показатели	Единица измерения	Горно-металлургическая технология	Горно-химическая технология (ГХТ)
Потери	%	3	1
Разубоживание	%	25	30
Руда, выдаваемая на поверхность:			
- руда	тыс. т	481,4	120,1
- содержание	%	0,166	0,250
- уран	тонн	799,12	300,25
Эксплуатационные расходы на добычу руды	тыс. усл. ед. т. усл. ед./т	3050 6	450 3
В том числе:		206	50
- вспомогательные материалы	тыс. усл. ед.	260	50
- энергозатраты	ед.	550	22
- трудозатраты	"-	8	20
- амортизация ГК	"-	275	учтено в подгот. ка- мер 125
- погашение ГПР	"-	610	
- содержание оборудования	"-	210	
- общезаводские расходы	"-	530	
- цеховые расходы	"-	495	
Эксплуатационные затраты на добычу урана из «магазина» (перевод урана в продуктивный раствор + сорбция на смолу)	тыс. усл. ед.	-	892
Эксплуатационные затраты на транспортировку руды на ГМЗ (для ГХТ - насыщенной ураном смолы на ГМЗ)	тыс. усл. ед.	345	85,8+42,2
Эксплуатационные затраты на переработку руды и промпродуктов	тыс. усл. ед.	5025	1254+156
Общекорбинатские и внепроизводственные расходы	тыс. усл. ед.	760	640
Полная себестоимость выпуска урана	тыс. усл. ед.	9180	5370
- на 1 кг товарного урана	усл. ед.	12,6	8,8
- на 1 т руды	усл. ед.	19,1	10,2

В результате сравнительных экономических расчетов установлено, что полная себестоимость 1 кг урана в товарной продукции, полученной при горно-

химической технологии для рассматриваемого среднего содержания в балансовой руде 0,221% на 30% ниже, чем при горно-металлургической технологии, а экономия эксплуатационных затрат на 1 т добываемой (магасинируемой) руды будет еще выше (до 47%). Из табл. 6 следует, что технология ШВ дает существенную экономию эксплуатационных затрат практически по всем составляющим себестоимости от 11% (добыча руды) до 60% (транспортировка руды) и 61% (переработка руды). Исключение составляет статья «общекомбинатские и внепроизводственные расходы», затраты по которой на 1 кг товарного урана являются величиной постоянной для предприятия.

Таблица 6

Сравнительные показатели себестоимости товарной продукции
и важнейших технологических процессов при ГМТ и ГХТ

Показатели	Ед. измер.	ГМТ	ГХТ	Снижение себестоимости при ГХТ, %
Выпуск урана	тонн	727,20	609,26	16
Сквозное извлечение	%	91,0	75,0	18
Себестоимость товарной продукции	т. усл. ед.	9180	5370	42
- 1 т руды	усл. ед.	12,6	8,8	30
- 1 кг товарного урана	усл. ед.	19,1	10,2	47
в том числе:				
- добыча руды (для ГХТ: компенсация + подготовка «камер-магазинов»)	"-	4,2	3,7	11
- транспортировка руды (для ГХТ руды из компенсации + промпродуктов)	"-	0,5	0,2	60
- переработка руды и промпродукта на ГМЗ	"-	5,9	2,3	61

Опытно-промышленными исследованиями установлено, что при добыче и переработке бедных руд эффективность горно-химической технологии по отношению к традиционной горно-металлургической технологии возрастает и наоборот - при добыче богатых руд эффективность ГМТ увеличивается за счет дополнительно получаемого урана в закиси-окиси. С ростом содержания урана в погашаемых запасах происходит сближение себестоимости 1 кг урана в товарной продукции при сравниваемых технологиях. Так, при содержании 0,3% относительное снижение себестоимости 1 кг товарного металла при ГХТ составляет 19% в сравнении с ГМТ, а уже при 0,5% себестоимость урана в закиси-окиси при обеих технологиях практически одинакова – см. табл. 7.

Сравнительные данные по себестоимости готовой продукции при ГМТ и ГХТ в зависимости от содержания урана в погашаемых запасах

Показатели	Един. изм.	Содержание урана, %			
		0,3		0,5	
		ГМТ	ГХТ	ГМТ	ГХТ
Сквозное извлечение урана в закиси-окиси	%	93,0	72,0	94,0	71,0
Выпуск товарного металла	тонн	1007,28	797,3	1695,92	1312,0
Эксплуатационные затраты на:	тыс. усл. ед.				
- добычу руды	ед.	3050	450	3050	450
- рудоподготовку	"-	-	1850	-	1850
- добычу урана из магазина при ГХТ	"-	-	1309	-	2319
- транспортировку руды	"-	345	85	345	85
- транспортировку насыщенной смолы	"-	-	62	-	110
- переработку руды	"-	5025	1253	5025	1253
- переработку промпродукта	"-	-	228	-	403
Общекорбинатские и внепроизводственные расходы	"-	761	637	1720	1364
Полная себестоимость 1 кг урана	усл. ед.	9,1	7,4	6,0	6,0

В сформировавшихся зонах обрушения, например, при использовании систем с обрушением руды и вмещающих пород, как правило, списывается в потери значительное количество полезного ископаемого, в то же время на земной поверхности находятся отвалы с забалансовой рудой, хвостохранилища. Как показывает опыт работы Приаргунского горно-химического объединения, этой рудой или хвостами можно заполнять провалы поверхности и одновременно с отработкой оставшихся запасов приступать к выщелачиванию металла на верхних горизонтах² (рис. 5 и 6), по аналогии с кучным и подземным выщелачиванием (рис. 7 и 8).

Предварительно, исследованиями было установлено, что в ненарушенном горном массиве водопроницаемость пород (длина блока 120-150 м, ширина 30-40 м, высота 40-60 м) близка к нулю, в зонах тектонических нарушений водопоглощение составляет 0,4-2,3 л/час на 1 м² при среднем водопоглощении пород в днище блоков – 0,67 л/час на 1 м² поверхности.

² Котенко Е.А. Горное дело и атомная энергетика. - М., изд. МГГУ, 2001, 197 с.

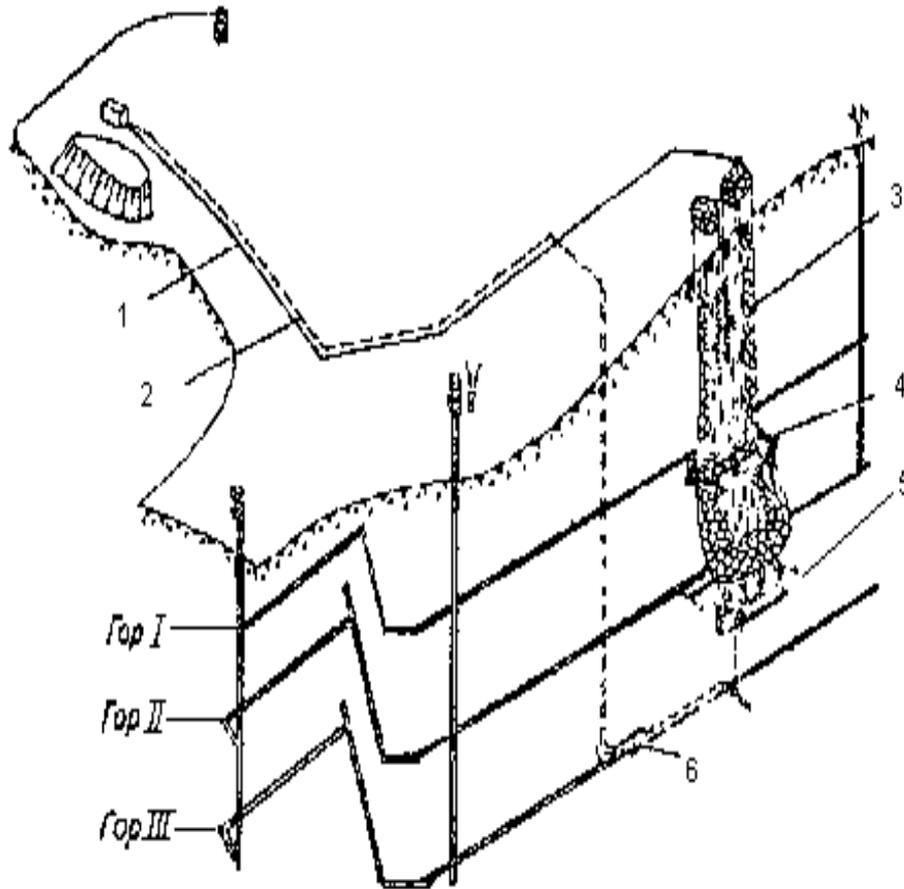


Рис. 5. Технологическая схема отработки забалансовой руды в зоне обрушения действующего рудника (месторождение Юбилейное ПГХО):

- 1 – рабочие растворы; 2 – продуктивные растворы; 3 – зона обрушения; 4 – горизонт орошения; 5 – дренажный горизонт; 6 – участковый растворосборник

Рудовмещающие породы представлены на месторождении «Юбилейное» окисленными фельзит-порфирами с коэффициентом крепости 8—12. Угол падения рудных тел 80—90°, мощность - от первых метров до первых десятков метров. Подготовка запасов включала проходку дренажных выработок под бывшим горизонтом выпуска³. Продуктивные растворы из дренажных выработок перепускались в центральный растворосборник, расположенный на гор. III на небольшом удалении от рудного тела.

³ Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В., Абдульманов И.Г. Горно-химическая технология добычи урана. М., изд. Геос, 2001, 368 с. (с. 37, 52-58).

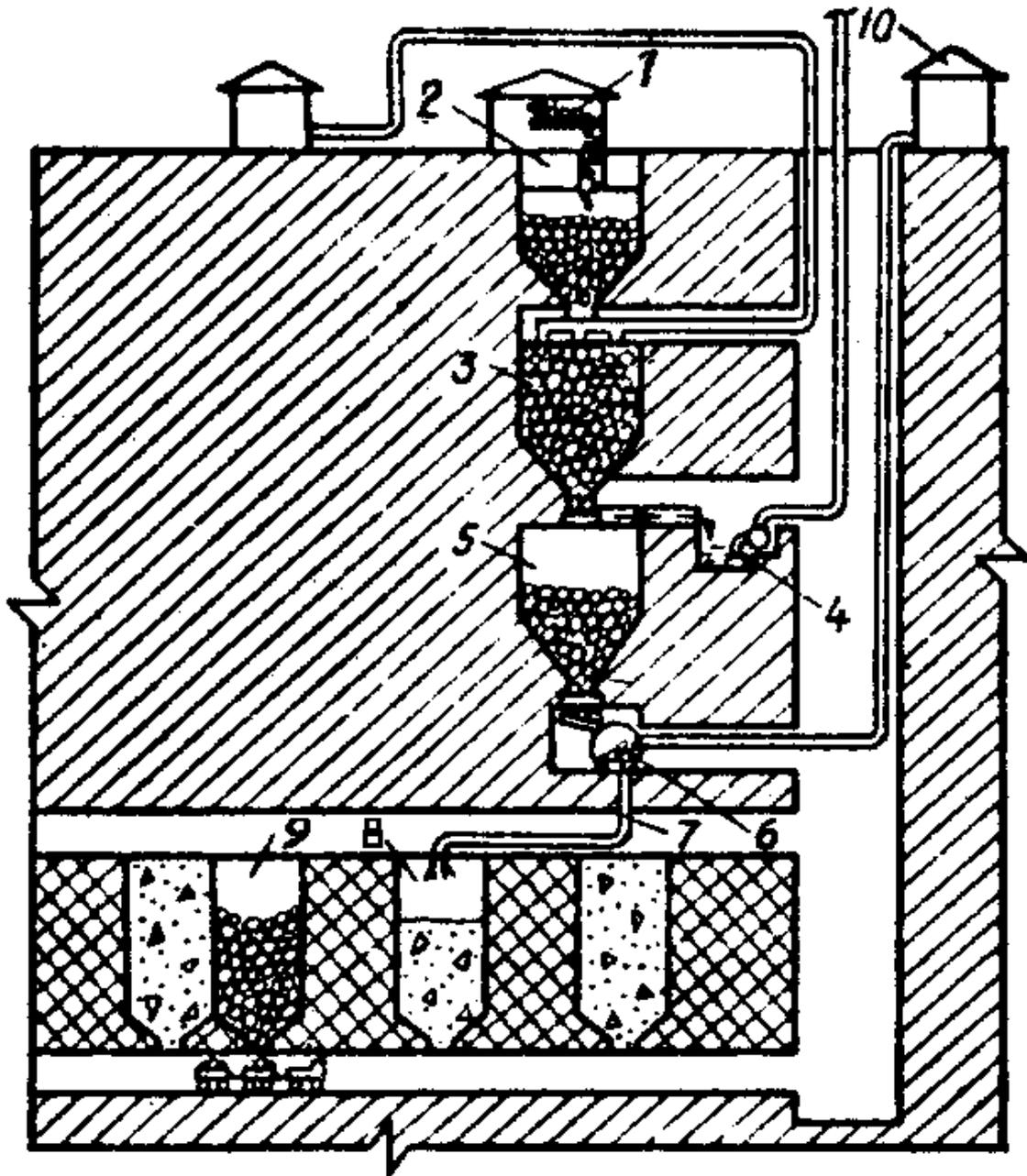


Рис.6. Технологическая схема ступенчатого выщелачивания забалансовых руд в подземных камерах с использованием отходов – в закладку:

1 – РОФ кондиционной руды; 2 – бункер (камера-накопитель) хвостов обогащения и отсортированной забалансовой руды (камеры ранее отработанных блоков); 3 – камера выщелачивания забалансовых руд и хвостов РОФ; 4 – насосная станция для выдачи продуктивных растворов на-гора; 5 – камера хвостов выщелачивания; 6 – смесительно-дробильная установка; 7 – закладочный трубопровод; 8 – выработанное пространство очистных камер; 9 – очистная камера; 10 – закладочный комплекс

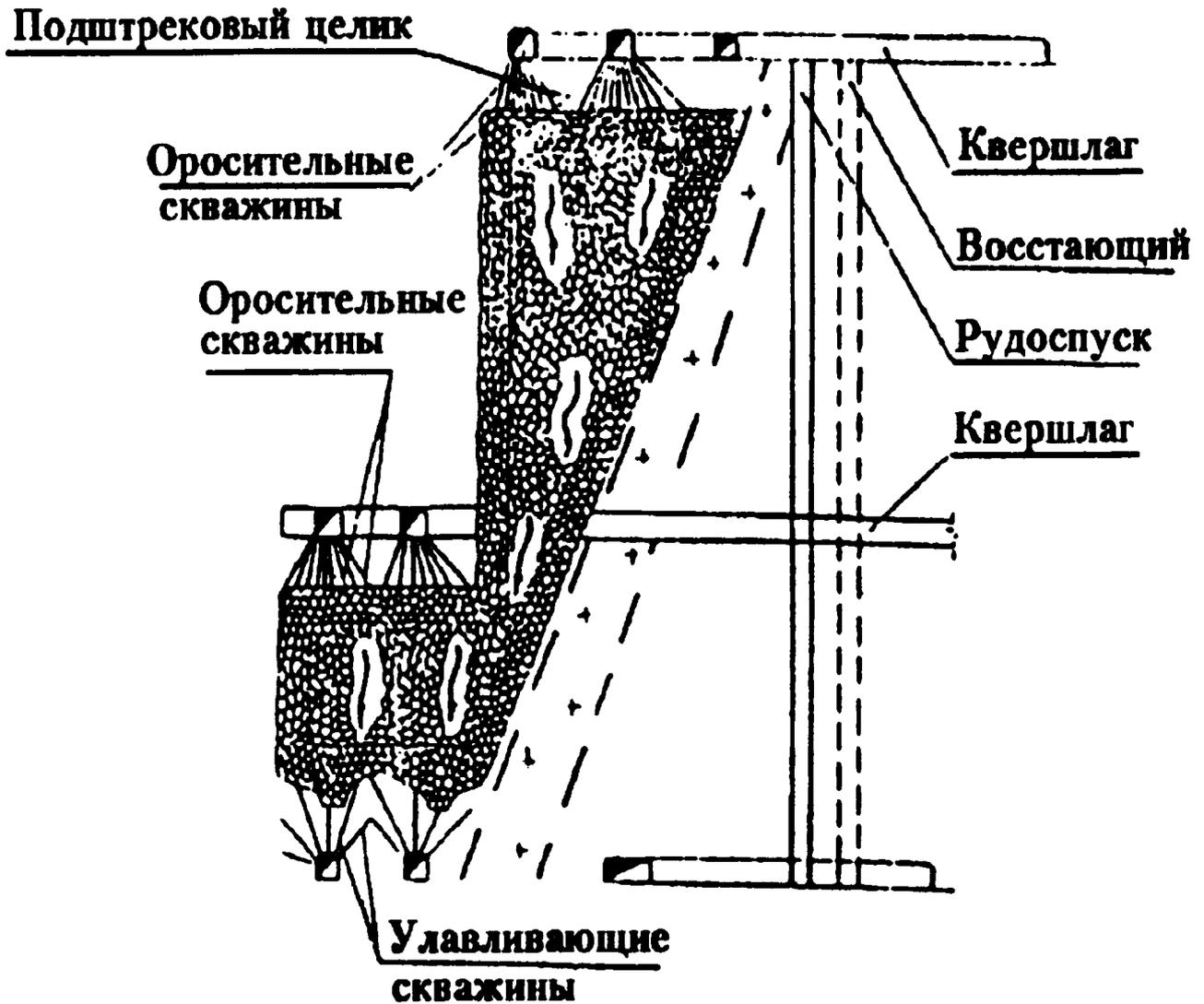
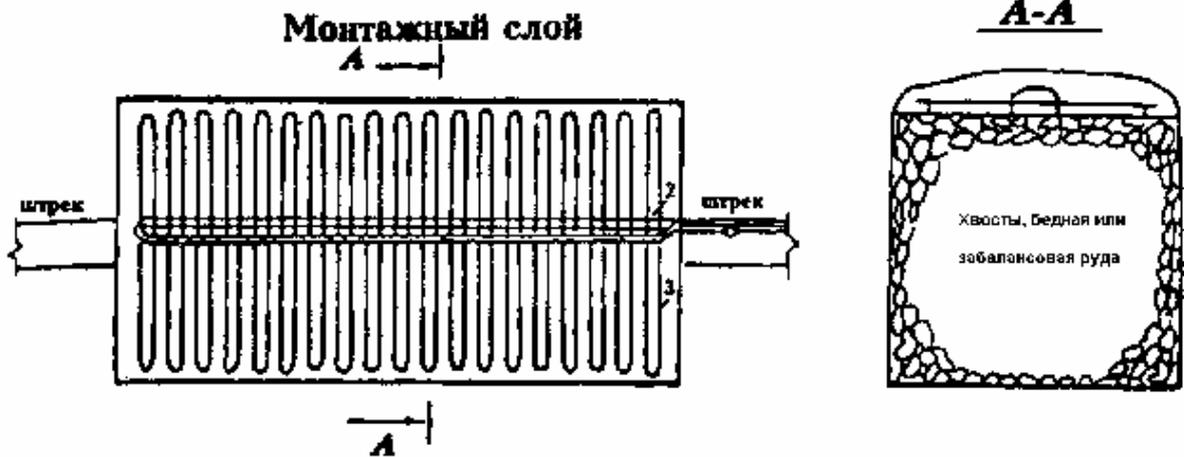


Рис. 7. Схема подачи выщелачивающего и улавливания продуктивного раствора

Обычно трещины 3 порядка (ширина раскрытия от десятков микрон до первых миллиметров) являются оперяющими по отношению к трещинам 2 порядка (ширина раскрытия от первых миллиметров до 2-3 см) и расположены к ним под углом порядка 45° . Поэтому ореол растекания раствора по трещинам не превышает 5-8 м, ведь проникновению раствора препятствуют взаимопересекающиеся трещины.

1 ВАРИАНТ



2 ВАРИАНТ

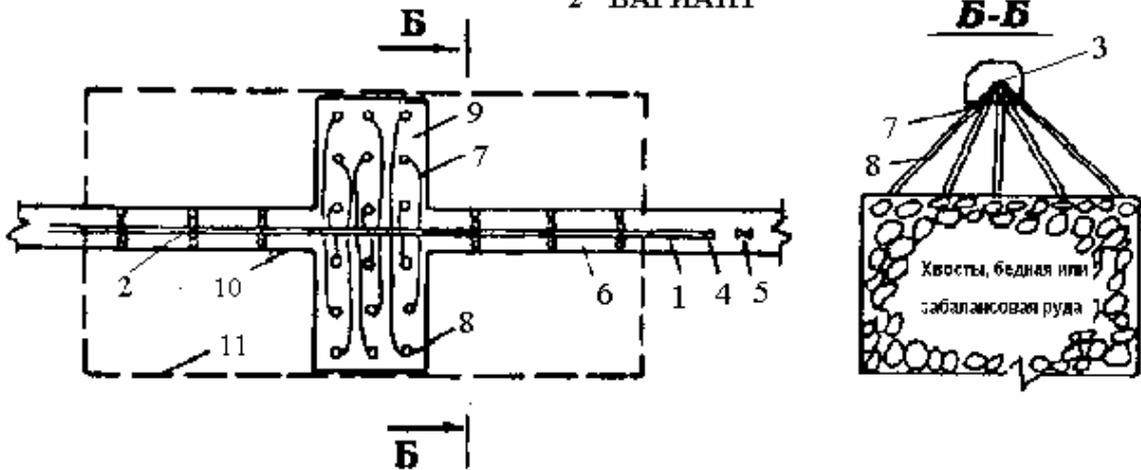


Рис. 8. Схемы подачи выщелачивающего раствора в камеру или в зону обрушения, заполненные хвостами, бедной или забалансовой рудой:

1 вариант – при полной и 2 вариант – при частичной подсечке монтажного слоя

- 1 – коллектор (полиэтилен, труба $\text{Ø}100\text{-}125$ мм); 2 – подпитывающий провод (полиэтилен $\text{Ø}60\text{-}80$ мм); 3 – ороситель (полиэтилен с отверстиями $\text{Ø}30\text{-}40$ мм); 4 – расходомер; 5 – задвижка; 6 – буровой штрек; 7 – полиэтиленовый патрубок $\text{Ø}8\text{-}12$ мм; 8 – скважины орошения $\text{Ø}100$ мм; 9 – подсечка отрезной щели; 10 – буровой штрек; 11 – контур блока, камеры

Для подачи выщелачивающих растворов по инфильтрационной схеме в зоны обрушения были сформированы оросительные системы на земной поверхности с производительностью $100 \text{ м}^3/\text{час}$. Продуктивные растворы из центрального растворосборника ёмкостью 400 м^3 подавались на поверхность для переработки на технологической установке, которая расположена на площадке комплекса КВ. Потери продуктивного раствора составили 3%,

продолжительность закисления и выстаивания блока – 50 суток, интенсивность орошения – 15-17 л/м² в час, расход кислоты – 20 кг/т руды, извлечение урана в раствор - около 50% при содержании урана в растворе 60-80%, при этом под землёй был задействован лишь штат по обслуживанию насосной станции, а на поверхности – штат оросительной установки. Схема чередования активного орошения и выстаивания блока в течении 10-15 суток приводила к падению содержания урана в продуктивном растворе на 20-30% из-за частичного закрытия пор и трещин вторичными минеральными образованиями. При пульсирующей схеме подачи растворов, с интервалом орошения и выстаивания 2-3 часа, этот недостаток ликвидировался.

В результате исследований были определены рациональная технология формирования штабеля, его параметры, объемы кучного выщелачивания и геотехнологические параметры, которые дали возможность с высокой рентабельностью извлекать металлы. В качестве растворителя используется совершенно безвредный, недефицитный реагент (концентрация серной кислоты - 10-15 г/л). После выщелачивания блок в течении 3-4 суток промывается маточниками сорбции интенсивностью 30-35 м³/час, затем блок промывается шахтной водой ещё 15-20 суток.

Шахтное выщелачивание блока в естественном залегании без дробления руды

Без дробления возможно выщелачивание трещиноватых руд с коэффициентом фильтрации $K_f=0,1-0,05$ м/сут. Вскрытие рудной залежи в пределах блока осуществляется осевыми или фланговыми нагнетательно-дренажными выработками, из которых бурятся скважины для подачи рабочих и дренажа продуктивных растворов. Режим выщелачивания – фильтрационный или пульсационно-фильтрационный.

Повышение эффективности шахтного выщелачивания урана из замагазинированной руды

Несмотря на высокую надёжность конструкции гидроизоляции днища (рис. 9), потери раствора всё же достигали 15-40% за счёт растекания по бортам и по трещинам, минуя гидроизоляционный слой. После дополнительных исследований было решено отказаться от оформления дорогостоящего гидроизоляционного слоя: весь закачиваемый в блок раствор перепускался на нижний горизонт и откачивался из депрессионной воронки на уровне трещинных вод. Улавливание таким способом продуктивного раствора, несмотря на высокое разубоживание его шахтными водами (до 40%), явилось более эффективным решением.

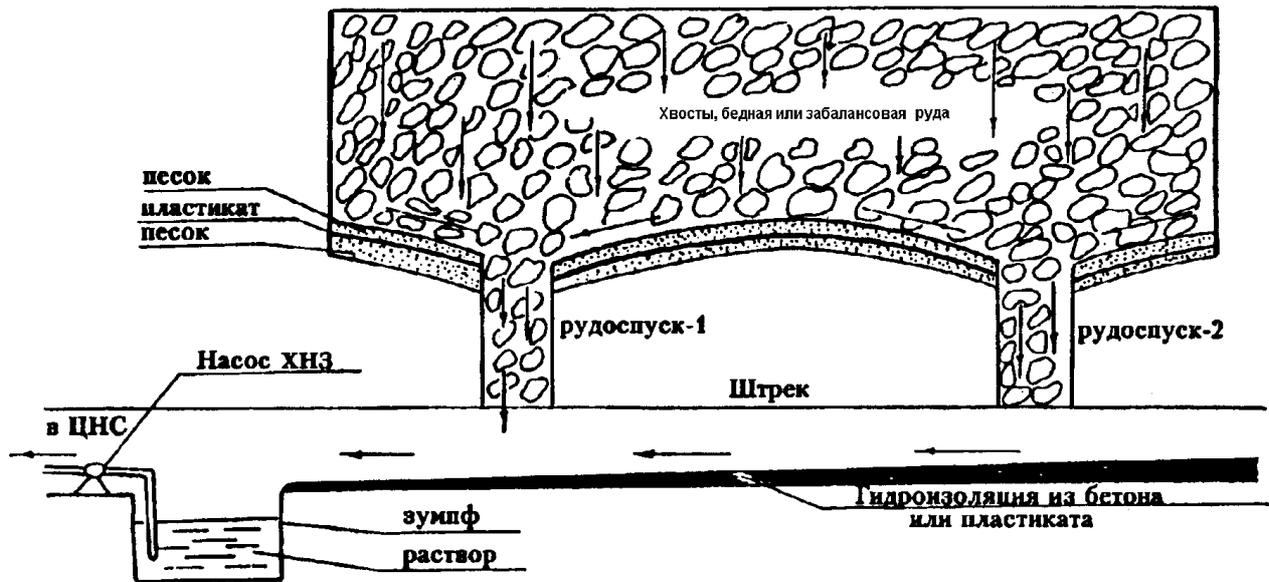


Рис. 9. Схема улавливания продуктивного раствора при выщелачивании хвостов, бедной или забалансовой руды в днище подземных камер

Для улавливания растворов на уровне трещинных вод бурились вкрест простирания рудных тел **специальные дренажные скважины** на глубину порядка 10-11 м от почвы выработки, с учётом угла растекания раствора (для трещиноватых пород он составляет 75°). Уровень трещинных вод находился под почвой выработок на глубине 2,8-4 м в зависимости от размеров камер в плане (рис. 10). В каждой дренажной скважине оборудовался всасывающий патрубок (на 1-2 м выше уровня забоя скважин), которые монтировались в сеть для мощных электровакуумных установок подъёма раствора производительностью не менее $6-8 \text{ м}^3/\text{час}$. Под каждым блоком монтировалось 4-5 электровакуумных насосов типа ХНЗ. Из центрального растворосборника ёмкостью 160 м^3 растворы насосами типа 8МСК откачивались по трубам из нержавеющей стали диаметром 133 мм на поверхность в химцех рудника для дальнейшей переработки.

Второй вариант снижения потерь продуктивного раствора заключается в создании в днище блока **пневмобарьера** за счёт подачи сжатого воздуха (импульсы высокого давления) в скважины, пробуренные перпендикулярно направлению преобладающих трещин из дренажного штрека до границ предполагаемого ореола растекания раствора (рис. 11). Величина избыточного давления поддерживается пневмоимпульсными установками автоматически в заданном режиме.

Третий вариант – снижение закупорки (кольматации) межпорового пространства и разрушение глинистых плёнок – достигается за счёт циклического воздействия на магазин руды **импульсами сжатого воздуха** высокого давления с помощью пневмоимпульсных устройств (см. рис. 12), причём непрерывную подачу реагента в камеру не прекращают. Раскольматация трещин и поровых пустот происходит как за счёт энергии импульсов сжатого воздуха,

так и за счёт движения реагента под давлением. Для большего эффекта сжатый воздух подаётся циклично – 1-2 цикла в сутки. Цикл заключается в последовательной подаче сжатого воздуха от скважины к скважине, например, слева направо по отношению к камере, а затем – справа налево.

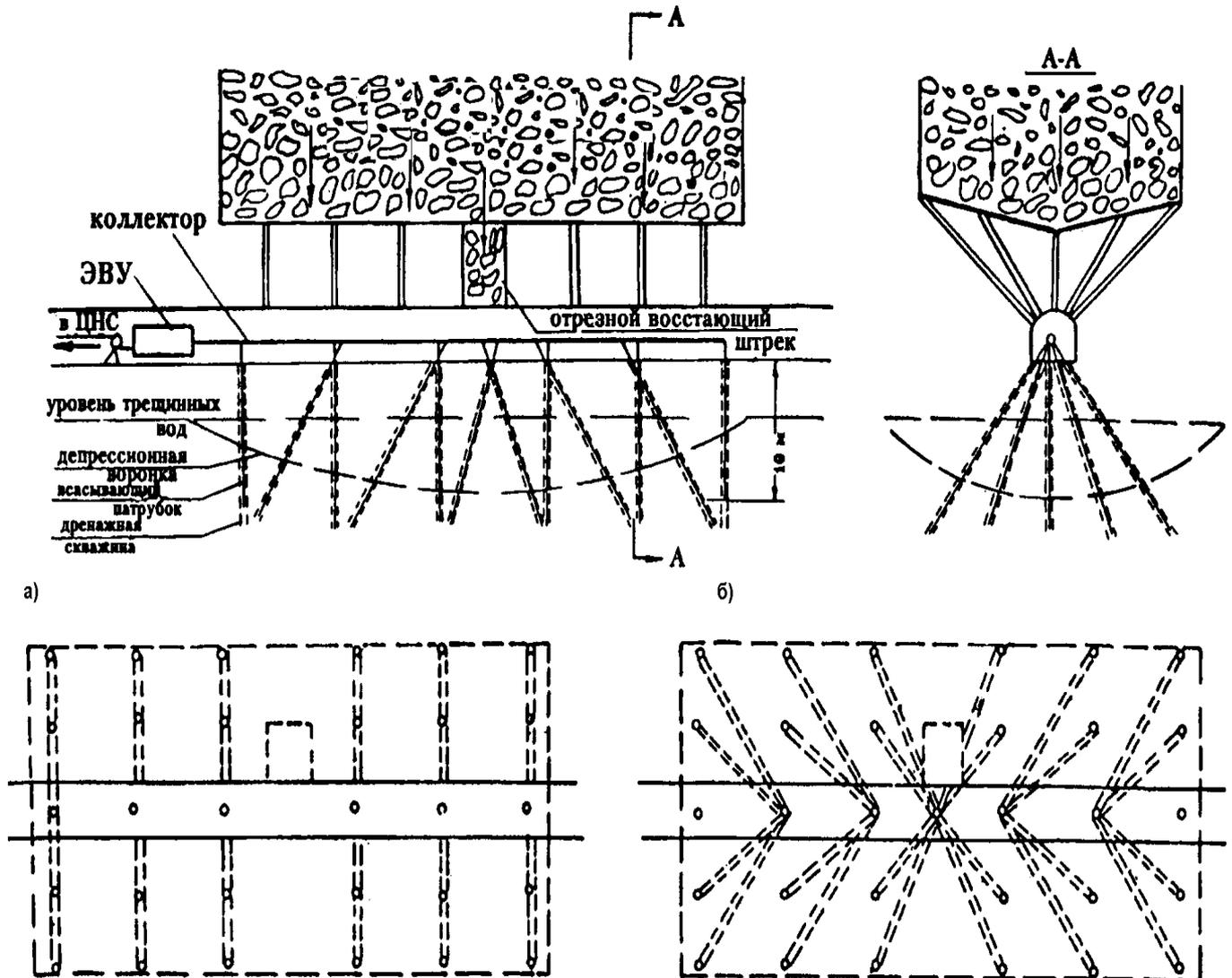


Рис. 10. Схема с двумя вариантами улавливания продуктивных растворов на уровне трещинных вод:

а – с линейным расположением дренажных скважин;

б – с площадным расположением кустов дренажных скважин

Четвёртый вариант – **реверсирование потока рабочего раствора** под большим давлением: подача рабочего раствора осуществляется попеременно в чётные и нечётные номера вееров скважин и дренаж продуктивного раствора также производится попеременно из нечётных и чётных номеров вееров скважин. Цикл заканчивается, когда в продуктивном растворе падает содержание урана ниже минимально-допустимого уровня. В заключение цик-

лов осуществляется режим «встречной фильтрации», когда рабочий раствор подаётся попеременно через скважину во все веера и дренаж производится также через скважину. Подача рабочего раствора во всех случаях происходит импульсами по 3-5 минут под давлением в 3,5-5,0 МПа. После стабилизации давления в камере до 2,5-3,0 МПа делается перерыв на 1 час, при этой разгрузке в массиве создаются дополнительные трещины растяжения. Подача раствора производится с помощью насоса НГР-250/50, оборудованного реле давления и реле времени, через бесшовные кислотостойкие трубы, выдерживающие давление 4-6 МПа.

Другие варианты повышения эффективности – камуфлетное взрывание зарядов ВВ в камере, электромагнитная обработка массива – требуют больших затрат при низкой отдаче.

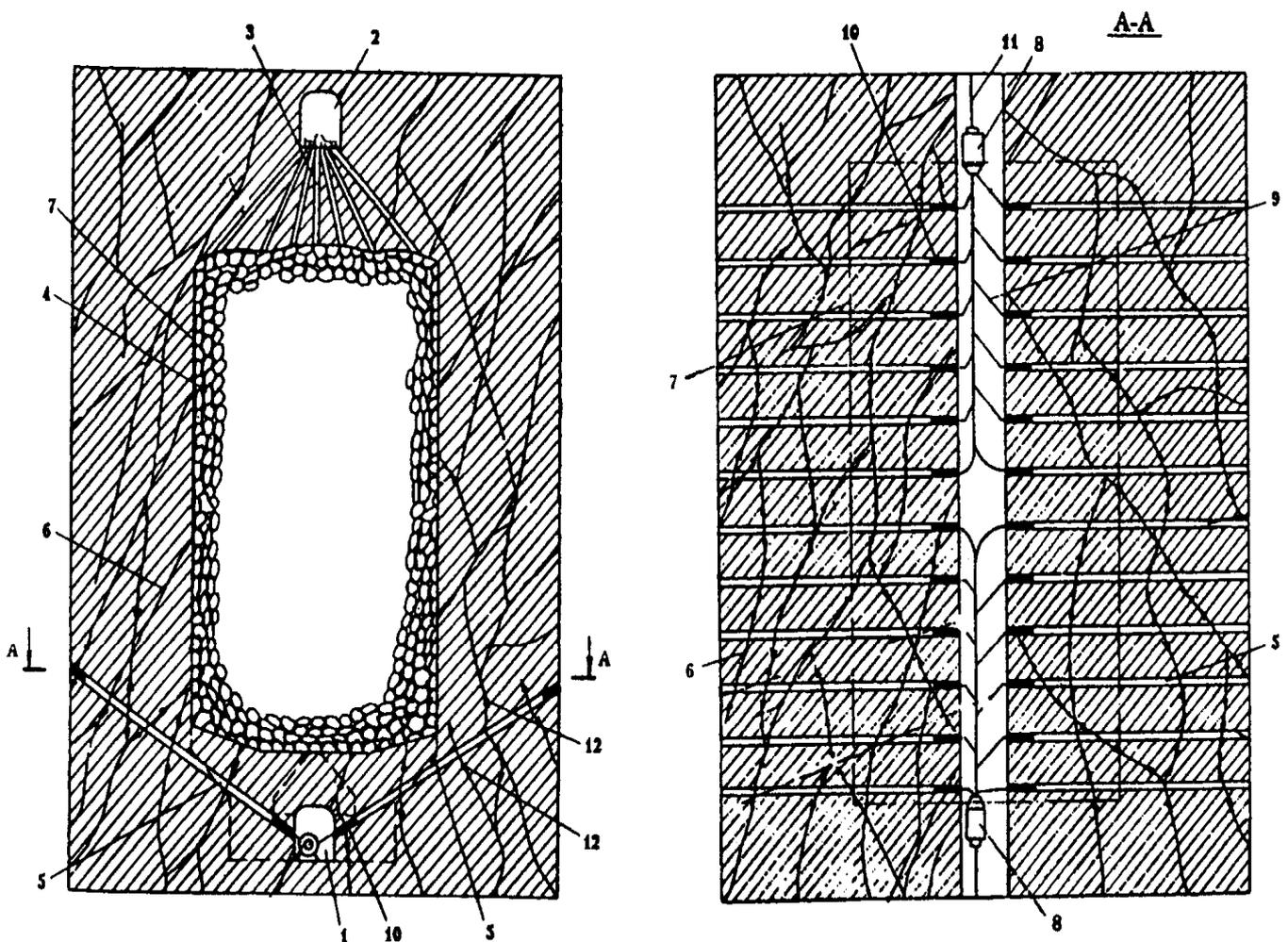


Рис. 11. Схема шахтного выщелачивания с использованием пневмобарьера
 1 – дренажный штрек; 2 – вентиляционный штрек; 3 – скважины подачи раствора; 4 – орошаемая замагазинированная руда; 5 – скважины пневмобарьера; 6 – трещины; 7 – контуры блока выщелачивания; 8 – пневмоимпульсные установки; 9 – пневмопривод; 10 – герметичный штуцер; 11 – общешахтная сеть сжатого воздуха

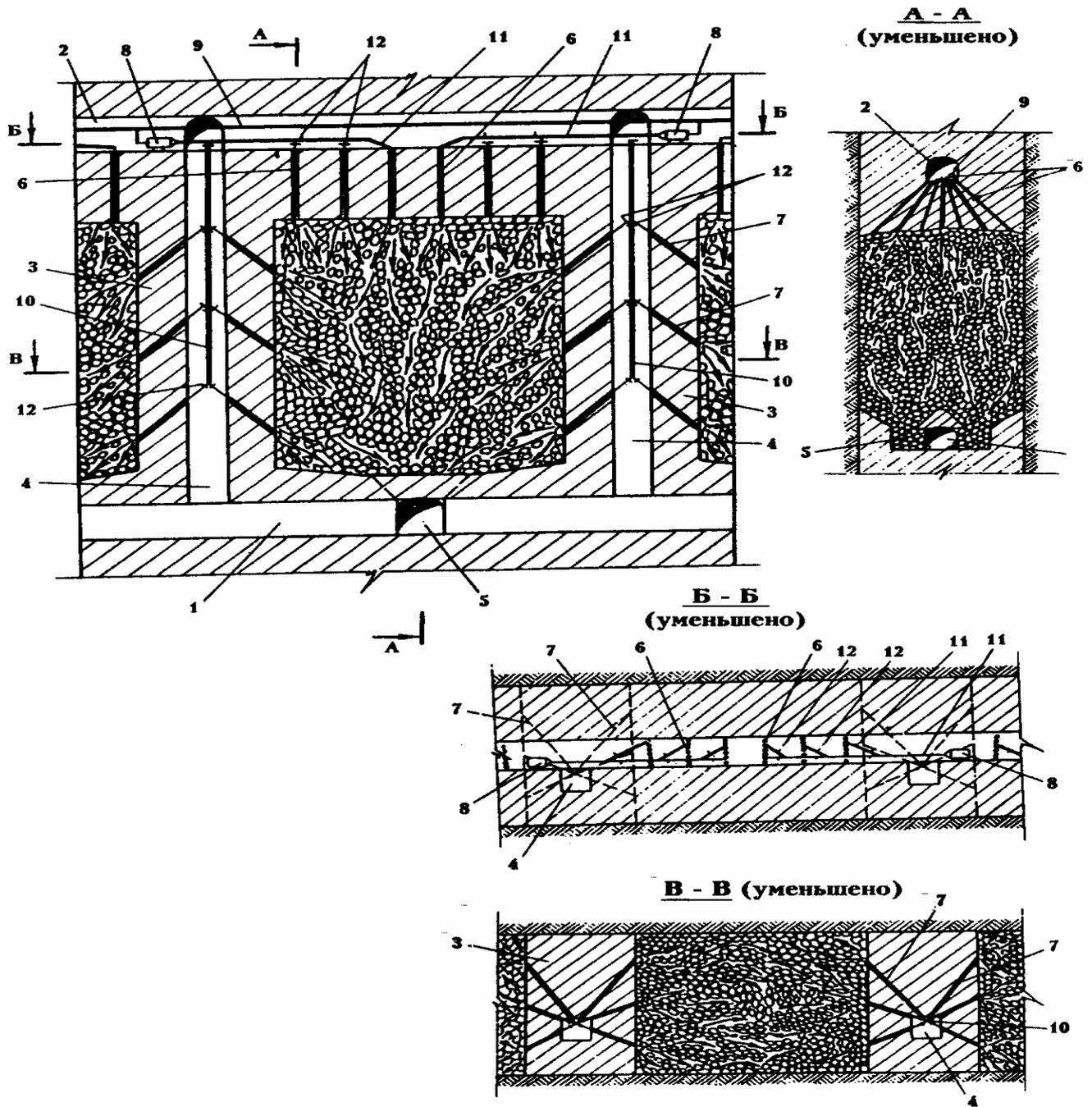


Рис. 12. Технологическая схема ШВ с циклическим воздействием на массив сжатого воздуха высокого давления

- 1 – сборный штрек; 2 – штрек подачи растворов; 3 – межблоковые целики;
 4 – восстающие; 5 – выпускной орт; 6 – скважины-оросители;
 7 – веера скважин из восстающих; 8 – пневмоимпульсные устройства;
 9 – общешахтная магистраль сжатого воздуха; 10, 11 – пневмопроводы;
 12 – задвижки-шиберы

Основная литература

1. Аренс В.Ж.. Физико-химическая геотехнология. - М.: изд. МГГУ, 2001, 656 с.
2. Подземное выщелачивание полиэлементных руд. Под ред. Н.П.Лаверова. - М.: изд. АГН, 1998, 446 с.
3. Водолазов Л.И., Дробаденко В.П., Лобанов Д.П., Малухин Н.Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. - М.: изд. МГГА, 1999, 300 с.
4. Толстов Е.А. Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. - М.: изд. МГГУ, 1999, 314 с.
5. Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В., Абдульманов И.Г. Горно-химическая технология добычи урана. - М.: изд. Геос, 2001, с. 37, 52-58.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Рабочая программа и контрольные задания	2
Основные положения	4
Глоссарий терминов	5
Геология	8
Классификация методов	12
Процессы сдвижения и гидроразрыва	15
Методы переработки	18
Скважинное выщелачивание	20
Системы разработки скважинного подземного выщелачивания	22
Подъём продуктивных растворов по скважинам	26
Чановое и кучное выщелачивание	27
Системы орошения рудных штабелей	28
Подземное внутримассивное выщелачивание	28
Возобновляемые природные источники энергии	29
Опыт выщелачивания урана в подземных камерах и в зонах обрушения	31
Определение параметров дробления руды	31
Варианты подготовки блока к шахтному выщелачиванию	33
Выщелачивание урана из горнорудного массива	38
Процесс формирования продуктивных растворов	38
Три периода процесса выщелачивания	40
Технологическая схема извлечения металла на ГМЗ	44
Повышение эффективности шахтного выщелачивания урана из за- магазинированной руды	52
Основная литература	57
Приложение	58

Приложение

Таблица 1

Растворители минералов

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Al	Алуниит	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	В воде и HCl не растворим. В концентрированной H_2SO_4 растворяется с трудом. При обработке прокаленного алуниита водой в раствор переходят квасцы. Легко растворяется в гидроксидах натрия и калия
	Биотит	$K(MgFe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Разлагается в H_2SO_4 , HNO_3 , смеси HF + H_2SO_4 (при нагревании разложение усиливается)
	Бемит	$AlO(OH)$	Растворяется в щелочах при 190°C и давлении 1,5-1,6 10^6 Па
	Галлуазит	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$	Кислоты и щелочи частично разлагают при нагревании
	Гиббсит	$Al(OH)_3$	Легко растворяется в гидроксидах щелочных металлов (в 11% KOH), растворим в 10% серной кислоте, 3% соляной кислоте
	Диаспор	HAU_2	В кислотах не растворяется. Растворяется в щелочах при температуре 200-225°C и давлении 1,8 10^6 Па
	Дистен	Al_2SiO_5	В кислотах не растворяется. Разлагается при автоклавной щелочной обработке или при спекании с известняком.
	Каолинит	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_4$	Растворим в конц.серной кислоте при нагревании до паров SO_3
	Калиевые квасцы	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Растворяются в воде, растворимость при 20°C составляет 151 г/л
	Корунд	Al_2O_3	В кислотах не растворяется
	Криолит	Na_3AlF_6	В крепкой H_2SO_4 растворяется совершенно
	Лейцит	$K(AlSi_3O_8)$	В HCl растворяется с выделением порошкового кремнезема

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Нефелин	$Na(AlSi_3O_8)$	Кислотами разлагается легко. Разлагается при автоклавной варке в крепком растворе NaOH
	Пирофиллит	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$	В кислотах и щелочах не разлагается
	Силлиманит	$Al(AlSiO_5)$	В кислотах и щелочах не растворяется
	Шпинель	$MgAl_2O_4$	В кислотах и щелочах не растворяется
Ba	Барит	$BaSO_4$	Практически нерастворим в воде и органических соединениях. Хорошо растворим в водных растворах щелочных карбонатов. Не растворяется в горячей HCl, порошок минерала медленно растворяется в конц. H_2SO_4
	Витерит	$BaCO_3$	Легко растворяется в слабых минеральных кислотах и относительно хорошо - в воде. Легко растворим даже в слабых органических кислотах (лимонной, винной, шавелевой), в уксусной кислоте при нагревании
Be	Берилл	$Al_2Be_3(Si_2O_7)$	В HCl и HNO_3 не растворяется, в HF растворяется при нагревании. Разлагается при сплавлении с содой. Для быстрого разложения и удаления кремния сплавливают с фторидами щелочных металлов
	Бертрандит	$Be_4(Si_2O_7)(OH)_2$	См. берилл.
	Гельвин	$(Mn,Fe,Zn)_3(BeSiO_4)_2S_2$	Растворяется в HCl с выделением H_2S ; при выпаривании образует студенистый осадок кремнезема
	Фенакит	$Be_3(SiO_4)$	См. берилл
	Хризоберилл	$BeAl_2O_4$	В кислотах не растворяется. Разлагается лишь при сплавлении порошка с KOH или $KHSO_4$
B	Ашарит	$MgHBO_3$	В воде не растворим. В щелочах растворяется с трудом, хорошо растворяется в минеральных кислотах
	Борацит	$Mg_3B_4O_{10}Cl_2$	Хорошо растворяется в минеральных кислотах
	Боронатрокальцит	$NaCaB_3O_7 \cdot 8H_2O$	Плохо растворим в воде. Хорошо растворяется в минеральных кислотах.
	Бура	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Хорошо растворяется в воде, особенно в горячей
	Гидроборацит	$MgCaB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	Растворяется в кислотах, в кипящей воде, в щелочах - при нагревании
	Датолит	$CaBSiO_4(OH)$	Растворяется в кислотах при нагревании; в щелочах нерастворим
	Кернит	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	Растворяется в воде, кислотах, щелочах
	Колеманит	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	Не растворяется в холодной воде, плохо растворяется в горячей и хорошо в минеральных кислотах; при нагревании растворяется в углекислых и едких щелочах

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Котонит	$Mg_3(BO_3)_2$	В воде не растворяется, плохо растворяется в щелочах, хорошо в горячих минеральных кислотах
	Пандермит	$Ca_4B_{10}O_{11} \cdot 7H_2O$	Растворяется в кислотах, а при нагревании и в щелочах, в воде растворяется плохо
	Сассолин	$B(OH)_3$	Хорошо растворяется в воде, особенно в горячей
V	Ванадинит	$Pb_3(VO_4)_2Cl$	Растворяется в HNO_3 ; разлагается в HCl , оставляя нерастворимый осадок
	Деклуазит	$(Zn,Cu)Pb(VO_4)(OH)$	Растворяется в HNO_3
	Карнотит	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_7 \cdot 3H_2O$	Растворяется в колодной разбавленной соляной кислоте
	Патронит	VS_2 или V_2S_5	Разлагается в HNO_3
	Роскоэлит	$KV_2(AlSi_5O_{10})(OH)_2$	После обжига ($850^\circ C$) с $NaCl$ ванадий растворяется в воде или разбавленных кислотах
Bi	Висмутит	$Bi(CO_3)(OH)_4$	Хорошо растворим в кислотах
	Висмут (самородный)	Bi	В HNO_3 легко растворяется. Из раствора при разбавлении выпадает белый осадок. Нерастворим в щелочах
	Висмутин	Bi_2S_3	В HNO_3 легко растворяется с выделением серы. С KOH вступает в реакцию
	Висмутовая охра (бисмит)	Bi_2O_3	Растворим в кислотах
	Тетрадимит	Bi_2Te_2S	Легко растворим в HNO_3 , растворяется в конц. H_2SO_4
W	Вольфрамит	$(Mn,Fe)WO_4$	Растворим в конц. H_2SO_4 при нагревании до паров SO_3 , в других кислотах не растворяется.
	Гюбнерит	$MnWO_4$	Разлагается соляной кислотой с выделением вольфрамовой кислоты. См. вольфрамит
	Ферберит	$FeWO_4$	См. вольфрамит, гюбнерит
	Ферригунгстит	$Fe_2(WO_4)(OH)_4 \cdot 4H_2O$	Разлагается в кислотах с выделением H_2WO_4 желтого цвета
	Шеелит	$CaWO_4$	Разлагается в кислотах с выделением вольфрамовой кислоты; растворяется в конц. H_2SO_4 при нагревании до паров SO_3
Ge	Аргиродит	$Ag_4(Ge, Sn)S_6$	С трудом разлагается в HNO_3
Fe	Альмандин	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Медленно разлагается конц. HCl и H_2SO_4 с выделением аморфного кремнезема, быстро разлагается в смеси HF и H_2SO_4
	Андрадит	$Ca_2Fe_2(SiO_4)_2$	Медленно разлагается конц. HCl и H_2SO_4 с выделением геля кремнезема; хорошо растворим в смеси HF и H_2SO_4
	Геленбергит	$CaFe(Si_2O_4)$	В HCl разлагается с выделением SiO_4
	Гематит	Fe_2O_3	Растворим в конц. HCl
	Гетит, лимонит	$HFFeO_2$	В HCl и HF растворяется при нагревании.

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Магнетит	Fe_3O_4	Полностью растворяется в HCl , конц. HNO_3 и H_3PO_4 ; медленно, но полностью растворяется в HP ; уксусная, лимонная и винная кислоты при кратковременном воздействии на магнетит не действуют
	Магнитомагнетит	$(Fe,Mg)Fe_2O_4$	См. магнетит
	Пирит	FeS_2	Полностью растворяется в конц. HNO_3 , в смеси кислот HCl и HNO_3 с выделением S ; разлагается в 30% H_2O_2 , а также в растворах $Na_2S_2O_3$
	Пирротин	$Fe_{1-x}S$	Растворим в разбавленной (1:2) HCl с выделением S и H_2S ; в разбавленной (1:1) HNO_3 растворяется при нагревании; растворяется в лимонной кислоте с выделением H_2S
	Сидерит	$FeCO_3$	Холодная HCl действует слабо, но при нагревании очень энергично
	Тюрингит	$Fe_{1.5}(Al,Fe)_{1.5}(Si_{2.5}Al_{1.5}O_{10})(OH)_6 \cdot nH_2O$	В HCl разлагается с выделением студенистого кремнезема
	Шамозит	$Fe_2Al(AlSi_7O_{10})(OH)_6 \cdot nH_2O$	В HCl легко разлагается с выделением студенистого кремнезема
Au	Золото самородное	Au	Растворяется в смесях кислот соляной и азотной (в пропорции 3:1, "царской водке"), серной с марганцевой, серной с азотной. Растворяется в водных растворах цианидов, хлоридов, бромидов, иодидов, тиокарбамида, тиосульфата, малонитрила
	Калаверит	$AuTe_2$	Разлагается в HNO_3 с выделением золота. См. золото самородное
	Креинерит	$(Au,Ag)Te_2$	См. калаверит
	Петцит	$(Ag,Au)_2Te$	См. калаверит
	Сильванит	$AuAgTe_4$	См. калаверит
	Электрум	Сплав Au с Ag	См. золото самородное
Y	Браннерит	$(U, Y, Ca, Fe, Th)_5Ti_5O_{16}$	Разлагается в серной кислоте
	Галолинит	$Be_2FeY_2Si_4O_{10}$	С минеральными кислотами не реагирует
	Ксенотим	YPO_4	Порошок минерала разлагается в H_2SO_4
	Ферросолинит	$(Y,Er)(Nb,Ta)_2O_4$	Разлагается серной кислотой
Cd	Гринокит	CdS	Растворяется в HCl с выделением сероводорода
	Сфалерит	ZnS	Растворяется в конц. H_2SO_4 и HCl с выделением сероводорода
K	Калиевая селитра	KNO_3	Легко растворяется в воде
	Сильвин	KCl	Легко растворяется в воде

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Ортоклаз	$KAl_3Si_3O_8$	Сплав минерала с Na_2CO_3 растворяется в кислотах
	Мусковит	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	Растворяется в HCl и H_2SO_4 при нагревании, в HF на холоде растворяется неполно.
Ca	Амфибол	Сложный силикат $Mg, Fe, RSiO_3$, где R- Ca, Mg или Fe	Не растворяется в минеральных кислотах. Разлагается обычно лишь после сплавления.
	Ангидрит	$CaSO_4$	Растворяется в HCl с трудом. Порошок легко растворяется в конц. H_2SO_4 . В воде, в противоположность гипсу, нерастворим. Разлагается щелочами.
	Анкерит	$Ca(Mg, Fe)(CO_3)_2$	Растворяется в 10% CH_3COOH (двукратная получасовая обработка при $100^\circ C$); 3-5% HCl (при нагревании)
	Апатит	$Ca_3(PO_4)_2(F, Cl)$	Растворяется в HCl , HNO_3 , H_2SO_4 ; при нагревании разлагается CH_3COOH
	Везувин	$Ca_2Al_2(SiO_4)_2(OH)_4$	В HCl разлагается частично, а после предварительного прокалывания полностью
	Волластонит	$CaSiO_3$	Разлагается в HCl
	Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Растворяется в HCl слабо. В воде, подкисленной H_2SO_4 , растворяется гораздо лучше, чем в чистой. Однако при концентрации H_2SO_4 свыше 75 г/л растворимость резко падает. Одна часть гипса растворяется в 200 ч H_2O
	Доломит	$Ca, Mg(CO_3)_2$	Растворяется в 3-5% HCl , 10% CH_3COOH при нагревании за 0,5 часа при Ж:Т = 100:1; в HF разлагается
	Кальцит	$CaCO_3$	Растворяется в 3-5% HCl без нагревания, 10% CH_3COOH в результате двукратной получасовой обработки при $100^\circ C$ и Ж:Т = 100:1; в HF разлагается на холоде
	Флюорит	CaF_2	Полностью разлагается в конц. H_2SO_4 и растворах $H_2C_2O_4$ при нагревании, несколько растворяется в HCl и HNO_3
	Эпидот	$Ca_2(Al, Fe)_3Si_2O_{11}OH$	Растворяется в HCl с выделением студенистого кремнезема только после предварительного сплавления или сильного прокалывания
Co	Карролит	$CuCo_2S_4$	Растворяется в HNO_3 , придавая жидкости розовый цвет
	Биберит	$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	Растворяется в воде
	Глауко-дот	$(Co, Fe)AsS$	В HNO_3 разлагается с выделением S и As_2O_3
	Кобаль-тин	$CoAsS$	Разлагается горячей HNO_3 , при этом выделяется S и As_2O_3 . Раствор окрашивается в розовый цвет
	Кобаль-тоириг	$(Fe, Co)_2S_9$	Растворяется в HNO_3
	Линнсит	Co_3S_4	Растворяется в конц. HNO_3 с выделением серы

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Сафлорит	$(CoNi)As_2$	Растворяется в HNO_3
	Скутте-рудит	$CoAs_2$	Растворяется в конц. HNO_3 с выделением As_2O_3
	Смальтин	$CoAs_{1-2}$	Растворяется в HNO_3 с выделением As_2O_3
	Сферок-бальтит	$CoCO_3$	При воздействии холодной HCl разлагается медленно, быстро с выделением CO_2 разлагается в горячих кислотах
	Шмаль-тин	$CoAs_2$	Растворяется в HNO_3
	Эригрит	$Co_2(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в HCl
La	Монацит	$(La, Ce)PO_4$	Медленно растворяется в HCl , растворяется в HNO_3
Li	Амбли-гонит	$LiAl(PO_3)F$	Растворим в H_2SO_4
	Лепидо-лит	$KLi_{1-5}Al_{1-5}(Si_4O_{10})(F, OH)_2$	Кислотой и разлагается только после сплавления
	Литио-филлит	$Li(Mn, Fe)PO_4$	В кислотах растворяется
	Сподумен	$LiAl(Si_2O_6)$	В HCl не растворяется, разлагается в конц. H_2SO_4 при нагревании. Сплав с K_2SO_4 растворяется в воде.
	Трифилит	$Li(Fe, Mn)PO_3$	Растворяется в HCl
	Петалит	$(Li, Na)AlSi_4O_{11}$	В кислотах не разлагается
	Цин-швальдит	$KLiFeAl(Si_7AlO_{10})(Fe, OH)_2$	В кислотах разлагается
Mg	Актино-лит	$Ca_2(Mg, Fe)_5(OH)_2(Si_4O_{11})$	Не растворяется в воде, HCl и HNO_3 . Разлагается в HF .
	Акто-филлит	$(Mg, Fe)_7(Si_4O_{11})(OH)_2$	С кислотами не реагирует
	Ашарит	$MgHBO_3$	Растворяется в HCl , но труднее, чем другие Mg -содержащие бораты
	Бишофит	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Легко растворяется в воде
	Брусит	$Mg(OH)_2$	Растворяется в кислотах
	Гекса-гидрит	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	Медленно растворяется в воде
	Диопсид	$Ca, Mg(SiO_3)_2$	Не растворяется в воде, HCl и HNO_3 . Разлагается HF на холоде.
	Доломит	$CaMg(CO_3)_2$	С холодной HCl реагирует очень слабо, в горячей - растворяется вполне
	Карналит	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Легко растворяется в воде
	Кизерит	$MgSO_4 \cdot H_2O$	В воде растворяется очень медленно, при этом переходит в более растворимый $MgSO_4 \cdot 7H_2O$
	Клино-хлор	$(Mg, Fe)_{1,75}Al_{1,25}(Si_{2,75}Al_{1,25}O_{10})(OH)_2$	Полностью разлагается только в конц. H_2SO_4
	Магнезит	$MgCO_3$	Вполне растворяется в горячих кислотах
	Оливин	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Порошок минерала бурно разлагается в конц. H_2SO_4 с образованием кремнекислоты. В HCl разлагается с выделением скелета кремнезема

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Пальгорскит	$2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot 4H_2O \cdot NaAl_2O_5 \cdot 4SiO_2 \cdot 5H_2O$	В горячей H_2SO_4 разлагается
	Пироп	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	Несколько растворяется HF
	Периклаз	MgO	Растворяется в HCl
	Серпентин	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	Разлагается в кислотах.
	Тальк	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	В HF разлагается
	Тремолит	$Ca_2Mg_5(OH)_2(Si_4O_{10})$	Не растворяется в воде, HCl и HNO_3 . Разлагается в HF
	Флоголит	$KMg_3(Si_3AlO_{10})(F,OH)_2$	С трудом разлагается кислотами и особенно в HCl.
	Фостерит	Mg_2SiO_4	Не растворяется в воде и HCl. Разлагается в конц. H_2SO_4
	Шпинель	$MgAl_2O_4$	Кислоты не действуют
	Энстатит	$Mg_2(Si_2O_6)$	В кислотах не растворяется
	Эпсомит	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	В воде легко растворим
Mn	Алабандин	MnS	Растворяется в HCl с выделением H_2S
	Браунит	Mn_2O_3	Разлагается в HCl с выделением хлора
	Гаусманит	Mn_3O_4	В HCl растворяется с выделением хлора
	Гауэрит	MnS_2	Растворяется в конц. HCl при нагревании с выделением H_2S и осаждеием S
	Грейнерит	$(Mg, Mn, Ca)CO_3$	Растворяется в кислотах
	Илезит	$(Mn, Zn, Fe) SiO_3 \cdot 4 H_2O$	Растворяется в воде
	Маллардит	$Mn SiO_3 \cdot 7 H_2O$	Легко растворяется в воде
	Манганит	$MnO_2 \cdot Mn(OH)_2$	Растворяется в конц. HCl
	Пирролозит	MnO_2	В HCl растворяется с выделением хлора
	Псиломелан	$mMnO \cdot MnO_2 \cdot 4H_2O$	Растворяется в HCl, HNO_3 , H_2SO_4 и в органических кислотах
	Родонит	$Mn_2Si_2O_6$	Частично растворяется в HCl
	Родохрозит	$MnCO_3$	В HCl на холоде растворяется медленно, но при нагревании весьма энергично, бурно выделяя CO_2
	Спессартин	$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$	Разлагается в HCl после сплавления
	Тефроит	Mn_2SiO_4	Разлагается в HCl с выделением кремниевой кислоты
Cu	Азурит	$Cu_2(CO_3)_2(OH)_2$	В кислотах растворяется с шипением, растворяется также в аммиаке, образуя раствор темно-синего цвета
	Айкинит	$CuPbBiS_3$	Растворяется в HNO_3 , выделяя $PbSiO_3$ и S
	Альгодонит	Cu_3As	Растворяется в HNO_3
	Атакамит	$CuCl \cdot 3Cu(OH)_2$	Растворяется в HCl с выделением хлора
	Авириг (диоптаз)	$Cu SiO_3 \cdot nH_2O$	В HCl и HNO_3 разлагается с выделением студенистого кремнезема

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Бирюза	$CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 5H_2O$	Растворяется в HCl
	Борнит	Cu_3FeS_4	Растворяется в HNO_3 и в "царской водке", а также в кипящем растворе NaOH
	Брошантит	$CuSiO_3 \cdot 3Cu(OH)_2$	В воде нерастворим, но растворим в кислотах и аммиаке
	Бурнонит	$CuPbSbS_3$	Растворяется в HNO_3 , причем раствор окрашивается в синий цвет и выделяется осадок $PbSiO_3$ и Sb_2O_3
	Дигидрит	$Cu_3(PO_4)_2(OH)_4$	Растворяется в HCl
	Кеевсенавит	$(Cu, Ni, Co)_2As$	Растворяется в HNO_3
	Ковеллин	CuS	В горячей HNO_3 растворяется с выделением серы. Слабо растворим в конц. HCl даже при нагревании. Растворим в NaOH
	Куприт	Cu_2O	В HNO_3 легко растворяется, раствор зеленеет, а от прибавления избытка аммиака становится синим. Несколько хуже растворяется в HCl, H_2SO_4
	Лузонит	Cu_3AsS_4	Растворяется в HNO_3 , с выделением серы
	Малахит	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	Хорошо растворяется в кислотах. В аммиаке частично растворяется, образуя раствор яркосинего цвета. Растворим в растворах аммонийных солей и KOH
	Медь самородная	Cu	В разбавленной HNO_3 легко растворяется, в HCl - с трудом
	Мохавкит	$(Cu, Ni, Co)_2As$	Полностью растворяется в HNO_3 при нагревании
	Натрохальцит	$Cu_3Na_2(SiO_4)_2(OH)_2 \cdot 2H_2O$	С трудом растворяется в воде, но легко растворяется в кислотах
	Олевенит	$Cu_3(AsO_4)_2 \cdot Cu(OH)_2$	Растворяется в HCl
	Розазит	$(Cu, Zn)_2 CO_3 \cdot (OH)_2$	Растворяется в кислотах
	Станнин	Cu_2FeSnS_4	Разлагается в растворах HNO_3 с образованием осадка -- SnO_2
	Твишлит	$Cu_2(PO_4)(OH) \cdot H_2O$	Растворяется в HCl
	Тенорит	CuO	Растворяется в HCl
	Тепиантит	Cu_2AsS_3 или $3Cu_2S \cdot As_2S_3$	В HCl не растворяется, разлагается в растворах HNO_3
	Тетраздрит	$Cu_3Sb_4S_3$ или $3Cu_2S \cdot Sb_2S_3$	В HNO_3 разлагается с выделением S и Sb_2O_3 , в HCl не растворяется
	Филиппит	$CuSO_4 \cdot Fe_2(SO_4)_3 \cdot 4H_2O$	Растворяется в воде
	Фосфорхальцит	$Cu_3PO_4 \cdot (OH)_3$	Растворяется в HCl
	Халькантит	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Растворяется в воде
	Халькозин	Cu_2S	В кислотах растворяется, лучше всего в HNO_3 с образованием серы. Растворяется и в инак-дах

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Халькопирит	$CuFeS_2$	В HNO_3 постепенно разлагается с выделением серы. Растворяется в царской водке и 30% растворе H_2O_2 . Раствор меди и HNO_3 зеленый, в царской воде - желтовато-зеленый
	Халькофиллит	$Cu_{14}Al_{12}(AsO_4)_2(SO_4)_3(OH)_{27} \cdot 36H_2O$	Не растворяется в HCl , но растворяется в HNO_3
	Хризолла	$CuSiO_3 \cdot nH_2O$	В кислотах разлагается
Mo	Вульфенит	$PbMoO_4$	В HCl растворяется медленно, покрывается белой пленкой $PbCl_2$. Растворяется в гидроксидах щелочных металлов при нагревании.
	Молибденит	MoS_2	Азотная кислота разлагает минерал с большим трудом, при этом выделяется SO_2 и образуется осадок MoO_3 . Конц. H_2SO_4 разлагает его лишь при температуре кипения; при действии H_2S образуется коллоидный $MoS_3 \cdot 4H_2O$
	Повеллит	$CaMoO_4$	Разлагается в минеральных кислотах, выделяя желтую вольфрамовую кислоту, растворимую в аммиаке. Растворим в карбонатах щелочей при длительном кипячении
	Ферри-молибдит	$Fe_2(MoO_4)_3 \cdot 7H_2O$	Растворяется в кислотах и разлагается в аммиаке
As	Арсенопирит	$FeAsS$	Разлагается в HNO_3 с выделением S и As_2O_3 , растворим в царской водке и хлорной воде
	Аурипигмент	As_2S_3	В HNO_3 и царской водке растворяется с выделением серы. Легко растворим без осадка в KOH
	Диморфит	As_2S_5	Растворяется в HNO_3 и царской водке. В гидроксидах щелочных металлов растворяется частично
	Леллингит	$FeAs_2$	Разлагается кипящей HNO_3 с выделением As_2O_3
	Мышьяк (самородный)	As	Растворяется в конц. HNO_3
	Реальгар	AsS	Растворяется в HNO_3 и крепком растворе KOH
	Симплезит	$Fe_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в HCl
	Скородит	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$	Растворяется легко в HCl , частично в HNO_3
	Энардит	Cu_3AsS_4	Минерал растворим в HNO_3
Na	Альбит	$NaAlSi_3O_8$	Не растворяется в воде и кислотах
	Анальцит	$Na(Al, Si_2O_6) \cdot H_2O$	В HCl вполне разлагается с образованием осадка иловатого кремнезема
	Арфведсонит	$Na_3(Mg, Fe)_4(Fe, Al)(Si_4O_{11})_2(OH, F)_2$	В кислотах нерастворим
	Галит	$NaCl$	Легко растворяется в воде
	Гаюин	$Na_6Ca(AlSiO_4)_6(SO_4)$	Растворяется в HCl с выделением студенистого осадка и PbS

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Глауберит	$Na_2Ca(SO_4)_2$	Растворяется в HCl , частично растворяется в воде
	Глаукофан	$Na_2(Mg, Fe)_3Al_2(Si_4O_{11})_2(OH, F)_2$	В кислотах не растворяется
	Десмин	$(Ca, Na_2K)_3Al_2Si_6O_{16} \cdot 6H_2O$	Разлагается соляной кислотой
	Жалент	$NaAl(Si_2O_6)$	Кислоты действуют только после сплавления
	Канкринит	$Na_6Ca(AlSiO_4)_6(CO_3, SO_4)$	Растворяется в HCl
	Мирабилит	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Хорошо растворяется в воде
	Натриевая селитра	$NaNO_3$	Легко растворяется в воде
	Натролит	$Na_2(Al_2Si_2O_{10}) \cdot 2H_2O$	Растворяется в HCl
	Натрон	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	Растворяется в воде легко. При действии HCl бурно выделяет углекислый газ
	Содалит	$Na_8(AlSi_3O_{10})_6Cl$	Растворяется в HCl
	Тенардит	Na_2SO_4	Легко растворяется в воде
	Эгирин	$NaFe(SiO_3)_2$	Не растворяется в воде и кислотах
Ni	Аннабергит	$Ni_2(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	В кислотах легко растворяется
	Гарнерит	$Ni_4(Si_4O_{10})(OH)_4 \cdot 4H_2O$	Разлагается при нагревании в конц. HCl
	Герсдорфит	$NiAsS$	Разлагается в HNO_3 с выделением S и As_2O_3
	Маухерит	Ni_3As_2	Полностью растворяется в HNO_3 с выделением NO_2
	Миллерит	NiS	В HNO_3 и царской водке растворяется, выделяя серу
	Мелонит	$NiTe_2$	Растворяется в азотной кислоте
	Моренозит	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	Легко растворяется в воде
	Никелин	$NiAs$	Растворяется в горячей азотной кислоте
	Пентландит	$(Fe, Ni)_9S_8$	С азотной кислотой дает зеленый раствор, разлагается HCl с выделением H_2S
	Раммельсбертит	$NiAs_2$	Разлагается в HNO_3 , причем осаждаются As_2O_3
	Ревдинскит	$(Ni, Mg)_6(Si_4O_{10})(OH)_6$	В горячей HCl разлагается с выделением слизистого кремнезема
	Шухардит	$(Ni, Fe, Al)_6\{(Si, Al)_4O_{10}\}(OH)_6$	Хорошо растворяется в HCl
Nb	Колумбит	$(Fe, Mn)Nb_2O_6$	Несколько разлагается в HF
Ta	Лопарит	$(Na, Ce, Ca)(Nb, Ta)_2O_7$	Разлагается в HF , в других кислотах не растворяется
	Цирохлор	$(Na, Ca...)_2(Nb, Ta...)O_6(F, OH)$	Частично разлагается в крепкой H_2SO_4 и HF
	Танталит	$(Fe, Mn)Ta_2O_6$	Несколько разлагается в HF
Sn	Касситерит	SnO_2	В кислотах не растворяется. Разлагается при сплавлении с бурой и содой

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Станнин	Cu_2FeSnS_4	В HNO_3 разлагается, выделяя серу и двуокись олова
Pt	Брэггит	$(Pt,Pd,Ni)S$	Разлагается в "царской водке"
Pd	Куперит	PtS	Не растворяется в кислотах и "царской водке"
Ir	Неньянский	(Ir_2O_3)	Чрезвычайно кислотоупорен
Os	Палладистая платина	(Pt,Pd)	Растворяется в "царской водке"
	Поликсен	$(PtFe)$	Растворяется в "царской водке"
	Порнесит	(Au,Pd)	Растворяется в "царской водке"
	Сперрилит	$PtAs_2$	В кислотах не растворяется, даже в "царской водке"
	Сысертекиит	(Os, Ir)	Чрезвычайно кислотоупорен
Hg	Каломель	$HgCl$	Растворяется только в "царской водке"
	Киноварь	HgS	Растворяется в азотной кислоте. Разлагается в растворах K_2S и Na_2S
	Колорадоит	$HgTe$	Разлагается в азотной кислоте
	Ливингстонит	$HgSb_2S_7$	Растворяется в азотной кислоте с образованием осадка
Pb	Аттаит	$PbTe$	Растворяется в азотной кислоте
	Англезит	$PbSiO_4$	Растворяется в HNO_3 с образованием осадка. Растворяется в смеси 25% $NaCl$ и HCl (5 мл/л), смеси 25% $NaCl$ с $FeCl_3$ (60 г/л), в 20% $NaOH$ и 20% HCl при нагревании
	Буланжерит	$Pb_5Sb_4S_{11}$	Полностью растворяется в горячей HCl , растворяется в HNO_3 и растворах $FeCl_3$, содержащих $NaCl$
	Бурнонит	$CuPbSbS_3$	Растворяется в HNO_3 с образованием осадка
	Галенит	PbS	Растворяется в конц. горячей HCl , конц. HNO_3 при длительном нагревании, порошок минерала растворяется в H_2SO_4 , $FeCl_3$, смеси 25% $NaCl$ с $FeCl_3$ (60 г/л)
	Джемсонит	$Pb_4FeSb_6S_{14}$	Растворяется в HCl с выделением H_2S ; при охлаждении раствора выпадает осадок $PbCl_2$
	Клаустилит	$PbSe$	Растворяется в HNO_3 , при прибавлении H_2SO_4 выпадает осадок сульфата свинца
	Козалит	$CuPb_7Bi_3S_7$	Разлагается в HCl с выделением осадка
	Крокоит	$PbCrO_4$	Разлагается в H_2SO_4 с образованием осадка $PbSO_4$
	Миметезит	$Pb_3(AsO_4)_2Cl$	Растворим в HNO_3 , HCl и растворах KOH
	Пироморфит	$Pb_3(PO_4)_2Cl$	Растворяется в соляной кислоте
	Штольцит	$PbWO_4$	Растворяется в соляной кислоте с выделением H_2WO_4
	Церуссит	$PbCO_3$	Растворяется в разбавленной HNO_3 , а также в KOH , HCl и в 10% CH_3COOH

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Se	Клаустилит	$PbSe$	Растворяется в азотной кислоте
	Науманнит	Ag_2Se	Растворяется в азотной кислоте
Ag	Аргентит	Ag_2S	Растворяется в азотной кислоте с выделением серы
	Гессит	Ag_2Te	Растворяется в азотной кислоте
	Дискразит	Ag_3Sb	Разлагается азотной кислотой с выделением белого осадка Sb_2O_3
	Кераргирит	$AgCl$	Хорошо растворяется в аммиаке
	Лаутит	$(Cu,Ag)AsS$	Растворяется в HNO_3
	Метиллит	$AgBiS_2$	Растворяется в HNO_3
	Науманнит	Ag_2Se	Растворяется в азотной кислоте
	Пираргирит	Ag_5SbS_3	Растворяется в азотной кислоте
	Писнаргирит	$Ag_2S Bi_2S_3$	В конц. HNO_3 после долгого кипячения растворяется полностью
	Полибазит	Ag_5SbS_6	Разлагается в азотной кислоте.
	Прустит	Ag_3AsS_3	Растворяется в азотной кислоте.
	Серебро (самородное)	Ag	Растворяется в HNO_3 . См. золото
	Стефанит	$AgSbS_4$	См. пираргирит
	Эвкварит	$Ag_2Se Cu_2Se$	Разлагается в азотной кислоте
Sr	Стронцианит	$SrCO_3$	В кислотах легко растворяется
	Целестин	$SrSO_4$	В воде нерастворим. Растворим в конц. H_2SO_4
Sb	Антимонит	Sb_2S_3	Растворяется медленно в горячей соляной кислоте с выделением H_2S . Разлагается в HNO_3 с образованием нерастворимого Sb_2O_3 белого цвета
	Сенармонтит	Sb_2O_3	Растворяется в конц. растворе KOH . Растворяется в соляной кислоте
	Сурьмяная обманка	$2Sb_2S_3 Sb_2S_7O$	В HCl растворяется почти нацело с выделением H_2S
Ti	Анализ	TiO_2	Тонкий измельченный порошок минерала, смешанный с тремя частями Na_2CO_3 , сплавляется, после чего сплав растворяется в HNO_3
	Брукит	TiO_2	См. анализ
	Ильменит	$FeTiO_3$	Не растворяется в воде и кислотах
	Перовскит	$CaTiO_3$	Разлагается только кипящей H_2SO_4 или после сплавления с $KHSO_4$
	Рутил	TiO_2	В кислотах не растворяется; растворяется только после сплавления с KOH или $KHSO_4$
	Сфен	$CaTiSiO_5$	В горячей HCl разлагается частично, в H_2SO_4 полностью с образованием $CaSO_4$

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Th	Бреннерит	$(U, Y, Ca, Fe, Th)_3Ti_3O_{16}$	Растворяется в серной кислоте
	Монацит	$(Ce, La, Th)(PO_4, SiO_4)$	В HCl с трудом растворяется, выделяя белый осадок. Разлагается H_2SO_4 и $HClO_4$, при сплавлении с содой
	Торит	$ThSiO_4$	Растворяется в HCl с выделением студенистого кремнезема. Из раствора при прибавлении шавелевой кислоты выпадает осадок, растворимый в шавелево-кислом аммонии
	Торианит	ThO_2	Растворяется в азотной кислоте
	Ферриторит	$(Th, Fe)SiO_4$	Растворяется в HCl
U	Аутигнит	$CaO \cdot 2UO_2 \cdot P_2O_5 \cdot 8H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Джоханит	$CuU_2S_5O_{16} \cdot 4H_2O$	Частично растворяется в воде, но полностью растворяется в соляной кислоте
	Карнотит	$K_2U_7(VO_4)_2O_4 \cdot 3H_2O$	Растворяется в холодной разбавленной HCl.
	Метаторбернит	$Cu(UO_2)_4(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в азотной кислоте
Ca	Отунит	$Ca(UO_2)_4(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в азотной кислоте
	Торбернит	$Ca(UO_2)_4(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Треггерит	$3UO_2 \cdot As_2O_5 \cdot 8H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Тюямунит	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Уранинит	UO_2	Растворяется в азотной кислоте, H_2SO_4
	Ураноспинит	$CaO \cdot 2UO_2 \cdot As_2O_5 \cdot 8H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Ураноплиг	$(UO_2)_6(SO_4)(OH)_{10} \cdot 12H_2O$	Частично растворяется в воде, хорошо - в кислотах
	Ураноталлит	$Ca_2(UO_2)_2(CO_3)_3 \cdot 10H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Ураноцирцит	$Ba(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
	Цейнерит	$Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Растворяется в соляной кислоте
Cr	Кеммерерит	$(Mg, Fe)_2(Al, Cr)(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Разлагается в серной кислоте
	Крокоит	$PbCrO_4$	Растворяется в горячей HCl, выделяя хлор и осажая $PbCl_2$, а также в KOH
	Уваровит	$Ca_3(CrAlFe)_2(SiO_4)_3$	Растворяется в кислотах только после сплавления (например, с содой)
	Хромит	$FeCrO_4$	См. уваровит
Cs	Воробьевит	$Cs(Be_2Li)Al_2(Si_4O_{14})$	В кислотах не растворяется
	Поллуцит	$Cs(AlSi_2O_6)$	В кислотах не растворяется
Zn	Ганит	$ZnAl_2O_4$	Кислоты и щелочи не действуют
	Монгеймит	$(Zn, Fe)CO_3$	В кислотах растворяется легко
	Смитсонит	$ZnCO_3$	В кислотах растворяется легко

Элемент	Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
	Сфалерит	ZnS	Растворяется в конц. H_2SO_4 и HCl с выделением S
	Франклинит	$(Zn, Mn)Fe_2O_4$	Растворим в соляной кислоте
	Цинкит	ZnO	Растворяется в кислотах
Zr	Циркон	$ZrSiO_4$	В кислотах не растворяется

Таблица 2

Растворители породообразующих минералов

Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Авгит	$\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Al})[(\text{Si, Al})_2\text{O}_6]$	В кислотах не растворяется. Титанингит (разность обогащения TiO_2) разлагается в горячей HCl полностью
Аксинит	$\text{Ca}_2(\text{Mn, Fe})\text{Al}_2\text{BSi}_4\text{O}_{13}(\text{OH})$	В HCl не разлагается, но после предварительного прокалывания растворяется с выделением студенистого кремнезема
Андрадит	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_2$	В HCl растворяется с большим трудом, выделяя студенистый кремнезем
Анортит	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$	В кислотах не растворяется
Астрофиллит	$(\text{K, Na})_2(\text{Fe, Mn})_4\text{TiSi}_4\text{O}_{11}(\text{OH, F})_2$	Разлагается в кислотах
Брейнерит	$(\text{Mg, Fe})\text{CO}_3$	Растворяется в кислотах
Бронзит	$\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$	В кислотах не растворяется
Вавеллит	$\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	С трудом растворяется в HCl
Вермикулит	$(\text{Mg, Fe})_2[(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	В кислотах не растворяется
Гармотом	$(\text{K, Ba})(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{14}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Разлагается в соляной кислоте
Гейландит	$(\text{Ca, Na}_2)(\text{AlSi}_3\text{O}_8) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Легко разлагается в соляной кислоте
Геленит	$(\text{Ca, Mg, Fe})_2(\text{Al, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_8$	С HCl желатинизирует
Гиалофаны	$(100-n)\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) \cdot n\text{Ba}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$	В кислотах не растворяются
Гиперстен	$(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Не растворяется в воде и кислотах
Глаукохит	$\text{K}(\text{Fe, Al, Mg})_{2-3}[\text{Si}_3(\text{Si, Al})\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Практически нерастворим в соляной кислоте; растворяется в кислотах только после сплавления с содой
Гранаты	$\text{A}_3\text{B}_3(\text{SiO}_4)_3$, где $\text{A} = \text{Mg, Fe, Mn, Ca}$, $\text{B} = \text{Al, Fe, Cr}$	В HCl лишь андрадит растворяется с большим трудом, выделяя студенистый кремнезем. Остальные разлагаются только после сплавления
Графит	C	В кислотах не растворяется. Порошок в смеси с KNO_3 при нагревании дает вспышку
Гумит	$\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH, F})_2$	Растворяется в H_2SO_4 с выделением HF
Дравит	$(\text{Na, Ca})(\text{Mg, Al})_6[\text{B}_3\text{Al}_3\text{Si}_6(\text{O, OH})_{30}]$	В кислотах не разлагается
Ильваит	$\text{Ca, Fe}_2, \text{Fe}(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	Легко растворяется в соляной кислоте
Кварц	SiO_2	С кислотами не реагирует, за исключением HF , с которой легко образует летучее соединение - SiF_4 . Поддается влиянию щелочей
Клинохлор	$(\text{Mg, Fe})_{4-7}\text{Al}_{1-2}(\text{Si}_{2-7}\text{Al}_{1-2}\text{O}_{10}) (\text{OH})_n$	Полностью разлагается только в конц. H_2SO_4

Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Кордиерит	$\text{Al}_3(\text{Mg, Fe})_2(\text{Si}_2\text{AlO}_{16})$	В кислотах не разлагается
Лазулит	$\text{Al}_2(\text{Mg, Fe})(\text{OH})_2 (\text{PO}_4)_2$	С трудом растворяется в соляной кислоте. Лучше растворяется после прокалывания
Лампрофиллит	$\text{Na}_2\text{SrFeTi}_2(\text{SiO}_4)_3\text{F}$	В кислотах разлагается
Ловгоррит	Титано-силикат $\text{Ca, Ca, Sr, Na, Th}$	Легко растворяется в кислотах
Ломонтит	$(\text{Na, Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Разлагается соляной кислотой
Мелилит	$(\text{Ca, Na})_2(\text{Mg, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_7$	С HCl желатинизирует
Микроклин	$\text{K}(\text{Al, Si}_3\text{O}_8)$	В кислотах не разлагается
Нонтронит	$(\text{Fe, Al})_2(\text{Si}_4\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Разлагается в соляной кислоте
Ортит	$(\text{Ca, Ce})_2(\text{Al, Fe})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4) (\text{O, OH})$	Обычно разлагается HCl , но после прокалывания в кислотах нерастворим
Парагонит	$\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Не растворяется в воде и кислотах
Пеннин	$5(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Соляная кислота только отчасти разлагает, серная большей частью разлагает совершенно
Плагиоклазы	$(100-n)\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) \cdot n\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$	В кислотах не растворяются
Пренит	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Медленно разлагается в HCl , не давая студня; после прокалывания быстро растворяется, образуя студень
Прохлорит	$23\text{MgO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	Соляная кислота только отчасти разлагает, серная кислота большей частью совершенно разлагает
Рибекит	$\text{Na}_2\text{Fe}_2(\text{OH})_2(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$	Не растворяется в воде и кислотах
Сепиолит	$\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{11}) \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	В соляной кислоте разлагается с выделением осадка
Скаполит	$(75-n)\text{Na}_4(\text{AlSi}_3\text{O}_8) \cdot 3\text{Cl} \cdot n\text{Ca}_4(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_2(\text{SO}_4, \text{CO}_2)$	В HCl отчасти разлагается тем легче, чем больше содержит мейонитовой молекулы. При этом кремнезем выделяется не в виде студня, а илового осадка
Сколецит	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Разлагается в соляной кислоте с выделением студенистого осадка
Ставролит	$\text{FeAl}_4(\text{SiO}_4)_2\text{O}_2 (\text{OH})_2$	Не растворяется в воде и кислотах. Частично разлагается серной кислотой
Томсонит	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Растворяется в соляной кислоте с выделением студенистого осадка
Топаз	$\text{Al}_2(\text{F, OH})_2\text{SiO}_4$	Тонко измельченный порошок минерала, смешанный с тремя частями Na_2CO_3 , сплавляется и сплав растворяется в HNO_3 . Минерал частично разлагается серной кислотой
Турмалин	$(\text{Na, Ca})(\text{Mg, Al})_6[\text{B}_3\text{Al}_3\text{Si}_6(\text{O, OH})_{30}]$	В кислотах не разлагается
Фаялит	Fe_2SiO_4	Разлагается соляной кислотой с выделением студенистого осадка
Филлипсит	$(\text{K, Ca})(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$	Разлагается в соляной кислоте с выделением слизистого или хлопьевидного SiO_2

Название минерала	Химическая формула	Растворители и условия растворения
Фтор - и хлорапатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ и $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	В HNO_3 , HCl и H_2SO_4 растворяется
Хлоритонд	$\text{Fe}_2\text{Al}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_4$	Соляная кислота не действует, конц. H_2SO_4 вполне разлагает
Хризотил-асбест	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	В соляной кислоте в отличие от амфибольных асбестов, растворяется, оставляя волокнистый скелет кремнезема. Разлагающее действие оказывает также морская вода
Цонзит	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{12}(\text{OH})$	Кислотами не разлагается. После прокальвания и сплавления разлагается в HCl
Чермнгит	$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Растворяется в воде
Эвдиалит	$(\text{Na}, \text{Ca})_6\text{ZrSi}_6\text{O}_{17}(\text{OH}, \text{Cl})$	В кислотах легко разлагается