

003-781

На правах рукописи
Для служебного пользования
Экз № # 019

РАЗЫКОВ ЗАФАР АБДУКАХОРОВИЧ

**МИГРАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ
КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫХ
РУД, ПУЛЬП ХВОСТОХРАНИЛИЩ И
СПОСОБЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ
РАДИОНУКЛИДОВ**

02.00.04 - физическая химия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Душанбе - 2003 г.

Работа выполнена в научно-производственном центре ГП "Востокредмет" и в Институте химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан

Научные консультанты: Академик АН Республики Таджикистан, доктор химических наук, профессор **Халиков Джурабай Халикович**
доктор химических наук, профессор **Юнусов Музафар Мамаджанович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, академик АН Республики Таджикистан, профессор **Марупов Рахим Марупович**
доктор технических наук, профессор **Сафаров Махмадали Махмадиевич**
доктор химических наук **Пулатов Махмуджан Саиджанович**

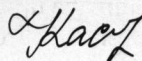
Ведущая организация: Унитарное государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии"

Защита состоится: "17" декабря 2003г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 047.003.01 при Институте химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063 Республика Таджикистан г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: guli@academv.td.silk.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии им В.И. Никитина АН Республики Таджикистан.

Автореферат разослан "28" октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук



Касымова Г.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Создание ядерной энергетики связано с вредным воздействием отдельных этапов - добыча и переработка урановых руд, изготовление тепловыделяющих сборок, эксплуатация АЭС, переработка облучённого топлива, хранение радиоактивных отходов - на окружающую среду.

Вопросу воздействия на окружающую среду предприятий по добыче и переработке урановых руд оказывается недостаточное внимание. Между тем всё возрастающие масштабы этих производств вызывают глобальные нарушения установившегося веками равновесия в природе за счёт увеличения загрязнения окружающей среды естественными радионуклидами и другими факторами. Основная масса отходов добычи и переработки урановых руд формируется в виде хвостохранилищ продуктовых вод, которые отличаются значительной минерализацией, и задача снижения неблагоприятного воздействия их на окружающую среду является весьма важной и требует решения ряда сложных инженерных, научных, проектных и производственных проблем.

Одним из действующих объектов, расположенных на территории Республики Таджикистан является Дигмайское хвостохранилище, которое с ранее захороненным хвостохранилищем опытного гидрометаллургического завода (ГМЗ, г. Гафуров), расположенного в непосредственной близости от населённого пункта представляет собой потенциальную опасность для растительности, подземных вод, продуктов питания и т.д.

Проблема защиты подземных вод является важной составной частью общей проблемы охраны окружающей среды. Актуальность ее значительно возросла в последнее время в связи с реальной опасностью загрязнения действующих и проектируемых водозаборов, в результате фильтрации техногенных компонентов-загрязнителей, содержащихся в стоках промышленных объектов, в водоносные пласты, открытые водоемы, в растворы хвостохранилищ, местах захоронения жидких отходов, полигонов подземного выщелачивания.

Фильтрация растворов и сопровождающие ее физико-химические процессы, обуславливающие, в конечном итоге, миграцию компонентов-загрязнителей, происходят в сложных горно-геологических условиях. При этом, преобладающей информацией о гидрогеохимии процессов, протекающих в недрах в натуральных условиях, служат данные на входе объекта эксплуатации и химического анализа растворов в наблюдательных скважинах, в том числе с использованием дистанционных методов изучения химического состава, кислотности и окислительно-восстановительного потенциала природных вод и техногенных растворов. Однако, эти традиционные методы наблюдений дают весьма при-

различные материалы, определено значение коэффициентов диффузии, кратность ослабления дозы облучения в зависимости от толщины покрытия, выбран "суглинок лёссовидный", как наиболее оптимальный материал для уменьшения выхода радона из объекта в окружающую среду до субфонового уровня.

Практическая ценность работы. Полученные в работе количественные данные о радиационной обстановке, содержании радионуклидов и тяжёлых элементов в окружающей среде, в хвостохранилищах и динамики их распространения использованы при разработке природоохранных мероприятий и защите населения от отрицательного воздействия радиационных факторов.

Установленные закономерности диффузии радона через различные материалы и количественные данные по определению коэффициентов диффузии позволили рекомендовать "суглинок лёссовидный", как наиболее доступный и экономически выгодный материал для дозахоронения хвостохранилища ГМЗ, что было осуществлено на практике и достигнуто субфоновое значение радиационной обстановки на поверхности объекта после её реализации.

Полученные в работе количественные данные о содержании кислорода в технологических и наблюдательных скважинах использованы для оценки степени закисления и регулировки подачи окислителя при бескислотном выщелачивании урана.

Сведения о химическом составе пластовых вод и окислительно-восстановительной обстановке являлись критерием при выборе технологии отработки в каждом конкретном случае. Установленная закономерность распределения сульфид-иона в технологических скважинах позволила проводить районирование обрабатываемых залежей и рекомендовать соответствующие режимы подачи окислителей в пласт.

По данным химического состава, кислотности и окислительно-восстановительного потенциала техногенных растворов, полученным электрохимическими методами в скважинах, производился контроль за растеканием растворов и контроль за процессом рекультивации. По режимным замерам в контрольно-наблюдательных скважинах оценивалось влияние объектов ПВ на загрязнение природных вод.

Разработанное математическое описание физико-химических процессов, происходящих в недрах при подземном выщелачивании, геофильтрации техногенных растворов, миграции компонентов-загрязнителей находит широкое применение при проектировании объектов подземного выщелачивания, хвостохранилищ, их последующей рекультивации и выработке методов защиты подземных вод. Применение методов моделирования в районе водозабора г. Худжанда и прудков рудника №3 ГП

"Востокредмет" позволило дать оценку характера их взаимодействия и выработать научно-обоснованные природоохранные мероприятия.

Настоящее исследование выполнено в соответствии с планом НИР Минсредмаша СССР "Совершенствование ионообменной технологии извлечения урана и сопутствующих ценных компонентов из пульпы и растворов ГМЗ-1" (регистрационный номер РК-Х35494), а также с планами НИР ГП "Востокредмет" - "Разработка комплекса геофизических методов при решении задач охраны окружающей среды" и "Автоматизация и контроль технологических процессов подземного выщелачивания с применением вычислительной техники" (№7/17 от 03.02.99 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 39 публикациях, в том числе 2 монографиях, 2 патентах и 10-и тезисах докладов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: "Международной региональной конференции МАГАТЭ по вопросам консервации отходов радиоактивных веществ" (Алматы, 1995г.), "Республиканской конференции по вопросам охраны окружающей среды и вторичному использованию отходов", (Душанбе, 1996г.), УШ Всероссийской конференции "Ванадий, химия, технология, применение", (Чусовой, 2000 г.), Международной конференции "Golden Jubilee convention. The Institution of Engineers Pakistan", (Карачи, 1998г.), III Междун. конференции "Благородные и редкие металлы", (Донецк-Святогорск, 2000 г.), Международной конференции "Водные ресурсы Центральной Азии и их рациональное использование (Душанбе, 2001г.), международном конгрессе "Colloquium spectroscopicum international CSI XXXII" (Претория, Африка -2001г.), республиканской конференции "Достижения в области химии и химической технологии" (Душанбе, 2001г.), II Междун. научно-практической конференции "Актуальные проблемы урановой промышленности" (Алматы, 2002г.), международной конференции "Earth Management-all Peoples together" (Торонто, Канада-2002г.), International conference on issues and Trends in Radioactive Waste Managment (Vienna, Austria, 2002), Междун. научно-практической конференции "16 сессия Шурои Оли Республики Таджикистан и ее историческая значимость в развитии науки и образования" (Душанбе, 2002г.), Республиканском научно - практическом семинаре "Современное состояние водных ресурсов Таджикистана - проблемы и перспективы рационального использования", (Душанбе, 2003г.).

Объем и структура работы. Диссертация представляет собой рукопись, изложенную на 268 стр. машинописного текста. Состоит из 6 глав, иллюстрирована 56 рисунками, 32 таблицами. Список использованной литературы включает в себя 286 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, изложены цели и научная новизна диссертации, практическая ценность и ее структура.

В литературном обзоре (Глава 1) изложены основные особенности процесса подземного выщелачивания полиэлементных руд, анализ работ, посвященных теоретическим и практическим аспектам геофильтрации техногенных растворов и миграции компонентов-загрязнителей, геотехнологии добычи урана и сопутствующих элементов, математическое моделирование фильтрационных потоков и миграции компонентов загрязнителей, а также современное состояние хвостохранилищ уранодобывающей промышленности.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментальной части приведена геолого-гидрогеологическая характеристика объектов, методика режимных наблюдений динамики изменения геохимических параметров района, методы рекультивации водоносных горизонтов полигонов подземного выщелачивания, методики определения интенсивности гамма-излучения, естественных радионуклидов, диффузии радона через различные материалы, а также потенциометрические и полярографические методы анализа вод и техногенных растворов.

2.1. Электрохимические методы анализа на объектах подземного выщелачивания

Скважинная полярография. Скважинная полярография на объектах подземного выщелачивания применялась для решения задач контроля и управления развитием процесса, наблюдения за изменением физико-химических свойств остаточных растворов по окончании отработки месторождения, а также в процессе проведения работ по рекультивации отработанных участков. Метод реализован в постояннотоковой и дифференциально-импульсной модификациях.

В постояннотоковой модификации производилось измерение растворенного кислорода, ионов двухвалентного железа, хлора. В дифференциально-импульсной модификации измерялось содержание в растворах UO_2^{2+} , VO_2^{2+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} и ионов ряда других тяжелых металлов. Исследования в скважинах проводились путем записи поляризационных кривых на точках, распределенных по глубине, либо непрерывно при заданном потенциале ртутного капельного электрода.

Градуировочные графики для определения содержаний растворенного кислорода в диапазоне от 8 до 320 мг/л, двухвалентного железа от 0 до 600 мг/л и хлора от 0 до 100 мг/л, получены на скважинном полярографе с использованием специальной установки (раздел 1.3).

Градуировочные графики на кислород и железо имеют линейный характер, а на хлор - нелинейный и несколько выхолаживается в области концентрации 60 мг/л. Это объясняется сложной формой волны, меняющейся от состава и минерализации изучаемых техногенных растворов и пластовых вод.

В табл. 1 приведено содержание растворенного кислорода, двухвалентного железа и хлора в скважинах глубиной от 50 до 350 м. Результаты полярографических (Сп) и химических (Сх) определений растворенного кислорода близки по своим значениям. Сопоставление данных, полученных при проведении исследований на различных участках ПВ, показывает, что относительная погрешность не превышает 10-15% в диапазоне концентраций растворенного кислорода от 0 до 350 мг/л, что соответствует технологическим задачам, решаемым данным методом.

В случае применения

для выщелачивания технологических растворов серной кислоты с обогащением их кислородом воздуха, погрешность определений не превышает 4-6% в диапазоне содержания от 10 до 40 мг/л при концентрациях серной кислоты до 30 г/л. Хлор дает хорошо выраженную волну на анодных полярограммах в области потенциалов 0,3-0,4 В. Волны ионов двухвалентного железа и хлора были выявлены при проведении исследований в скважинах отработанной залежи. Погрешность определения железа лежит в пределах 5-10%, а минимальная концентрация обнаружения составляет 0,2-0,3 мг/л.

Содержание хлора, определенное методом полярографии, ниже данных химического анализа. Это связано с нелинейностью градуировочной характеристики полярографа и высоким содержанием хлора в изу-

Таблица 1
Сопоставление полярографических определений с данными химического анализа проб

№ п/п	Кислород, мг/л		Железо, мг/л		Хлор, мг/л	
	Сп	Сх	Сп	Сх	Сп	Сх
1	18	16.2	595.0	640.0	48.0	50.0
2	42	38.2	108.2	112.0	55.0	55.0
3	34	36.0	118.2	1-12.0	47.0	45.0
4	56	48.4	2.16	Н.О	31.0	29.0
5	82	76.6	495.0	502.0	52.0	53.0
6	112	124.0	88.0	56.0	50.0	56.0
7	64	72.2	495.0	450.0	42.0	59.0
8	180	190.0	550.0	510.0	48.0	49.0
9	156	160.0	288.4	302.0	49.0	55.0
10	272	300.0	7.72	Н.О	51.0	55.0

чаемых растворах. Наиболее достоверные результаты по хлору получены в исследованиях природных вод, где содержание хлора не превышает 100 мг/л. В этом случае возможно определение концентрации хлорид-иона с погрешностью $\pm 20\%$.

Значительно более широкими возможностями, по сравнению с постоянноточковой, обладает дифференциально-импульсная полярография. В процессе проведения исследований были выявлены и идентифицированы поляризационные волны, соответствующие урану, ванадию, кадмию, никелю, марганцу и некоторым другим тяжелым металлам и токсичным элементам. Минимальные концентрации при которых возможно определение тяжелых металлов, находятся в пределах 0,1-0,2 мг/л, а для урана 3-4 мг/л.

Важную информацию дает наличие в пластовых водах сульфид-иона, волна которого зарегистрирована и идентифицирована в скважинах подготовленного к обработке участка. Его распределение в пластовых водах позволяет проследить границу пластового окисления и провести районирование залежи на участки, содержащие окисленные и неокисленные руды. На основании этих сведений подбирался состав технологических растворов и режимы подачи окислителя в рудовмещающий горизонт.

Для проведения полярографических исследований в скважинах разработана микропроцессорная аппаратура, позволяющая реализовать обе модификации. Использование программируемых микросхем нами применен способ, позволяющий проследить за ростом капли от момента образования до ее отрыва, и производить измерение диффузионного тока в заданный момент времени и при определенных размерах капли. Это позволило отказаться от электромеханических устройств, применяемых для этой цели в серийной аппаратуре, повысить помехозащитность и надежность в работе. Параллельно с регистратором аппаратура позволяет производить запись информации на твердотельный носитель с последующей обработкой на ЭВМ.

Таблица 2.
Результаты потенциометрических измерений некоторых параметров растворов ПВ

Параметры	Скважина №						
	1	2	3	4	5	6	7
t	24	23	24	23	24	24	21
pH	5.07	4.02	3.92	2.97	3.32	4.06	7.22
Eh1	305	414	422	510	505	430	290
Eh2	298	412	412	497	510	425	300
Eh3	302	415	420	492	498	420	305

Скважинная потенциометрия. На месторождениях, обрабатываемых способом подземного выщелачивания, скважинная потенциометрия применялась для измерения кислотно-щелочного показателя (рН) технологических растворов и пластовых вод, а также их окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Измерение рН производилось стандартным электродом, снабженным компенсатором давления. Eh измерялся тремя платиновыми электродами. В качестве электрода сравнения служил неполяризующийся насыщенный хлорсеребряный электрод сильфонного типа. Дополнительно производилось измерение температуры при помощи термодатчика. Определение значений рН производилось с помощью градуировочных графиков, построенных по результатам измерений в буферных растворах. Измерение окислительно-восстановительного потенциала производилось тремя независимыми датчиками с целью контроля их работоспособности. В табл. 2 приведены результаты замеров контролируемых параметров в скважинах на одном из участков ПВ.

Анализ результатов измерений в скважинах на участках ПВ, обрабатываемых различными способами и их сравнение с данными химического анализа проб показал, что при измерении рН технологических растворов и пластовых вод относительная погрешность не превышала 1-5%. Измерение температуры производилось с абсолютной погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Относительное расхождение между тремя независимыми каналами измерения Eh в скважинах не превышало 10%. Значения Eh в скважинах и в пробах, поднятых на поверхность, расходились между собой на сотни мВ вследствие контакта пробы с атмосферным воздухом.

Выполненные исследования показывают, что скважинная потенциометрия позволяет решить задачу контроля за физико-химическими процессами подземного выщелачивания и изменениям свойств остаточных растворов на обработанных участках при их рекультивации.

2.2. Технические средства обеспечения и контроля достоверности результатов, полученных электрохимическими методами.

Одним из важных этапов, обеспечивающих достоверность данных, полученных в процессе исследований скважин методами полярографии и потенциометрии, является градуировка измерительной аппаратуры. С этой целью разработана установка, позволяющая имитировать такие скважинные условия, как давление и температура, а также производить эталонировку аппаратуры с применением технологических растворов различного состава (Рис. 1).

Способ работы установки. Полиэтиленовый стакан заполняется водой или технологическим раствором до уровня на 10-15 см ниже верх-

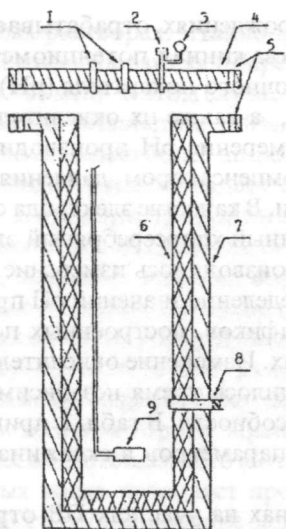


Рис.1. Установка для градуировки полярографической и потенциметрической аппаратуры.

- 1 - сальниковые устройства;
- 2 - предохранительный клапан;
- 3 - манометр;
- 4 - крышка;
- 5 - отверстия для крепления крышки;
- 6 - полиэтиленовый стакан;
- 7 - охранный кожух;
- 8 - кран для отбора проб;
- 9 - диспергатор.

Установка обеспечивает подачу в эталонные растворы газообразных компонентов, а также имеет устройство отбора проб для химического анализа.

Скважинный пробоотборник.

Оценка достоверности данных скважинной полярографии и потенциометрии производилась путем сопоставления с результатами химического анализа проб. На участках ПВ отбор проб производился при помощи эрлифта. Данный способ имеет высокую стоимость, требует специального оборудования и приводит к загрязнению почвы откачиваемыми растворами, а отобранная проба характеризует весь интервал фильтров (валовая проба). Кроме того, контакт отбираемых растворов с воздухом эрлифта существенно изменяет их окислительно-восстановительный потенциал.

Разработанный нами пробоотборник свободен от этих недостатков, позволяет отбирать пробы с заданной глубины и обеспечивает отбор герметичных проб. Результаты эксплуатации пробоотборника на участках ПВ и сопоставление результатов с данными химического анализа валовых проб показывают, что относительное расхождение по определе-

него края. В стакан помещается скважинный прибор и герметично закрывается крышкой. От баллона по шлангу подается кислород и в течение 0.5-1 часа производится насыщение раствора при давлении в 1 атм. После этого производят запись полярограммы и отбирают пробы на химический анализ. Затем давление повышают до 2 атм. и операцию повторяют. Таким образом, поступают до тех пор, пока аппаратура не будет проградуирована в требуемом диапазоне концентраций. На данной установке выполнялись все градуировочные работы, а также работы по изучению технических параметров аппаратуры и отработке методик проведения измерений в скважинах.

Установка обеспечивает подачу в эталонные растворы газообразных компонентов, а также имеет устройство отбора проб для химического анализа.

Оценка достоверности данных скважинной полярографии и потенциометрии производилась путем сопоставления с результатами химического анализа проб.

нию таких параметров, как SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} тяжелых металлов, UO_2^{2+} , VO_2^{2+} составляет от 4 до 20%, сухого остатка + 8%, кислотнощелочной показатель $\pm 10\%$.

Кроме контроля результатов полярографии и потенциометрии при помощи поинтервального пробоотбора решались такие технологические задачи, как изучение характеристики растворов в вертикальном разрезе скважин, определение мест разбавления продуктивных растворов пластовыми водами в артезианских скважинах.

Таким образом, впервые наряду с химическим анализом использованы методы постоянно-токовой и дифференциально-импульсной полярографии, а также потенциометрии для определения содержания растворенного кислорода, химического состава, кислотности и окислительно-восстановительного потенциала пластовых вод и техногенных растворов на месторождениях, обрабатываемых способом подземного выщелачивания, оценена достоверность полярографических определений, в сравнении с химическим анализом проб растворов, проведена классификация полярограмм и установлены типичные полярограммы для различных по своему назначению скважин.

ГЛАВА 3. КОНТРОЛЬ МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Эффективное применение подземного выщелачивания возможно на основе тщательного изучения гидрохимической обстановки на планируемых к отработке месторождениях, обеспечения оперативного и ответственного контроля за процессом выщелачивания на этапе их эксплуатации, наблюдения за поведением линзы остаточных растворов и рекультивацией недр рудовмещающего водоносного горизонта после отработки месторождения.

Химический состав и зональность пластовых вод на объектах подземного выщелачивания. Химическому составу подземных вод и их физико-химическим характеристикам принадлежит определяющая роль в процессах миграции, осаждения и образования месторождений урана.

Результаты химического анализа проб пластовой воды, отобранных из скважин блока 150, являющейся типичным и характеризующей рудовмещающий водоносный горизонт Букинайской группы месторождений показывает, что содержание таких компонентов как кислород, железо, хлор, никель, кобальт, марганец, ванадий находятся в пределах чувствительности скважинной полярографии. Содержание кислорода в пробах заведомо завышено вследствие ее контакта с кислородом воздуха. Информация о Fe^{2+} , Fe^{3+} , S^{2-} , HS^- , является чрезвычайно важной для

оценки окислительно-восстановительной обстановки в продуктивном горизонте. Результаты изучения состава и физико-химических характеристик пластовых вод с использованием скважинных вариантов электрохимических методов на опытном блоке 4А показывают, что отмечается определенная дифференциация от скважины к скважине таких компонентов, как растворенного кислорода (от 0 до 1,4 мг/л), сульфид-иона (от 0 до 2,5 мг/л), двухвалентного железа (от 0 до 6,8 мг/л), а также окислительно-восстановительного потенциала (от 6 до 136 мВ). Различие в содержаниях компонентов и физико-химических параметрах пластовых вод обусловлено тем, что часть скважин вскрывает рудовмещающий водоносный горизонт в зоне, характеризующейся преимущественно окислительной обстановкой, а часть скважин - восстановительной. Скважины, находящиеся южнее границы выклинивания зоны пластового окисления характеризуются наличием кислорода, низким содержанием или полным отсутствием двухвалентного железа и повышенным значением окислительно-восстановительного потенциала. В остальных скважинах растворенный кислород отсутствует. В них отмечается наличие сульфид-иона, несколько повышенное содержание двухвалентного железа и незначительные величины Eh (от 6 до 22 мВ).

На рис. 2 показаны полярограммы на сульфид-ион и дан пример определения границы зоны пластового окисления. Для этого использованы данные разведочного бурения и электрохимическое исследование скважин на одном из участков ПВ. Граница выклинивания зоны пластового окисления является геохимическим барьером, на котором в продуктивном пласте происходит смена окислительной обстановки, об этом свидетельствует наличие в скважинах кислорода и повышенные значения Eh, на восстановитель-

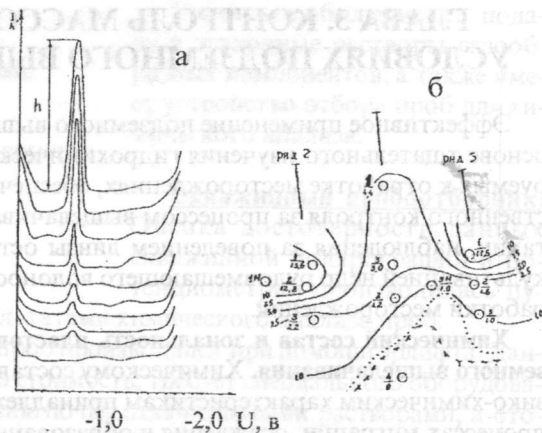


Рис.2. Определение границы зоны пластового окисления

а - полярограммы на сульфид-ион;
 в - границ зоны окисления
 --- по полярографическому каротажу;
 ... по разведочному бурению;
 1/4,4 - номер скважины в ряду/содержание сульфид-иона в усл.ед

ную, характеризующуюся наличием S^{2-} и Fe^{2+} , что приводит к локализации подвижных форм урана и формированию рудной залежи. Как видно из рис.2 граница выклинивания зоны пластового окисления по данным электрохимических исследований скважин удовлетворительно совпадает с данными разведочного бурения и изучения кернового материала, отобранного из скважин.

Таким образом районирование подготовленных к отработке участков по окислительно-восстановительным признакам на основе электрохимических исследований скважин позволило сократить объемы разведочного бурения и привлечь данные, полученные при исследованиях в эксплуатационных и контрольно-наблюдательных скважинах, бурение которых осуществляется, как правило, без отбора керна и специальных гидрохимических исследований. Полученный опыт изучения состава вод рудовмещающего водоносного горизонта и их зональности в пределах исследуемой залежи применялся на месторождениях Чу-Сарысуйской и Сырдарьинской депрессий. Содержание изучаемых компонентов и значение физико-химических параметров использовались в качестве фоновых значений для контроля за растеканием выщелачивающих растворов на этапе эксплуатации месторождений.

Изучение массопереноса при опытно-промышленном моделировании. В практике подземного выщелачивания для определения геотехнологических свойств продуктивного водоносного горизонта используется зависимость параметров и концентраций компонентов выщелачивающих растворов в откачной скважине от безразмерного параметра Ж:Т, так называемые выходные кривые. Параметр Ж:Т определяется как отношение массы раствора с определенной исходной концентрацией, прошедшего через блок породы на момент времени t , к массе породы в этом блоке.

Как видно из рис. 3 на первоначальной стадии, характеризующейся изменением Ж:Т от 0 до 0.6 и pH от 8.5 до 5.0 в растворе отмечается невысокое содержание железа, которое практически целиком пред-

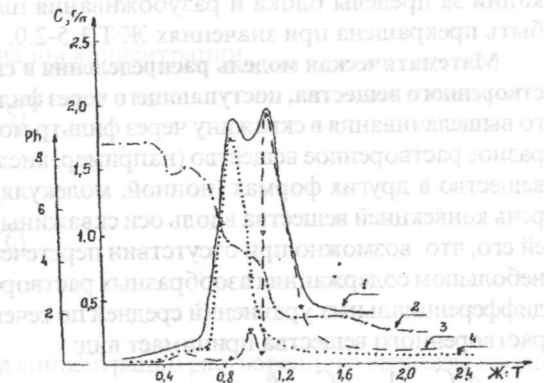


Рис.3. Изменение физико-химических параметров выщелачивающих растворов от величины Ж:Т
 1 - Fe вал; 2 - pH; 3 - UO_2^{2+} ; 4 - Fe^{2+} .

ставлено ионами Fe^{2+} . Содержание урана в растворе на этой стадии выщелачивания не превышает 30-40 мг/л, а окислительно-восстановительный потенциал Eh изменяется от 350 до 450 мВ. При изменении Ж:Т от 0.6 до 1.1 и рН от 5.0 до 4.0 содержание Fe^{2+} в растворе резко возрастает, практически все железо в растворе представлено ионом Fe^{2+} , что отражает соотношение между графиками концентраций двухвалентного железа и валового в интервале значений Ж:Т 1.1-1.5 и рН 2.2-2.0 железо окисляется до степени +3, величина Eh возрастает до 650-660 мВ. В этом интервале значений Ж:Т и рН в раствор переходит основное количество урана. Максимум его содержания отмечается при рН 2.0-2.2 и Ж:Т - 1.2-1.4. При дальнейшем увеличении Ж:Т и понижении значений рН концентрация урана и железа в продуктивных растворах резко снижается и продолжение обработки не приводит к увеличению объемов добычи. Это говорит о том, что практически все растворимые формы урана переведены в подвижную фазу и извлечены на поверхность.

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что в условиях месторождения потенциал задающей окислительно-восстановительной системой является система Fe^{3+}/Fe^{2+} . Она определяет скорость перехода урана в подвижную фазу и время обработки блока. Для ускорения выщелачивания урана и сокращения времени обработки залежи (увеличение значений Eh до 650 мВ и понижение рН до 2.2-2.3) целесообразно на первой стадии подавать в продуктивный пласт выщелачивающие растворы с высоким содержанием растворителя (50-100 г/л H_2SO_4) обогащенные кислородом воздуха (20-30 мг/л). Обработка блока, с учетом возможных потерь выщелачивающих растворов при растекании за пределы блока и разубоживания пластовыми водами, может быть прекращена при значениях Ж:Т 1.5-2.0.

Математическая модель распределения в скважине концентрации растворенного вещества, поступающего через фильтр. В условиях подземного выщелачивания в скважину через фильтр может поступать как газообразное растворенное вещество (например, кислород), так и растворенное вещество в других формах (ионной, молекулярной и т.д.). Если пренебречь конвекцией вещества вдоль оси скважины, по сравнению с диффузией его, что возможно при отсутствии перетечек раствора вдоль ствола и небольшом содержании газообразных растворенных веществ, то система дифференциальных уравнений средней по сечению ствола концентрации растворенного вещества принимает вид:

$$\frac{d^2 C}{dz^2} - \frac{1}{D} * \frac{dC}{d\tau} - \frac{k}{D} (C - C_0) = 0$$

$$\frac{d^2 C_1}{dz^2} - \frac{1}{D} * \frac{dC_1}{d\tau} = 0 \quad (1)$$

где: C и C_1 - средняя по сечению скважины концентрация растворенного вещества в пределах фильтра мощностью (длиной) $2h$ и за пределами интервала фильтра соответственно; C_0 - концентрация растворенного вещества в подземном потоке, переходящем через фильтр; z - расстояние вдоль оси скважин от центра до интервала фильтра; τ - время; D - коэффициент диффузии растворенного вещества в скважинной жидкости;

$k = \frac{4v}{\pi d_c^2}$, где v - скорость фильтрации раствора в пласте в интервале фильтра, d_c - диаметр скважины.

Принимая начальное условие - нулевое, в силу симметрии распределения концентрации относительно начала координат можно рассматривать только интервал $0 \leq Z \leq \infty$ при соответствующем граничном условии, с применением метода операционного исчисления, переходя от оригиналов концентраций C и C_1 к их изображениям по Лапласу, согласно соотношению:

$$\Phi = \int_0^{\infty} C e^{-p\tau} d\tau, \Phi_1 = \int_0^{\infty} C_1 e^{-p\tau} d\tau \quad (2)$$

где: p - комплексная переменная, для фильтра большой длины ($h \rightarrow \infty$), пренебрегая краевыми эффектами имеем:

$$\Phi \approx \frac{kC_0}{p(p+k)} \quad (3)$$

$$\Phi_1 \approx \frac{C_0}{p} * e^{-(z-h)\sqrt{\frac{p}{D}}} \quad (4)$$

и формулы для оригиналов концентрации:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - e^{-k\tau}, \quad (5)$$

$$\frac{C}{C_0} = ezf\left(\frac{z-h}{2\sqrt{D\tau}}\right), \quad (6)$$

где, $ezf(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-s^2} ds$

Графики распределения концентрации растворенного вещества вдоль оси скважины, рассчитанные по формулам (5) и (6) показывают, что в начальный период концентрация растворенного вещества увеличивается только против интервала фильтра, затем достигают значения соответствующего концентрациям вещества в потоке, проходящем через фильтр и происходит возрастание ее и за пределами интервала фильтра.

Реальное распределение растворенного вещества в скважине несколько отличается от расчетного. Под влиянием процессов конвекции, диффузии, сорбции стенками обсадной колонны и гравитационной дисперсии диаграммы искажаются, и эти искажения обусловлены природой вещества. Так для растворенного кислорода диаграммы, записанная в режиме концентратомера, отличается смещением максимальных концентраций в верхнюю часть интервала фильтров. Для тяжелых металлов, в частности урана, наибольшие значения концентраций приурочены к нижней части фильтровой зоны и за счет гравитационной дисперсии происходит его накопление в застойной зоне скважины ниже фильтровой зоны.

Геотехнологическое картирование залежи. Производимое картирование залежей по продуктивности, распределению коэффициентов фильтрации, соотношению мощностей рудной и безрудной частей разреза продуктивного водоносного горизонта позволяет в известной мере оценивать влияние оказанных факторов на эффективность процесса выщелачивания, однако не учитывает все природные особенности месторождения и геотехнологические свойства руд. Кроме того, затруднено определение эффективности отработки отдельных эксплуатационных блоков. Можно считать, что задачам геотехнологического картирования в наибольшей степени отвечает распределение содержания урана в продуктивном растворе и, соответственно, в конечном счете, определяет эффективность отработки залежи.

Нами были использованы результаты полярографических исследований скважин на уран для построения карт распределения его содержания в выщелачивающих растворах на одной из залежей, степень отработки которой на момент картирования составляла 30-35%. Показано, что содержание урана в растворах варьирует в широких пределах от 4 мг/л до 480 мг/л. Среднее содержание урана в продуктивных растворах за указанный период эксплуатации по данным лабораторного контроля составило 156 мг/л.

С учетом большого диапазона изменения содержания урана в выщелачиваемых растворах в пределах залежи, были выделены участки с неблагоприятными ($U < 10$ мг/л), умеренно благоприятными (U от 10 до 100 мг/л) и благоприятными ($U > 100$ мг/л) условиями для подземного выщелачивания. Согласно данным геотехнологического картирования по содержанию урана в выщелачивающих растворах установлено, что площади участков соответственно составляют 10, 40 и 50 % от площади залежи.

Таким образом, на основании выполненного геотехнологического картирования были рационализированы эксплуатационная система скважин и режим отработки всей залежи, что позволило повысить экономическую эффективность добычи месторождения Кенимех.

Миграция некоторых компонентов техногенных растворов в процессе рекультивации отработанных залежей. В процессе отработки месторождений урана способом подземного выщелачивания имеет место значительное изменение солевого состава подземных вод и содержания в них естественных радионуклидов. Показано, что в процессе отработки в контуре выщелачивания резко возрастает общая минерализация, содержание комплексных ионов урана и естественных радионуклидов уран-радиевого ряда, снижаются значения кислотно-щелочного показателя. Под воздействием выщелачивающих растворов в пластовых водах увеличивается содержание ряда нормируемых и токсичных элементов, в десятки и сотни раз превышая предельно-допустимые концентрации. В связи с этим необходимо выполнение рекультивационных работ по восстановлению природной обстановки в отработанном рудовмещающем водоносном горизонте.

Одним из способов рекультивации является осуществление принудительной миграции загрязнителей за контуры отработанного участка посредством откачки пластовых вод рудовмещающего горизонта через дополнительные законтурные скважины, сооружаемые вдоль одной из границ участка. При этом откачиваемые пластовые воды подаются в сохранившиеся скважины участка, а расстояние от контура выщелачивания до откачных скважин должно быть не менее ширины зоны полной нейтрализации техногенных растворов, которая определяется расчетным путем с учетом емкостных и сорбционных свойств пород водоносного горизонта. Эффективность работ по восстановлению природной обстановки и затраты на их выполнение в значительной степени определяются качеством и оперативностью контроля за окислительно-восстановительной обстановкой в водоносном горизонте рекультивируемого участка. С этой целью нами при выполнении таких работ на участке N1 месторождения Южный Букинай для контроля были применены скважинные электрохимические методы.

На начало работ по рекультивации пластовые воды внутри контура выщелачивания характеризовались общей минерализацией до 12 г/л, значениями рН от 3.2 до 5.6, Eh от 495 до 290 мВ. Содержание двухвалентного железа находилось в пределах от 112 до 524 мг/л, урана от 2.6 до 26.0 мг/л, хлорид-иона от 280 до 770 мг/л. По всем показателям отмечается превышение фоновых значений, характерных для пластовых вод данного региона.

Оперативный контроль за состоянием окислительно-восстановительной обстановки в пласте в процессе проведения работ осуществлялся по содержанию в подземных водах двухвалентного железа. Выбор определялся следующими факторами: при сернокислотном выщелачивании основной потенциал-задающей системой является система $Fe^{3+}/$

Fe²⁺, при значениях pH 6-8, характерных для фоновых значений подземных вод, двухвалентное железо практически все выпадает в осадок и его содержание не превышает 4-5 мг/л. Полярографические измерения содержанием двухвалентного железа проводились ежемесячно. По результатам строились карты распределения концентраций по площади участка. Перед началом работ выделяются два участка с повышенным содержанием двухвалентного железа, приуроченные к скважинам 18-10, 18-12 и 5-12, 6-12. В целом изоконцентраата 100 мг/л удовлетворительно совпадает с границами линзы высокоминерализованных растворов, которая построена по значениям pH=5.5, полученным в результате гидрохимического опробования.

В ходе работ линза высокоминерализованных растворов разделилась на две, а содержание двухвалентного железа в них заметно снизилось. При этом отмечается смещение линз в направлении откачивающих скважин.

После окончания работ по всей площади рекультивируемого участка в подземных водах отмечается содержание двухвалентного железа от 0 до 10 мг/л. Причем значение 10 мг/л зарегистрированы в двух скважинах. В остальных содержание не превышает 5 мг/л, что соответствует фоновым значениям природных вод.

Таким образом, в процессе работ по рекультивации данные ежемесячного контроля состояния окислительно-восстановительной обстановки служили основой для изменения технологической схемы распределения подачи откачиваемых пластовых вод в скважины рекультивируемого участка.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫХ РУД

4.1. Методика определения водно-физических свойств и распределения полиэлементных руд в пространстве рудоносного горизонта

Оконтуривание рудных залежей, подсчет запасов, определение структуры фильтрационных потоков, динамики изменения во времени и, как следствие, миграции основных компонентов-загрязнителей технологических растворов подземного выщелачивания и растворов хвостохранилищ при решении задач охраны окружающей среды и геотехнологии существенно зависят от пространственного распределения фильтрационных характеристик среды и полиэлементных соединений. Для расче-

та их значений в произвольной точке пространства водоносного горизонта на геолого-разведочных данных опробования скважин может быть предложено несколько алгоритмов интерполяции, реализующих математическую модель среды.

Для определения формулы интерполирования параметра "P" (содержание полезного компонента в процентах, коэффициент фильтрации, пористость) в точку с координатами $r(x, y)$ вводится ряд понятий:

- анизотропия распределения - зависимость изменчивости значения параметра пласта от направления в заданной системе координат;
- направление простирания - направление наиболее медленного изменения значения параметра в заданной системе координат;
- φ_p - угол направления простирания в заданной системе координат;
- A_p - коэффициент анизотропии распределения. Его значение указывает, во сколько раз изменчивость значений параметра вдоль простирания меньше, чем вкрест;
- (X', Y') - исходная система координат (координаты привязки скважин);
- (X, Y) - изотропная система координат; система, к которой приводится исходная система координат, при этом изменчивость свойств параметра уже не зависит от направления.

Формулы перехода исходной системы координат к изотропной имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x &= (x' * \cos \varphi_p - y' * \sin \varphi_p) / A_p \\ y &= (x' * \sin \varphi_p + y' * \cos \varphi_p) / A_p \end{aligned} \quad (7)$$

- сопряженные скважины - две ближайшие к расчетной точке скважины;
- множество опорных точек, равноудаленных от двух сопряженных скважин;
- опорная точка - ближайшая к расчетной равноудаленная точка, находящаяся на луче, выходящем из точки с координатами ближайшей скважины и проходящем через расчетную точку;
- $\bar{r}(x, y)$ - координаты расчетной точки, в которой определяется значение параметра;

$\bar{r}_1(x_1, y_1)$ - координаты скважины, ближайшей к расчетной точке;

$\bar{r}_2(x_2, y_2)$ - координаты сопряженной скважин;

$\bar{r}_0(x_0, y_0)$ - координаты опорной точки, которые вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \bar{r}_* &= \bar{r} + \bar{e} * t; \\ \bar{e} &= (\bar{r} - \bar{r}_i); \\ \bar{R}_1 &= |\bar{r}_1 - \bar{r}_i|; \\ \bar{R}_2 &= |\bar{r}_2 - \bar{r}_i|; \\ t &= 0.5 * (R_1^2 - R_2^2) / (\bar{e} * \bar{r}_1 - \bar{e} * \bar{r}_2) \end{aligned} \quad (8)$$

Искомое значение параметра "P" в расчетной точке определяется на основе данных значений параметров $P_1; P_2; P_3; P_4$ в четырех ближайших скважинах по следующей формуле интерполяции:

$$P = F(P_1; P_2; P_3; P_4) = \frac{1}{R_1 + R_2} * \left[R_1 * R_2^2 + (R_1^2 + R_2 * R_1) \frac{\sum_{i=1}^4 P_i * R_{oi}}{\sum_{i=1}^4 R_{oi}} \right] \quad (9)$$

$$\text{где: } R_{oi} = 1 / \left[(X_i - X_0)^2 - (Y_i - Y_0)^2 \right]$$

Алгоритм определения значений параметра "P" в искомой точке (X; Y) заключается в следующем:

- с использованием формул (8) выбираются четыре скважины с номерами: i_1, i_2, i_3, i_4 , а по формуле вычисляется отметка (или глубина) кровли нижнего водоупора:

$$Z = F[B_H(i_1); B_H(i_2); B_H(i_3); B_H(i_4)])$$

и мощность пласта:

$$\alpha_B = F[B_B(i_1); B_B(i_2); B_B(i_3); B_B(i_4)] - Z_0,$$

где: $B_H(i_j); B_B(i_j)$ - отметки нижнего и верхнего водоупоров в скважине;
- после преобразования системы координат по формулам выбираются четыре опорных скважины с номерами N_1, N_2, N_3, N_4 для интерполяции значения параметра "P" в точку с координатами (X, Y), из базы данных выбираются значения параметра P_1, P_2, P_3, P_4 в опорных скважинах на соответствующих интервалах и по формуле (9) рассчитываем интерполированное значение параметра:

$$P = F(P_1, P_2, P_3, P_4)$$

Применение вышеописанной двумерной модели позволяет производить увязку значений параметров, находящихся только на одинаковом относительном уровне. Двумерные задачи распределения имеют множество реализаций, как, например, метод скользящего окна, метод ближайшего района, метод треугольников. Однако, у данных реализаций имеется один общий минус: они, фактически, являются геометрическими и, соответственно, опираются на 3-5 ближайших скважин, и, как следствие, возможная прерывность результата.

В связи с этим для определения исходного параметра среды в произвольной точке наряду с вышеприведенной моделью предлагается метод статистической обработки геолого-геофизических данных скважин ближайшего района (трехмерная модель), суть которого заключается в решении двумерных задач для пластов, ограниченных маркирующими плоскостями, внутри которых параметры меняются плавно по линейному закону.

4.2. Геофильтрация пластовых вод и технологических растворов с учетом пространственного распределения водно-физических свойств

Для определения физико-химических процессов, происходящих в недрах, необходимо иметь информацию о скорости и направлении движения пластовых вод, техногенных растворов. Традиционные методы, основанные на данных опробования наблюдательных скважин, трудоемки и дают приближенное представление о характере взаимодействия техногенных растворов с породами водоносных горизонтов. Наиболее приемлемой для условий хвостохранилищ, отработки месторождений методом подземного выщелачивания и используемая в настоящее время является модель гидродинамики для однородно-анизотропных сред при следующих допущениях:

фильтрационные свойства пласта на моделируемый период условно считаются постоянными;

площадь рабочей поверхности фильтра принимается неизменной;

процесс фильтрации независим от термодинамических и химических процессов в пласте (плотность и вязкость растворов считаются постоянными);

кольматация прифильтровых зон может быть учтена изменением производительности скважин;

неограниченный в плане водоносный горизонт схематизируется в разрезе как однородно-анизотропный пласт, ограниченный сверху и снизу водоупорами (анизотропия пласта определяется коэффициентом анизотропии).

Для определения поля скоростей (пространственные составляющие скорости в любой точке пласта) используются следующие основные уравнения:

Закон Дарси:

$$U = -\frac{K_\phi}{K_n} \frac{\partial H}{\partial X}; V = -\frac{K_\phi}{K_n} \frac{\partial H}{\partial Y}; W = \frac{K_\phi K_A}{K_n} \frac{\partial H}{\partial Z} \quad (10)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (11)$$

Условие непроницаемости водоупоров:

$$\frac{\partial B_i}{\partial X} * U + \frac{\partial B_i}{\partial Y} * V = W \quad (12)$$

Невозмущенность потока на бесконечности:

$$\left. \frac{\partial H}{\partial X} \right|_{x=\infty} = J \cos j; \left. \frac{\partial H}{\partial Y} \right|_{y=\infty} = J \sin j; \left. \frac{\partial H}{\partial Z} \right|_{z=\infty} = 0 \quad (13)$$

Граничные условия на 1-й скважине:

$$\lim_{\sigma_i \rightarrow 0} \iint U_n d\sigma = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, K_c) \quad (14)$$

$$\lim_{\substack{X \rightarrow X_i \\ Y \rightarrow Y_i}} W \Big|_{Z \in (F_i^1; F_i^2)} = 0 \quad (15)$$

где:

$H(X, Y, Z)$ - функция напоров;

$U(X, Y, Z), V(X, Y, Z), W(X, Y, Z)$ - компоненты действительной скорости фильтрации по осям декартовой системы координат (м/сутки);

Q_i - дебит i -й скважины (м³/сутки);

X_i, Y_i - координаты забоя i -й скважины (м);

F_i^1, F_i^2 - абсолютные отметки нижней, верхней части фильтра (м);

B_i^1, B_i^2 - абсолютные отметки кровли нижнего, подошвы верхнего водоупоров (м);

$K_\phi(X, Y, Z)$ - коэффициенты фильтрации (м/сутки);

$K_n(X, Y, Z)$ - коэффициенты активной пористости (%);

$K_A(X, Y, Z)$ - коэффициенты анизотропии фильтрационных свойств (отношение вертикального к горизонтальному K_ϕ);

J - гидравлический уклон;

j - угол направления движения пластовых вод (град.);

σ - поверхность, охватывающая фильтр i -й скважины;

U_n - проекция скорости на нормаль к поверхности;

K_0 - количество скважин на участке моделирования, влияющих на процесс фильтрации.

Учитывая линейность по H уравнений и граничных условий, решение задачи будем искать в виде:

$$H = H_0 + \sum_{i=1}^{K_c} H_i Q_i \quad (16)$$

где: $H(X, Y, Z)$ и $H_0(X, Y, Z)$ - должно удовлетворять (10) и (13), а Q_i , i -ым условиям (14).

Вышеприведенная система уравнений имеет аналитическое решение

относительно скорости фильтрации в произвольной точке пространства водоносного горизонта.

В случае полностью неоднородной среды (модель пространственного распределения водно-физических свойств) для определения H - естественной фильтрации вод аналитическое решение не найдено и поэтому используется конечно-разностных метод.

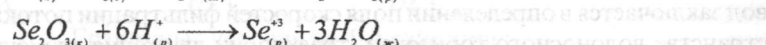
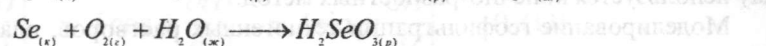
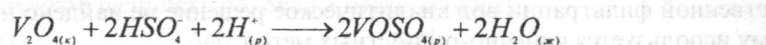
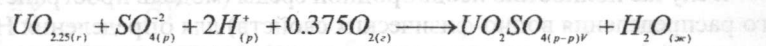
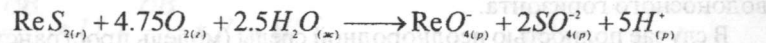
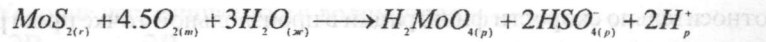
Моделирование геофильтрации техногенных растворов, пластовых вод заключается в определении поля скоростей фильтрации потока в пространстве водоносного горизонта, траектории движения элементарных частиц (элементарных объемов) растворов, расчета линий и трубок тока, построение гидродинамических схем, разрезов, подсчета гидродинамических запасов ПК, вовлекаемых в обработку и т.д. Модель обеспечивает решение как стационарных (не зависящих от времени режимов работы объектов), так и нестационарных задач фильтрации. Используется для целей проектирования объектов ПВ, хвостохранилищ, анализа их функционирования и разработки природоохранных мероприятий.

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫХ РУД, ОТРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Геологические и гидрогеологические условия локализации полиэлементного оруденения на экзогенных эпигенетических месторождениях преимущественно благоприятны для добычи полезных компонентов подземным выщелачиванием, что обусловлено компактным расположением в едином водоносном горизонте эпигенетических концентраций редких и рассеянных элементов относительно уранового оруденения, связанных с восстановительным геохимическим барьером.

5.1. Кинетика сернокислотного выщелачивания полиэлементных руд

В последовательности противоположной порядку их восстановительного осаждения переход полезных компонентов в сернокислые растворы выщелачивания ($pH = 1.2-2.5$, $E_n = 250-450$ мв) описываются следующими уравнениями химических реакций:



Также могут переходить в сернокислотные растворы: кадмий при pH < 6 в виде CdSO₄, цинк при pH < 5 в виде ZnSO₄, медь при pH < 5 в виде CuSO₄, индий при pH < 3.5 в виде InSO₄, торий при pH < 2.5, а так же бериллий, кобальт, фосфор и другие элементы.

При использовании моделей пространственного распределения i-го компонента в недрах, гидродинамики процесса подземного выщелачивания в общем случае, математическое описание процесса массопереноса, сопровождаемого объемной химической реакцией, сводится к рассмотрению уравнений вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\bar{\sigma} \text{grad} C_i) = q_i \quad (17)$$

где C_i - концентрация участвующих в реакции веществ,

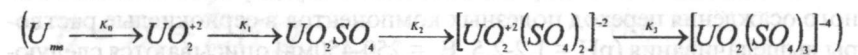
$\bar{\sigma}$ - вектор скорости фильтрации,

q_i - характеризует тип химической реакции (например, для реакций первого порядка q_i = -K_iC_i, где K_i - константа скорости реакции)

При моделировании гидродинамики процесса подземного выщелачивания производится расчет линий тока и при переходе в их систему координат ось "X" выбирается вдоль линии тока таким образом, что численное значение "X" будет совпадать со временем движения частицы от закачной скважины до соответствующей точки линии тока. В этой системе координат (1,0,0) и уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial C_i}{\partial x} = q_i \quad (18)$$

При описании перехода урана из твердой фазы в жидкую как линейной реакции первого порядка



уравнение имеет аналитическое решение для функции его добычи во времени E(t) на выходе трубки тока, т.е. при X=TL (где TL - время поршневого вытеснения). В этом случае определение C_i(t,x), т.е. концент-

рация i-го компонента в растворе и содержание его в руде на момент времени T=TL производится по формулам:

$$C_i(T, X) = \frac{1}{QL} \frac{dE(t, x)}{dt} \Big|_{t=T} \approx \frac{E(T + \Delta t, X + \Delta x) - E(T, X)}{QL * \Delta t} \quad (19)$$

$$C_i(T, X) = C_i(0, X) = \frac{K_n}{QL * \rho} \frac{dE(t, x)}{dt} \Big|_{t=T} \approx C(0, X) - \frac{E(T + \Delta t, X + \Delta x) - E(T, X)}{\Delta t} \quad (20)$$

$$E(t, x) = C_2(T, X) / C_2(0, X) \quad (21)$$

где:

QL - производительность трубки тока (м³/сутки);

K_п - активная пористость (%);

ρ - объемный вес горнорудной массы (тн/м³);

E(t,x) - извлеченный i-го компонента на момент времени t = T в точке x трубки тока X(0, TL);

C₁(T, X) - концентрация i-го компонента в растворе на момент времени t = T в точке XE(0, TL) (мг/л);

C₂(T, X) - концентрация i-го компонента в руде на момент времени t = T в точке XE(0, TL).

При решении задач гидродинамики расчет линий (трубок) тока производится по 10 точкам и, следовательно, концентрация i-го компонента в растворах, содержание i-го компонента в твердой фазе на любой момент времени t = T в n-ой точке трубок тока определяется как:

$$C_2(0, T_n) = \frac{K_n(Z_n - Z_{n-1})}{QL * \rho * (T_n - T_{n-1})} \quad (22)$$

$$Z_n(T_n + \Delta t) = Z_n(T_n) + C_2(0, T_n) * \frac{\rho * QL}{K} * \Delta t \quad (23)$$

$$C_1(T, T_n) = E(T + \Delta t, T_n + \Delta t) \Big|_{z_n(t, \Delta t)} - E(T, T_n) \Big|_{z_n(t, \Delta t)} \quad (24)$$

$$C_2(T, T_n) = C_2(T, T_n) / C_2(0, T_n) \quad (25)$$

где:

Z_n(T_n) - запасы i-го компонента в трубке тока от 0-ой до n-ой точки (тн);

T_n - время движения растворов от закачной скважины до n-ой точки (сутки);

Δt - 1 сутки;

В свою очередь E_i(T) определяется составом горнорудной массы и выщелачивающих растворов, т.е. типом химической реакции.

Если рассматривать переход полезного компонента (Mo, Re, V, Se и т.д.) из твердой фазы в жидкую как одностороннюю реакцию первого порядка (A₀ \xrightarrow{K} A), то для трубки тока как открытой системы данный процесс описывается кинетическим уравнением вида:

$$\frac{d[A_0]}{dTd} = K_0[A_0] \quad (26)$$

и уравнением материального баланса:

$$\frac{d[A_1]}{dTd} = A_0 - [A_0] - \frac{QL}{VL} * Td[A_1] \quad (27)$$

Вышеприведенная система при начальных условиях: $Td=0$; $[A_0]=A_0$; $A_1=0$ имеет аналитическое решение на выходе трубки тока относительно добычи полезного компонента нарастающим итогом:

$$E_i(Td) = A_0 * (1 - e^{-K_0 Td}) * \frac{B_1}{1 + B_1} \quad (28)$$

где:

A_0 - первоначальные запасы;

$T_d = T - TL$ - промежутки времени добычи полезного компонента от момента его появления в продуктивных растворах, соответствующего времени поршневого вытеснения (TL);

$$B_1 = \frac{QL}{VL} * Td = \frac{QL * Td}{QL * Tl} = \frac{Td}{Tl} \quad (29)$$

T - время от начала отработки, в днях;

K_0 - константа скорости реакции.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс перехода урана в жидкую фазу вследствие высоких значений K_2, K_3 (350, 2500 - соответственно) имеет вид:

$$E_i(T) = U_{me}^0 * \left[1 - \left(1 + \frac{K_0}{K_1 - K_0} \right) * \exp(-K_0 * Td) + \frac{K_0}{K_1 - K_0} * \exp(-K_1 * Td) * \frac{B_1}{1 + B_1} \right] \quad (30)$$

При этом добыча урана на момент времени T по n -й откачной скважине рассчитывается по формуле

$$E_n(T) = \sum_{L=1}^n E_L(T)$$

где: L - количество трубок тока, участвующих в формировании продуктивных растворов n -ой моделируемой откачной скважины.

В общем виде уравнение кинетической кривой (30) представляется в виде:

$$E_L(T) = U_{me}^0 * \varepsilon_L(T) * \frac{B_1}{1 + B_1} \quad (31)$$

где:

$U_{me}^0 * \varepsilon_L(T)$ - общее количество урана, перешедшее из твердой фазы в жидкую в трубке тока (тн);

$B_1/(1+B_1)$ - характеризует динамику выноса урана с откачными растворами.

Следовательно, остаточное количество урана в жидкой фазе, оставшееся в недрах, рассчитывается по формуле:

$$U_L^* = U_{me}^0 * \varepsilon_L(T) * \left(1 - \frac{B_1}{1 + B_1} \right) \quad (32)$$

Сущность адаптации модели кинетики на геотехнологические параметры обрабатываемых блоков, участков заключается в определении оптимальных значений констант скорости выщелачивания по минимуму среднеквадратичного отклонения фактической добычи или концентрации металла в продуктивных растворах от прогнозируемой.

Решение задач прогнозирования добычи полиэлементного соединения как функции времени отработки на большом объеме статистических данных месторождений "СБ", "ЮБ" показало, что константа скорости перехода урана из твердой фазы в жидкую K_0 имеет явную тенденцию повышения от крыла к мешку (табл. 3):

Таблица 3.
Значение K_0 для различной геохимической зоны
Северного и Южного Букиная

Константа	Крыло	Промежуток	Мешок
K_0	0.0005	0.0014	0.008

Исходя из предположения, что уран в рудном теле представлен минеральной фазой переменного состава (различная степень окисления, аморфная или кристаллические формы), т.е. исходя из классификации руды "легковскрываемые" и "слабовскрываемые" автором предложена модификация модели добычи как функции времени отработки вида

$$E_L(T) = U_{me}^0 * \left[d_{me} * \varepsilon_L^{lb}(T) + (1 - d_{me}) * \varepsilon_L^{cb}(T) \right] * \frac{B_1}{1 + B_1} \quad (33)$$

где: d_{me} - доля легковскрываемых запасов;

$\varepsilon_L^{lb}(T); \varepsilon_L^{cb}(T)$ - функция извлечения урана для легковскрываемых и слабовскрываемых руд.

При этом $K_0^{lb} > K_0^{cb}$ при неизменных значениях $K_1=50$.

В свою очередь для сложных физико-химических процессов, каким является подземное выщелачивание, K_0 не имеет такого простого физического смысла как константа скорости реакции, а сама является функцией геотехнологических параметров.

Автором на большом статистическом материале апробировались различные виды функций, наиболее приемлемыми из них оказались функции вида:

$$K_0 = a * \left[\left(C_{H_2SO_4}^3 * TL \right)^n - 1 \right] \quad (34)$$

$$K_0 = \frac{a * \left[\left(C_{H_2SO_4}^3 * TL \right)^n - 1 \right]}{C_L^k} \quad (35)$$

где:

a, n, k - эмпирические коэффициенты;

$C_{H_2SO_4}^3$ - концентрация кислоты на закислении;

CL - содержание урана в трубке тока.

Оптимальные значения K_L и эмпирических коэффициентов в зависимости от принадлежности блоков к той или иной геохимической зоне приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Оптимальные значения K_L и эмпирических коэффициентов для блоков различной геохимической зоны

Коэффициенты	Геохимическая зона		
	Мешок	Промежуток	Крыло
$K_0^{об}$	0.018	0.009	0.007
$K_0^{св}$	0.00003	0.00005	0.000085
$d_{об}$	0.88	0.85	0.81
a	0.426	0.101	0.013
n	0.002	0.015	0.016

Вышеприведенная методика поиска оптимальных значений констант и эмпирических коэффициентов применима и для моделей анализа и последующего прогнозирования добычи сопутствующих полезных компонентов.

При проектировании объектов, отличающихся по минералогическому составу, геолого-гидрогеологическим характеристикам, необходимо проведение опытных работ. Очевидно, что численные значения констант и эмпирических коэффициентов зависят от типа месторождений, условий его формирования.

Так, например, для опытного блока месторождения "Карамурун", оснащенного тремя откачными и шестью закачными скважинами оптимальные значения (a, n, d): a=0.63; n=0.009; $d_{об}$ =0.87. Это означает, что при одинаковых режимах отработки выщелачивание месторождения "Карамурун" будет происходить более интенсивно, чем блоков месторождений Северный и Южный Букинай, видимо вследствие более глубокого залегания рудного тела и, соответственно, более высоких природных температур зоны реакции.

Адекватность модели процесса подземного выщелачивания, включающей модели пространственного распределения металла, гидродина-

мики и кинетики, фактическим условиям отработки определяется также корреляцией концентрации металла в продуктивных растворах от гидродинамических запасов, вовлекаемых в отработку.

Расчитанные значения $C_1(T, T_n)$, $C_2(T, T_n)$, (T, T_n) , по каждой точке линии тока записываются в базовый расчетный файл. При выводе гидродинамических схем с отображением вышеприведенных показателей по формулам линейной интерполяции рассчитывается необходимое количество промежуточных точек в соответствии с масштабом и отображается в виде карты состояния моделируемого блока (уровень извлечения) на заданные периоды от начала отработки. Эти карты состояния объекта являются информационной основой для управления процессом подземного выщелачивания. При этом изменение направления фильтрационного потока может быть достигнуто как изменением режимов работы скважин, либо отключением какой-то части из них.

Для прогнозирования экологического состояния водоносного горизонта на любой заданный момент времени от начала ведения процесса рекультивации автором на основе модели геофильтрации техногенных растворов определялись геотехнологические параметры по трубкам тока, количество которых может быть задано произвольно в зависимости от требуемой точности расчета.

Если для трубки тока как макроскопической системы, ввести допущения, что обменные процессы протекают в них независимо и система электронейтральна (т.е. происходит эквивалентный обмен ионов между породой и раствором), то в общем случае процесс массопереноса для i-го компонента (в данном случае иона SO_4^{2-}) в трубке тока описывается уравнением вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = K_n * S * \frac{\partial C_i}{\partial V} + S * \frac{\partial m_i}{\partial V} \quad (36)$$

где: C_i - концентрация i-го компонента (г/л);

K_n - активная пористость (%);

S - площадь поперечного сечения трубки тока (m^2);

m_i - поглощающая способность породы по i-му компоненту (кг/тн);

x - пространственная координата анализируемой точки в трубке тока;

V - объем раствора, прошедший через анализируемую точку за время "t" (m^3).

При использовании уравнений, описывающих обратимую кинетику второго порядка, а также "лэнгмюровскую" кинетику, приводящую к уравнению типа изотермы Лэнгмюра, уравнение имеет аналитическое решение, программно реализованное автором в модели миграции i-го компонента:

$$V = \left(K_{ii} + \frac{m}{C_{0i}} \right) * V_{Tp} + \frac{U * S}{B_2(K_{ii} - 1)} \ln \frac{\frac{C_i}{C_{0i}}}{\left(1 - \frac{C_i}{C_{0i}} \right)^{K_{ii}}} \quad (37)$$

где: V_{Tp} - объем трубки тока (m^3);
 K_{ii} - константа скорости реакции;
 U - скорость движения растворов (м/сутки);
 C_{0i} - фоновое значение концентрации (г/л)
 B_i - коэффициент пропорциональный коэффициенту диффузии и обратно пропорциональный площади поверхности частицы породы и ширине диффузионного слоя.

Программная реализация определения оптимальных значений характеристик m , B , K_i по минимуму среднеквадратичного отклонения фактических и расчетных значений SO_4^{-2} приводит к следующим результатам (Табл. 5).

Таблица 5.

Программная реализация определения оптимальных значений характеристик m , B , K_i по минимуму среднеквадратичного отклонения фактических и расчетных значений ионов SO_4^{-2}

Номер скважины	Оптимальные значения характеристик			Среднеквадратичное отклонение
	K_{SO_4}	B_{SO_4}	m_{SO_4}	
1Н	9.8	0.007	15.4	0.04
3	9.4	0.095	14.4	0.06
4Н	9.2	0.027	14.6	0.03

Следует отметить, что на модели по всем наблюдательным скважинам происходит более резкое снижение концентрации иона SO_4^{-2} после прохождения ее максимального значения по сравнению с фактическим. Это однозначно определяет неполное соответствие математического описания механизму "пакетного" режима подачи технологических растворов и последующей деминерализации. Очевидно, при последующей закачке пластовых вод происходит сдвиг равновесия "порода-раствор" в сторону перехода ранее сорбируемого (осажденного) иона SO_4^{-2} в жидкую фазу, что в вышеописанной модели не учитывается.

Описание перехода осажденного (сорбированного) компонента из твердой фазы в жидкую по трубке тока программно реализуется следующим алгоритмом:

1. Рассчитывается общее количество i -го компонента, мигрирующего по трубке тока формуле:

$$M_i^{общ} = QL * T_3 * C_{0i} \quad (38)$$

где: T_3 - время закачки "пакета" растворов.

2. Рассчитывается количество i -го компонента, выведенного из системы (трубки тока) в жидкой фазе за период прохождения "пакета" растворов через точку с координатами наблюдательной (откачной) скважины по формуле:

$$M_i^{ж.ф} = (C_{0i} + C_i(TL + T_3))/2 * T_3 * QL \quad (39)$$

где: $C_i(TL + T_3)$ - максимальное значение концентрации i -го компонента в жидкой фазе на момент времени $T = TL + T_3$.

3. Рассчитывается количество осажденного (сорбированного) компонента

$$M_i^{сорб} = M_i^{общ} - M_i^{ж.ф} \quad (40)$$

4. При $(T - TL) > T_3$ переход i -го сорбированного компонента в жидкую фазу на момент времени "Т" рассчитывается по формуле (изотерма десорбции):

$$\epsilon_i(T) = M_i^{сорб} * e^{-K_{di} * (T - TL - T_3)} \quad (41)$$

где: K_{di} - константа скорости перехода i -го компонента из твердой фазы в жидкую (константа десорбции)

$$C_i(T) = \epsilon_i(T) - \frac{\epsilon_i * (T + \Delta T)}{QL * \Delta T} \quad (42)$$

Таким образом, адаптация модели, описывающей механизм "пакетной" закачки раствора заключается в определении оптимальных значений константы " K_{di} " по минимуму среднеквадратичного отклонения фактических значений $C_i = f(T)$ от расчетных.

В табл. 6 приводятся результаты адаптации модели по скважинам №1Н, №3, №4Н.

Таблица 6.
Оптимальные значения K_{di} , рассчитанные по минимуму
среднеквадратичного отклонения значений C_i

Номер скважины	K_{di}	Среднеквадратичное отклонение
1Н	0.0022	0.01
3	0.0019	0.06
4Н	0.0022	0.09

По результатам моделирования построена гидрогеоэкологическая карта исследуемого блока, где по каждой из 10-и точек линий тока отобрано значение концентрации иона SO_4^{-2} в г/л на 100-й день от начала проведения процесса рекультивации. Показано, что время полной рекультивации, когда концентрация иона SO_4^{-2} в наблюдательных скважинах не превышает предельно допустимых, составило 420 дней.

Вышеприведенное математическое описание миграции i -го компонента техногенных растворов в сочетании с моделями геофильтрации и кинетики процесса перехода макрокомпонентов из твердой фазы (породы) в жидкую может быть использовано для разработки природоохранных мероприятий и выбора метода рекультивации пластовых вод полигонов подземного выщелачивания, хвостохранилищ и на объектах захоронения жидких отходов.

5.2. Взаимодействие объектов подземного выщелачивания с водозаборами и способы защиты подземных вод

В последние десятилетия правобережье р.Сыр-Дарья на участке между кишлаком Чашма и Учтепа подвергается интенсивному хозяйственному освоению - жилая и промышленная застройка, разработка уранового месторождения Киил-Тал, сооружение и развитие водозабора подземных вод №4 (с 1977г. по настоящее время), развитие садоводства и огородничества. Поэтому в настоящее время на формирование гидрогеохимической обстановки в средневерхнечетвертичном водоносном комплексе наряду с третичными водами хр.Могол-Тау, существенное влияние оказывают как техногенные, так и иные (агрогенные, биогенные) факторы. Так, опробованием скважин 12, 32 в районе котельной 13-го микрорайона выявлен источник повышенной хлоридной минерализации с содержанием хлор-иона в подземных водах до 2300 мг/л; по данным неоднократного опробования скважин в районе кладбища, лесопитомника, и фабрики "Атлас" выше 18-го и 19-го микрорайона проявляется источник повышенной сульфатной минерализации (содержание сульфат-иона до 2.0-2.2 г/л). Проведенными массовыми гидрохимическими опробованиями скважин выявлены также

аномальные содержания нитратов на участках жилой застройки, особенно индивидуальной (содержание нитрат-иона до 150-200 мг/л).

При моделировании геофильтрации техногенных растворов прудков, миграции компонентов-загрязнителей, а также области разгрузки водозаборов анализ гидродинамических схем показывает, что области разгрузки водозаборов и ореола растекания техногенных растворов ликвидированного рудника подземного выщелачивания не пересекаются и повышение минерализации вод, используемых для хозяйственных нужд, связано с деятельностью других источников загрязнения. А, учитывая физико-химическое взаимодействие рудничных вод с породами и смешение их с природными водами (миграция иона SO_4^{-2} на модели), влияние рудника на загрязнение водозаборов практически равно нулю.

Данный вывод подтверждается последующим комплексом исследований, который показал, что ухудшение гидрогеохимической обстановки на площади правобережной части г.Худжанда является результатом общей деградации природных условий вследствие интенсификации антропогенной деятельности вообще и урбанизации ландшафта, в частности.

Загрязнение подземных вод связано с несколькими полигонными источниками, основными из которых являются: участок кладбища, фабрика "Худжандатлас", питомник областного Хукумата, котельная 13-го микрорайона. Существенную роль в процессе загрязнения играет водозабор №4 вследствие деятельности которого имеет место ускоренный приток бытовых, агрохимических и промышленных стоков в четвертичный водоносный комплекс. Ликвидированный рудник №3 является одним из многих источников загрязнения лишь в периоды опытных и эксплуатационных работ.

Решение задач прогноза функционирования водозабора и рудника на более длительные сроки (например, до 2000 года) показывает, что область его разгрузки перекрывает зону распространения техногенных растворов. Однако, учитывая физико-химические процессы, происходящие в недрах, сорбционно-емкостные свойства пород область предельно допустимых концентраций по иону SO_4^{-2} не достигает области разгрузки водозабора, а в связи с тем, что рудник был отключен в 1992 году, происходит "отрыв" техногенных растворов от зоны прудков и их постепенная деминерализация.

5.3. Особенности разработки программного обеспечения и решения задач геотехнологии и экологии подземных вод

Пакет прикладных программ "Геотехнология полиэлементных руд и экология подземных вод", разработанный автором с сотрудниками, реализует методику решения задач прогнозирования компонентного

6.2. Минеральный состав подземных вод вокруг хвостохранилища

Массоперенос компонентов отходов хвостохранилища в окружающую среду, в основном, осуществляется посредством подземных вод, поэтому при описании параметров системы важная роль отводится контролю за миграцией хвостовых растворов, определению их мест утечки, а также разработке экспресс-методов анализа уровня их минерализации. Для данной цели широко используются геофизические методы контроля, к числу которых относится вертикальное (ВЭЗ) и круговое вертикальное электроразведывание (КВЭЗ). Благодаря использованию этих методов во многих случаях установлены корреляционные связи между удельными электрическими сопротивлениями водоносного горизонта и минерализацией подземных вод.

Сущность метода ВЭЗ состоит в следующем. Измеряют силу тока I_{AB} в питающей цепи АВ и разность потенциалов U_{MN} на измерительных электродах MN и вычисляются кажущиеся удельные сопротивления среды ρ_k по формуле:

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}$$

$$K = \pi * AM * AN / W_{MN}$$

Обработка и интерпретация результатов ВЭЗ проводятся в два этапа. На первом этапе анализируется весь материал и устанавливаются характерные особенности геоэлектрического разреза, как они отражаются на кривых ВЭЗ, низкоомные геоэлектрические аномалии увязываются с геохимическим опробованием по скважинам, определяются участки дополнительных геофизических исследований. На втором этапе кривые ВЭЗ интерпретируются по методике, предложенной О. Куфудом, для чего нами разработана программа VEZB, реализующая автоматическую интерпретацию методом "быстрейшего спуска", с помощью которой обработаны полученные полевые материалы. Обработка данных ВЭЗ осуществлялась с помощью программы автоматизированной обработки "ЛЯМБДА".

Полученные данные использованы для составления карты изолиний кажущегося сопротивления, в частности, для эффективных глубин, соответствующих разностей АВ/2 равной 150 м. Аналогичные изолинии были построены для значений АВ/2, соответственно равные 250 и 325 м, которые позволяют проследить процесс развития этих аномалий в зависимости от глубины зондирования. Сопоставление результатов ВЭЗ с данными геохимического опробования сети наблюдательных скважин допускает возмож-

ность существования взаимосвязи между значением рвыделяемого низкоомного слоя и минерализацией пластовой воды верхнего водоносного горизонта. Полученные карты имеют высокую контрастность и могут быть использованы для определения уровня минерализации пластовых вод, используя условную шкалу, представленную таблицей 7.

Таблица 7.

Взаимосвязь величины кажущегося удельного сопротивления слоя подземных вод с её общей минерализацией

Р, ом.см.	Общая минерализ. г/л	Примечание
менее 20	более 8-10	Сильно минерализованная вода
60—20	2—8	Минерализованная вода
более 60	менее 2	Слабо минерализованная вода

Анализ полученной информации позволяет сделать предположение о существовании в обследуемом районе двух источников низкоомных геоэлектрических аномалий, первый из которых приурочен к зоне хвостохранилища. В этой зоне наблюдаются четыре низкоомные протяженные геоэлектрические аномалии, представляющие из себя крестообразную структуру у Северного борта хвостохранилища.

Отмеченные геоэлектрические аномалии скорее всего свидетельствуют о существовании фильтрационного потока минерализованных растворов, что подтверждается также результатами геохимического анализа наблюдательных скважин. Другая аномалия, также хорошо согласующаяся с результатами геохимического опробования контрольных скважин, позволяет заключить о существовании области инфильтрации под дамбой хвостохранилища с миграцией минерализованных растворов в северо-западном направлении. Продолжением этой аномалии в Юго-Восточном направлении является третья аномалия, выклинивающаяся уже на незначительном удалении от хвостохранилища. Результаты геохимического анализа показывают отсутствие миграции минерализованных хвостовых растворов в Юго-Восточном направлении.

Четвёртая аномалия расположена у Южного борта хвостохранилища, что связано с отсутствием выраженных фильтрационных процессов и особенностями геологических формирований, т.е. относится к зонам тектонических нарушений, развивающихся от Южного борта хвостохранилища в Южном и Юго-Западном направлениях.

Следует отметить, что выявленный второй источник низкоомных геоэлектрических аномалий находится в состоянии сложного гидродинамического взаимодействия с хвостохранилищем. Речь идёт о распо-

ложенной Юго-Западнее хвостохранилища зоне интенсивного полива. Поливная высокоминерализованная вода частично сбрасывается по саю преимущественно Северного и Северо-Западного направления, а частично фильтруется подпочвенным слоем, приводя к поднятию уровня подземных вод. В результате чего сложившаяся гидродинамическая обстановка может препятствовать распространению хвостовых растворов в Юго-Западном направлении от хвостохранилища через выявленные участки повышенной трещиноватости. Однако наличие минерализованной поливной воды также приводит к загрязнению верхнего водоносного горизонта, причём по результатам ВЭЗ здесь также наблюдается миграция минерализованных вод преимущественно в Северном и Северо-Западном направлениях.

Таким образом, использование комплекса геофизических методов наряду с данными, полученными из наблюдательных скважин с применением методов скважинного экспресс-анализа состава подземных вод позволяет чётко устанавливать основные направления массопереноса компонентов хвостохранилища в окружающую среду.

6.3. Эффективность различных материалов для локализации радионуклидов гидromеталлургического завода

Результаты, полученные в предыдущих главах, могут быть использованы для локализации радионуклидов вокруг хвостохранилища ГМЗ, образованного в начале 50-х годов, которое в настоящее время в результате градостроительства оказалось в городской черте г. Гафурова (Таджикистан) и, естественно, к нему предъявляются повышенные требования по радиационной безопасности.

Путём гамма-каротажа и пробоотбора по короткометражным скважинам установлена сложная структура объекта, обусловленная технологией переработки руд на опытном ГМЗ и формированием хвостохранилища. Основным радиоактивным веществом в захоронении является радий-226, что обуславливает эскаляцию радона с поверхности хвостохранилища в пределах $0,14-15,9 \text{ БКхМ}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ при фоновом значении в районе объекта $0,009-0,018 \text{ БКхМ}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Эти данные дали основание считать необходимым постановку задачи по доконсервации хвостохранилища с использованием местных материалов. В связи с этим были поставлены две задачи - выбор консервирующего материала и определение толщины слоя покрытия хвостохранилища ГМЗ, обеспечивающего надёжную радиационную защиту. Для решения поставленной задачи в качестве основного метода исследования было выбрано изучение диффузионных процессов радона через различные материалы путём определения коэффициентов диффузии и расчёта толщины слоя, обеспечивающего снижение концентрации радона до

фонового уровня. Диффузионные процессы были изучены с помощью так называемой "баковой модели", представляющей собой цилиндр диаметром 1 м, где помещены эманулирующие радиоактивные вещества, сверху которых насыпан слой исследуемого материала, имеющего на различных глубинах от поверхности пробоотборники воздуха, связанные с внешней средой стеклянными трубками. После установления диффузионного равновесия через трубки отбиралась эманация с помощью эманометра, и определялась концентрация радона. Кажущийся (D^*) и истинный (D) коэффициенты диффузии вычислялись по следующим уравнениям:

$$D' = \frac{\lambda(x_2 - x_1)^2}{\ln N_1 - \ln N_2} \quad (43) \quad D = g \cdot D^* \quad (44)$$

где: $\lambda = 2.097 \times 10^4 \text{ сек}^{-1}$ - постоянная распада радона

N - концентрация радона (Кихл^{-1}) на глубинах соответственно x_1 и x_2 (см); g - пористость горной породы

Рассчитанные значения D^* могут быть использованы для установления взаимосвязи кратности ослабления плотности потока радона (n) от толщины слоя покрытия (R)

$$R = \sqrt{D' / \lambda^* \ln(n)} \quad (45)$$

Таблица 8.

Кажущийся коэффициент диффузии (D^*) и толщина слоя (R) 100-кратного сокращения плотности потока радоновыделения для различных материалов

Наименование материалов	D^* , $\text{см}^2/\text{сек}$	R , см
Песок	$5,0 \cdot 10^{-2}$	708
Суглинок, рыхлая кора выветривания	$(0,5-1,0) \cdot 10^{-2}$	224-318
Суглинок лессовидный	$2,0 \cdot 10^{-3}$	142
Глина влажная	$(0,5-1,0) \cdot 10^{-3}$	71-100
Бетон	$2,0 \cdot 10^{-4}$	44

Из таблицы 8, в которой приводятся значения величины D^* и R для различных материалов, видно, что по выбранным критериям в наибольшей степени удовлетворяет бетон, глина влажная и суглинок лессовидный. Среди этих материалов по экономическим и доступным соображениям предпочтение следует отдать лёссовидному суглинку - тонкозернистой однородной породе с большим содержанием кварца и силикатов, отличающийся хорошей пористостью и влагопроницаемостью, относительно малой деформируемостью при увлажнении, который и был выбран в качестве материала для дальнейшего исследования.

Кинетические данные, полученные в модельных условиях (база 60 см; $x_1 = 20$ см; $x_2 = 80$ см) с использованием суглинка показывают, что

диффузионное равновесие в системе практически устанавливается через неделю, а со временем суглинок слёживается и самоуплотняется, что проявляется в некотором снижении коэффициента D^* в пределах от $4,25 \times 10^{-3}$ до $3,67 \times 10^{-3}$ см²/сек. Из модельных опытов следует также, что распределение величины D^* послойно неоднородно: средний слой (20-40 см) при укладке оказался более рыхлым ($D^* = 15,4 \times 10^{-3}$ см²/сек), а верхний слой (0-20 см) хорошо уплотнён ($D^* = 1,52 \times 10^{-3}$ см²/сек).

Результаты, полученные на модельных опытах ($n=100$; $R=200$ см), апробированы на поверхности хвостохранилища - ГМЗ, для чего была сооружена ступенчатая площадка размером 30 x 10 м, с тремя секциями 10x10 м, в пределах которой насыпан и укатан слой лёссовидного суглинка толщиной соответственно 1,0; 1,5; 2,5 м. Первые две площадки хорошо уплотнены колёсами автомашин и бульдозера, а третья площадка уплотнена лишь утаптыванием. В центре последней площадки установлена полиэтиленовая закрытая трубка глубиной около 3,5 м, пересекающая лёссовую и старую гравийную насыпь и доходящая до слоя отходов, позволяющая измерять эксхалацию радона на различных уровнях. Полученные данные свидетельствуют об эффективности консервации и благоприятной роли уплотнения. Так, например, при изменении мощности слоя от 1,0 до 1,5 м и соответствующего уплотнения эксхалация радона уменьшается от 330 до 7000 раз, в то время как при мощности слоя 2,5 м без уплотнения эксхалация радона снижается лишь в 150 раз. Процесс диффузии радона в слое консервирующей засыпки, определяемый путём гамма-каротажа скважины, (специально пробуренной на третьей площадке), происходит путём постепенного роста радиоактивности в нижней и средней частях скважины и последующего запределивания. Изменения гамма-активности в поверхностной части скважины практически отсутствуют. Полученные в данной части работы результаты были использованы для расчёта толщины покрытия хвостохранилища, равной 2 м, обеспечивающей снижение выхода радона на поверхность до субфонового значения - 0,05 БК м⁻²/сек.

Данная разработка успешно прошла экологическую экспертизу в Минохране природы Республики Таджикистан и использована для дозащиты хвостохранилища ГМЗ.

Таким образом, изучение диффузионных процессов радона через различные материалы подтверждает обоснованность выбора суглинка лёссовидного, как наиболее доступного материала, а практическое воплощение данной разработки свидетельствует о надёжной локализации хвостохранилища опытного ГМЗ и благоприятной радиационной обстановки вокруг него.

ВЫВОДЫ

1. Впервые, методами постоянного тока и дифференциально-импульсной полярографии, а также потенциометрии изучены химический состав, кислотность и окислительно-восстановительный потенциал пластовых вод и техногенных растворов на месторождениях, обрабатываемых способом подземного выщелачивания. Проведены измерения растворенного кислорода в скважинных участках, оценена достоверность полярографических определений в сравнении с химическим анализом проб растворов. Осуществлена классификация полярограмм и установлены типичные полярограммы для различных по своему назначению скважин. Сделан теоретический расчет распределения газообразного окислителя в интервале фильтра контрольно-наблюдательных скважин и показано их соответствие практическим полярограммам. Путем сравнения с данными химического анализа доказана достоверность полярографических и потенциометрических определений с погрешностью, удовлетворяющей требованиям экспрессного контроля технологических процессов. Предложены методики и технические средства оперативного контроля процесса добычи полезных ископаемых способом подземного выщелачивания электрохимическими методами в скважинном варианте.

2. Использование геофизических методов вертикального (ВЭЗ) и кругового (КВЭЗ) электроразведывания установлена степень минерализации прудковых и определены пути миграции хвостовых вод. Выявлены корреляционные связи между удельным электрическим сопротивлением водоносного горизонта и минерализацией подземных вод. Составлена карта удельного электрического сопротивления и установлены два источника низкоомных геоэлектрических аномалий, первый из которых расположен в зоне хвостохранилища, а другой - в области инфильтрации под дамбой хвостохранилища, что является следствием миграции минерализованных растворов в северо-западном направлении.

3. На основании большого объема статистических данных обработки месторождений Северного и Южного Букиная, проведено моделирование и изучена кинетика процесса подземного выщелачивания урана. Полученные результаты позволяют подсчитать запасы в заданном контуре и прогнозировать направление и скорость движения техногенных растворов в пространстве водоносного горизонта и миграцию компонентов загрязнителей в районе действия водозабора, а также дать оценку характера взаимодействия водозабора и загрязнителей, выработать научно-обоснованные природоохранные мероприятия.

4. Разработаны программы автоматизированного расчета коэффициента анизотропии пространственного распределения содержания полиэлементных руд, направления их простирания, что значительно по-

вышает точность подсчета запасов в заданном контуре, а также точность прогнозирования геотехнологических параметров объекта подземного выщелачивания (добыча, концентрация полезного компонента в откатных растворах).

5. Проведено моделирование геофильтрации техногенных растворов, разработаны алгоритмы и программы расчета линии тока, что позволяет определить направление и скорость их движения в пространстве водоносного горизонта, являющихся необходимой информацией при оперативном управлении добычным комплексом, проектировании его и хвостохранилищ.

6. Используя модели пространственного распределения водно-физических свойств среды, распределения полиэлементных соединений и модель геофильтрации техногенных растворов, разработан алгоритм и программы расчета величин констант скоростей последовательной реакции перехода урана из твердой фазы в уранил ион и сульфатные комплексы различной степени координации. Продемонстрировано, что наиболее медленной стадией процесса является переход урана в уранил ион, причем численное значение константы скорости этой реакции изменяется для различных геохимических зон. Подобрано эмпирическое уравнение расчета скорости реакции, учитывающее взаимосвязь его величины и концентрации выщелачивающего реагента на стадии закисления и продолжительности поршневого вытеснения.

7. На основании моделей кинетики, среды и гидродинамики, разработаны алгоритмы и программы, позволяющие определить состояние объекта подземного выщелачивания (уровень извлечения, остаточное содержание) в любой точке пространства рудоносного горизонта, на любой момент времени от начала отработки в виде гидродинамических схем с отображением в точках линий тока вышеприведенных параметров, что является основой для оперативного управления добычным комплексом.

8. Разработаны оригинальные системные средства по созданию и ведению оперативной базы данных, архивов описания информации и схем ее обработки, прикладные программы, объединенные в единый пакет "Геотехнология полиэлементных руд и экология подземных вод".

9. Впервые, рассматривая Дигмайское хвостохранилище как термодинамическую систему, изучен массоперенос компонентов пульпы в окружающую среду путём определения содержания радиоактивных и тяжёлых элементов в почве, растительности, в воздухе и подземных водах района эксплуатации. Методами радиометрии, спектрального и химического анализов определено содержание тридцати двух элементов в растительности и почвенном покрове вокруг действующего Дигмайского хвостохранилища. Установлены типы и виды растительных сообществ, выявлены морфологические изменения у отдельных видов и

определены параметры распределения химических элементов, позволяющие выявить растения-индикаторы, способные накапливать радиоактивные и сопутствующие им химические элементы - польнь (уран, свинец, цинк, кадмий, цирконий, молибден); мятлик (молибден, свинец); катран (уран, свинец); лютик (цинк, уран, цирконий); лук, колючелистник, левкоя и боялыш (уран). Показано, что как в растениях, так и в почве содержание радиоактивных и токсичных элементов значительно превышает норму и постепенно снижается до фонового уровня в радиусе около 800 метров от центра их источника. Найдена корреляция между содержанием элементов в почве и растительности.

10. Изучена миграция радона через различные материалы - песок, глина, бетон, плёнки, плёнообразующие покрытия и различные виды суглинка - определены физико-химические параметры - коэффициент диффузии, кратность ослабления радиационного облучения в зависимости от толщины покрытия и плотности трамбовки - выявлены закономерности их взаимосвязи, обоснованы удобство и экономическая эффективность применения суглинка лёссовидного для дозахоронения хвостохранилища опытного гидрометаллургического завода в г. Гафурове Республики Таджикистан, приводящего радиологическую обстановку вблизи объекта до субфонового значения.

11. Изучена применяемость разработанных моделей для прогноза миграции элементов-загрязнителей в пространстве, показано соответствие полученных данных с результатами наблюдательных и контрольных скважин по концентрации элементов-загрязнителей на различные моменты времени в период эксплуатации Дигмайского хвостохранилища. Моделирование миграции техногенных растворов рудника №3 в районе действия Худжандского водозабора позволило дать оценку характера их взаимодействия и выработать научно-обоснованные методы рекультивации, путем подачи в закачные скважины незагрязненных пластовых вод, дать математическое описание физико-химических процессов происходящих в недрах и рекомендовать соответствующие природоохранные мероприятия.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Разыков З.А., Юнусов М.М. Содержание радионуклидов и тяжёлых элементов в почвенном покрове и растительности в зоне Дигмайского хвостохранилища. // Докл. АН РТ. -1997. -Т.41. -№ 11-12. -С. 25-29.
2. Разыков З.А. Юнусов М.М. Эффективность различных материалов для локализации радионуклидов хвостохранилища. // Докл. АН РТ. -1997. -Т.41. -№11-12. -С. 30-33.

3. Разыков З.А., Юнусов М.М. Минерализация подземных вод вокруг Дигмайского хвостохранилища. -1997. 5с. Деп. в ТаджикНПИЦентр 02.97, № 40 (1183). Вып. 2.

4. Юнусов М.М., Разыков З.А., Беззубов Н.И. Возможности электрохимических методов при экологических исследованиях. -1999. 5с. Деп. в ТаджикНПИЦентр, № 014 (1257). Вып. 1.

5. Разыков З.А., Коптелов В.Л., Юнусов М.М. Геофильтрация техногенных растворов и миграция их ионов. -1997. 9 с. Деп. в ТаджикНПИЦентр 02.97, № 41 (1184). Вып. 2.

6. Yunusov M.M., Razikov Z.A. "Chemical elements plant geobotanic distribution near waste stockpiles at hydrometallurgic enterprises". // "Golden Jubilee Convention". -Karachi 1998, (The Institution of Engineers Pakistan), P. 93.

7. Yunusov M.M., Bezzubov N.I., Razikov Z.A. "Research on ground water re-cultivation by the method of vertical electric sounding". // "Golden Jubilee Convention". -Karachi 1998, (The Institution of Engineers Pakistan), P. 94.

8. Yunusov M.M., Bezzubov N.L., Razikov Z.A., Kovirshin S.G. "Natural and technological water composition study by methods of polarigraphy". // "Golden Jubilee Convention". -Karachi 1998, (The Institution of Engineers Pakistan), P. 109.

9. Разыков З.А. Экология уранперерабатывающего предприятия. Монография, Худжанд, 1999, 184 с.

10. Коптелов В.П., Разыков З.А., Юнусов М.М., Коптелов А.В. Геофильтрация техногенных растворов на объектах подземного выщелачивания. // Докл. АН РТ. -2001. -Т. 44. -№11-12. С. 54-58.

11. Козлов В.А., Разыков З.А., Гусаков Э.Г., Батракова А.Х., Суетин Г.Л., Белоножко Н.Д., Кузьмина О.С. Сорбционная технология получения ванадия из отработанных ванадиевых катализаторов серноокислотного производства. УШ Всероссийск. конф. "Ванадий, химия, технология, применение", Тез. докл. - Чусовой, 2000. С. 206.

12. Разыков З.А., Юнусов М.М., Коптелов А.В. Распределение урана на месторождениях обрабатываемых методом подземного выщелачивания. // Докл. АН РТ. -2001. -Т. 44. -№1-2. С. 60-65.

13. Разыков З.А., Юнусов М.М., Коптелов А.В. Способ рекультивации водоносных горизонтов при отработке месторождений методом ПВ. // Докл. АН РТ - 2001. - Т. 44. - №1-2. - С.66-70.

14. Коптелов А.В., Разыков З.А., Юнусов М.М., Халиков Д.Х. Кинетика серноокислотного выщелачивания урана. // Док. АН РТ - 2001. - Т. 44. - №11-12. - С.49-53.

15. Разыков З.А., Коптелов В.П., Юнусов М.М., Коптелов А.В., Халиков Б.Д. Пакет прикладных программ "Экология подземных вод". // Международная конференция "Водные ресурсы Центральной Азии и их рациональное использование", Тез. докл. Душанбе, 2001, С.95-96.

16. Коптелов А.В., Разыков З.А., Юнусов М.М. Формирование карт состояния объектов подземного выщелачивания урана. Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.56-60.

17. Юнусов М.М., Разыков З.А., Беляев А.П., Бакулина Г.К. Комплексная переработка трудновскрываемого ванадий-алюминий содержащего сырья. // Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.189.

18. Юнусов М.М., Разыков З.А., Бакулина Г.К., Беляев А.П., Хочиён М.К. Причины образования гидратных осадков в аффинажном переделе. // Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.191.

19. Юнусов М.М., Разыков З.А., Беляев А.П., Бакулина Г.К. "Очистка богатых урансодержащих растворов участков подземного выщелачивания от железа". // Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.191.

20. Юнусов М.М., Разыков З.А., Бакулина Г.К., Беляев А.П. Извлечение драгметаллов из золото-серебросодержащего цементата царской водкой. // Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.192.

21. Разыков З.А., Юнусов М.М., Беззубов Н.И. Экологические проблемы организации цинкового производства на этапе проектирования. // Республ. конф. "Достижения в области химии и химической технологии", Материалы, - Душанбе: Дониш, 2002, С.190.

22. Беззубов Н.И., Разыков З.А., Юнусов М.М., Файзуллоев Б.Г. Оценка воздействия Дигмайского хвостохранилища на окружающую среду. // II Междун. научно-практическая конференция "Актуальные проблемы урановой промышленности", Сб. докл., Алматы, Казахстан, 2002, С.181-183.

23. Юнусов М.М., Разыков З.А., Бакулина Г.К., Беляев А.П. "Извлечение урана из вод сложного солевого состава озера "Сасык-Куль"". // II Междун. научно-практическая конференция "Актуальные проблемы урановой промышленности", Сб. докл., Алматы, Казахстан, 2002, С.91-94.

24. Козлов В.А., Разыков З.А., Батракова Л.Х., Гражданова Я.В. Исследование и разработка сорбционной технологии извлечения и разделения урана и ванадия из кварцитов Каратау. // II Междун. научно-практическая конференция "Актуальные проблемы урановой промышленности", Сб. докл., Алматы, Казахстан, 2002, С.165-166.

25. Патент на изобретение Республики Казахстан № 33239 "Способ переработки отработанных ванадиевых катализаторов". / Козлов В.А., Разыков З.А., Гусаков Э.Г., Суетин Г.Л., Хакимов Н., Батракова А.Х., Епанешников Ю.А., Белоножко Н.Д.

26. Патент на изобретение Республики Казахстан № 34908 "Способ переработки кварцитов Каратау". / Козлов В.А., Гражданова Я.В., Батракова А.Х., Разыков З.А.

27. Разыков З.А., Юнусов М.М., Беззубов Н.И., Муртазаев Х.М., Файзуллоев Б.Г. Экологические исследования в долине Ягноб. // Докл. АН РТ. -2002. -Т.45. -№1-2. -С.66-71

28. Разыков З.А., Бакулина Г.К., Ниязматова Д.Т., Беляев А.П., Юнусов М.М. Извлечение урана из природных ураносодержащих вод сложного солевого состава. // Докл. АН РТ. 2002. -Т.45. -№1-2. -С.60-65.

29. Разыков З.А., Суегин Г.Л., Хахимов И.Х., Гусаков Э.Г., Герасимова И.А., Беляев А.П., Козлов В.А. Исследование и разработка сорбционной технологии извлечения и разделения урана и ванадия. VII Всероссийская конференция "Ванадий, химия, технология, применение", Тез. докл. Чусовой, 2000, С. 123.

30. Беззубов Н.И., Разыков З.А., Юнусов М.М., Файзуллоев Б.Г. Дигмайское хвостохранилище и его экологическая опасность. // Международная научно-практическая конференция "16 сессия Шурои Оли Республики Таджикистан (12 созыва) и ее историческая значимость в развитии науки и образования", Тез. докл., Душанбе, 2002, С.123

31. Бакулина Г.Х., Беляев А.П., Ниязматова Д., Разыков З.А., Юнусов М.М. Технология извлечения урана из природных ураносодержащих вод Таджикистана. // Международная научно-практическая конференция "16 сессия Шурои Оли Республики Таджикистан (12 созыва) и ее историческая значимость в развитии науки и образования", Тез. докл., Душанбе, 2002, С.122

32. Разыков З.А., Гусаков Э.Г., Марущенко А.А., Ботов А.Ю., Юнусов М.М. Урановые месторождения Таджикистана, Монография, Чкаловск, 2002, 212 стр.

33. Razikov Z.A., Pavljuk L.M., Bezzubov N.I. Investigations for decision making on an old tailing pond of a former experimental metallurgical plant. (International conference on issues and Trends in Radioactive Waste Managment. Vienna, Austria, 9-13 Desember 2002, P. 291-293.

34. Халиков Д.Х., Разыков З.А., Коптелов В.П., Коптелов А.В. Взаимодействие объектов подземного выщелачивания с водозаборами и способы защиты подземных вод. Республиканский научно - практический семинар "Современное состояние водных ресурсов Таджикистана - проблемы и перспективы рационального использования": (13-14 мая 2003 года): Тез. докл. - Душанбе, 2003.-С.16-17.

35. Разыков З.А., Юнусов М.М., Коптелов В.П., Халиков Д.Х. Миграция хвостовых растворов вокруг Дигмайского хвостохранилища. Республиканский научно - практический семинар "Современное состояние водных ресурсов Таджикистана - проблемы и перспективы рациональ-

ного использования": (13-14 мая 2003 года): Тез. докл. - Душанбе, 2003.- С.65-66.

36. Халиков Д.Х., Разыков З.А., Коптелов В.П., Коптелов А.В. Взаимодействие объектов подземного выщелачивания с водозаборами и способы защиты подземных вод. Докл. АН РТ. 2003. -Т.46. -№11-12. -С.76-83.

37. Разыков З.А., Юнусов М.М., Коптелов В.П., Халиков Д.Х. Миграция хвостовых растворов вокруг Дигмайского хвостохранилища. // Докл. АН РТ. 2003. -Т.46. -№11-12. -С.84-90.

38. Козлов В.А., Батракова Л.Х., Терликбаева А.Ж., Разыков З.А., Гражданова Я.В., Нуржанова С.Б. Современные проблемы металлогении урана и ванадия. "Современные проблемы металлогении", "Фан", АН Республики Узбекистан, Ташкент, 2002, С.90-92.

39. Разыков З.А., Гусаков Э.Г., Беззубов Н.И., Павлюк Л.М. Опыт исследование законсервированного хвостохранилища. // Горный ж., Цветные металлы. 2003, Спецвыпуск. -С.82-83.



Получено в печать 14.10.2003 г. Формат 60x84 1/8
Объем 3 л. л. Тираж 50 шт.

© Издательство ООО «Издательство «Ташкент»
Т. Душанбе, ул. Истиклол, 33