



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т**

Председатель
Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

*ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ОХРАНА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

В.А. МИРОНЕНКО

В.Г. РУМЫНИН

ПРОБЛЕМЫ ГИДРО- ГЕОЭКОЛОГИИ

том 1

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕОМИГРАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ**

Издание 2-е, стереотипное

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 2



Издание осуществлено при поддержке Российского Фонда фундаментальных и прикладных исследований по проекту 98-05-78006

Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х т. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 611 с. ISBN 5-7418-0123-4

В монографии рассматриваются теоретические основы миграционных процессов, разрабатываются концептуальные (на базе исследования краевых задач) модели массопереноса в типовых гетерогенных водоносных системах с учетом физико-химических преобразований вещества; обосновываются эффективные алгоритмы решения миграционных задач методами математического (численного) моделирования; излагаются методы планирования и расчетные схемы интерпретации полевых индикаторных опробований; развиваются количественные подходы к постановке и обработке данных мониторинга качества подземных вод на участках их техногенного загрязнения; обосновываются модели для прогнозирования миграции высокоплотных солевых растворов, нефтепродуктов, радионуклидов и некоторых других веществ и компонентов, представляющих угрозу для подземной гидросферы на участках загрязнения; оценивается эффективность различных методов реабилитации качества подземных вод; обосновываются водоохранные мероприятия; рассматриваются особенности практической реализации предлагаемых исследований авторов на различных объектах (горнодобывающие районы, водозаборы подземных вод, участки складирования высокотоксичных, в том числе радиоактивных, отходов, атомные электростанции и др.).

УДК 622:502

ISBN 5-7418-0123-4

© В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, 1999

© Издательство МГГУ, 1999

© В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, 2002

© Издательство МГГУ, 2002

Содержание

ТОМ 1

Предисловие.....	27
Введение.....	29
ЧАСТЬ 1 Гидродинамические основы теории массопереноса в подземных водах и породах зоны аэрации.....	34
 Глава 1. Основные физические механизмы массопереноса в водоносных породах и его математическая формализация	
36	
1.1. Формы переноса и рассеяния вещества	36
1.1.1. Конвективный перенос	36
1.1.2. Диффузионный перенос	43
1.1.3. Дисперсионный перенос	45
1.1.4. Осмос и наведенные им процессы.....	53
1.1.5. Основные представления о миграции многофазных жидкостей.....	59
1.2. Базовые уравнения и краевые условия для мате- матического описания миграционных процессов.....	64
1.2.1. Общее уравнение массопереноса и его основные дифференциальные представления.....	64
1.2.2. Уравнения миграционного потока перемен- ной плотности	68
1.2.3. Краевые условия	71

Глава 2. Анализ физико-математических моделей миграции в гомогенных водоносных породах 78

- 2.1. Расчетная схема поршневого вытеснения 79**
- 2.2. Квазиодномерная расчетная схема продольной микродисперсии 82**
- 2.3. Пространственные модели миграции в гомогенных водоносных породах 92**
 - 2.3.1. Поперечная микродисперсия в одномерном фильтрационном потоке 92**
 - 2.3.2. Особенности пространственного рассеяния в условиях неоднородного фильтрационного поля 103**

Глава 3. Анализ физико-математических моделей миграции (макродисперсии) в гетерогенных водоносных комплексах 117

- 3.1. Модели миграции в упорядоченного стратифицированных пластах 121**
 - 3.1.1. Двухслойные системы 122**
 - 3.1.2. Многослойные водоносные пласты 131**
 - 3.1.3. О значимости вертикальной конвекции в водоносных и разделяющих пластах 137**
- 3.2. Комплексы трещиновато-пористых пород 141**
 - 3.2.1. Принципиальные модели массопереноса ... 143**
 - 3.2.2. О параметрической тождественности расчетных моделей миграции 151**

3.2.3. Об аналогии между процессами массо- и теплопереноса	153
3.2.4. Некоторые обобщенные решения и их анализ.....	154
3.3. Анализ миграции в неупорядоченно-неоднород- ных системах на базе стохастических моделей мак- родисперсии	157
3.3.1. Общие представления о стохастических моделях	157
3.3.2. Анализ принципиальных результатов изу- чения трехмерной макродисперсии в неоднород- ных средах.....	162
3.3.3. Стохастический анализ некоторых частных задач миграции в макронеоднородных средах	169
3.3.3.1. Макродисперсия при площадной инфильтрации.....	169
3.3.3.2. Макродисперсия при плотностной конвекции.....	172
3.4. Макродисперсия в стохастически неоднород- ных средах с двойной пористостью	176
3.5. Основные выводы теоретического анализа	179
 Глава 4. Основные представления о переносе влаги и загрязнений через зону аэрации.....	 192
 4.1. Теоретические основы влагопереноса в горных породах при неполном водонасыщении	 193
4.1.1. Общая энергетическая характеристика процесса влагопереноса	193
4.1.2. Закон движения влаги.....	197

4.1.3. Влияние гетерогенности ненасыщенных сред на влагоперенос	203
4.1.4. Математические основы вертикального влагопереноса	210
4.2. Основные представления о массопереносе в не- насыщенных грунтах.....	215
4.2.1. Перенос в гомогенных грунтах.....	215
4.2.2. Особенности массопереноса в ненасыщен- ных гетерогенных средах.....	219
 ЧАСТЬ 2 Гидрогеохимические основы миграции подземных вод.....	 226
 Глава 5. Гидрогеохимическое описание условий и процессов, контролирующих качественный состав подземных вод	 226
 5.1. Естественный гидрогеохимический фон и его роль в проявлениях буферных свойств водонос- ной системы.....	 227
5.1.1. Общие сведения о качественном составе подземных вод	227
5.1.2. Определяющие минеральные равновесия ..	231
5.2. Основные процессы физико-химического пре- образования вещества в подземных растворах (без учета фильтрации)	236
5.2.1. Межфазовые сорбционные и ионообменные взаимодействия.....	237
5.2.1.1. Равновесная сорбция (адсорбция)	237

5.2.1.2. Модель поверхностного комплексообразования.....	246
5.2.1.3. Равновесный ионный обмен	248
5.2.1.4. Модель кинетики сорбционных и ионообменных взаимодействий	255
5.2.2. Термодинамика и кинетика процессов растворения-осаждения	257
5.2.3. Гомогенные (внутрифазовые) взаимодействия	262
5.2.3.1. Комплексообразование	262
5.2.3.2. Исходные представления о коллоидных формах переноса загрязнителей.....	264
5.2.3.3. Деструкция химических соединений	267
 Глава 6. Миграционные модели физико-химических трансформаций	281
 6.1. Миграция активных компонентов в гомогенных породах.....	281
6.1.1. Сорбционные и ионообменные взаимодействия	281
6.1.1.1. Равновесная сорбция	281
6.1.1.2. Особенности проявления кинетики сорбционных процессов	286
6.1.1.3. Ионообменные взаимодействия в потоке подземных вод	288
6.1.2. Закономерности миграции компонентов, участвующих в процессах растворения-осаждения	292
6.1.2.1. Простейшие расчетные схемы.....	293

6.1.2.2. Процессы равновесного растворения-осаждения вещества применительно к растворам сложного состава на подвижных гидрогеохимических барьерах	299
6.1.3. Влияние внутрифазных реакций на интенсивность массопереноса и характер концентрационных фронтов.....	309
6.1.3.1. Расчетные схемы, учитывающие роль комплексообразования в сорбционных и ионообменных процессах	309
6.1.3.2. Модель миграции радиоактивных растворов, содержащих коллоидные частицы	315
6.1.3.3. Деструкция мигрантов.....	318
6.2. Модели миграции неконсервативных компонентов в гетерогенных водоносных системах.....	325
6.2.1. Сорбция в стратифицированных пластах ...	326
6.2.2. Сорбция в стохастически неоднородных системах	330
6.2.3. Миграция в трещиновато-пористых породах.	333
6.2.3.1. Особенности межфазовых взаимодействий.....	333
6.2.3.2. Коллоидный транспорт вещества в трещиновато-пористых породах	335
6.2.3.3. Описание деструкции вещества в трещиновато-пористых породах	340
6.2.3.4. Обобщенный аналитический подход к исследованию миграции в гетерогенных системах.....	344

ЧАСТЬ 3	Численное моделирование процессов загрязнения подземных вод	352
Глава 7. Анализ принципов и методов численного моделирования процессов загрязнения подземных вод		353
7.1. Общие представления о численных методах решения задач массопереноса и принципах постро- ения численных схем		354
7.1.1. Краткая характеристика методов конечных разностей и конечных элементов		354
7.1.2. Построение поля напоров		356
7.1.3. Свойства конечно-разностных аппрокси- маций одномерных уравнений переноса		357
7.1.4. Поперечная численная дисперсия		365
7.1.5. Аппроксимация временной производной ...		367
7.1.6. Особенности задания граничных условий ..		369
7.1.7. Принципы решения матричных уравнений .		370
7.1.8. Основы метода характеристик и метода случайных блужданий		373
7.1.9. Обобщающие выводы		375
7.2. Принципы построения численных алгоритмов для решения задач миграции подземных вод		380
7.2.1. Расщепление дифференциальных опера- торов в уравнениях переноса		380
7.2.2. Схема аппроксимации составляющих пе- реноса		382
7.3. Специфика численных моделей и схем при ана- лизе различных механизмов миграции		392

7.3.1. Алгоритмы численного моделирования миграции с учетом физико-химических взаимодействий	292
7.3.1.1. Общие принципы моделирования миграции многокомпонентных растворов	393
7.3.1.2. Особенности моделирования кинетических процессов (на примере сорбции)	401
7.3.2. Особенности численного моделирования миграции подземных вод переменной плотности и некоторые частные результаты	405
7.3.3. Особенности моделирования миграции в трещиновато-пористых средах	412
 Глава 8. Исследование процессов миграции на численных моделях	422
 8.1. Исследование на математических моделях массопереноса в гетерогенных водоносных пластах	422
8.1.1. Анализ закономерностей макродисперсии ..	423
8.1.2. Анализ чувствительности на стохастических моделях гетерогенных сред с неупорядоченной структурой	429
8.2. Исследование на математических моделях простейших физико-химических взаимодействий при миграции подземных вод	436
8.2.1. Ионообменные процессы	437
8.2.1.1. Ионный обмен при миграции в комплексах гомогенных пород	437
8.2.1.2. Ионный обмен при миграции в комплексах гетерогенных пород	442

8.2.2. Исследование процессов комплексообразования.....	448
8.3. Исследование на математических моделях некоторых особенностей радионуклидного транспорта в подземных водах	449
8.3.1. О точности сеточных решений высокоградиентных задач массопереноса.....	449
8.3.2. Исследование миграции радионуклидов в составе многокомпонентных растворов.....	451
8.4. Исследование миграции несмешивающихся жидкостей в ненасыщенной зоне	459
8.5. Некоторые замечания о состоянии исследований по численному моделированию миграции	461
 ЧАСТЬ 4	
Принципы и методы прогноза процессов загрязнения подземных вод	467
 Глава 9. Схематизация миграционных процессов .	469
9.1. Исходные предпосылки схематизации	469
9.2. Схематизация геофильтрационных условий массопереноса	471
9.2.1. Схематизация пространственной изменчивости и анизотропии фильтрационных свойств водоносных пластов.....	471
9.2.2. Схематизация пространственной структуры фильтрационного потока	473

9.2.3. Схематизация условий питания (разгрузки) водоносных пластов по площади их распространения	477
9.2.4. Заключительные выводы	479
9.3. Схематизация процессов массопереноса (собственно миграционная схематизация)	480
9.3.1. Схематизация влияния массопереноса на расчетную схему фильтрации	481
9.3.2. Схематизация гидродинамических процессов миграции (на примере физически и химически нейтральных компонентов)	484
9.3.2.1. Выявление значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса и схематизация структуры миграционного потока (в гомогенных породах)	484
9.3.2.2. Схематизация граничных условий миграции	489
9.3.2.3. Особенности схематизации миграционного процесса в гетерогенных водоносных комплексах	493
9.3.3. Особенности схематизации миграционного потока в условиях плотностной конвекции	495
9.3.4. Схематизация физико-химических условий и процессов миграции неконсервативных компонентов	498
9.4. О значении схематизации для расширения границ применимости аналитических методов	503
 Глава 10. О возможностях прогноза процессов загрязнения в водоносных пластах аналитическими методами	 508

10.1. Прогноз концентрационных полей на участках размещения поверхностных бассейнов промстоков и других локальных (сосредоточенных) источников загрязнения	510
10.1.1. Плановые миграционные модели	510
10.1.2. Профильные миграционные модели.....	515
10.1.2.1. Локальный источник загрязнения в двухслойном пласте.....	516
10.1.2.2. О роли поперечной (профильной) гидродисперсии	522
10.1.2.3. Об учете плотностной конвекции....	527
10.2. Прогноз качества подземных вод при их площадном загрязнении инфильтрацией или нисходящим перетеканием	528
10.2.1. Постановка задач прогноза.....	528
10.2.2. Плановые миграционные модели	531
10.2.2.1. Основные балансовые уравнения для пласта с инфильтрацией и их решения....	531
10.2.2.2. Проявление гетерогенных свойств комплексов трещиновато-пористых пород....	536
10.2.2.3. Роль диффузионных процессов при миграции загрязненных вод через покровные и разделяющие слои.....	538
10.2.3. Профильные двумерные модели.....	538
10.3. Прогноз загрязнения, вызванного подземными источниками некондиционных вод	542
10.3.1. Субвертикальное подтягивание глубоких некондиционных вод к водозаборным скважинам	543

10.3.1.1. Вариант отсутствия относительного водоупора между пресными и солеными водами	543
10.3.1.2. Вариант наличия разделяющего водоупора между пресными и солеными водами	549
10.3.2. Субгоризонтальная миграция от подземного источника некондиционных вод	552
10.4. О прогностических возможностях стохастических моделей миграции	555
10.5. Краткая характеристика базовых компьютерных программ	561
10.5.1. Численная модель трехмерной фильтрации подземных вод — программа MODFLOW	561
10.5.2. Численная модель трехмерного массопереноса и дисперсии в подземных водах — программа MT3D	563
10.5.3. Численная модель двумерного массопереноса и дисперсии в подземных водах — программа МОС	564
10.5.4. SUTRA — численная модель фильтрации и массо-теплопереноса в водоносных пластах (с учетом переменной плотности подземных вод и наличия ненасыщенной зоны)	566
10.5.5. Программа HT3D	569
10.5.6. Программа FLOWPATH	571
10.5.7. Программа FLOWNET	572
 Глава 11. Прогнозные оценки роли зоны аэрации в развитии процессов загрязнения подземных вод	 576

11.1. Общая характеристика основных прогнозных ситуаций и методических подходов к их анализу	576
11.1.1. Постановка задач для исследования и их типизация	577
11.1.2. Оценка по предлагаемым участкам разме- щения поверхностных бассейнов промстоков.....	581
11.1.3. Оценки защитных свойств зоны аэрации .	584
11.2. Особенности прогноза миграции загрязнений, вносимых в водоносные пласты с площадной ин- фильтрацией	593
11.3. О прогнозных оценках развития процессов загрязнения в породах зоны аэрации	595
11.4. Численная модель влаго- и массопереноса в зоне аэрации — VS2DT	606

ТОМ 2

Введение.....	28
---------------	----

ЧАСТЬ 5	Опытно-миграционные опробования в водоносных пластах	33
---------	--	----

Глава 12. Анализ эффективности лабораторных экспериментов как альтернативы опытным опробованиям	34
---	----

12.1. Общие положения и предпосылки к дифференциации экспериментальных схем	34
---	----

12.2. Определение параметров сорбции и ионного обмена	37
---	----

12.3. Изучение диффузионных параметров	43
--	----

Глава 13. Анализ целесообразных схем и условий постановки опытно-миграционных опробований .	49
---	----

13.1. Общие представления об индикаторных экспериментах.....	49
--	----

13.1.1. Задачи и направленность индикаторных опробований (ИО)	49
---	----

13.1.2. Сравнительная характеристика основных экспериментальных схем.....	52
---	----

13.2. Взаимоотношение опытно-миграционных опробований с другими видами работ при гидрогеологической разведке	57
--	----

13.3. О масштабных эффектах и целесообразных условиях проведения ОМО	61
--	----

Глава 14. Обоснование расчетных моделей для опытно-миграционных опробований69

14.1. Исходные предпосылки схематизации и основные аналитические решения	69
--	----

14.1.1. Исходные предпосылки к построению расчетных моделей	69
---	----

14.1.2. Общая математическая постановка задачи миграции в плоскорадиальном потоке	73
---	----

14.1.3. Особенности математического описания миграции индикатора при дуплетном опробовании квазигомогенных пород	75
--	----

14.1.4. О возможном несоответствии структуры миграционного потока модельным представлениям	81
--	----

14.2. Частные решения для квазигомогенных сред	87
---	----

14.2.1. Приближенные решения для плоскорадиальной миграции и их сравнительная характеристика	87
--	----

14.2.2. Представление решений для дуплетного опробования	90
--	----

14.2.3. Решение для индикаторных опытов при откачке	91
---	----

14.2.4. Односкажинный эксперимент	93
---	----

14.3. Частные решения для макрогетерогенных пород	95
---	----

14.3.1. О расчетных схемах для опытов в комплексах стратифицированных пород.....	95
14.3.2. Решение радиальных задач переноса в пласте гетерогенных трещиновато-пористых пород	99
14.3.3. Тепловое воздействие на трещиноватый пласт	105
14.3.4. Представление решений для дуплетного опробования.....	109
14.3.5. О расчетных оценках при индикаторных опытах с откачкой.....	112
14.3.6. Решения для односкважинной схемы опробования.....	113
14.4. Анализ гидрохимической инерционности наблюдательных скважин	116
14.5. Гидрохимическая инерционность запускных скважин, используемых в опытах при откачках	121
14.6. Исследование некоторых задач индикаторного опробования на математических моделях	123
14.6.1. Оценка эффективности дуплетного индикаторного опробования водоносных пластов	123
14.6.2. О надежности интерпретации односкважинных трассерных экспериментов	135
 Глава 15. Планирование и проведение опытно-миграционных опробований	144
 15.1. Рекомендации к планированию общей схемы миграционного эксперимента и опытного куста	145

15.1.1. Предпосылки к выбору опытных участков и схем опробования	145
15.1.2. Предварительное обоснование пространственно-временного масштаба опробования.....	147
15.1.3. Обоснование интервалов опробования и конструкций скважин	150
15.1.4. Стохастическая интерпретация практических рекомендаций.....	154
15.1.5. Об информации, привлекаемой к планированию ОМО.....	157
15.2. Предпосылки и выбору индикатора.....	159
15.3. Расчетное обоснование опытной схемы с выбором контролирующих показателей и дополнительных трассеров.....	165
15.4. Проведение индикаторных опробований	174
15.4.1. Предварительное опробование скважин опытно-миграционных кустов.....	174
15.4.2. Запуск трассера и наблюдения за его миграцией	178
 Глава 16. Интерпретация индикаторных опробований.....	 181
16.1. Диагностика опытных результатов и выбор расчетной модели.....	181
16.1.1. Комплексы пористых пород.....	181
16.1.2. Комплексы трещиноватых пород	183
16.2. Методика количественной интерпретации и анализа опытных результатов	189
16.2.1. Опыты в квазигомогенных средах	189

16.2.2. Опыты в гетерогенных средах.....	194
16.2.3. Анализ чувствительности индикаторных кривых.....	200
16.2.4. О привлечении математических моделей к планированию и интерпретации ОМО	204
16.3. Примеры интерпретации индикаторных опробований.....	205
 ЧАСТЬ 6 Опытно-миграционные наблюдения (ОМН) в водоносных пластах	 218
 Глава 17. Задачи и условия проведения ОМН.....	218
17.1. Роль и задачи ОМН	218
17.2. Типизация условий проведения ОМН	221
 Глава 18. Принципы и методы теоретического анализа в связи с интерпретацией опытно-миграционных наблюдений	229
18.1. Миграция трассеров от поверхностных источников загрязнения	230
18.1.1. Профильные модели для гетерогенных систем.....	230
18.1.2. Плано-двумерные квазигомогенные модели преноса (для ореолов рассеяния)	235
18.1.3. Значение и учет структуры фильтрационного поля.....	237

18.1.4. Значение погрешностей наблюдений	239
18.2. Миграция реальных стоков от поверхностных источников загрязнения	242
18.2.1. Общий подход к построению расчетных моделей	242
18.2.2. Простейшие схемы интерпретации данных наблюдений за миграцией стоков	245
18.2.3. Особенности анализа условий миграции разноплотностных жидкостей	249
 Глава 19. Постановка и методика проведения опытно-миграционных наблюдений.....	254
19.1. Общие положения	254
19.2. Принципы размещения пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах	257
19.2.1. Загрязнение от поверхностных источников	258
19.2.2. Загрязнение от подземных бассейнов некондиционных вод	264
19.3. О дополнительных требованиях к оборудованию наблюдательных скважин	267
19.4. Гидрохимическое опробование при наблюдениях и его достоверность	278
19.4.1. Показатели, контролирующие качество подземных вод	278
19.4.2. О требованиях к качеству гидрохимического опробования.....	280

19.5. Изучение миграции минерализованных стоков методами поверхностной геофизики	284
---	-----

ЧАСТЬ 7	Опытное изучение условий фильтрации индикаторными методами в связи с оценкой процессов загрязнения подземных вод.....	291
----------------	--	------------

Глава 20. Использование индикаторных методов при опытно-фильтрационных опробованиях	291
--	------------

20.1. Использование индикаторов для детализации фильтрационного процесса при опытных откачках (нагнетаниях)	293
---	-----

20.1.1. Предварительное опробование индикатор- ными методами скважин опытно-фильтрацион- ных кустов.....	293
--	-----

20.1.2. Изучение профиля проницаемости водо- носного пласта	296
--	-----

20.1.3. Изучение раскрытия индивидуальных трещин.....	301
--	-----

20.1.4. Об эффективности фильтрационного опробования пластов по дуплетной схеме	302
--	-----

20.1.5. Оценка плановой фильтрационной анизо- тропии	306
---	-----

20.1.6. Об использовании естественных трассеров	308
--	-----

20.2. Использование трассеров при изучении опыт- ными опробованиями вертикальной проницаемости и профильной фильтрационной анизотропии	309
--	-----

Глава 21. Опытное изучение условий и параметров фильтрации индикаторными методами при проведении режимных наблюдений318

21.1. Использование глобальных техногенных индикаторов для калибровки гидрогеологических моделей 319

21.1.1. Общие сведения о глобальных индикаторах..... 319

21.1.2. О расчетных моделях 324

21.1.3. Пример интерпретации данных тритиевого опробования подземных вод 331

21.1.4. Теоретические основы тритий-гелий (-3) метода датирования возраста подземных вод 333

21.2. Применение индикаторных гидрогеофизических методов для изучения фильтрационных потоков вблизи поверхностных водоемов и водотоков 335

21.2.1. Определение скорости фильтрации резистивиметрией наблюдаемых скважин 335

21.2.2. Гидрогеотермические наблюдения 337

21.3. Оценка условий и параметров фильтрации по данным гидрохимических наблюдений за подтягиванием минерализованных вод из подземных бассейнов 343

ЧАСТЬ 8	Опытное изучение условий переноса загрязнений через зону аэрации	348
Глава 22. Опытное опробование пород зоны аэрации.....		349
22.1. Опытная оценка вертикальной проницаемости покровных отложений и искусственных глинистых экранов.....		350
22.1.1. Об эффективности опытных наливов в шурфы		351
22.1.2. Лабораторная оценка проницаемости грунтов, экранирующих бассейны промстоков ...		353
22.2. Изучение водопроводящих свойств зоны аэрации опытными опробованиями в скважинах		351
22.2.1. Опробование вблизи поверхности грун- товых вод		358
22.2.2. Опробование зон разреза, удаленных от поверхности грунтовых вод		359
22.3. О целесообразных границах применения опыт- ных опробований для оценки параметров мас- сопереноса пород зоны аэрации		372
Глава 23. Опытные наблюдения для изучения условий переноса загрязнений через зону аэрации		379
23.1. Задачи, состав и проведение наблюдений		379
23.2. Интерпретация результатов наблюдений		386
23.2.1. Общие интерпретационные подходы.....		386
23.2.2. Простейшие схемы интерпретации на примере лизиметрических наблюдений		389
23.2.3. Интерпретация результатов наблюдений за глобальными трассерами		390

Предисловие

К концу 20-го века экологические направления геологии прочно заняли одно из ведущих мест в многочисленных теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в рамках наук о Земле. В особой мере это относится к экологической гидрогеологии, призванной выявлять, рационально использовать и охранять наиболее ценный сырьевой ресурс и компонент геологической среды — подземные воды. Изучаемые ею фундаментальные и прикладные научные проблемы приобрели в последнее время исключительную социальную и экономическую значимость. Достаточно упомянуть здесь защиту качества питьевых водных ресурсов; выявление, оценку и прогноз процессов загрязнения подземных вод как одного из техногенно уязвимых компонентов среды; реабилитацию загрязненных подземных вод, в том числе в районах крупных экологических катастроф; гидрогеоэкологическое обоснование условий безопасной эксплуатации различных инженерных объектов, включая АС, горнодобывающие предприятия, городские свалки, участки наземного и подземного хранения опасных отходов и т.п.

Несмотря на несомненную актуальность, эта важнейшая область геологической науки явно испытывает дефицит фундаментальных монографических исследований, что особенно бросается в глаза при анализе западных публикаций. Отечественной гидрогеологии, в этом смысле, повезло несколько больше, однако и на таком, сравнительно благополучном, фоне предлагаемая читателю работа кажется нам весьма заметным явлением. Насколько мы можем судить, подобный комплекс теоретических, экспериментальных и прикладных проблем экологической гидрогеологии анализируется в едином исследовании впервые в мировой практике. При этом, авторы удачно сочетают богатый личный опыт прикладных научных

проработок для самого широкого спектра практических проблем (полевой гидрогеологии, в частности) с фундаментальным теоретическим анализом — при особом упоре на математическое моделирование. В работе отчетливо прослеживается мультидисциплинарный подход, что нашло свое отражение как в многообразии применяемых методов исследований, так и в привлечении к анализу длинного списка отечественных и зарубежных публикаций разного плана. Авторы часто «выстраивают новое знание из старых фактов». В итоге, внимательный читатель найдет здесь много стимулов для острых дискуссий и дальнейших исследований.

Главная польза монографии, на мой взгляд, вытекает из разрабатываемых в ней принципов и методов решения столь актуальных, столь и трудных проблем экологической гидрогеологии. Теоретический анализ и прогноз, методика полевых экспериментов и наблюдений, а также практические рекомендации по весьма сложным и ответственным объектам, несомненно, находятся на уровне лучших мировых стандартов. Это исследование, безусловно, поможет заинтересованному читателю. Оно демонстрирует также, что и в наше, трудное для российской науки, время она способна успешно решать сложные задачи.

Н.П.Лаверов, академик

Введение

Развитие гидрогеологии как науки ориентировано на современном этапе, прежде всего, на решение проблем охраны от загрязнения подземных вод — одного из важнейших компонентов окружающей среды. Особая экологическая значимость гидрогеологии сделала ее весьма престижной, если угодно — модной специальностью на Западе с соответствующими экономическими последствиями: например, гидрогеологи в США — один из наиболее оплачиваемых инженерных контингентов. И именно это — гидрогеозэкологическое — направление во многом определяет сейчас лицо гидрогеологии, — как ее теоретический и экспериментальный базис, так и многочисленные практические приложения. Среди последних достаточно назвать: оценку и защиту ресурсов пресных питьевых вод, охрану подземной гидросферы в целом от техногенного загрязнения, подземное и наземное хранение опасных отходов, когда подземные воды могут оказаться в роли «главного транспортера» ядовитых или радиоактивных загрязнителей. Будучи неотъемлемой частью обеспечения экологической безопасности населения, решение этих проблем требует громадных финансовых затрат, например, одна только Арсенальная свалка (отходы военного производства) в США потребует для своей очистки около 10 млрд долларов.

Вместе с тем, упомянутые практические приложения определили во многом и направленность фундаментальных исследований в гидрогеологии, и сложность их проблематики — в силу того, что именно здесь мы имеем дело с сопряженными (часто — сильно нелинейными) процессами, когда одновременно приходится рассматривать взаимосвязанные гидрогеомеханические и гидрогеохимические, а очень часто и термомеханические

проблемы в рамках единой исследуемой задачи. Однако соответствующие исследования находят пока отражение лишь в многочисленных статьях и практически не обобщены в сколь-нибудь значимых монографиях.

В этой связи настоящая работа (к изданию подготовлено три тома монографического характера) может рассматриваться как попытка авторов подвести итог первого, наиболее продуктивного с точки зрения формирования концептуальных идей, и, в то же время, достаточно противоречивого периода становления этого направления гидрогеологии.

В данном, первом, томе рассматриваются проблемы теоретического описания и прогноза процессов загрязнения подземной гидросферы. В основе соответствующих разработок лежит теория миграции — массопереноса вещества в подземных водах и породах зоны аэрации. Ее становление связывается с именами В.М.Шестакова, Н.Н.Веригина, Ф.М.Бочевера, Я.Бэра (J.Bear), Г.Дарана (G.Dagan), Л.Гелхара (L.Gelhar), Ш.Ньюмена (Sh.Neuman), Ч.-Ф.Цанга (C.-F.Tsang). В соответствии с простейшими представлениями о горной породе как об однородной пористой среде, теория миграции оперировала сначала весьма идеализированными моделями, которые, тем не менее, позволили дать исходное физико-математическое описание ряда важнейших механизмов миграции — конвективного переноса и диффузионно-дисперсионного рассеяния вещества — «на микроуровне», т.е. в пределах репрезентативного элементарного объема однородной гомогенной среды; так была создана классическая теория дисперсии (точнее, микродисперсии).

Дальнейшие этапы развития гидродинамической теории миграции связываются с выявлением и описанием роли макронеоднородности и гетерогенности горных пород, что позволило перейти к существенно более реальным и практически важным процессам

макродисперсии. Именно гетерогенность обуславливает «взрывной», прямо не экстраполируемый и внешне нелогичный характер загрязнения подземной гидросферы: медленное развитие процесса, обусловленное «буферными» возможностями горных пород, после исчерпания этих возможностей может смениться катастрофически резким нарастанием загрязнения. Отсюда видно, какое важное значение имеет правильное понимание наблюдаемых процессов на уровне теоретически обоснованных (а не только эмпирических) представлений.

Параллельно с гидродинамической теорией миграции осуществлялись многочисленные исследования и выстраивалась теория физико-химических взаимодействий в системе «горные породы — подземные воды/техногенные растворы». Достаточно известны работы в этом направлении С.Р.Крайнова, В.М.Швеца, Ф.И.Тютюновой, В.С.Голубева. Наиболее разработанными здесь являются представления о минеральных, сорбционных и ионообменных равновесных взаимодействиях. В стадии становления находятся исследования, посвященные неравновесным процессам, протекающим при участии микроорганизмов; последние, в частности, играют определяющую роль в самоочищении подземных вод на участках их углеводородного загрязнения.

До поры, до времени эти работы были довольно слабо увязаны с первым — гидродинамическим — направлением, и лишь в последнее время наметился кардинальный сдвиг к их тесному объединению, чему немало способствовало численное моделирование; приоритет здесь принадлежит преимущественно зарубежным специалистам, о чем можно судить по работам Г.Т.Иеха (G.T.Yeh), К.Л.Карнахана (C.L.Carnahan), М.Д.Сигала (M.D.Siegel), И.Рубина (Y.Rubin). По сути дела, во многих отношениях моделирование сыграло роль мощного инструмента исследования сложных миграционных процессов, которые оказа-

лись за пределами возможностей аналитических методов, а подчас, более того, — и натурных экспериментов.

Благодаря эффективному сочетанию численного моделирования с аналитическими методами, гидрогеология сейчас располагает вполне дееспособной теоретической базой для прогнозов процессов загрязнения подземных вод. Вместе с тем, развитие компьютерного моделирования привело к определенным перекосам во взглядах на его роль: широко распространилась наивная вера в то, что моделирование может вообще устранить пресловутый информационный барьер, «сделать знание из полного незнания». Эта вера нашла свое отражение в многочисленных формализованных работах, где реальное существо изучаемых процессов полностью растворяется в гуще математической символики.

Авторы попытались изложить теоретические основы экологической гидрогеологии, соблюдая деликатный баланс между фундаментальными, физико-механическими (а также, в какой-то мере, гидрогеохимическими) представлениями, с одной стороны, и их математическими эквивалентами, с другой: при этом приходится учитывать, что в современной гидрогеологии затейливый математический орнамент часто является прикрытием для неглубоких или вообще неверных физико-химических интерпретаций; последнее во многом справедливо, в частности, для широкого круга сегодняшних исследований в сфере стохастического моделирования миграционных процессов. И не совсем уж без оснований высказываются опасения, что моделирование может погубить нашу гидрогеологическую профессию, — если не будет соблюден разумный баланс между теоретическими разработками и их информационной базой.

В этой связи очень важно, что развитие фундаментальных представлений о миграции, особенно в нашей стране, во многом опиралось не только на теоретические (в частности, аналитические) методы, но и на их тесное

сочетание с полевыми экспериментальными исследованиями — опробованиями и наблюдениями на опытно-промышленных полигонах. Решая конкретные производственные задачи, эти исследования одновременно приносили уникальный материал для теоретических обобщений, а также во многом способствовали разработке научно-методической базы полевой гидрогеоэкологии, о которой речь пойдет в следующем (втором) томе монографии.

Исходными для настоящей работы послужили длительные исследования фундаментального и прикладного характера, проводившиеся под руководством и при участии авторов в С.-Петербургском горном институте, — сначала кафедрой гидрогеологии, а затем Комплексной Лабораторией гидрогеологии и природосберегающих горных технологий (РАН и Роскомобразования). В этих исследованиях были заняты многие научные сотрудники и инженеры СПГГИ; большую помощь в постановке и реализации исследований оказали также работники многих производственных предприятий, таких как Лебединский, Коршуновский, Ковдорский ГОКи, ПО «Уралкалий», «Апатит», «Маяк», АО «Алмазы Якутии-Саха», «Североалмаз», «Татнефть». Геологическое управление АО «Татнефть» является спонсором настоящего издания.

Не имея возможности перечислить здесь всех представителей упомянутых и других организаций, авторы приносят им свою глубокую признательность.

В составлении отдельных разделов первого тома монографии принимали участие П.К.Коносавский (разд. 10.3), Н.С.Петров (гл. 4), Г.Н.Гензель и Н.Ф.Карачевцев (гл. 8), Ф.Г.Атрошенко (разд. 2.3.3).

Авторы с вниманием и благодарностью примут советы и критические замечания по существу работы.

Гидродинамические основы теории массопереноса в подземных водах и породах зоны аэрации

Физико-математическое описание рассматриваемых здесь процессов базируется на теории миграции вещества, влаги и тепла в горных породах, находящихся в состоянии полного (водоносные комплексы) или частичного (зона аэрации) водонасыщения.

В свое время, при описании массо- и теплопереноса в однородных гомогенных средах широкое распространение получили простейшие модели гидродинамической дисперсии (фильтрационной микродисперсии); упомянем здесь, среди многих, фундаментальные работы Н.Н.Веригина, Ф.М.Бочевера, В.Н.Николаевского, Б.С.Шержукова, Я.Бэра, П.Сафмана, Ж.Фрида, А.Шейдгера. Позднее произошло сближение формализованных математических моделей с физической сущностью процессов в реальных водоносных системах, характеризующихся детерминированной неоднородностью и гетерогенностью; здесь безусловная заслуга принадлежит российским специалистам, в первую очередь, В.М.Шестакову, Ф.М.Бочевру и А.Е.Орадовской, А.А.Рошало. Применительно к стохастически неоднородным средам принципы теоретического описания получили развитие в публикациях М.И.Швидлера, Г.Дагана, Л.Гелхара, Ш.Ньюмена, Ж.Матерона, Ч.Ф.Цанга и др.

В конечном итоге, к настоящему времени сложились основные представления о физических механизмах массопереноса в подземных водах. Согласно им, миграция компонентов осуществляется в рамках их конвективного (с учетом механизма гравитационной дифференциации)

переноса и диффузионно-дисперсионного рассеяния, на которые накладываются физико-химические процессы превращений вещества в подземных растворах и его взаимодействия с горными породами (часть 2). В многофазных системах — в зоне аэрации или при миграции несмешивающихся жидкостей в зоне насыщения — упомянутые физические механизмы существенно определяются также взаимодействием фаз.

Во многом неясными остаются пока механизмы миграции в слабопроницаемых глинистых породах, где круг их значительно шире; ряд авторов придают здесь существенное значение не только конвекции и диффузии, но и осмосу.

1.1. Формы переноса и рассеяния вещества

1.1.1. Конвективный перенос

Конвекция — механический перенос под действием гидравлического градиента — является основной формой переноса компонентов в водоносных пластах зоны интенсивного водообмена. В физически однородных жидкостях такой перенос идет неотделимо от фильтрационного потока со средней его действительной скоростью, определяемой полем скоростей фильтрации ($\bar{v}$) и т. наз. активной пористостью (трещиноватостью) пород — n .

Обычно считается, что эти показатели достаточны для расчета переноса при конвекции в статистически усредненной в пределах минимального репрезентативного объема пористой (трещиноватой) среды [10]: ими определяется поле действительных скоростей фильтрации

$$\bar{u} = \frac{\bar{v}}{n}. \quad (1.1)$$

В таком представлении конвективный перенос в однородных пластах должен характеризоваться резкой границей раздела между вытесняющей и вытесняемой жидкостями (рис. 1.1, а): перемешивания нет, и можно говорить о *поршневом* вытеснении одной жидкости другой.

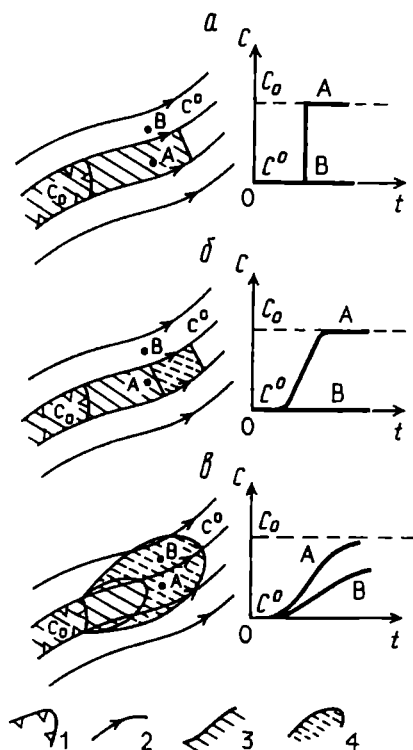


Рис. 1.1. Характерные схемы плановой миграции в неограниченном пласте от фиксированного концентрационного источника и типовые кривые соответствующих временных графиков $c=f(t)$ в расчетных точках A и B;

а - при поршневом вытеснении, б - при одномерной продольной микродисперсии, в - при двумерной микродисперсии (1 - границы концентрационного источника, 2 - линии тока, 3 - поле с постоянной концентрацией $c=c_0$; 4 - зона дисперсии $c^0 \leq c \leq c_0$, c^0 и c_0 - начальная концентрация и концентрация в источнике)

Характерные значения активной пористости для раздельно-зернистых (песчаных) пород обычно укладываются в относительно узкий ($n \approx 0,3+0,4$) диапазон; в коллекторах с трещинной емкостью разброс значений параметра n намного шире, а абсолютные его вели-

чины — гораздо ниже ($0,0005 \pm 0,01$). Отсюда понятно, что массоперенос в трещиноватых породах, при прочих равных условиях, должен протекать намного интенсивнее, чем в пористых.

Следует заметить, что показатель n для реальных пористых сред является довольно условным параметром, так как наряду с проточными (активными) породами всегда существуют застойные, пассивные в фильтрационном отношении зоны, которые, не принимая непосредственного участия в гидравлическом переносе вещества (в направлении средней скорости фильтрации), тем не менее играют заметную роль в формировании общего массового потока: «донасыщаясь» веществом в результате процессов молекулярной диффузии, эти тупиковые зоны увеличивают общую емкость системы (по сравнению с величиной собственно активной пористости), замедляя тем самым скорость конвекции u (1.1). Такого рода обменные процессы требуют времени, поэтому степень вовлечения порового пространства в общий процесс массопереноса, а следовательно, и расчетная емкость системы будут зависеть от скорости фильтрации и длины переноса.

Аналогичное замечание можно сделать и о трещиноватых средах, содержащих системы трещин разных порядков. Более того, на первых этапах миграции в трещиноватых анизотропных средах, расчетное значение активной трещиноватости может сильно зависеть от направления вектора-градиента фильтрационного потока.

Итак, стремление сохранить активную емкость системы как физически определенный параметр следует признать целесообразным лишь для достаточно длительных процессов, когда ее можно оценивать по величине суммарной емкости — общей (связной) пористости-трещиноватости (n^0). Масштабы процесса, допускающие такое приближение, зависят от степени взаимосвязи от-

дельных элементов порового или трещинного пространства, что особенно важно иметь в виду для трещиноватых пород.

Дело в том, что в последнее время различными авторами публикуются все новые доводы в пользу «каналового» механизма фильтрации в таких породах, когда основная масса фильтрующейся жидкости сосредоточена в существенно разобщенных каналах; при достаточно большом естественном напряжении (>10 МПа), площадь их занимает обычно не более 15-20 % от общей поверхности трещин.

Свое теоретическое описание такой режим потока находит, в частности, в рамках двумерной модели трещины со случайным законом распределения ее раскрытия [37] и в более общих моделях параллельных каналов различного (взаимно-коррелированного) раскрытия. Ясно, что каналовой механизм фильтрации снижает демпфирующее действие пористой матрицы и роль сорбции на поверхностях трещин, сокращает время продвижения загрязнений (трассеров) и увеличивает их «пиковые» значения, в первую очередь, в относительно мелкомасштабных процессах. В частности, диффузия в матрицу (а вследствие этого, и внутривпоровая сорбция) сокращается на 1-2 порядка, хотя интенсивность диффузии и не падает во времени подобно обычной трещиновато-блочной среде с ограниченной приемной способностью блоков. Впрочем, в реальности, именно диффузия в матрицу (наряду с конвективно-дисперсионным рассеянием вещества в пересекающие каналы трещины) приводит к подавлению этого механизма миграции с ростом масштаба переноса. Однако происходит это, при прочих равных условиях, существенно позднее и на больших удалениях от источника загрязнения, чем это следует из традиционных моделей трещиноватых сред. Важнейшую роль здесь играет частота пересечения каналов между

собой и с трещинами, а также смоченная поверхность последних.

Отсюда возникает необходимость существенных изменений — в большую сторону — привычных оценок элементарного репрезентативного объема, проводимых на основе характерных расстояний между трещинами: для выполнения условия сплошности среды требуется наличие в выделенном объеме достаточно большого числа пересечений водопроводящих каналов с поперечными трещинами, обеспечивающими гидравлическую связь между каналами; такое взаимодействие, как будет видно из дальнейшего анализа, контролирует также особенности гидродисперсионных эффектов в трещиноватых средах. В целом же, нам представляется, что значимость канального механизма переноса в специальной литературе явно преувеличивается, и его важно учитывать лишь в сравнительно мелкомасштабных процессах, в первую очередь — при индикаторном опробовании и при оценке ситуации в непосредственной близости от источника загрязнения.

К этому нужно добавить, что полевые опытные данные на этот счет часто сильно искажены уже самой (некорректной) постановкой эксперимента, явно способствующей завышению роли «канальных» эффектов. В частности, это относится, например, к известным наблюдениям в подземных выработках рудника Стрипа [36]. Здесь изучалось распределение водопритоков из трещиноватых пород в штрек, для чего в кровле последнего были размещены водоулавливающие пленки. Наблюдения показали, что основная часть водопритоков приходилась на весьма ограниченную (менее 10 % от общего числа) долю трещин-"каналов". При этом, однако, остался за кадром тот очевидный факт, что само наличие измерительной системы-штрека приводит в данном случае к резкому усилению неоднородности упомянутого распределения за счет нулевого гидростатического давления на выходе и доступа воздуха к системе трещин.