МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ОХРАНА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

В.А. МИРОНЕНКО
В.Г. РУМЫНИН

ПРОБЛЕМЫ ГИДРО-ГЕОЭКОЛОГИИ

том 2

ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Издание 2-е, стереотипное

МОСКВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

2 0 0 2

УДК 622:502

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. 2. Опытно-миграционные исследования. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 394 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 математического описания миграционных процессов 64
1.2.1. Общее уравнение массопереноса и его основные дифференциальные представления 64
1.2.2. Уравнения миграционного потока переменной 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 неодномерного 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-неоднородных системах на базе стохастических моделей макродисперсии 157

3.3.1. Общие представления о стохастических моделях 157

3.3.2. Анализ принципиальных результатов изучения трехмерной макродисперсии в неоднородных 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 неоднородных 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 ненасыщенных грунтах 215

4.2.1. Перенос в гомогенных грунтах 215

4.2.2. Особенности массопереноса в ненасыщенных 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 водоносной 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 преобразования 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 гетерогенный 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 построения 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 аппроксимаций 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 операторов в уравнениях переноса 380

7.2.2. Схема аппроксимации составляющих переноса 382

7.3. Специфика численных моделей и схем при анализе 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 MOC 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 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 размещения поверхностных бассейнов промстоков..... 581

11.1.3. Оценки защитных свойств зоны 584

11.2. Особенности прогноза миграции загрязнений, вносимых в водоносные пласты с площадной инфильтрацией 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 опробований 69

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 планировнию 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 индикаторых 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. Планово-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 индикаторными методами скважин опытно-фильтрационных кустов 293

20.1.2. Изучение профиля проницаемости водоносного 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 анизотропии 306

20.1.6. Об использовании естественных трассеров 308

20.2. Использование трассеров при изучении опытными опробованиями вертикальной проницаемости и профильной фильтрационной анизотропии 309

Глава 21. Опытное изучение условий и параметров фильтрации индикаторными методами при проведении режимных наблюдений 318

21.1. Использование глобальных техногенных индикаторов для калибрации 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 условоий 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 грунтовых вод 358

22.2.2. Опробование зон разреза, удаленных от поверхности грунтовых вод 359

22.3. О целесообразных границах применения опытных опробований для оценки параметаров массопереноса 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

Введение

В глобальной проблеме охраны геологической среды заметное место отводится защите от загрязнения важнейшего ее компонента — подземных вод. Вместе с тем, из накопленного опыта хорошо известно, что во многих случаях имели место и возникают вновь тяжелые экологические ситуации с загрязнением подземных вод, ни в коей мере не предполагавшиеся при проектировании тех или иных инженерных объектов (в частности, питьевых водозаборов, горных дренажней, городский свалок, подземных хранилищ отходов и др.). Помимо чисто субъективных причин, подобные просчеты проектов во многом объясняются и объективным фактором принципиального свойства — их недостаточным информационным обеспечением. Применительно к гидрогеоэкологии, речь здесь идет прежде всего об исходной информации для надежных оценок и прогнозов процессов техногенного загрязнения подземных вод: главное место в ней занимают сведения о механизмах и параметрах миграции загрязнений.

В этой связи, данный — второй — том нашего монографического исследования* ориентирован на анализ и дальнейшее развитие научно-методической базы полевой гидрогеоэкологии, ответственной за информационное обеспечение оценок и прогнозов загрязнения подземных вод. Основу этих работ составляют опытно-миграционные работы (ОМР) — индикаторные опробования и наблюдения, ориентированные на изучение механизмов и параметров миграции, т.е. на снижение информационного барьера, являющегося сейчас главным препятствием для адекватных взаимоотношений теории и практики.

---

* Напомним, что первый том посвящен проблемам теории геомиграционных процессов.

Несмотря на очевидную потребность практики, такого рода работы ставятся пока в весьма ограниченном объеме и обычно без должного методического обоснования; так, единичные полевые индикаторные эксперименты чаще всего носят исследовательский характер, а принятые в широкой практике схемы и методы наблюдений за загрязнением подземных вод лишь в редких случаях позволяют использовать их результаты для детального анализа собственно миграционных процессов.

Такое положение дел объясняется рядом причин: слабой разработанностью теоретических и методических основ упомянутых работ, часто неверно понимаемых возможностями отдельных их видов; отсутствием тесного сочетания традиционно разобщенных в гидрогеологии методов исследований — гидродинамических, гидрохимических и гидрогеофизических; слабой увязкой миграционных экспериментов с существующей практикой гидрогеологической разведки; недооценкой значимости подобного рода работ, без которых зачастую невозможно обоснование эффективных инженерно-экономических решений в системе управления подземными водами. Эти решения недостаточно обеспечены требуемой информацией, методикой ее определения и соответствующей квалификацией инженерного персонала.

В период разведки главным видом ОМР являются полевые опытно-миграционные опробования (ОМО) пластов с помощью индикаторов в сочетании с лабораторными экспериментами. Будучи основными инструментом оценки миграционных параметров трещиноватых водоносных пород, индикаторные запуски могут оказаться и полезным дополнением к геофильтрационным опробованиям, когда перед последними ставится задача повышенной детализации фильтрационных характеристик пластов; чаще всего такая необходимость возникает именно при исследовании миграционных процессов.

Поскольку водоносным комплексам всегда свойственна гетерогенность, учет ее приобретает принципиальное значение при проведении ОМР: с нею связываются пространственно-временные эффекты, которые во многом предопределяют методические принципы, а иногда и саму целесообразность этих работ. С этой точки зрения, реализация ОМО всегда предполагает сознательное упрощение опытной схемы с целью исключения ряда нежелательных эффектов, которые, однако, в прогнозных расчетах могут приобретать особый вес. Так, круг экспериментально определяемых в полевых условиях параметров намеренно сужается до того минимального предела, который в лучшем случае может служить основой простейших прогнозных моделей.

Неизбежная ограниченность возможностей изучения механизмов переноса вещества и миграционных параметров опытным опробованием и лабораторными экспериментами вынуждает искать дополнительные источники информации для решения этой проблемы. Очевидно, наиболее эффективным здесь оказывается целенаправленное использование данных режимных наблюдений за процессом миграции при строительстве и эксплуатации инженерного объекта. По аналогии с опытно-фильтрационными наблюдениями (ОФН), направленными на изучение гидродинамического режима, эти наблюдения можно называть опытно-миграционными (ОМН), подчеркивая тем самым их ориентацию на обоснование модели переноса и оценку миграционных параметров. Будучи важной составной частью мониторинга подземных вод, и в частности, источником необходимых данных для корректировки исходных проектных прогнозов, ОМН лежат в основе разрабатываемой авторами концепции *контролируемого* загрязнения подземных вод. Эта концепция исходит из того, что в подавляющем большинстве случаев предварительные прогнозы процессов загрязнения подземных вод недостаточно надежны и нуждаются в последовательном

уточнении, согласно общим принципам адаптации и обратной связи.

Особое внимание уделяется тщательному планированию ОМН, без которого они зачастую оказываются на практике вообще бесполезными. В вопросах интерпретации ОМН авторы ориентировались на простейшие аналитические построения и, учитывая повышенную сложность изучаемых процессов в сочетании с ограниченностью исходной информации, отказались от подробного рассмотрения возможных здесь приложений математического моделирования. Сказанное, естественно, не исключает его целесообразности, особенно при планировании ОМН.

К сожалению, реализация опытных функций режимных наблюдений, требующая глубокого проникновения в сущность миграционных процессов, наталкивается и на принципиальные трудности субъективного характера, связанные с недостаточной подготовленностью специалистов-гидрогеологов в области теории массопереноса.

Если учесть также практически полное отсутствие специальной литературы по этому вопросу, то становится понятным, что для коренного улучшения качества режимных наблюдений за процессами загрязнения подземных вод необходимо, прежде всего, последовательное построение научно-методических основ ОМН как путем обобщения имеющихся теоретических представлений о миграционных процессах, так и на базе специальных новых разработок. Последние касаются применения не только сугубо гидрогеологических, но и соответственно направленных гидрогеофизических методов, тем более что постановка геофизических исследований в гидрогеологии носит часто формальный характер.

В работе над составлением данного тома монографии принимали также участие: П.К.Коносавский (разд. 14.1, 16.2, 16.3, 20.2), В.К.Учаев (разд. 16.3, 21.2), Н.С.Петров (гл. 22 и 23), Г.Н.Гензель (разд. 21.2), Ф.Г.Атрощенко

(разд. 20.2), Е.В.Мольский (разд. 19.2, 19.4), В.В.Щемилинин (разд. 19.4, 21.2), С.П.Поздняков (разд. 14.6).

Излагаемые здесь научно-методические основы полевой гидрогеоэкологии нашли свое применение при решении широкого круга инженерных задач, которые рассмотрены в заключительном (третьем) томе, посвященном прикладным исследованиям.

Весьма полезными для этого исследования были творческие контакты с В.М.Шестаковым, В.М.Гольдбергом, Б.В.Боревским, С.П.Поздняковым, Г.Е.Ершовым, а также представителями многих производственных организаций. В последние годы особенно плодотворными были совместные исследования с геологическим управлением АО «Татнефть», которое является спонсором настоящего издания.

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

ЧАСТЬ 5

Опытно-миграционные опробования в водоносных пластах

В данном разделе дается обоснование постановки, методов проведения и интерпретации полевых индикаторных опробований (ИО), рассматриваемых в качестве главного инструмента изучения миграционных параметров трещиноватых и трещиновато-пористых пород при гидрогеологических изысканиях, а также в качестве эффективного дополнения к геофильтрационных опробованиям, проводимым на участках возможного загрязнения подземных вод. Индикаторные эксперименты, имеющие целью оценку возможных моделей и параметров миграции, будем далее именовать *опытно-миграционными опробованиями* (ОМО).

ГЛАВА 12 Анализ эффективности лабораторных экспериментов как альтернативы опытным опробованиям

12.1. Общие положения и предпосылки к дифференциации экспериментальных схем

Лабораторные методы изучения массопереноса имеют как самостоятельное значение, т.е. их результаты могут непосредственно использоваться при построении моделей и в прогнозных расчетах, так и вспомогательное — при расшифровке данных полевых экспериментов и наблюдений. Важно подчеркнуть, что в целом роль лабораторных испытаний в общем комплексе экспериментальных работ здесь намного заметнее, чем при геофильтрационных исследованиях. Более того, лабораторные опыты миграционной направленности подчас могут рассматриваться как эффективная альтернатива полевым экспериментам. В частности, они обычно являются базовыми для оценки физико-химических взаимодействий в пористых образованиях, массовое изучение которых полевыми опробованиями мало реально.

Перед лабораторными исследованиями ставятся несколько взаимосвязанных задач: определение миграционных параметров для нейтральных стоков; выявление физико-химической природы процессов преобразования сточных растворов; оценка параметров, контролирующих протекание межфазовых физико-химических реакций; изучение диффузионных и осмотических процессов; изучение влияния состава стоков и напряженного состояния пород на фильтрационные свойства последних. Опы-

ты осуществляются с несцементированными гранулярными породами водоносных горизонтов, с глинистыми породами разделяющих пластов, с пористыми блоками трещиноватых коллекторов и с естественными и техногенными отложениями, экранирующими бассейны промстоков. При опытах с породами первой из упомянутых категорий можно, согласно разд. 2.2, пытаться ориентироваться на дисперсионно-конвективный режим массопереноса в образце, а в большинстве остальных случаев — на молекулярно-диффузионный режим, по крайней мере при коэффициентах фильтрации, меньших 0,1 м/сут. Эксперименты в слабопроницаемых породах могут, однако, заметно усложняться из-за необходимости достаточно тонких способов индикации, не смещающих существенно заданных или замеряемых условий на торцах образца: время накопления объема пробы должно быть намного меньше общего времени регистрации расчетного участка опытной кривой. Поэтому, в частности, может представиться целесообразным применение косвенных (без отбора проб) методов непрерывного прослеживания — резистивиметрического, потенциометрического, фотометрического и т.п.

Нужно подчеркнуть, что при общепринятых способах замера концентрации и лабораторных экспериментах определяется ее объемное значение в образце C_r, а не значение C_ρ, отвечающее расходу через какое-то его сечение (в частности, входное или выходное). Соответственно, и граничные условия следует задавить функцией C_r, а не C_ρ, что имеет существенное значение при Pe<10-20 (разд.1.2.3, 2.2); при поддержании постоянных концентраций в камерах на торцах колонки, это означает задание граничного условия первого рода.

На первом этапе проводятся опыты с инертными компонентами. Полученные результаты используются при анализе экспериментов, направленных на оценку параметров физико-химических взаимодействий реальных

сточных растворов с породами. Соответствующие эксперименты могут вестись в «статическом» (без конвекции) или динамическом режиме, однако последние нередко приводят к неудовлетворительным результатам. Во-первых, при форсированных динамических режимах емкостные (а также сорбционные или ионообменные) характеристики, как правило, оказываются заниженными (разд. 1.1.1). Во-вторых, в динамических опытах максимально проявляется кинеткика гетерогенных процессов (оценка которой сама по себе часто не является обязательной), что снижает надежность определения параметров, характеризующих равновесную стадию этих процессов. Дополнительные сложности связаны с наложением микродисперсионных эффектов продольного рассеяния в фильтрационной колонне — механизма, также не представляющего самостоятельного интереса. Наконец, в динамических экспериментах труднее поддерживать постоянство опытных условий.

По этим причинам динамические миграционные эксперименты (и то в режиме фильтрации, близком к прогнозному) могут представлять какой-то интерес лишь для гомогенных песчано-гравийных грунтов — при оценке их массообменных характеристик. Что же касается емкости этих пород по отношению к трассерам, то она достаточно надежно контролируется определяемыми известными методами значениями пористости (см. также разд. 1.1.1).

Для иллюстрации сказанного сошлемся на результаты опытов [1] со среднезернистыми песками, в которых четко прослеживалось ассимптотическое приближение расчетной активной пористости (n) к значению общей пористости ($n^0 = 0{,}4$) по мере уменьшения скорости фильтрации; при $v = 43$ м/сут $n = 0{,}3$; при $v = 8$ м/сут $n = 0{,}32$; при $v = 3$ м/сут $n = 0{,}34$; при $v = 1{,}5$ м/сут $n = 0{,}38$. Другой иллюстрацией гетерогенного поведения таких пород при динамических испытаниях

могут служить результаты «вымывания» содержащихся в них нефтепродуктов [4]: предел растворения при этом никогда не достигается.

В любом случае, достоверность получаемых результатов во многом определяется сохранностью естественной структуры грунтов. Если же образцы ненарушенной структуры отобрать не удается, то необходимо по крайней мере их предварительное уплотнение под «бытовыми» нагрузками*; при этом для глинистых пород важно обеспечить состав поровых вод, примерно идентичный естественному. Опыты на «порошках» из твердых пород или на глинистых «пастах» часто оказываются непредставительными. Подчеркнем поэтому, что не следует отождествлять рекомендуемые ниже «статические» модификации опытов с экспериментами на порошках (т.наз. batch tests): подготовка образца, создавая дополнительные свободные поверхности для сорбции, резко увеличивает ее и/или делает необратимой [5].

12.2. Определение параметров сорбции и ионного обмена

В условиях статического эксперимента с зернистыми материалами концентрации компонента в растворе (C_i) и на твердой фазе (q_i) связаны в виде:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\frac{M}{v}\frac{dq_i(t)}{dt}, \qquad (12.1)$$

где v — объем раствора, M — исходная масса вещества, $q_i|_{t=0} = 0$, $C_i|_{t=0} = C_{0i}$.

* И это, однако, не гарантирует от серьезных погрешностей.

Строго говоря, в сорбции и ионном обмене опосредованно принимают участие и диффузионные процессы. Сначала (условно-мгновенно) диффузия идет через пограничный слой (пленку), окружающий частицу грунта, а затем вещество диффундирует внутрь частицы; для шаровых частиц радиуса R

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{3K_f M}{R\,v\rho}(C_i - C_{si}), \qquad (12.2)$$

где C_{si} — концентрация в растворе, равновесная концентрации на твердой фазе (на внешней поверхности частицы), имеющей плотность ρ, K_f — «пленочный» коэффициент массообмена. Концентрация C_{si} вводится через уравнение изотермы как функция от C_i.

При опробовании хорошо проницаемых песчаных грунтов для оценки параметров изотермы *сорбции* опыт заключается в медленной фильтрационной пропитке образца исследуемым раствором до установления физико-химического равновесия между адсорбатом и адосорбентом — до тех пор, пока на выходе из образца не фиксируется постоянная концентрация, равная входной.

Формула оценки концентрации вещества на породе (в единице ее объема) q, равновесной заданной концентрации раствора C, имеет вид

$$q = (C\,V - \Sigma C_i\,V_i)/V_o - nC, \qquad (12.3)$$

где V_o и V — объем фильтрационной колонны и раствора, поступившего в нее за время опыта; C_i — текущая концентрация (в пределе стремится к значению C), непрерывно измеряемая на выходе из колонны в порциях объемом V_i. Активная пористость n может быть определена по аналогичной схеме с инертным индикатором (его входная концентрация C_n):

$$n = V/V_o - (\Sigma C_{ni}\,V_i)\ /\ (C_n V_o). \qquad (12.4)$$

Если насыщение происходит достаточно медленно, так что кинетикой сорбции допустимо пренебречь*, то по сдвигу выходных кривых на индикаторых графиках ($c \div t$), построенных для инертного и сорбирующегося компонетов, может быть непосредственно оценен параметр распределения $K_d = \rho K_d$ (линейная изотерма). Для точки $\bar{c} = 0{,}5$ этот сдвиг составляет

$$\Delta t_{0,5} = LK_r / v, \qquad (12.5)$$

где L — длина опытной колонны; v — скорость фильтрации.

Здесь необходимо, однако, еще раз предупредить о недопустимости проведения опытов в форсированном фильтрационном режиме. Иллюстрацией важности этого требования могут служить результаты изучения сорбции на песчано-гравийных грунтах фторидов из техногенных растворов, накапливаемых в хвостохранилище комбината «Фосфорит». Опыты выявили достаточно четкую зависимость коэффициента распределения K_r от скорости фильтрации v: при изменении v от 0,2-0,5 до 20-40 м/сут происходило уменьшение K_r от 0,5 до 0,2 — в разнозернистых песках и от 0,2 до 0,03 — в гравийных отложениях, хотя активная пористость пород возрастала при этом — за счет донасыщения застойных зон — всего лишь на 10-20%.

Дополнительные сложности могут возникнуть в связи с проявлением при опыте кинетики сорбции (разд. 5.2.1.4), которое деформирует опытную кривую и внешне идентично гидродисперсионному рассеянию; совместное влияние этих факторов заметно затрудняет интерпретацию опыта, что, опять-таки, является доводом против форсированного опытного режима.

* Подтверждением тому должна служить параллельность кривых, полученных для сорбируемого и инвертного индикаторов.

С другой стороны, неоднократно отмечена неопределенность результатов «динамических» испытаний в колонках, что объясняется влиянием гетерогенности на поле скоростей (см. выше) или, например, несоблюдением условий подобия для кинетики гетерогенных физико-химических взаимодействий* [6]. В итоге, время установления равновесия в полевых условиях может быть гораздо большим, нежели в лабораторных.

Критерий установления такого равновесия для условий непрерывного запуска — должен оцениваться не по значениям времени, а в виде $(Ln/V)\ P_D$, где P_D — показатель скорости кинетики, что в общем равноценно использованию числа Дамколера (разд. 5.2.1.4). Для импульсного запуска время установления равновесия зависит еще и от критерия $\frac{\delta n}{vt}$, который должен быть менее 0,1. Все эти эффекты приводят к тому, что коэффициент задержки (распределения) растет во времени.

В слабопроницаемых глинистых грунтах или в пористых блоках трещиноватых пород эксперименты осуществляются в режиме длительной (обычно несколько десятков суток) молекулярно-диффузной пропитки образца, что позволяет обычно пренебречь влиянием кинетики сорбции. При этом глинистые породы, а также образцы сцементированных, но набухающих (с большим содержанием глинистых минералов) пород помещают в жесткую кассету, препятствующую разрушению их структуры.

Количестве вещества, идущего на насыщение образца (объемом V_0) и характеризующее сорбционную способность (при данной концентрации), определяется по разности между исходной C_0 и равновесной C концентрациями раствора

$$q = V\ (C_o - C)\ /\ V_o - n_o c, \qquad (12.6)$$

* Уместно отметить, что оценка параметров кинетики даже в лабораторных экспериментах сильно зависит от опытных условий и трудно поддается однозначной интерпретации.