

**ФОРМИРОВАНИЕ
И СТРОЕНИЕ ОРЕОЛОВ
РАССЕЯНИЯ ВЕЩЕСТВА
В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ**

2086

Формирование
и строение ореолов
рассеяния вещества
в подземных водах



МОСКВА ● «НЕДРА» ● 1977



Формирование и строение ореолов рассеяния вещества в подземных водах. М., «Недра», 1977, 136 с. Авт.: В. А. Грабовников, В. З. Рубейкин, Л. М. Самсонова, Б. Г. Самсонов.

В книге излагаются основные закономерности рассеяния вещества в подземных водах, на основе которых исследуются условия формирования и строение ореолов рассеяния. В ней приводятся результаты исследований, полученные на уровне математических моделей, физического моделирования в лабораторных условиях, натуральных экспериментов. Рассматривается ряд методических положений, которые могут быть использованы при интерпретации гидрогеохимических аномалий, при прогнозировании распространения загрязнения подземных вод в проблеме охраны окружающей среды и при генетических геологических построениях. Выводы авторов иллюстрируются примерами из практики поисково-разведочных работ и работ по изучению загрязнения подземных вод.

Книга рассчитана на гидрогеологов, геохимиков и геологов. Табл. 13, ил. 39, список лит.— 73 назв.

Авторы: В. А. Грабовников, В. З. Рубейкин, Л. М. Самсонова, Б. Г. Самсонов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение вопросов миграции и рассеяния вещества в подземных водах осуществляется в последние годы весьма интенсивно, что обусловлено, в первую очередь, непосредственными запросами современной гидрогеологической практики. Такие важные практические задачи, как прогноз возможных изменений качества подземных вод при эксплуатации их в сложной гидрохимической обстановке или вблизи хранилищ промышленных отходов, гидрогеохимические прогнозы для орошаемых территорий, вопросы выбора пластов-коллекторов для подземного захоронения промышленных отходов и проведения соответствующих прогнозов, поиски месторождений полезных ископаемых гидрохимическим методом, добыча твердых полезных ископаемых подземным выщелачиванием — могут успешно решаться только на базе правильного понимания физических и физико-химических процессов, обуславливающих миграцию и рассеяние вещества в подземных водах.

Знакомство с современным состоянием вопроса о формировании ореолов рассеяния вещества в подземных водах обнаруживает в нем, по крайней мере, два аспекта: 1) гидрогеохимический аспект, который заключается в исследовании условий поступления в подземные воды и устойчивости в растворе различных элементов-индикаторов, развивается успешно на количественной физико-химической основе; 2) гидродинамический аспект, который включает изучение закономерностей переноса вещества от источников поступления в подземные воды, исследуется также довольно интенсивно. Однако пригодные для практического применения математические модели миграции и рассеяния вещества ограничиваются пока простейшими расчетными схемами. В то же время во многих работах недостаточное внимание уделялось физическому содержанию изучаемых процессов и физическому смыслу получаемых решений.

Поэтому авторы попытались осветить в данной работе следующие вопросы: а) физическую сущность и имеющиеся математические модели миграции и рассеяния вещества в подземных водах; б) по данным лабораторного физического моделирования, натуральных экспериментов и анализа результатов изучения рассеяния вещества от природных источников пока-

зять основные закономерности формирования и строения ореолов рассеяния вещества в подземных водах.

Основное внимание при решении указанных вопросов уделено источникам вещества, практически не оказывающим гидродинамического влияния на структуру потока подземных вод (потока-носителя). Это прежде всего природные источники рудного вещества, а также некоторые искусственные источники с малыми расходами потока-индикатора по сравнению с расходами потоков подземных вод. Для источников, формирующих заново структуру потока или существенно изменяющих ее, вопросы миграции и рассеяния вещества рассматриваются в работах Ф. М. Бочевера, В. М. Шестакова, В. М. Гольдберга и других.

Участие авторов в составлении данной работы распределялось следующим образом: глава 1 написана В. А. Грабовниковым, глава 2—В. А. Грабовниковым и Б. Г. Самсоновым, главы 3 и 6—Б. Г. Самсоновым, глава 4—В. З. Рубейкиным и Л. М. Самсоновой, глава 5—Б. Г. Самсоновым, В. А. Грабовниковым и Л. М. Самсоновой.

В выполнении экспериментальных исследований и оформлении работы авторам помогали: О. Л. Бурдакова, Л. Л. Белова, Л. И. Кривошеева, С. И. Крючков, Г. И. Новожилова, Е. А. Солодовникова, А. Е. Тюнин, которым авторы выражают глубокую благодарность.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ И РАССЕЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

1. Миграция

Миграция, или пространственное перемещение вещества в водной фазе литосферы может осуществляться в результате двух физических процессов: конвекции, т. е. перемещения вещества вместе с водной фазой при движении последней, и диффузии, т. е. перемещения частиц вещества вследствие наличия градиентов концентрации его, температуры или давления (независимо от движения водной фазы). С. И. Смирновым [49] показано, что в реальных природных условиях процесс диффузии практически полностью определяется градиентом концентрации вещества. В зависимости от конкретных условий, указанные процессы могут происходить как раздельно, так и совместно. В покоящихся подземных водах при наличии градиента концентрации миграция осуществляется только диффузией. В движущихся подземных водах при отсутствии градиента концентрации имеет место только конвективный перенос вещества. При наличии градиента концентрации и при движении подземных вод миграция вещества обусловлена диффузией и конвекцией совместно.

2. Рассеяние

Рассеяние, или прогрессивное уменьшение концентрации вещества в подземных водах в пространстве и времени относительно выбранных начальных точек отсчета, в определенных условиях сопровождает миграцию вещества. Поэтому в литературе обычно в качестве процессов, обуславливающих рассеяние, указываются те же конвекция и диффузия, которые выше уже определены как две возможные составляющие процесса миграции вещества. Однако конвекция в пористой среде имеет две специфические особенности, которые (с точки зрения их влияния на рассеяние) должны рассматриваться отдельно. Этими особенностями являются: неоднородность поля скоростей конвективного потока в пористой среде (неравенство скоростей элементарных струек в соседних порах и внутри отдель-

ных пор) и неизбежное разветвление и слияние отдельных элементарных струек перед прохождением каждого зерна и после прохождения. Каждая из этих особенностей может независимо от другой обусловить определенную разновидность рассеяния.

Рассеяние как результат неравенства скоростей миграции

Для рассмотрения этого процесса удобно моделировать пористую среду пучком параллельных капилляров разного диаметра. До начала поступления вещества через капилляры проходил поток чистой воды при одинаковых перепадах напора между концами всех капилляров. В таких условиях средняя скорость течения в каждом капилляре прямо пропорциональна квадрату его диаметра. Если с какого-то начального момента в капилляры вместо чистой воды начнет поступать раствор вещества с концентрацией C_0 , то по прошествии некоторого времени длина участка, занятого раствором в каждом капилляре, будет пропорциональна средней

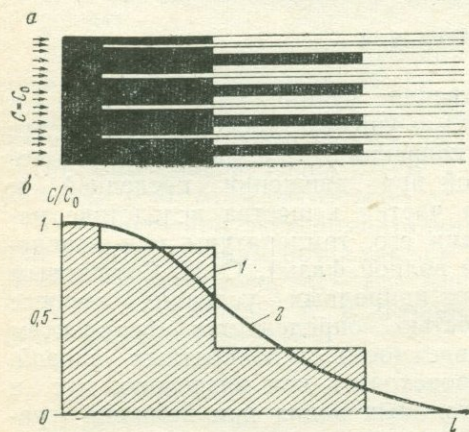


Рис. 1. Продольное рассеяние вещества при миграции в пучке капилляров. а — пучок капилляров; б — распределение концентрации в ряду капилляров

средней скорости, а общая картина распространения раствора в ряду капилляров показана на рис. 1, а (участки, занятые раствором с концентрацией C_0 , показаны сплошной закрашкой). Если теперь отбирать пробы жидкой фазы последовательно по длине ряда капилляров, то каждая проба будет представлена макрообъемом жидкости, составленным из суммы микрообъемов, находящихся во всех капиллярах на одинаковом расстоянии от начала. Распределение концентрации в макрообъеме жидкой фазы в ряду капилляров (см. рис. 1, а) будет иметь ступенчатую форму (кривая 1, рис. 1, б). Ступенчатость в приведенном примере обусловлена малым числом капилляров и дискретным характером распределения их диаметров (изображены капилляры диаметром 1, 2 и 3 мм). При достаточно же большом числе капилляров и при непрерывном распределении их диаметров в каких-то пределах, кривая изменения концентрации будет иметь плавную форму (кривая 2, рис. 1, б).

Приведенная схема показывает, что одного только различия в величине средних скоростей движения элементарных струек

достаточно для того, чтобы обусловить рассеяние первоначального резкого фронта концентрации вещества, поступающего в одномерный фильтрационный поток, по мере его продвижения. При этом длина фронта рассеяния (или расстояние между сечениями, в которых относительная концентрация $\frac{C}{C_0}$ равна 1 и 0) будет зависеть от разности между максимальной и минимальной скоростями и возрастать во времени. Мы намеренно не рассматривали выше влияние изменения скорости внутри каждого капилляра, чтобы, сохранив достаточную близость принятой модели реальным фильтрационным потокам в пористых средах, обеспечить наиболее простое и понятное описание физической сущности рассеяния за счет неравенства скоростей. В действительности же, поскольку внутри каждого капилляра скорость изменяется по параболическому закону, подобная описанной выше картина изменения концентрации будет наблюдаться не только в пучке капилляров, но и в каждом капилляре в отдельности. Это экспериментально и теоретически показано Тейлором [73]. Суммарный же эффект для пучка капилляров будет в конечном счете таким же, как и при пренебрежении различиями в скорости внутри капилляров.

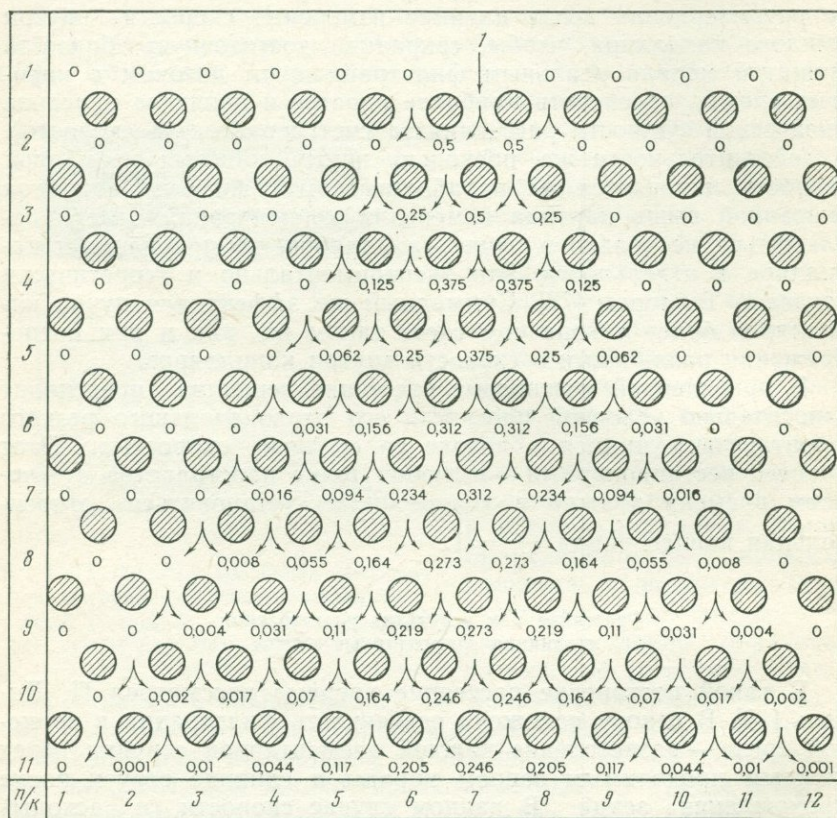
В приведенной постановке рассеяние вещества происходит относительно условной плоскости его первоначального резкого фронта, движущегося в потоке со средней скоростью. Этот процесс нестационарный — в любой точке пространства с течением времени должна в конце концов установиться относительная концентрация $\frac{C}{C_0} = 1$.

Рассеяние как результат разветвления и слияния элементарных струек

В такой постановке рассеяние впервые рассмотрел П. Данель [18]. В основу положена особенность фильтрации в пористой среде — разветвление каждой элементарной струйки перед каждым проходным зерном породы и слияние струек после прохождения зерна. В данном случае скорости (и расходы) элементарных струек для наглядности удобнее принимать одинаковыми. Рассмотрим модель такого фильтрационного потока — достаточно большую в двух направлениях, а в третьем — размером, равным одному зерну (рис. 2, а). На верхней границе рассматриваемой области фильтрации в каждую пору (пространство между соседними зернами) входят элементарные струйки воды с равными расходами. При этом одна струйка содержит вещество с концентрацией C_0 (точечный источник вещества). Разветвляясь перед очередным зерном, расход этой струйки делится пополам, а последующее слияние с половинами расхода каждой соседней «чистой» струйки приводит к умень-

шению концентрации вещества (при одновременном увеличении общего сечения, через которое оно проходит) пропорционально долям смешивающихся расходов. Последовательное лавинообразное расширение фронта прохождения вещества приводит к соответствующему уменьшению его концентрации как в микрообъемах из элементарных струек, так и в макрообъемах,

a



составленных из суммы соседних микрообъемов. На рис. 2, *a* цифрами в поровом пространстве показано отношение концентраций $\frac{C}{C_0}$ для каждой элементарной струйки, а стрелками — направление струек. Близкая картина получится, если вещество будет поступать в фильтрационный расход не в одной, а в нескольких элементарных струйках. Принципиальным отличием этого механизма от описанного выше влияния неравенства скоростей является возможность достижения стационарного

состояния поля концентраций при $\frac{C}{C_0} \neq 1$ в части или во всем рассматриваемом объеме. Действительно, показанное на рис. 2, а распределение концентраций будет наблюдаться сколь угодно долго, если условия на границах потока не изменяются. В данном случае можно говорить о рассеянии относительно

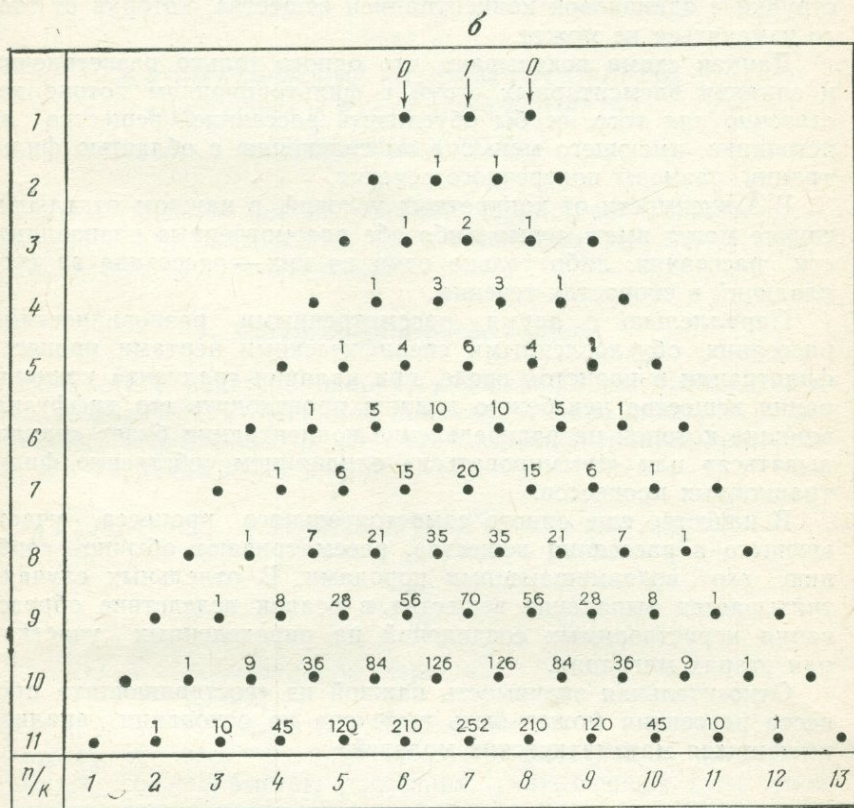


Рис. 2. Таблицы рассеяния вещества.

а — при поступлении вещества одной струйкой (по П. Дanelю); б — в относительных концентрациях (треугольник Паскаля)

фиксированного источника поступления вещества (а не условного подвижного «фронта фильтрации»). Распределение концентрации вещества от точечного источника в тонком («однозерновом») фильтрационном потоке за счет разветвления и слияния элементарных струек показано на рис. 2, а. Близкие виды зависимостей концентрации от координат (при более резком убывании) должны иметь место при переходе от «однозер-

нового» к полноценному трехмерному объему фильтрационного потока за счет возможности разветвления и слияния струй в третьем направлении. Описанная разновидность рассеяния перестает действовать, как только мы примем, что вещество поступает в фильтрационный поток по всему рассматриваемому сечению. В этом случае разветвляться и сливаться будут струйки с одинаковой концентрацией вещества, которая от этого изменяться не может.

Данная схема показывает, что одного только разветвления и слияния элементарных струй в фильтрационном потоке достаточно для того, чтобы обусловить рассеяние вещества от источника, имеющего меньшие по сравнению с областью фильтрации размеры поперечного сечения.

В зависимости от конкретных условий, в каждом отдельном случае могут иметь место либо обе рассмотренные разновидности рассеяния, либо только одна из них — рассеяние за счет различий в скоростях течения.

Параллельно с двумя рассмотренными разновидностями рассеяния, обусловленными специфическими чертами процесса фильтрации в пористой среде, при наличии градиента концентрации вещества неизбежно должна происходить его диффузия, влияние которой на распределение концентрации будет «накладываться» или «суммироваться» с влиянием собственно фильтрационных процессов.

В качестве еще одного самостоятельного процесса, участвующего в рассеянии вещества, рассматривают обычно сорбцию его водовмещающими породами. В отдельных случаях учитывается выпадение вещества в осадок вследствие образования нерастворимых соединений на определенных участках или этапах миграции.

Относительная значимость каждой из «составляющих» процесса рассеяния может быть выяснена на основании анализа имеющихся математических моделей.

Глава 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ И РАССЕЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Математические модели миграции и рассеяния вещества в пористой среде разделяются на две основные группы — детерминированные и статистические.

1. Детерминированные модели

Совместное действие охарактеризованных в предыдущем разделе физических процессов приводит к следующему математическому выражению их влияния на концентрацию вещества при его миграции и рассеянии:

$$n \frac{dC}{dt} = D_x \frac{d^2C}{dx^2} + D_y \frac{d^2C}{dy^2} + D_z \frac{d^2C}{dz^2} - v_x \frac{dC}{dx} - v_y \frac{dC}{dy} - v_z \frac{dC}{dz}, \quad (1)$$

где C — концентрация вещества;

t — время;

x, y, z — координаты пространства;

v_x, v_y, v_z — составляющие скорости фильтрации жидкости;

D_x, D_y, D_z — параметры рассеяния, учитывающие суммарное влияние всех процессов, обуславливающих эффект рассеяния в соответствующем направлении;

n — активная пористость среды.

Решения уравнения (1) для конкретных начальных и граничных условий являются детерминированными математическими моделями процесса миграции и рассеяния вещества в подземных водах. При использовании приводимых ниже решений следует иметь в виду, что часто в них фигурируют истинные значения скорости и параметров рассеяния $\left(\frac{v}{n} \text{ и } \frac{D}{n}\right)$, и там, где величина пористости не указана, она фактически должна быть учтена в значениях этих постоянных.

При рассмотрении детерминированных математических моделей удобно разделить их по количеству направлений, в которых рассеивается вещество, т. е. на рассеяние одномерное, радиальное, двумерное и трехмерное. При этом необходимо четко представлять себе, что размерность процесса рассеяния может не совпадать с размерностью фильтрационного потока. Она определяется условиями поступления вещества в поток. Так, на приведенном выше рис. 2, *a* фильтрационный поток является одномерным, а поток вещества в нем — двумерным.

Одномерное рассеяние

Схема процесса. Реальную схему процесса можно представить следующим образом. В полубесконечной трубке, заполненной пористым материалом, поддерживается постоянный фильтрационный расход ($v_x = \text{const} = v$; $v_y = v_z = 0$) жидкости, не содержащей изучаемое вещество. В момент времени $t=0$ в начальное сечение вместо этой жидкости подается с прежним расходом раствор вещества с концентрацией C_0 , по физическим свойствам (вязкость и плотность) не отличающийся от первоначальной жидкости. По мере продвижения в трубке первоначально резкая граница между жидкостью, содержащей и не содержащей растворенное вещество, «размывается» аналогично тому, как это показано для пучка капилляров.

Математическая модель. В описанной схеме $D_x = \text{const} = D$; $D_y = D_z = 0$. Решение уравнения (1) для таких условий, приведенное в работах Л. В. Радушкевича [41], Д. Ароновского и Д. Хеллера [63], Р. Оркутта, М. Рифаи и др. [69], В. Н. Николаевского и М. Д. Розенберга [32], дает следующую зависимость концентрации вещества от расстояния и времени:

$$C = 0,5C_0 \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\left| x - \frac{vt}{n} \right|}{2 \sqrt{\frac{Dt}{n}}} \right) + \right. \\ \left. + \exp \left(\frac{v}{D} x \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \frac{vt}{n}}{2 \sqrt{\frac{Dt}{n}}} \right) \right], \quad (2)$$

где n — активная пористость среды;

$\frac{v}{n}$ — действительная скорость движения жидкости.

С ошибкой менее 5% последним членом в квадратных скобках для $x > \frac{130D}{V}$ можно пренебречь, как было показано

А. Огата и Р. Бэнксом [68]. Это существенно упрощает уравнение (2) и расширяет возможности его практического применения.

Знак перед вторым членом в квадратных скобках берется в зависимости от знака выражения в числителе: при $x - \frac{vt}{n} > 0$ перед функцией $\operatorname{erf} z$ принимается знак минус, а при $x - \frac{vt}{n} < 0$ берется знак плюс.

Во многих работах вместо первых двух членов в квадратных скобках $(1 \pm \operatorname{erf} z)$ указана функция $\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z$. Однако это не вполне удобно, поскольку затрудняет проведение расчетов для значений аргумента $z = x - \frac{vt}{n} < 0$.

Таким образом, для практического применения в описанной схеме может быть использовано уравнение (2), которое с учетом приведенных выше оговорок и упрощений имеет вид:

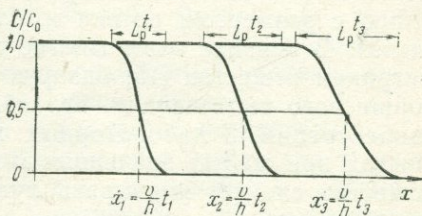


Рис. 3. Формирование зоны продольного рассеяния в одномерной схеме

$$C = 0,5C_0 \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\left| x - \frac{vt}{n} \right|}{2 \sqrt{\frac{Dt}{n}}} \right) \right]. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что со средней истинной скоростью течения жидкости $\left(\frac{v}{n}\right)$ движется концентрация вещества $C = 0,5 C_0$. Меньшие концентрации опережают этот фронт, а большие — отстают от него, причем с течением времени величины опережения и отставания возрастают (рис. 3).

На основании уравнения (3) многими исследователями предложены выражения для определения так называемой «длины зоны рассеяния» L_p , под которой понимается протяженность участка в направлении движения (по оси x), в пределах которого относительная концентрация вещества $\frac{C}{C_0}$ на определенный момент времени (см. рис. 3) изменяется в заданном диапазоне:

$$L_p = B \sqrt{\frac{Dt}{n}}, \quad (4)$$

где B — числовой коэффициент, зависящий от принятых пределов относительной концентрации (при $\frac{C}{C_0}$ 0,999—0,001, $B=8,8$; при $\frac{C}{C_0}$ 0,99—0,01; $B=6,6$; при $\frac{C}{C_0} = 0,9—0,1$, $B=3,6$).

Анализ величины L_p при характерных значениях определяющих ее параметров привел В. М. Шестакова [56] к выводу, что в натуральных условиях при изучении процессов вытеснения растворов по направлению фильтрационного потока она оказывается в большинстве случаев пренебрежимо малой по сравнению с размерами потока и, следовательно, может не учитываться. В связи с этим многие практические приемы расчетов миграции вещества [15] базируются на так называемой «схеме поршневого вытеснения», пренебрегающей рассеянием фронта концентраций. В лабораторных же условиях (или в натуральных опытах при малых значениях x и t) эффект рассеяния фронта вещества следует учитывать путем использования зависимости (3).

В. М. Шестаковым [56], а затем Ф. М. Бочевеком и А. Е. Орадовской [38] исследовано влияние различия в плотностях вытесняющей и вытесняемой жидкостей на строение границы раздела. Ими установлено, что в этом случае граница принимает наклонное положение в сторону жидкости с большей плотностью и общая длина зоны от $C=C_0$ до $C=0$ возрастает на величину, названную «зоной деформации».

Важная в практическом отношении модель одномерного рассеяния рассмотрена А. Н. Огильви [34]. Он анализирует загрязненный промышленными стоками грунтовый поток, по пути движения разбавляющийся инфильтрационными водами*. В такой постановке концентрация в каждой точке по пути движения определяется степенью разбавления и может рассматриваться во времени как постоянная. В случае отсутствия изучаемого компонента в инфильтрационных водах, закономерность убывания концентраций по мере удаления от источника вещества принимает вид

$$C = C_0 e^{-\frac{W}{q_0} x}, \quad (5)$$

где W — единичный инфильтрационный расход;
 q_0 — единичный расход загрязненного подземного потока в начальном сечении;
 x — расстояние от источника вещества.

* В этом случае сам фильтрационный поток в разрезе является двухмерным, а концентрация рассматривается как осредненная по мощности потока.

Зависимость (5) проверена А. Н. Огильви в натуральных условиях.

Экспериментальная проверка уравнения (3). Уравнение (3) многократно проверялось экспериментально и использовалось для обработки опытных данных, полученных для условий, отвечающих рассматриваемой схеме одномерного рассеяния. Результаты исследований говорят о вполне удовлетворительной для практики сходимости экспериментальных и расчетных данных и, следовательно, о возможности практического использования решения (3). Однако здесь необходимо уточнить следующее обстоятельство.

Строгая экспериментальная проверка справедливости любого уравнения, выражающего какой-либо физический процесс, заключается в том, что при подстановке в него числовых значений: постоянных параметров, определенных независимо от результатов данного опыта (в нашем случае C_0 , v , n , D), и экспериментальных значений переменных независимых x и t и зависимого C , оно должно обратиться в тождество. В нашем же случае определение параметра D независимо от рассматриваемого опыта невозможно. Единственное, что можно установить в каждом отдельном опыте — постоянство параметра D независимо от значений переменных x и t , а также справедливость самой функции по кривым зависимости концентрации от времени (в фиксированных точках) и от расстояния (в фиксированные моменты времени). Именно такая проверка уравнения (3) и проводилась многими исследователями. После установления справедливости уравнения (3) по данным экспериментов решались обратные задачи — определялось значение параметра D и его зависимость от других параметров процесса. Оказалось, что параметр D может существенно превышать эффективный коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде D_0 (максимальное значение которого может быть принято равным $\sim 10^{-5}$ см²/с) и возрастает с увеличением скорости движения жидкости. Зависимость его от скорости для разных сред устанавливалась различными исследователями от линейной до квадратичной. Таким образом, по теоретическим соображениям структура параметра D представляется большинством исследователей в следующем виде:

$$D = D_0 + \gamma \left(\frac{v}{n} \right)^\alpha, \quad (6)$$

где γ и α — параметры, характеризующие геометрию порового пространства (однородность материала и размеры зерен).

Проведенная С. И. Смирновым [49] обработка результатов экспериментов ряда зарубежных исследователей показала сле-

дующую обобщенную зависимость (число точек наблюдений $n=183$):

$$D = 0,23 \left(\frac{v}{n} \right)^{1,3}. \quad (7)$$

Сравнивая это выражение с уравнением (6), видим, что в последнем правая часть содержит только второй член, выражающий влияние конвективных процессов на рассеяние. Этот факт вполне удовлетворительно может быть объяснен тем обстоятельством, что экспериментальные данные были получены для сравнительно высоких значений скорости $\frac{v}{n}$, так что в этих условиях первый член D_0 в правой части уравнения (6) оказывался пренебрежимо малым по сравнению со вторым. Обработанные С. И. Смирновым данные включали только единичные опыты при значениях скорости $\frac{v}{n} < 10^{-2}$ см/с. Этот пробел достаточно убедительно восполняют результаты опытов А. Е. Орадовской [37], проведенных с мелкозернистыми песками в диапазоне действительных скоростей от $1,5 \cdot 10^{-3}$ до $4,44 \cdot 10^{-2}$ см/с.

Эти данные, будучи помещенными на графики С. И. Смирнова (рис. 4), заметно увеличивают фактический материал в области низких скоростей и в достаточной степени согласуются с проведенным С. И. Смирновым обобщением зависимости D от $\frac{v}{n}$, хотя и обнаруживают тенденцию к отклонению от линейной регрессии в сторону асимптотического приближения к $D=10^{-5}$ см²/с (т. е. к величине коэффициента молекулярной диффузии).

Исследовалась и зависимость D от характерных размеров пористой среды, например, от среднего диаметра зерен (В. А. Баум, Д. Брух и Р. Стрит и др.). Установлено близкое к линейному увеличение D с увеличением среднего диаметра.

Теоретическими исследованиями и экспериментальным путем установлено, что наличие процессов сорбции вещества породами при фильтрации и влияние фильтрационной неоднородности среды принципиально не меняют математическую модель рассеяния (в том числе одномерного), а только отражаются определенным образом на величине параметра рассеяния D . Оценка «вклада» каждого из перечисленных процессов в миграцию и рассеяние вещества приведена ниже в специальном разделе работы.

Ошибочные математические модели одномерного рассеяния. Основная ошибка, послужившая причиной получения неправильных математических моделей, заключается в том, что для схемы одномерного рассеяния неправомерно допущение о стационарности поля концентраций.

В данной схеме концентрация не изменяется во времени только там, где она уже достигла исходной величины ($\frac{C}{C_0} = 1$). Во всех остальных точках пространства концентрация в определенный отрезок времени изменяется от 0 до C_0 и пренебречь этим — значит игнорировать физический смысл процессов, про-

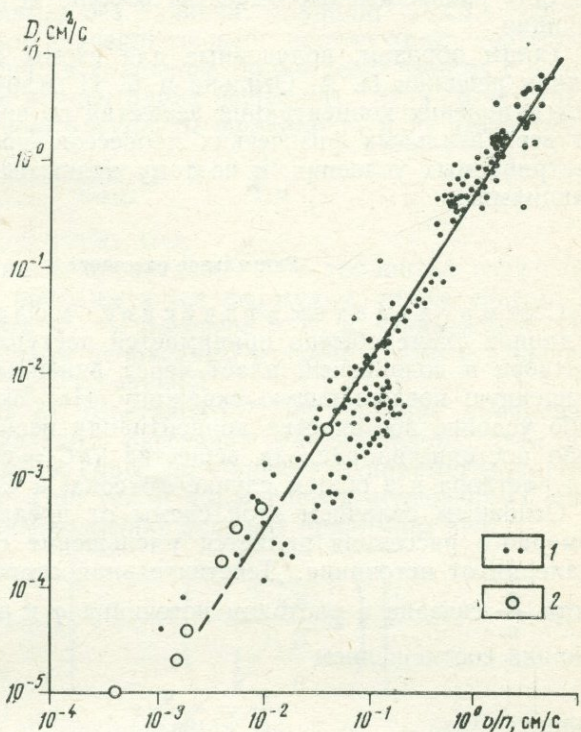


Рис. 4. Зависимость коэффициента продольной дисперсии от скорости конвекции.

1 — данные С. И. Смирнова; 2 — экспериментальные данные А. Е. Орадовской

текающих в рассматриваемой схеме. В математическом же отношении такое пренебрежение заключается в принятии в исходном уравнении (1) $\frac{dC}{dt} = 0$, что позволяет существенно упростить получение решений. Именно так и поступили Н. А. Огильви [35] и С. П. Албул [2]. При этом в одном из вариантов С. П. Албул считает возможным принять $\frac{dC}{dt} = 0$, так как им учитывается сорбция вещества породами. Однако процесс сорбции является нестационарным. Породы не могут беспредельно поглощать вещество из проходящего раствора. А именно такое условие и принято С. П. Албулом путем включения в исходное уравнение члена, учитывающего сорбцию, и

одновременного задания $\frac{dC}{dt} = 0$. Если же рассматривать длительно существующие природные ореолы рассеяния вещества от рудных тел [2], то к моменту рассмотрения скорее всего должно установиться равновесие между раствором и твердой фазой (породами), так что процесс сорбции, имевший место в начале формирования ореола рассеяния, на рассматриваемую картину распределения вещества вообще не должен оказывать влияния.

Таким образом, полученные для схемы одномерного рассеяния решения Н. А. Огильви и С. П. Албула, не учитывающие изменения концентрации вещества во времени, не отражают всех реальных физических процессов, протекающих в рассматриваемых условиях, и поэтому являются математическими фикциями.

Радиальное рассеяние

Схема и математические модели процесса. В данной схеме обычно принимается поступление вещества в растворе в водоносный пласт через линейный источник — совершенную поглощающую скважину. На скважине задается либо условие постоянства концентрации вещества ($C_0 = \text{const}$), либо постоянство расхода вещества ($qC_0 = \text{const}$, где q — расход раствора и в общем случае $q \neq \text{const}$ и $C_0 \neq \text{const}$).

Основным отличием этой схемы от предыдущей схемы одномерного рассеяния является уменьшение скорости по мере удаления от источника. Действительная скорость течения жидкости $\frac{v}{n}$ связана с расходом источника q и расстоянием от источника соотношением

$$\frac{v}{n} = \frac{q}{2\pi r m n}, \quad (8)$$

где m — мощность водоносного пласта.

При этом, строго говоря, величина параметра D должна соответственно уменьшаться по мере удаления от источника. Однако для получения приемлемых для практики решений обычно принимается один из видов осреднения величины D в исследуемой области. В такой постановке исходные параметры принимают вид $D_x = D_y = D$; $D_z = 0$. Задачи радиального рассеяния рассмотрены в работах Н. Н. Веригина [7, 8], В. М. Шестакова [59], Ф. М. Бочевера и А. Е. Орадовской [4], Д. Хоупса и Д. Харлемана [67].

По Ф. М. Бочевеу и А. Е. Орадовской решения для такой схемы имеют следующий вид:

$$\text{для } C_0 = \text{const} \quad C = C_0 [1 - F_1(v, \lambda)]; \quad (9)$$

$$\text{для } \bar{C}_0 q = \text{const} \quad C = \bar{C}_0 [1 - F_1(v, \lambda) - F_2(v, \lambda, B)], \quad (10)$$

$$\text{где } v = \frac{q}{4\pi m D^* n}; \quad \lambda = \frac{r^2}{4D^* t}; \quad B = \frac{q}{4\pi m D^* n} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 (v - 1),$$

D^* — параметр рассеяния, который при наличии сорбции имеет структуру $D^* \approx \frac{D}{n [1 + f'(C)]}$ (D —

параметр без влияния сорбции; $f'(C)$ — усредненное значение первой производной изотермы сорбции в диапазоне взаимодействующих с породами концентраций вещества). При отсутствии сорбции аргументы функций F_1 и F_2 имеют вид:

$$v = \frac{q}{4\pi m D}; \quad \lambda = \frac{r^2 n}{4Dt};$$

r_0 — радиус скважины;

F_1 и F_2 — функции, определяемые по таблицам, графикам или приближенным формулам, приведенным в работе Ф. М. Бочевера и А. Е. Орадовской [4]. При этом необходимо учитывать, что в решении (9) $C_0 = f(t) \neq \text{const}$.

В. М. Шестаков [57, 58] приводит уравнение радиального рассеяния к одномерному пути осреднения значения скорости и параметра рассеяния. При таком упрощении в приведенных выше обозначениях решение принимает вид

$$C = 0,5C_0 \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\left| r^2 - \frac{qt}{\pi m n} \right|}{2 \sqrt{\frac{D}{n} t}} \right) \right]. \quad (11)$$

Д. Хоупс и Д. Харлеман [67] для таких же условий, принимая $D_m = 0$, получили решение, которое в приведенных выше обозначениях можно представить:

$$C = 0,5C_0 \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\left| 1 - \frac{qt}{\pi m r^2} \right|}{4 \sqrt{\frac{2\pi D m}{3q}}} \right) \right]. \quad (12)$$

Решения для радиального рассеяния, как правило, проверялись экспериментально в лабораторных условиях авторами. Кроме того, А. Е. Орадовской [37] выполнена экспериментальная проверка всех трех приведенных выше решений, которая для песчаной модели $r = 87,3$ см и $m = 7,5$ см дала близкие результаты. Параметр D получился равным $5,8 \cdot 10^{-3} - 7,5 \cdot 10^{-3}$ см²/с, при минимальных скоростях фильтрации

$1,8 \cdot 10^{-3} - 2,75 \cdot 10^{-3}$ см/с (на внешнем контуре модели), что для пористости $n=0,2$ отвечает истинным скоростям $0,9 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/с.

Длина зоны дисперсии фронта концентрации вещества при радиальном рассеянии, по Ф. М. Бочевверу и А. Е. Орадовской [4], так же как и в одномерных задачах может быть выражена зависимостью (4), в которой для $\frac{C}{C_0} = 0,99 - 0,01$ коэффициент $B=4,7$.

Проведенные Ф. М. Бочеввером и А. Е. Орадовской расчеты величины L_p по сравнению с величиной радиуса распространения исходной концентрации раствора при характерных для природных условий значениях расчетных параметров показали, что при росте абсолютной величины L_p во времени отношение ее к радиусу распространения остается практически постоянным и составляет приблизительно 15% его величины. Как и для одномерной схемы, Ф. М. Бочеввером и А. Е. Орадовской [4] получено для радиального рассеяния выражение длины зоны деформации границы вытесняющей и вытесняемой жидкостей, обусловленной различиями в их плотностях.

К этому необходимо добавить, что если для одномерного рассеяния нет оснований сомневаться в справедливости полученных математических моделей для природных условий, то для радиального рассеяния такие основания есть. Полученные теоретически и удовлетворительно отвечающие результатам лабораторных экспериментов модели радиального рассеяния могут не подтвердиться в натуральных условиях при больших (десятки и сотни метров) значениях расстояния r , на которых величина скорости, в соответствии с зависимостью (8) уменьшится по сравнению с прискважинной зоной на несколько порядков. Это должно обусловить существенное уменьшение параметра D , возможно, до заметных изменений концентрации фактической от расчетной.

В заключение необходимо отметить, что, как и в одномерных условиях, здесь теоретически не может быть достигнуто стационарного состояния концентрации. В любой точке пространства, находящейся на конечном расстоянии от источника поступления вещества, концентрация его в определенный интервал времени будет возрастать от нулевой до исходной (поступающей из источника). Это обстоятельство отражено во всех математических моделях процесса, в которых концентрация рассматривается как функция расстояния и времени.

Двухмерное рассеяние

Схема процесса. В рассмотренных выше одномерной и радиальной схемах миграция и рассеяние вещества могли осуществляться только в направлениях, совпадающих с векто-

ром скорости фильтрации. Это предопределялось условиями поступления вещества в фильтрационный поток, исключаящими возможность миграции и рассеяния в направлениях, не совпадающих с вектором скорости. При иных условиях поступления, частным случаем которых является точечный источник (см. рис. 2, а), вещество неизбежно мигрирует и рассеивается не только в направлении фильтрации, но и нормально к нему. При этом в суммарное действие процессов, обуславливающих рассеяние, вступает эффект разветвления и слияния отдельных элементарных струек потока, который на определенных участках может обеспечить создание стационарного поля концентраций. Конкретные схемы двухмерного рассеяния рассматриваются нами ниже совместно с соответствующими математическими моделями. Общим для всех моделей является одномерный характер фильтрации ($v_x = v; v_y = v_z = 0$) и двухмерный характер миграции и дисперсии вещества ($D_x \neq D_y; D_z = 0$)*. В литературе параметры рассеяния по разным направлениям обычно определяют как коэффициент продольной (D_L — в направлении фильтрации) и поперечной (D_T) дисперсии.

Математические модели. Впервые исследование двухмерной дисперсии было проведено В. А. Баумом [3], который изучал перемешивание двух потоков, входящих параллельно друг другу в трубу, заполненную пористым материалом в процессе фильтрации (рис. 5). Один из потоков содержит вещество в концентрации C_0 , второй не содержит вещества. Начальные сечения, расходы и скорости потоков одинаковы, так что при достаточной длине трубы происходит их полное перемешивание за счет разветвления и слияния струй и диффузии, а на выходном сечении концентрация вещества в конечном счете достигает $0,5 C_0$ и далее остается постоянной во времени. Строго говоря, в данной схеме необходимо было бы различать три зоны, показанных на рис. 5: зону перемешивания ($C_0 > C > 0$), зону распространения концентрации полного смешения ($C = 0,5 C_0$), зону рассеяния фронта концентрации смешения ($0,5 C_0 \geq C \geq 0$). Таким образом, ниже первой зоны двухмерное рассеяние по существу трансформируется в одномерное.

В первой зоне после необходимого для ее формирования времени, устанавливается стационарное поле концентраций, для образования которого достаточно наличие одного только эффекта разветвления и слияния элементарных струй (аналогично схеме, изображенной на рис. 2, а). Во второй зоне, размеры которой непрерывно увеличиваются во времени, происходит распространение вещества в концентрации смешения. Третья зона является зоной рассеяния фронта концентрации

* В литературе применяют разное обозначение координатных осей относительно направления фильтрации, поэтому в каждом конкретном решении необходимо ориентироваться на соответствующие схемы и обозначения к ним.

смешения. В. А. Баум изучал только стационарное поле концентраций в первой зоне. Поэтому в исходном дифференциальном уравнении он вполне обоснованно принял $\frac{dC}{dt} = 0$. Кроме того, получение решения было упрощено В. А. Баумом путем принятия в исходном уравнении условия $D_L = D_T = D$. Влияние этого на точность решения будет рассмотрено ниже.

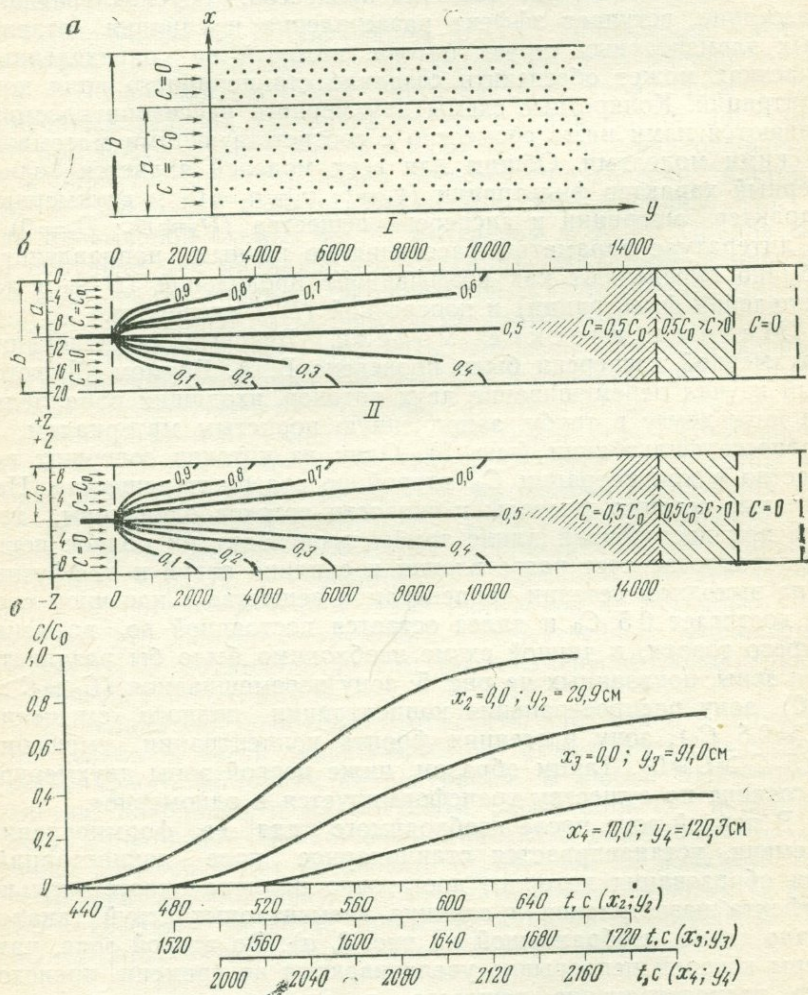


Рис. 5. Результаты решения уравнений двумерной дисперсии.

a — схема граничных условий к решению по Д. Бруху и Р. Стриту; b — результаты решения уравнений: I — по Д. Бруху и Р. Стриту ($C_0=1$; $b=20$ см; $a=10$ см; $D_1=10^{-5}$ см²/с; $D_2=10^{-4}$ см²/с; $v=10^{-3}$ см/с; $t=10$ с); II — по В. А. Бауму ($C_0=1$; $z=10$ см; $D=1,2 \cdot 10^{-5}$ см²/с; $v=10^{-3}$ см/с); кривые на графике — изолинии относительной концентрации; v — изменение относительных концентраций вещества во времени в разных точках фильтрационного поля в соответствии с решением Д. Бруха и Р. Стрита

Решение В. А. Баума имеет вид:

$$C = 0,5C_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_p}}{2n-1} \times \exp \left\{ -\frac{x}{2z_0} \left[\sqrt{\left(\frac{z_0}{a}\right)^2 + \pi^2(2n-1)^2} - \frac{z}{a} \right] \right\}, \quad (13)$$

где $a = \frac{D}{v}$.

Остальные обозначения объяснены выше.

В. А. Баум проверял свое решение экспериментально на разных материалах и установил хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

С. П. Албул [1, 2] рассмотрел задачу о распределении концентрации рудного элемента в стационарном двухмерном поле рассеяния, возникающем в одномерном фильтрационном потоке мощностью h ниже по течению от залегающей в его основании рудной залежи (рис. 6, а). В начальном сечении (совпадающем с окончанием рудной залежи) концентрация по вертикали изменяется по прямолинейному закону — в основании потока достигает величины C_0 и на расстоянии h_1 по вертикали от основания убывает до нуля. Рассмотрен случай, когда эпюра изменения концентрации в начальном сечении описана ломаной линией. В случае прямолинейной эпюры решение имеет вид:

$$C = C_0 \left[\frac{h_1}{2h} + \frac{2h}{\pi h_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi}{h} y \left(1 - \cos \frac{n\pi h_1}{h} \right)}{n^2} \right] \times \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 D}{h^2 v} \cdot x \right). \quad (14)$$

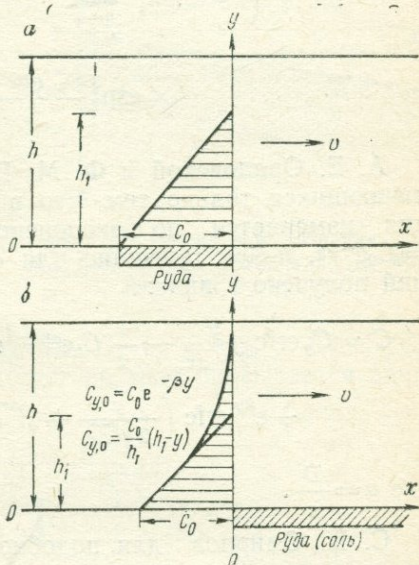


Рис. 6. Схемы двухмерного рассеяния вещества при растворении залежей в основании одномерного фильтрационного потока:

а — к решению С. П. Албула; б — к решению А. Н. Патрашева и Н. Х. Арутюняна
 $C_{y,0} = \frac{C_0}{h} (h_1 - y)$, А. Е. Орадовской и
 Ф. М. Бочера $C_{y,0} = C_0 l^{-\beta y}$

А. Н. Патрашевым и Н. Х. Арутюняном [40] решена задача о растворении пласта солей, залегающего в основании одномерного фильтрационного потока (рис. 6, б). Как и в предыдущей работе, рассматривался только участок перемешивания ($\frac{dC}{dt} = 0$), а параметры рассеяния по направлению фильтрации и поперек него приравнены ($D_L = D_T = D$). В обозначениях С. П. Албула решение имеет вид:

$$C = C_0 \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2 h_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi y}{2h} \sin \frac{(2n+1)\pi h_1}{2h}}{(2n+1)^2} \times \right. \\ \left. \times \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D x}{4h^2 v} \right] \right\}. \quad (15)$$

А. Е. Орадовской и Ф. М. Бочевеком [38] для условий, отличающихся только тем, что в начальном сечении концентрация изменяется по экспоненциальному закону, т. е. $C_{y,0} = C_0 e^{-\beta y}$, $h \rightarrow \infty$, решение для стационарного поля концентраций получено в виде:

$$C = C_0 \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{ax}} - \frac{1}{2} C_0 e^{a\beta^2 x} \left\{ e^{-\beta y} \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{ax}} - \sqrt{a\beta^2 x} \right) + \right. \\ \left. + e^{\beta y} \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{ax}} + \sqrt{a\beta^2 x} \right) \right\} + C_0 e^{-\beta(y-a\beta x)}, \quad (16)$$

где $a = \frac{D}{v}$.

С. И. Смирнов для подобной же схемы, но с граничными условиями $\frac{dC}{dy} = 0$ при $y=0$ и $x < 0$; $C = C_0$ при $y=0$ и $x \geq 0$, приводит решение Р. Б. Бирда и др., которое имеет еще более простой вид:

$$C = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{D}{v}x}} \right). \quad (17)$$

Это уравнение по сравнению с уравнениями (14), (15) и (16), на наш взгляд, правильнее отражает картину распределения концентраций (во всяком случае в области $x \rightarrow 0$). Согласно этому решению, изолинии концентраций выходят из одной точки ($x=0, y=0$), в то время как по решениям (14), (15) и (16) на оси y (при $x=0$) уже отмечаются определенные значения концентраций. Физически этого не может быть, так как при $v > 0$ любая частица вещества из точки $x=0$ и $y=0$ имеет

положительную составляющую траектории по оси x и может оказаться в точке $y > 0$ только при $x > 0$, но не при $x = 0$. Известная неточность всех приведенных решений, в том числе и (17), заключается еще в том, что концентрация не может достигать значения C_0 непосредственно в точке $x = 0$; для достижения этой концентрации необходимо, чтобы фильтрующая жидкость прошла по оси x какой-то определенный путь.

Д. Харлеман и Р. Румер [66] изучали двухмерное рассеяние в схеме, близкой к схеме В. А. Баума. Отличие заключалось в том, что этими авторами приняты весьма большие (теоретически полубесконечные) размеры смешивающихся потоков с концентрациями вещества, равными 0 и C_0 по оси y (рис. 7). В такой постановке в потоке по прошествии определенного времени формируются три зоны со стационарным распределением концентраций вещества: $C = 0$; $C = C_0$ и $0 < C < C_0$. Распределение концентраций в третьей зоне описывается зависимостью:

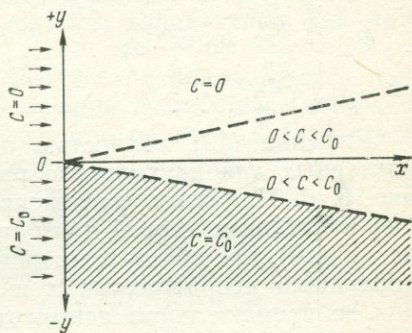


Рис. 7. Дисперсия при смешении двух полубесконечных потоков по Д. Харлеману и Р. Румеру

$$C = 0,5C_0 \operatorname{erfc} \frac{y}{2 \sqrt{\frac{D_T x}{v}}} . \quad (18)$$

Более общий случай двухмерного рассеяния вещества рассмотрен Д. Брухом и Р. Стритом [64]. В отличие от перечисленных выше авторов, эти исследователи учли различие параметров рассеяния по разным направлениям ($D_L \neq D_T$) и в целом нестационарный характер процесса ($\frac{dC}{dt} \neq 0$). Схема, для которой Д. Брухом и Р. Стритом получено решение, изображена на рис. 5, а, а само решение* имеет вид:

$$C = \frac{aC_0}{2b} \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{|y - vt|}{2 \sqrt{D_L t}} \right) \right] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[F_n \cos \frac{\pi n}{b} x \right] \times \\ \times \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{v}{D_L} - I_n \right) y \right] \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{|y - I_n D_L t|}{2 \sqrt{D_L t}} \right) \right] +$$

* С частичным изменением обозначений и пренебрежением вторым членом, аналогично уравнениям (2) и (3).

$$+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[F_n \cos \frac{\pi n}{b} x \right] \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{v}{D_L} + I_n \right) y \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{y + I_n D_L t}{2 \sqrt{D_L t}} \right], \quad (19)$$

$$\text{где } I_n = \left[\left(\frac{v}{D_L} \right)^2 + \frac{4n^2 \pi^2}{b^2} \frac{D_T}{D_L} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$F_n = \frac{2C_0}{\pi n} \sin \frac{\pi n}{b} a;$$

$$n = 1, 2, \dots$$

Решение (19) полностью отражает наличие всех трех характерных для двухмерного рассеяния зон, изображаемых на рис. 5, б. При этом достижение постоянства поля концентраций в пределах первой зоны перемешивания отражено в уравнении (19) тем обстоятельством, что для любой точки с фиксированными координатами x и y кривая изменения концентрации во времени носит асимптотический характер, приближаясь в конце концов к постоянной, предельной для данной точки, величине (см. рис. 5 в). Д. Брух и Р. Стрит проверяли свое решение экспериментально на физической модели и путем численного решения дифференциального уравнения двухмерного рассеяния. Результаты сравнения свидетельствуют о вполне удовлетворительном описании двухмерного рассеяния в изученной схеме решением (19).

Ошибочные математические модели двухмерного рассеяния. Приведенные выше схемы и математические модели двухмерного рассеяния с той или иной степенью приближения в целом правильно отражают сложный комплекс физических процессов, определяющих рассеяние вещества при его миграции, и могут быть использованы для описания распределения концентрации вещества после достижения стационарного состояния на участке перемешивания (см. рис. 5, б, зона 1), а модель Д. Бруха и Р. Стрита — во всей области фильтрации и на любой момент времени. Однако имеется еще несколько моделей, которые нельзя признать правильными.

С. П. Албул [2] стремится упростить свое решение (14) и решение А. Н. Патрашева и Н. Х. Арутюняна [40] и сделать их более удобными для практического применения. Он произвольно принимает в них $h_1 = h$, а число членов ряда ограничивает в первом решении 1, а во втором — 0. Таким путем он получает и рекомендует для практического применения вместо выражения (14)

$$C = C_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{4}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D}{h^2 v} x} \cos \frac{\pi y}{h} \right], \quad (20)$$

а вместо — (13)

$$C = C_0 \left[1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 D}{4h^2 v} x} \sin \frac{\pi y}{2h} \right]. \quad (21)$$

Формально эти выражения с учетом принятых упрощений являются правильными. Однако эти же упрощения чрезвычайно сузили возможности применения решений (20) и (21), еще более отдалив их от исходных условий, характерных для природной обстановки.

Так, например, по формуле (20) в середине мощности подземного потока ($y=0,5 h$) концентрация вещества во всех точках (при любом значении x) получается равной $0,5 C_0$. Естественно, такая схема не представляет практического интереса при изучении ореолов рассеяния вещества от рудных тел, а именно на этом решении С. П. Албул базирует основные методы интерпретации гидрогеохимических аномалий.

Еще несколько ошибочных моделей получены С. П. Албулом для двухмерного рассеяния при учете сорбции вещества. Вводя коэффициент поглощения вещества породами в исходное дифференциальное уравнение и принимая одновременно с этим условие $\frac{dC}{dt} = 0$, С. П. Албул, таким образом, как и в одномерной схеме, принимает неизменную во времени скорость поглощения и беспредельную поглотительную емкость пород. Очевидно, что это противоречит физическому смыслу рассматриваемых процессов. В двухмерной схеме может быть на определенном участке достигнуто стационарное состояние поля концентраций вещества, но сорбция способна только отдалить во времени достижение этого состояния. Если же оно, несмотря на участие сорбции, уже достигнуто, дальнейший учет сорбции является неправомерным, так как стационарное состояние может иметь место только при установлении равновесных концентраций вещества в породах и подземных водах. Иными словами: или мы учитываем сорбцию и тогда не имеем права принимать $\frac{dC}{dt} = 0$, или мы принимаем $\frac{dC}{dt} = 0$ и тогда не имеем права учитывать сорбцию. Ни одно из этих условий С. П. Албулом при получении решений, учитывающих сорбцию, не выполнено. Поэтому эти решения, так же как и стационарные решения для одномерной схемы, являются математическими фикциями и не могут быть рекомендованы для практического применения.

Трехмерное рассеяние

Рассеяние вещества во всех трех направлениях будет иметь место в одномерном фильтрационном потоке, когда поперечные размеры источника вещества меньше размеров поперечного

сечения потока. Характерным частным случаем является рассеяние от точечного источника.

В этом случае, как и при двухмерном рассеянии, непосредственно ниже источника формируется стационарное поле концентраций (участок перемешивания), и лишь ниже того сечения, в котором достигнуто полное осреднение концентраций, процесс рассеяния переходит в одномерный (далее происходит только нестационарное рассеяние фронта осредненной концентрации).

Для стационарного участка перемешивания от точечного источника решение уравнения (1) дано Н. Н. Веригиным (1969):

$$C = \frac{qC_0}{4\pi D_L} \frac{\rho^{3/4}}{r} e^{-0.5 \frac{v}{D_L} (r-x)}, \quad (22)$$

где qC_0 — солевой расход точечного источника;

$$\rho = \frac{D_L}{D_t}; \quad r = \sqrt{(z^2 + y^2) \rho + x^2};$$

$$D_L = D_x; \quad D_T = D_y = D_z; \quad v = v_x; \quad v_y = v_z = 0.$$

При условии $y=z=0$ (т. е. по оси формирующегося от точечного источника ореола рассеяния) $r=x$ и решение (20) примет вид

$$C = \frac{qC_0}{4\pi D_L} \frac{\rho^{3/4}}{x}, \quad (23)$$

или, учитывая, что $\frac{qC_0 \rho^{3/4}}{4\pi D_L} = \text{const} = A$,

$$C = \frac{A}{x}. \quad (24)$$

Таким образом, в данных условиях уравнение изменения концентрации по оси ореола является уравнением гиперболы.

Экспериментальная проверка решений (23) и (24) является весьма актуальной для установления возможности их применения в практике гидрогеохимических и санитарно-гидрогеологических исследований. Какие-либо другие математические модели трехмерного рассеяния нам неизвестны.

**Роль отдельных физических процессов
и факторов в миграции
и рассеянии вещества в подземных водах**

Роль отдельных процессов и факторов удобно устанавливать на базе числовых значений параметров, входящих в соответствующие детерминированные модели, получаемые опытным путем для разных условий проведения эксперимента.

Большой материал по этому вопросу имеется в опубликованной литературе. Некоторые специальные исследования выполнены нами.

Сравнительная роль конвекции и диффузии в миграции и рассеянии вещества (одномерное рассеяние). Относительную роль молекулярной диффузии и конвективных процессов в миграции и рассеянии вещества многими исследователями предлагается оценивать по величине безразмерного критерия Пекле [27, 49, 4, 21]

$$Pe = \frac{vL}{D_0}, \quad (25)$$

где v — скорость фильтрации;

D_0 — коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде;

L — характерный линейный размер пористой среды, на котором происходит основное изменение концентрации вещества C (от $C \sim C$ до $C \sim 0$).

Указывается, что при $Pe \ll 1$ (или $< 0,1$) преобладающее значение имеет молекулярная диффузия, а при $Pe \gg 1$ (или > 10) доминируют конвективные процессы. При этом не различается роль рассматриваемых процессов в переносе и в рассеянии вещества отдельно. Считается, что если данный процесс доминирует в переносе (миграции), то он, безусловно, должен определять и рассеяние. Кроме того, утверждается, что в зависимости от целей анализа, характерный линейный размер L может приниматься произвольно. Эти обстоятельства, да и сама ориентировка только на критерий Пекле нуждаются в уточнениях и оговорках.

1. Критерий Пекле установлен для стационарных условий ($\frac{dC}{dt} = 0$) и с этой точки зрения к наиболее часто рассматриваемой схеме одномерного рассеяния, строго говоря, вообще неприменим.

2. Даже для стационарных условий критерий Пекле выражает отношение конвективного ($I_{\text{конв.}} = vC$) и диффузионного потока ($I_{\text{диф}} = \frac{D_0 \Delta C}{L}$) вещества только в том случае, когда характерный линейный размер L близко соответствует тому расстоянию, на котором перепад концентрации вещества ΔC равен средней концентрации, переносимой конвекцией (C). Лишь в этом случае отношение величин $I_{\text{конв.}} : I_{\text{диф}}$ дает критерий Пекле $\frac{vL}{D_0}$. При произвольном же назначении линейного размера L величины C и ΔC не сокращаются, и отношение потоков не дает критерия Пекле, а принимает вид $I_{\text{конв.}} : I_{\text{диф}} = \frac{vCL}{D_0 \Delta C}$.

3. Даже при соблюдении всех необходимых условий $\left(\frac{d\bar{C}}{dt} = 0\right)$, линейный размер соответствует изменению концентрации от C до 0) критерий Пекле определяет соотношение конвективного и диффузионного потока вещества, т. е. роль конвекции и диффузии в переносе вещества, но не может однозначно свидетельствовать о таком же соотношении роли этих процессов в эффекте рассеяния. Однозначно свидетельствовать о степени влияния конвективных процессов и диффузии на рассеяние вещества может только сравнение величин параметра D , отвечающего рассматриваемым условиям, с величиной коэффициента молекулярной диффузии.

Поясним это на таком примере. Действительная скорость $\frac{v}{n} = 2 \cdot 10^{-3}$ см/с, определенный в опыте параметр $D = 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с (см. рис. 4). Скорость фильтрации v при $n=0,4$ получается примерно равной $v \approx 10^{-3}$ см/с. При величине характерного линейного размера $L \geq 0,1$ см, критерий Пекле $Pe \geq 10$, т. е. в миграции вещества основную роль играют конвективные процессы. Однако значение параметра $D = 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с, всего вдвое превышающее величину коэффициента молекулярной диффузии, свидетельствует о примерно равном участии конвективных и диффузионных процессов в эффекте рассеяния.

Таким образом, соотношение «вклада» конвекции и диффузии в перенос и в рассеяние вещества может быть не тождественным и должно, строго говоря, рассматриваться отдельно: в первом случае на основе анализа отношения $\frac{vCL}{D_0\Delta C}$ (которое при L , отвечающем $C = \Delta C$, дает критерий Пекле), во втором — на основе анализа отношения $\frac{D}{D_0}$. Этот анализ удобно выполнить по данным обобщения С. И. Смирнова (см. рис. 4). Диффузионная составляющая в рассеянии вещества имеет заметное влияние тогда, когда величина коэффициента молекулярной диффузии составляет значительную часть параметра D . Это имеет место только при действительных скоростях, не превышающих 10^{-3} см/с (см. рис. 4). Уже при скоростях $(1,5-2,0) \cdot 10^{-3}$ см/с параметр D в 2—6 раз превышает величину D_0 . Десятикратное превышение отмечается при скорости 5×10^{-3} см/с. Таким образом, можно утверждать, что при одномерном рассеянии, происходящем при фильтрации в пористой среде, начиная с истинных скоростей $5 \cdot 10^{-3}$ см/с и выше, эффект рассеяния фронта концентраций вещества практически полностью обусловлен влиянием конвективных процессов. При меньших скоростях заметную (а при $\frac{v}{n} < 5 \cdot 10^{-4}$ см/с опреде-

ляющую) роль играет процесс молекулярной диффузии. Уместно напомнить, что в рассматриваемой схеме разветвление и слияние струй не дает эффекта рассеяния, так как в каждом сечении разветвляются и сливаются струйки с одинаковыми концентрациями вещества. Участие конвективных процессов в рассеянии здесь представлено только первой разновидностью, обусловленной различиями в скоростях течения элементарных струй.

Влияние сорбции на миграцию и рассеяние вещества. При наличии сорбции вещества породами или при выпадении его в осадок эти процессы отражаются на величинах параметров D и n . Решения для одномерного рассеяния вещества с учетом сорбции и исследование структуры параметра D в этих условиях даны в работах В. В. Рачинского [42], Ф. М. Бочевера и А. Е. Орадовской [4] и В. М. Шестакова [56]. В. М. Шестаковым исследовано влияние сорбции на получаемую в опыте величину пористости n , которую он предложил называть «эффективной». Наличие быстро протекающей сорбции приводит, по Ф. М. Бочевеу и А. Е. Орадовской, к следующей структуре параметра рассеяния:

$$D^* = \frac{D\beta}{1 + \beta}, \quad (26)$$

где D^* — параметр рассеяния пористой среды при наличии сорбции;

D — то же для той же среды для несорбирующихся компонентов раствора;

β — коэффициент распределения сорбирующегося компонента между раствором и твердой фазой в равновесных условиях.

Для хорошо сорбирующихся компонентов $\beta=0$, $n=0,00n$, а для слабо сорбирующихся $\beta=n-n \cdot 10$; в первом случае будет наблюдаться существенное уменьшение параметра D по сравнению с условиями отсутствия сорбции, во втором — существенных отличий не должно отмечаться. Таким образом, наличие сорбции уменьшает рассеяние фронта концентраций вещества и одновременно замедляет скорость его продвижения. Последнее приводит к увеличению значения «эффективной» пористости по сравнению с истинной, поскольку выражение эффективной пористости ($n_э$) через активную имеет вид

$$n_э = n + \frac{1}{\beta}. \quad (27)$$

Приведенные данные позволяют устанавливать и ориентировочно оценивать количественную роль сорбции в миграции и рассеянии вещества. Экспериментально определенные коэффициенты рассеяния и пористости сравниваются: первый — с ко-

эффицентом D , отвечающим по зависимости (2) (см. рис. 4) реализованной в опыте скорости, второй — со значением активной пористости, полученной для данной среды по несорбирующемуся индикатору, или с табличным значением. При заметном участии сорбции экспериментальное значение D должно быть ощутимо ниже величины, определенной для данной скорости по графику на рис. 4, а экспериментальное значение n — намного больше активной пористости.

Макродисперсия. Приведенное выше рассмотрение одномерного рассеяния предполагало отсутствие макронеоднородности пористой среды. При наличии такой неоднородности, наиболее характерным случаем которой для природных условий является горизонтальная слоистость пласта, обусловленная чередованием прослоев разной проницаемости, рассеяние фронта вещества должно происходить более интенсивно, чем в однородной среде. Исследование этого процесса, начатое В. М. Шестаковым еще в 1961 г. и продолжающееся до последних лет [44], показало, что закономерности рассеяния в таких условиях принципиально остаются теми же, что и для однородной пористой среды, однако заметно возрастает величина параметра D . Это увеличение отражает влияние еще одного дополнительного физического процесса — диффузионного «ухода» вещества из проницаемых прослоев в глинистые. Следует указать, что о результатах экспериментального изучения макродисперсии в известной нам литературе не упоминается.

Физические процессы, определяющие величину параметра D и рассеяние фронта концентрации вещества в радиальной схеме. Так же, как и для одномерного рассеяния, в радиальной схеме действует только одна разновидность влияния конвекции — неравенство горизонтальных скоростей течения элементарных струек. Разветвление и слияние струй здесь не дает эффекта рассеяния вследствие равенства концентраций вещества в равноудаленных от источника сечениях потока. Судя по полученным в экспериментах значениям параметра D , влияние неравенства скоростей на рассеяние так же, как и для одномерной схемы, намного превышает влияние молекулярной диффузии уже при сравнительно низких скоростях. Как и в одномерной схеме, существенный эффект может оказывать сорбция, наличие которой должно обусловить снижение скорости распространения вещества и сокращение длины зоны рассеяния.

Влияние макронеоднородности фильтрационного потока в радиальной схеме должно обусловить, как и в одномерной, существенное усиление рассеяния фронта концентрации вещества. В математических моделях [44] это соответствует значительному возрастанию величины параметра D за счет диффузионного перемещения вещества из проницаемых слоев в глинистые прослои, разделяющие их. Так, по расчетам В. М. Шестакова, при

характерных для натуральных условий значениях скоростей и мощностей песчаных и глинистых слоев, параметр D слоистого водоносного пласта может превышать значение его для собственно песчаных прослоев на шесть порядков.

При этом следует указать, что, как и для одномерных условий, упоминаний о серьезном экспериментальном изучении макродисперсии в радиальной схеме в литературе нет.

Структура параметров D_L и D_T и физические процессы, определяющие их величину и эффект рассеяния в двухмерной схеме. Входящий в уравнение двухмерного рассеяния параметр дисперсии в направлении фильтрации D_L многими исследователями по существу отождествляется с параметром D в схеме одномерного рассеяния. Правомерность такой интерпретации формально как будто подтверждается установленной Д. Брухом и Р. Стритом (1970) структурой параметра, полученной для двухмерной схемы. После некоторых преобразований она может быть приведена к виду

$$D_L = \gamma \left(\frac{v}{n} \right)^{1,205}, \quad (28)$$

где

$$\gamma = \frac{1,8d_{50}^{1,205} \cdot n^{1,205}}{v^{0,205}};$$

d_{50} — средний диаметр зерен, см;

v — кинематический коэффициент вязкости (для воды может быть принят $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$).

Контрольные расчеты показывают, что величина коэффициента γ для среды с $d_{50} = 2$ мм и пористостью 40% равна 0,22. Последнее обуславливает близость выражений (7) и (28).

Структура параметра D_T , по Д. Бруху и Р. Стриту, аналогична структуре по выражению (28), но обуславливает примерно на порядок меньшую его величину, по сравнению с D_L .

Вопрос об определяющем физическом процессе в схеме двухмерного рассеяния первоначально можно рассмотреть на основании результатов исследований В. А. Баума. Дело в том, что при получении своего решения он опустил в исходном дифференциальном уравнении член $D \frac{d^2C}{dx^2}$, тем самым пренебрегая рассеянием, обусловленным непосредственно продольными процессами, идущими в направлении вектора скорости. Удовлетворительное совпадение полученного при таком упрощении решения с экспериментальными данными, установленное В. А. Баумом, может быть интерпретировано таким образом, что в двухмерной схеме при реализованном в опытах диапазоне скоростей основная роль в рассеянии принадлежит процес-

сам, идущим в нормальном к вектору скорости направлений т. е. разветвлению и слиянию элементарных струй фильтрационного потока.

Кроме приведенных выводов из опытов В. А. Баума, этот вопрос специально изучался нами путем сопоставления для одних и тех же параметров и граничных условий результатов тестовых расчетов по решениям В. А. Баума [13], Д. Бруха и Р. Стрита [19]. Расчеты выполнялись Л. В. Петруковичем по составленной им программе на ЭВМ МИР-1.

Сначала для граничных условий схемы В. А. Баума рассчитывалось по решению Д. Бруха и Р. Стрита поле концентраций вещества по решению (19) при $\frac{D_L}{D_T} = 10$. При этом учи-

тывалось влияние всех процессов и факторов — разветвления и слияния струй и неравенства скоростей в направлении фильтрации. Затем по решению (13) подбиралось такое значение D , при котором поле концентраций совпадало с рассчитанным по (19). Решение В. А. Баума фактически отражает влияние одного процесса — разветвления и слияния элементарных струек. Оказалось, что одно и то же поле концентраций получается при величине коэффициента D в решении В. А. Баума, близком величине D_T в решении Д. Бруха и Р. Стрита. Получены одинаковые поля концентраций для решений по В. А. Бауму при $D = 1,2 \cdot 10^{-5}$ см²/с, по Д. Бруху и Р. Стриту при $D_T = 1,0 \cdot 10^{-5}$ см²/с, $D_L = 10^{-4}$ см²/с (см. рис. 5а). Это свидетельствует о доминирующем влиянии разветвления и слияния элементарных струй на поле концентраций при двухмерном рассеянии по сравнению с влиянием неравенства продольных скоростей. Десятикратное превышение D_L над D_T практически не влияет на поле концентраций. Таким образом, продольное рассеяние, наблюдаемое в двухмерной схеме, является следствием поперечного, а собственный вклад продольных процессов, обусловленный неравенством скоростей, пренебрежимо мал. Этот вывод при обычном соотношении $\frac{D_L}{D_T}$ внешне носит парадоксальный характер, но правильность его на сегодня не может вызвать сомнений.

Анализ роли отдельных процессов при трехмерном рассеянии выполняется по данным о величинах соответствующих параметров аналогично тому, как это показано для двухмерной схемы. В трехмерной схеме в связи с появлением еще одной степени свободы для миграции и рассеяния вещества еще более возрастает роль разветвления и слияния элементарных струек. Приведенные выше характеристики физических процессов и математических моделей рассеяния относились к случаю длительного (теоретически бесконечного) действия источника в фильтрационном потоке.

При ограниченном во времени периоде действия источника область распространения вещества имеет не только переднюю (в одномерной и радиальной схемах) и боковые (в двух- и трехмерной схемах) размытые границы, но и заднюю границу, которая также размывается по мере движения. Этот случай имеет соответствующие математические модели для одномерной [4, 59] и трехмерной [19] схем. Решение А. А. Абдуллаева для трехмерной схемы (мгновенный точечный источник) имеет вид

$$C_{x,y,z,t} = \frac{C_0 e^{-\frac{[y^2 + z^2 - (x - vt)^2]}{4Dt}}}{[2 \sqrt{\pi Dt}]^3}. \quad (29)$$

В приведенном решении не учитываются различия параметра рассеяния D в разных направлениях. В то же время необходимо отметить, что схема кратковременного действия источника вещества представляет практический интерес только при некоторых видах так называемых индикаторных исследований движения подземных вод. К природным объектам и к большинству случаев влияния искусственных источников вещества эта схема неприменима.

Приведенный анализ физических процессов, обуславливающих рассеяние вещества при его миграции в подземных водах, а также анализ детерминированных математических моделей, описывающих миграцию и рассеяние, позволяет заключить следующее:

1) рассеяние фронта концентрации вещества в одномерной и радиальной схемах при величинах действительной скорости более $5 \cdot 10^{-3}$ см/с практически полностью формируется за счет конвективных процессов. Заметное участие диффузии в рассеянии имеет место только при меньших скоростях. В двухмерной и трехмерной схемах можно ожидать только еще более низкого «порога» скорости, ограничивающего заметное участие процесса диффузии в рассеянии;

2) в одномерной и радиальной схемах при $\frac{v}{n} > 5 \cdot 10^{-3}$ см/с рассеяние фронта концентрации вещества полностью обусловлено неравенством скоростей миграции вещества в отдельных элементарных струйках. В этих схемах невозможно достижение стационарного поля концентраций (за исключением случая $C = \text{const}$ во всем изучаемом объеме). Имеющиеся математические модели могут применяться в практике решения как прямых, так и обратных задач, однако для радиальной схемы пока не выяснена степень влияния уменьшения скорости с удалением от источника вещества на величину коэффициента рассеяния и, соответственно, на строение размытого фронта концентраций;

3) в двухмерной и трехмерной схемах рассеяние вещества практически полностью обусловлено разветвлением и слиянием элементарных струй в пористой среде. В этих схемах формируются стационарные во времени участки поля концентраций вещества. Возможности практических расчетов в таких схемах имеются пока для простейших граничных условий. В связи с тем, что многие модели в итоге представлены в виде рядов, решения обратных задач возможны только путем подбора, т. е. весьма ограничены;

4) основными задачами дальнейших исследований вопросов миграции и рассеяния вещества в подземных водах применительно к запросам практики являются: опытная проверка имеющихся решений для радиального рассеяния и экспериментальное изучение закономерностей трехмерного рассеяния.

Экспериментальные исследования авторов посвящены последнему вопросу.

2. Статистические модели

Параллельно с созданием охарактеризованных выше детерминированных моделей рассеяния интенсивно развивалось и другое направление — разработка статистических моделей. Построение целого ряда статистических моделей осуществляется на основе теории случайных блужданий [61]. В простейшем случае эта теория рассматривает движение частицы в виде серии шагов в одном генеральном направлении при случайных нарушениях ее траектории. Принимается, что смещение частицы в любом поперечном направлении равновероятно. Следовательно, смещение в одном направлении имеет вероятность $1/2$. Принимается, что этот принцип справедлив для описания процесса перемещения частицы вещества в конвективном потоке, проходящем через пористую среду. Эта задача решается в вероятностной постановке: искомой является вероятность обнаружения частицы в данной точке после определенного числа шагов в генеральном направлении. Вероятность любой последовательности из n шагов равна $(1/2)^n$.

Для попадания в точку m частице необходимо совершить $\frac{n+m}{2}$ шагов в одном и $\frac{n-m}{2}$ — в другом направлении. Общее число последовательных смещений выражается формулой биномиальных коэффициентов, а искомая вероятность попадания частицы в точку m после n шагов описывается уравнением биномиального распределения. Асимптотическим приближением биномиального распределения при числе шагов $n \geq 10$ является формула нормального распределения:

$$P_{(n,m)} = \frac{0,8}{\sqrt{n}} \exp\left(-\frac{m^2}{2n}\right). \quad (30)$$

Каждое перемещение частицы происходит через равные промежутки времени, за единицу времени частица испытывает n перемещений. Перемещение в поперечном направлении $x = m \cdot l$, где l — длина шага. При этих условиях может быть определена вероятность попадания частицы после n шагов в интервале $x, x + \Delta x$ в момент времени t :

$$P(x, t) \cdot \Delta x = \frac{1}{2(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \Delta x, \quad (31)$$

где

$$D = \frac{1}{2} n \cdot l^2.$$

Из уравнений (30) и (31) следует, что вероятность попадания частицы в точку n, m определяется исключительно координатами этой точки; вероятность реализуется по истечении определенного времени от начала движения частицы. Коэффициент D , зависящий от скорости перемещения частицы ($U = n \cdot l$), и длина шага могут рассматриваться как характеристики среды.

В теории случайных блужданий рассматривается также влияние отражающей и поглощающей границы на вероятность попадания частицы в точку m после n шагов. Если граница находится в точке $m = m_1$ и $m_1 > 0$, то искомая вероятность для большего n выражается формулой

$$P_{(m, n; m_1)} = \frac{0,8}{\sqrt{n}} \left\{ \exp\left(-\frac{m^2}{2n}\right) \pm \exp\left[-\frac{(2m_1 - m)^2}{2n}\right] \right\}. \quad (32)$$

Знак плюс в фигурных скобках относится к отражающей, а знак минус — к поглощающей границе. Следовательно, по сравнению с неограниченной моделью влияние отражающей границы при прочих равных условиях выражается в увеличении вероятности попадания частицы в точку n, m , а влияние поглощающей границы — в уменьшении такой вероятности. Влияние полностью поглощающей границы означает то, что частица, попадая в m , теряет способность к дальнейшим перемещениям.

Простейший случай из теории случайных блужданий описывает распределение вероятностей в плоскости, т. е. в двухмерной схеме. В пространственной задаче результат аналогичен — распределение в любом поперечном направлении нормально и описывается гауссианом. Аналогичным здесь является только характер распределения, количественно распределение вероятностей в пространстве иное. Убывание вероятностей с удалением от начала движения частицы происходит интенсивнее.

Такая модель случайных блужданий используется для описания рассеяния вещества при конвективном переносе. В ряде работ с помощью этой модели рассматривается конкретное фи-

зическое явление, называемое поперечной, или фильтрационной, диффузией [18, 39]. Поровое пространство рассматривается как плоскостная или пространственная система ячеек, соединенных каналами. Жидкость или газ, проходящий сквозь такую решетку, перетекает из ячеек предыдущего в ячейки последующего уровня, смещаясь в поперечном направлении на некоторое расстояние, определяемое структурой решетки. Основным фактором такого рассеяния является свойство фильтрующей среды случайным образом усложнять траектории частиц или элементарных струек вещества. По этой причине описанный вид рассеяния мы будем называть далее фильтрационной дисперсией.

Использование теории случайных блужданий для описания рассеяния вещества при конвективном переносе требует вероятностного выражения количества вещества. С этой целью рассматривается движение через фильтрующую среду не одной частицы, а облака меченых частиц. В схеме с одной частицей вероятность выражает число попаданий в ячейку n , m по отношению к общему числу испытаний, т. е. в данном случае — пропусков частицы. Например, вероятность 0,05 указывает на то, что при 100 запусках частицы, она может пройти через данную ячейку только 5 раз, при 1000 пусканий — 50 раз и т. д. Но если вместо 1000 пусканий одной частицы произвести запуск 1000 частиц одновременно, та же вероятность будет выражать отношение числа частиц, которые могут пройти через данную ячейку (50), к их исходному количеству — (1000). Следовательно, в случае с «облаком» частиц вероятность выражает относительное количество вещества. Это следует из определения вероятности как относительной частоты при достаточно большом числе испытаний. Из закона больших чисел следует, что с увеличением числа испытаний относительная частота стремится к константе, называемой вероятностью случайного события [60]. Если количество вещества выражается концентрацией, то вероятность в этом случае есть отношение концентрации в данной точке $C_{n,m}$ к исходной концентрации вещества C_0 . Следовательно, в формуле (30) допустима замена вероятности относительным количеством вещества $P_{(n,m)} = \frac{C_{(n,m)}}{C_0}$.

Основным параметром нормального распределения является дисперсия. В данном случае дисперсия — это мера поперечного рассеяния вещества. Как следует из формулы (30), $\sigma^2 = n$, т. е. степень рассеяния закономерно возрастает с удалением от точки поступления вещества. Следствием поперечного рассеяния является продольная закономерность уменьшения количества вещества. Осевая, или продольная, закономерность уменьшения относительных количеств вещества есть убывающий ряд модальных значений, обратно пропорциональных поперечным дисперсиям.

Как уже отмечалось, вероятность попадания частицы в данную точку статистической модели, или степень уменьшения исходного количества вещества, реализуется по истечении определенного времени от начала его поступления. Выражение этого времени и учет его при построении статистических моделей не представляет трудности, если перемещения частиц происходят одновременно через равные промежутки времени, как это принято в классической теории случайных блужданий [61].

Но задача усложняется при переходе к реальным фильтрационным средам, когда время между перемещениями частицы зависит от времени пребывания ее в межпоровых ячейках. Это время само является случайной величиной. Решение задачи становится существенной и достаточно сложной частью статистических моделей [39, 46]. Однако учет времени пребывания вещества в системе пор важен для временного прогнозирования распространения вещества. Применительно к природным ореолам рассеяния этот аспект статистических моделей не столь важен, так как время существования ореолов многократно превышает время их формирования. При стационарном поступлении вещества, что характерно для природных условий, пространственное распределение вещества стационарно и не зависит от микрораспределения времени [39].

Таким образом, с помощью теории случайных блужданий удастся более или менее полно описать фильтрационную дисперсию. Однако рассеяние вещества при конвективном переносе обусловлено не только фильтрационным эффектом, связанным со свойствами фильтрующей среды, но и с эффектом гидродинамическим, связанным с такими свойствами потока, как его скорость и неравномерность поля скоростей. Учет гидродинамического аспекта, достигаемый соответствующими способами статистического описания и введением эффективных коэффициентов, еще более усложняет статистические модели. Относительная роль этих факторов в рассеянии вещества в подземных водах определяется условиями поступления вещества в подземные воды или схемой миграции [17].

Особенность механизма рассеяния, обусловленного присутствием фильтрационного или гидродинамического эффекта, такова, что поддается статистическому описанию применительно к любой схеме миграции. Однако универсальных статистических моделей, которые с одинаковым успехом могли бы быть приложимы к любой схеме миграции, нам не удалось обнаружить в опубликованной литературе.

Обзор имеющихся работ показывает, что основное внимание при исследовании конвективной диффузии с помощью статистических моделей уделено схеме разового запуска вещества. В этом случае исследуется «плывающий» ореол, для которого характерна дисперсия, возрастающая во времени. Решение для

этой схемы приложимо, как отмечает П. Сафмэн [46], и для схемы вытеснения.

Примером статистических моделей, основанных на теории случайных блужданий, может служить модель Шейдеггера для трехмерной дисперсии в одномерном потоке [72]:

$$C_{(x,y,z,t)} = \frac{C_0}{[2\sqrt{\pi Dt}]^3} \exp \left\{ - \left[\frac{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2 + (z-\bar{z})^2}{4Dt} \right] \right\}. \quad (33)$$

Аналогичное решение имеется в работе [19]. Эта формула приложима к схеме разового запуска индикатора в поток-носитель. Здесь $\bar{x}=U(x)t$, $\bar{y}=U(y)t$, $\bar{z}=U(z)t$. $U(x)$, $U(y)$, $U(z)$ — составляющие постоянной средней скорости; \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} — положение центра «плывущего» ореола.

Если движение происходит в направлении оси x , то член в квадратных скобках можно записать: $[y^2+z^2+(x-Ut)^2]$. Формула (33) описывает гауссиан вращения с возрастающей во времени дисперсией и уменьшающейся модой. При $t \rightarrow \infty$ $C \rightarrow 0$.

Предпосылка об изотропности дисперсии и принятие в связи с этим коэффициента дисперсии в продольном и поперечном направлении постоянными нереально. Независимо от изотропности среды дисперсия в направлении движения потока и нормально к нему различна.

В работе [65] эта модель усовершенствована с учетом различия величины продольной и поперечной дисперсий. В результате получено, что пространственной эпюрой является более сложный гауссиан с эллиптическим основанием.

Дальнейшее совершенствование статистической модели, выполненной по схеме случайных блужданий, мы находим в работе [46]. В этой работе П. Сафмэном получены основные характеристики дисперсии облака меченых частиц в виде эффективных коэффициентов продольной по отношению к средней скорости потока и поперечной дисперсии. Оба коэффициента различным образом зависят от средней скорости потока, длины шага (длины поры), а коэффициент продольной дисперсии зависит также от коэффициента молекулярной диффузии. Таким образом, учет скорости потока в статистической модели, основанной на теории случайных блужданий, достигается введением эффективных коэффициентов и раскрытием их структуры. Распределение вероятностей в этой модели описывается нормальным законом.

Рассмотрение работ, посвященных статистическим моделям, свидетельствует о том, что основное внимание при исследовании конвективной дисперсии уделяется нестационарному аспекту этой проблемы, а также схемам миграции, при которых относительное количество вещества изменяется в пространстве и времени.

Применительно к природным объектам, существующим геологически длительное время, для которых характерна стационарная подача вещества с расходом, меньшим чем полный расход водоносного горизонта, простейшая схема случайных блужданий не получила развития.

Необходимо добавить, что отсутствие учета граничных условий (в первую очередь, размеров первоначального источника вещества) в решениях, полученных для статистических моделей, исключает возможность использования их для практических расчетов в отличие от детерминированных моделей. Однако простейшая статистическая модель более пригодна для анализа механизма рассеяния вследствие ветвления элементарных струек, т. е. эффекта, условно названного нами фильтрационной дисперсией.

3. Основные схемы миграции и рассеяния вещества в подземных водах

Универсального решения для математического описания процесса миграции в широком диапазоне граничных условий в настоящее время не существует. Закономерности рассеяния вещества могут рассматриваться лишь применительно к конкретным схемам рассеяния. При изучении и прогнозировании процессов миграции и рассеяния вещества в подземных водах применительно к природной обстановке необходимо различать две основные схемы, выделяемые по характеру начальных условий и механизму рассеяния.

Схема А — вещество поступает в фильтрационный поток по всему рассматриваемому сечению (точнее — во всем рассматриваемом расходе); включает одномерную и радиальную схемы. Рассеяние по схеме А характерно для искусственных источников поступления вещества в подземные воды (совершенные поглощающие скважины, хранилища промстоков при условии многократного превышения фильтрационных потерь из хранилища над расходом естественного подземного потока). В данной схеме область, примыкающая к источнику вещества и занимаемая его исходной концентрацией, непрерывно растет во времени, а основная задача сводится к отысканию положения и строения размытого фронта концентраций. Основной постоянно действующий фактор рассеяния фронта — неравенство скоростей движения отдельных элементарных струек, разветвление и слияние струй рассеивающего влияния не оказывает. Молекулярная диффузия вносит заметный вклад в рассеяние фронта при малых скоростях конвекции ($\frac{v}{n} < 5 \cdot 10^{-3}$ см/с).

Сорбция вещества породами может существенно снижать скорость продвижения фронта концентраций и оказывать заметное влияние на его протяженность.

Схема Б — вещество поступает в фильтрационный поток по части рассматриваемого сечения (точнее, в части рассматриваемого фильтрационного расхода); включает двухмерную и трехмерную схемы. Рассеяние по схеме Б характерно для природных источников поступления вещества в подземные воды (рудных тел), но может иметь место и при искусственном источнике (когда соблюдается условие $Q_{хр} \ll q_e V_{хр}$).

В данной схеме непосредственно в примыкающей к источнику вещества области формируется и в дальнейшем остается стабильным во времени участок перемешивания, где вследствие фильтрационной дисперсии (эффекта разветвления и слияния элементарных струек) концентрация вещества закономерно уменьшается как в направлении вектора скорости, так и нормально к нему до конечной концентрации смешения. После полного осреднения концентрации по всему рассматриваемому сечению потока схема Б переходит в схему А. В схеме Б основной задачей является определение размеров и строения участка перемешивания. Основным постоянно действующим фактором формирования этого участка является, как уже указывалось, фильтрационная дисперсия. Эффект неравенства скоростей несуществен.

Глава 3

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ДИСПЕРСИЯ ВЕЩЕСТВА

Эффект рассеяния вещества при миграции его в подземных водах обусловлен совместным влиянием целого ряда процессов и факторов и может завершаться при определенных условиях формированием стационарного во времени поля концентраций вещества с закономерным изменением концентраций в его пределах. В других случаях стационарное состояние достигается только тогда, когда во всей рассматриваемой области концентрация вещества оказывается одинаковой и равной по величине концентрации, поступающей из источника вещества. Основным интерес в аспекте данной работы представляет случай формирования стационарного поля концентраций. Из комплекса процессов и факторов, приводящих в конечном итоге к формированию стационарного поля концентраций, определяющее значение имеет фильтрационная дисперсия, результатом исследования которой посвящен данный раздел.

Фильтрационная дисперсия — явление рассеяния вещества при движении его в фильтрующей среде, когда вследствие пористого характера ее происходит ветвление, постепенное утончение и разобшение движущихся струек вещества при одновременном слиянии их с соседними струйками жидкости, не несущими вещества или несущими его в других концентрациях. Рассеивающий эффект этот процесс оказывает только в том случае, если источник вещества занимает лишь часть поперечного сечения фильтрационного потока, т. е. в двухмерной или трехмерной моделях (или в выделяемой нами схеме Б).

При исследовании этого явления нас будет интересовать механизм рассеяния и его количественное описание. К исследованию подобного явления в общей постановке приложимы решения из классической теории случайных блужданий, в основу которых положены стохастические модели [61]. Поровое пространство зернистого слоя рассматривается как совокупность ячеек, соединенных каналами. Жидкость, проходящая сквозь слой, перетекает в ячейки последующего уровня, смещаясь в поперечном направлении на некоторое расстояние, определяемое структурой упаковки слоя. Задача в вероятностной постановке, в стационарном режиме, когда в начальную ячейку постоянно подается индикатор, формулируется как определе-

ние вероятности обнаружения индикатора в ячейке n , m , где n — номер слоя, m — номер ячейки в слое. Распределение вероятностей в сечениях, нормальных направлению движения, аппроксимируется в итоге гауссовой кривой. Исходя из модели случайных блужданий, можно предположить прямую аналогию в механизме рассеяния между жидкостями, газами и тонкодисперсными сыпучими материалами.

Действительно, необходимым и достаточным условием для реализации фильтрационной дисперсии является наличие фильтрующей среды и потока частиц вещества, проходящих через нее без задержки в ячейках. Если обеспечено прохождение частиц, искривление их траекторий неизбежно и случайно. Следовательно, возникновение фильтрационной дисперсии возможно при любом из указанных фазовых состояний потока-индикатора, а механизм ее во всех случаях будет аналогичным.

1. Механизм фильтрационной дисперсии

Рассмотрим простейшую механическую модель фильтрационной дисперсии. В качестве фильтрующей среды взята кладка шаров, а в качестве потока — индикатора служит струйка тонкозернистого песка. Экспериментом воспроизведена трехмерная дисперсия с помощью простого прибора.

Кладка из шаров $d=20$ мм в наиболее плотной упаковке, размером $420 \times 370 \times 405$ мм, помещается в ящик из оргстекла. Дно ящика перфорировано так, что отверстия в нем соосны с межшаровыми (поровыми) ячейками нижнего ряда. Нижняя часть ящика приспособлена для размещения сменной кассеты стеклянных сборников, соответствующих отверстиям в дне ящика. Сборники в кассете могут быть набраны в разных комбинациях (полный набор или линии различных направлений).

С помощью такого дисперсионного прибора исследованы:

- а) механизм фильтрационной дисперсии и формы объема рассеяния;
- б) продольная (осевая) и поперечная по отношению к генеральному направлению индикатора закономерность распределения вещества в объеме рассеяния;
- в) влияние непроницаемых стенок модели на распределение вещества.

Первая серия опытов производилась при отсутствии влияния стенок на характер рассеяния, что достигалось запуском песка в центре модели, в 210 мм от стенки. Реальность явления фильтрационной дисперсии и связанный с ним значительный рассеивающий эффект устанавливаются следующим образом.

При просеивании тонкозернистого песка через кладку шаров на чистый лист бумаги, помещенной ниже кладки, обнаруживается, что поступающий в центр модели тонкой струйкой

песок образует на бумаге круг, диаметр которого во много раз превышает сечение запускаемой струйки.

При высоте кладки, состоящей из 23 горизонтальных рядов (405 мм), диаметр круга равен 320 мм. Повторение опыта при переменной высоте кладки показало также, что диаметр круга рассеяния в плоскости, перпендикулярной направлению движения, зависит от числа рядов фильтрующей кладки. Отсюда следует, что рассеивающийся внутри кладки песок занимает объем в форме конуса с углом 44° при вершине.

По расположению песка на бумаге видно, что количество его закономерно уменьшается от центра к периферии. Эту закономерность распределения количества песка в поперечных сечениях конуса дисперсии можно проследить с помощью описанных выше сборников (пробирок). Сборники размещались в выдвижной кассете в две линии крестом, центр которого совмещался с осью кладки. Просеивание производилось до заполнения центральной пробирки. Замечено, что в обеих линиях количество песка в сборниках закономерно и симметрично уменьшается от центра к краям.

Результаты этого опыта представлены на рис. 8 в виде вероятностного графика накопленных частостей количеств песка, уловленных сборниками. Эти количества выражались высотой столбика песка. Частости вычислялись по отношению к общему количеству песка, уловленному всеми сборниками анализируемого направления.

По полученным результатам можно заключить:

а) вследствие удовлетворительного положения точек около прямой реальная закономерность распределения песка в поперечном сечении конуса дисперсии аппроксимируется уравнением нормального распределения;

б) поскольку вероятностные графики двух взаимно перпендикулярных направлений совпадают, закономерность распределения по сечению в целом есть гауссиан вращения вокруг оси, проходящей через ось модели и точку запуска песка.

Таким образом, выполненные эксперименты иллюстрируют существо фильтрационной дисперсии как закономерное уменьшение относительного количества вещества (концентрации) при движении его в фильтрующей среде вследствие случайных искривлений траекторий движения частиц и распределения за счет этого постоянного количества вещества в прогрессивно увеличивающихся поперечных сечениях. Распределение вещества в последовательных по направлению движения сечениях аппроксимируется гауссианом с закономерно убывающей модой.

В случае нормального распределения и при совпадении оси ординат с осью модели закономерность его в любом направлении поперечного сечения полностью определяется величиной параметра σ . Определим выражение для σ при просеивании

через кладку с разным числом рядов: $n=23, 20, 17, 14, 11, 8, 5$. После каждого просеивания строим спрямленный график накопленных частот, по уклону которого определяем величину σ (табл. 1).

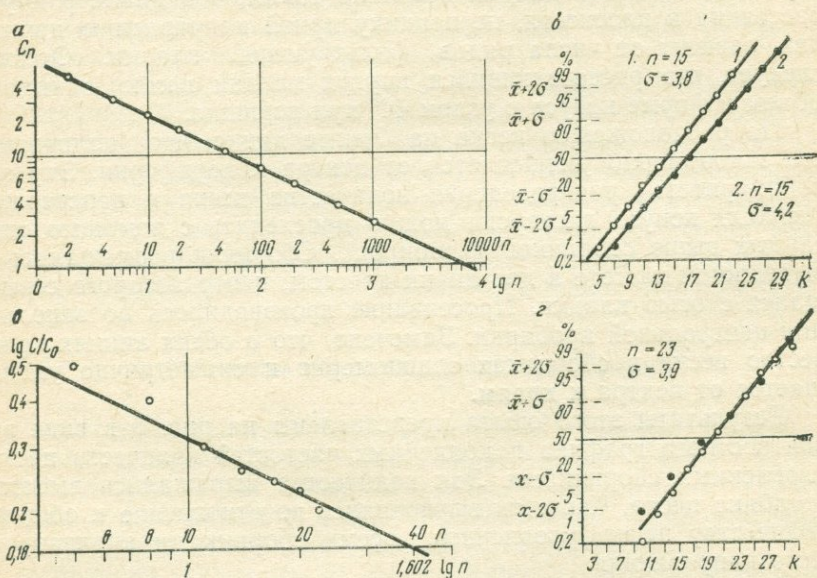


Рис. 8. Осевое и поперечное распределение вещества (теоретическое и по экспериментальным данным на механической модели).

a — осевое распределение по расчету; *б* — поперечное распределение по расчету для схемы с одной (1) и четырьмя (2) струйками; *в* — распределение относительных количеств песка по механической модели; *г* — поперечное распределение относительных количеств песка по механической модели по двум взаимно перпендикулярным направлениям

Из сравнения значений σ и \sqrt{n} следует, что зависимость σ от номера ряда с точностью в 12% аппроксимируется выра-

Таблица 1

№ опыта	Номер ряда	σ	\sqrt{n}	Расхождение между σ и \sqrt{n}	Относительное расхождение $\Delta, \%$
1	23	4,2	4,8	0,6	12
2	20	4,1	4,5	0,4	9
3	17	3,5	4,1	0,6	15
4	14	3,2	3,7	0,5	13
5	11	2,8	3,3	0,5	15
6	8	2,5	2,8	0,3	11
7	5	2,0	2,2	0,2	9
				$\Delta_{\text{ср}} = 12$	

жением $\sigma = \sqrt{n}$. Номер ряда здесь характеризует удаление от точки запуска. Чтобы перейти от дискретного к линейному выражению этого удаления, запишем: $y = \gamma_2 \cdot n \cdot d$, т. е. расстояние от точки запуска (y) равно произведению числа рядов (n) на диаметр шара (d) с учетом характера укладки (γ_2). В условиях данного эксперимента $\gamma_2 = 0,88$. Из приведенных выражений следует, что параметр σ как мера фильтрационного рассеяния прямо пропорционален корню квадратному из отношения расстояния от источника к диаметру шаров.

Проведем анализ закономерности распределения относительных количеств песка в направлении его движения через фильтрующую среду по оси модели, проходящей через точку запуска (табл. 2). В табл. 2 приведены значения моды попе-

Таблица 2

№ опыта	n	Мода M	$\frac{1}{\sqrt{n}}$	Расхождение Δ между M и $\frac{1}{\sqrt{n}}$	Относительное расхождение $\Delta, \%$
1	23	0,20	0,21	0,01	5
2	20	0,23	0,22	0,01	5
3	17	0,24	0,25	0,01	5
4	14	0,26	0,27	0,01	5
5	11	0,30	0,30	0,00	0
6	8	0,36	0,35	0,01	5
7	5	0,49	0,45	0,04	20

речного распределения в зависимости от номера ряда. При сравнении M с выражением $\frac{1}{\sqrt{n}}$, получим следующую опытную зависимость $M = \frac{1}{\sqrt{n}}$. Осевое распределение относительных количеств показано на рис. 9.

Анализируя полученные закономерности распределения частостей в объеме рассеяния, убеждаемся в том, что эти закономерности описываются уравнением нормального распределения с параметром $\sigma = \sqrt{n}$.

Выражаем частость как относительное количество песка, проходящее через ячейку n , m

$$C_{n,m} = \frac{C_0}{\sqrt{n}} \cdot e^{-\frac{m^2}{2n}}. \quad (34)$$

Сравнение фактических C_f и расчетных C_p значений по формуле (34) для $n=23$ дает удовлетворительную сходимость (табл. 3):

Сравнивая формулы (30) и (34), мы можем сделать вывод об адекватности описанной физической дисперсионной модели и теоретической модели случайных блужданий. Однако сравниваемые зависимости адекватны лишь с некоторым допуще-

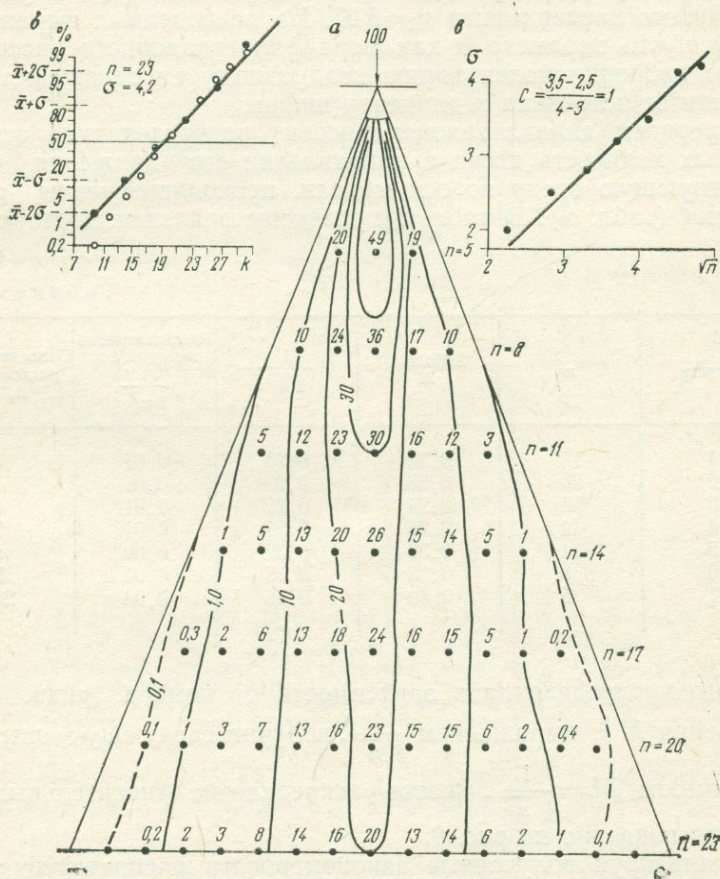


Рис. 9. Распределение относительных количеств песка в механической модели.

a — распределение в продольном сечении; *b* — вероятностный график поперечного распределения; *c* — график зависимости среднеквадратического распределения от номера ряда

нием, поскольку зависимость для параметра σ справедлива с погрешностью 12%, а для моды — с погрешностью 20%. Но эти расхождения понятны и объяснимы тем, что формула распределения вероятностей для простейшей схемы случайных блужданий является асимптотической и справедлива при $n \gg 1$. Мы можем предположить, что при $n > 23$ может быть достигнута

большая сходимость. Кроме того, здесь сыграла роль определенная грубость дисперсионной модели.

Для более наглядного представления о структуре конуса рассеяния построены изолинии относительных количеств в его продольном сечении (см. рис. 9, а). Исходя из полученной зависимости, можно видеть, что относительные количества вещества в конусе дисперсии определяются только координатами интересующей точки. Получаемые по этой формуле величины реализуются по истечении времени, необходимого для достижения частицами вещества соответствующих ячеек, после чего картина распределения относительных количеств в объеме рассеяния уже не зависит от времени. Следовательно, объем рассеяния, изображенный на рис. 9, является стабильным, его структура не зависит от времени просеивания песка и общего его количества.

Выполненный анализ показывает, что реализованная в описанной механической модели фильтрационная дисперсия приводит к образованию объема рассеяния в форме конуса. Распределение относительных количеств вещества внутри конуса стабильно, не зависит от общего количества просеянного песка, адекватно простейшей схеме случайных блужданий, описывается уравнением нормального распределения.

Дальнейшее изучение механической модели дисперсии производилось с целью определения влияния непроницаемой стенки на распределение вещества в поперечных сечениях. Это достигалось запуском песка в точки, расположенных на расстояниях 10, 90 и 210 мм от стенки модели. По результатам опытов известно, что при удалении точки запуска на 210 мм от стенки влияния ее на характер распределения не ощущалось. Ход экспериментов аналогичен описанному. Результаты показаны на рис. 10 в виде кривых распределения для направления, нормального стенке, и графиков накопленных частостей для направлений, параллельных ей. Опыты производились при той же кладке шаров ($n=23$). Как видно из рис. 10, а, в направлении, нормальном к стенке, происходит закономерная деформация характера распределения, выражающаяся в возрастающей ее асимметрии, увеличении моды M и уменьшении участка или размаха дисперсии (R). Таким образом, влияние непроницаемой границы приводит к сокращению поперечного сечения конуса дисперсии, следствием чего является увеличение моды и деформация кривой распределения в целом.

Рассмотрим характер распределения в направлении, парал-

Таблица 3

m	C_{Φ}	C_P
0	0,20	0,21
2	0,16	0,18
4	0,14	0,14
6	0,08	0,09
8	0,03	0,05
10	0,02	0,02

мельном стенке. В этом случае характер распределения прослеживается с помощью графиков накопленных частот для тех же вариантов расположения точки запуска. Как видно на

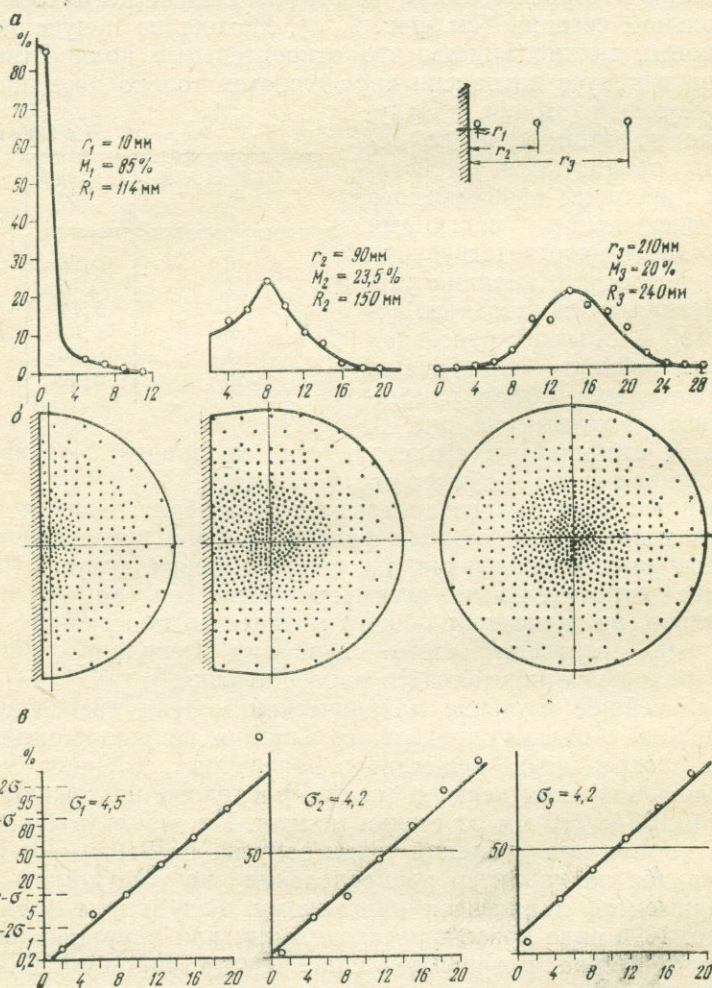


Рис. 10. Распределение относительных количеств песка в поперечных сечениях в ограниченной механической модели.

а — графики распределения в направлении, нормальном к стенке; **б** — диаграммы распределения песка в поперечных сечениях; **в** — вероятностные графики распределения песка в направлении, параллельном стенке

рис. 10, **в**, графики прямолинейны. Это значит, что распределение в параллельных направлениях остается нормальным. Для каждого случая вычислены величины параметра σ , при этом получены довольно близкие значения. Следовательно, на-

личие границы не оказывает влияния на распределение песка в параллельных направлениях.

Аналогичные результаты получены при опытах по влиянию двух взаимно перпендикулярных непроницаемых границ. Качественно картина та же, но различия в размахе и моде рассеяния для указанных вариантов еще резче.

Таким образом, наличие непроницаемых границ вблизи точки запуска снижает эффект рассеяния. Степень рассеяния обратно пропорциональна степени ограничения модели и прямо пропорциональна расстоянию от точки запуска до непроницаемой границы.

В связи с установленной адекватностью опытных закономерностей рассеяния теоретическим зависимостям описанный эксперимент можно рассматривать как физическую реализацию вероятностной модели случайных блужданий.

2. Фильтрационная дисперсия при конвективном переносе

Описанные выше эксперименты иллюстрируют эффект фильтрационной дисперсии как бы в чистом виде, т. е. при наличии только одного потока-индикатора в фильтрующей среде. Исходя из физической сущности явления, можно предположить, что аналогичным будет проявление фильтрационной дисперсии при конвективном переносе вещества, т. е. при движении потока-индикатора в потоке-носителе.

Попытка объяснить формирование ореолов рассеяния вещества в подземных водах явлением фильтрационной дисперсии была предпринята впервые П. Данелем в 1953 году [18]. Явление фильтрационного рассеяния он именовал диффузией, а участок водоносного горизонта, в пределах которого она проявляется, — ореолом диффузии.

Рассмотрим механизм фильтрационной дисперсии при конвективном переносе вещества фильтрационным потоком на примере модели двухмерного рассеяния в одномерном потоке. Пористая среда в этой модели изображается дисками, расположенными на плоскости в шахматном порядке (см. рис. 2, а). Принято условие постоянства подачи индикатора одной начальной элементарной струйкой. Модель симметрична, что определяет равенство расходов смешивающихся элементарных струек. Процесс рассеяния происходит следующим образом: струйка, обогащенная индикатором с начальной концентрацией вещества C_0 , встречая при движении в потоке-носителе первый диск, изображающий зерно пористой среды, ветвится на две струйки половинных по сравнению с исходным расходов, но с исходной концентрацией C_0 . В междисковом пространстве первого ряда эти струйки сливаются со струйками потока-носителя, не содержащими индикатор ($C=0$). В новой струйке, возникшей от слияния, концентрация индикатора уменьшается вдвое по

сравнению с исходной. В свою очередь эта струйка ветвится при встрече с соответствующим диском следующего ряда, снова сливается со стружкой потока-носителя, а концентрация в ней уменьшается теперь вчетверо против исходной. При многократном ветвлении и последующем разбавлении введенное в поток вещество перемещается в направлении средней скорости потока-носителя и нормально к нему.

Одновременно с этим происходит закономерное уменьшение концентрации от одного ряда дисков к другому и от одного междискового пространства к другому в каждом ряду. Приняв начальную концентрацию $C_0 = 1$ и пользуясь описанной последовательностью ветвления и осреднения элементарных струек, составим таблицу рассеяния, представляющую поле концентраций смешения (см. рис. 2, а). Обратим внимание на последовательность минимальных чисел — крайних в каждом ряду таблицы. Легко заметить, что они подчиняются следующей простой зависимости:

$$C_{k,n}^{\min} = \frac{1}{2^n}, \quad (35)$$

где n — номер ряда.

Преобразуем таблицу полученных чисел, разделив величины концентраций на минимальные значения — крайние в каждом ряду. Теперь таблица состоит из целых чисел, не зависящих от исходной концентрации (см. рис. 2, б). В ней каждый член последующего ряда равен сумме смежных членов предыдущего ряда. Полученная таблица представляет собой таблицу биномиальных коэффициентов или известный треугольник Паскаля [60]. Убедившись в том, что величины относительных концентраций являются биномиальными коэффициентами $C_{k,n}^n$, запишем выражение для концентрации в любой точке двухмерной модели, для чего используем зависимость (35).

$$C_{k,n} = C_k^n \cdot C_{k,n}^{\min} = C_k^n \cdot \frac{1}{2^n}. \quad (36)$$

Полученное выражение является частным случаем уравнения Бернулли для биномиального распределения:

$$P_k = P_{(x=k)} = C_k^n p^k q^{n-k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n), \quad (37)$$

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1,$$

где x — распределение случайной величины, принимающей значения $k = 0, 1, 2, \dots, n$ с вероятностями p_k ;

p — параметр этого распределения, который представляет собой заданную вероятность исследуемого события;

q — вероятность противоположного события $1-p=q$;
 C_k^n — биномиальный коэффициент.

Выражение (35) является частным случаем уравнения биномиального распределения при $p=1/2$. В нашем случае анализируемым событием является разбавление концентрации индикатора при слиянии элементарных струек, противоположное событие — обогащение потока-носителя. Вероятности этих событий при каждом слиянии элементарных струек одинаковы и равны $p=q=1/2$.

Таким образом, распределение концентраций вещества в поле рассеяния описывается уравнением биномиального распределения с параметром $p=0,5$. Полученное уравнение выражает искомую вероятность уменьшения исходной концентрации вещества после n, k ветвлений и осреднений концентраций смежных элементарных струек до x частей исходной концентрации. Вероятность в данном случае выражает относительное количество вещества в данной точке (n, k) или степень разбавления исходной концентрации

$$P_k = \frac{C_{k,n}}{C_0} \quad (38)$$

Можно убедиться (см. рис. 2, б), что сумма чисел каждого ряда равна исходной концентрации, следовательно, каждое число есть часть ее, т. е. $\sum_{k=0}^n \frac{C_{k,n}}{C_0} = 1$ и $0 \leq \frac{C_{k,n}}{C_0} \leq 1$.

Известно, что биномиальное распределение с параметром $p=0,5$ сходится с нормальным распределением уже при малых n . В нашем случае это подтверждается прямолинейностью вероятностного графика, построенного по данным указанной таблицы для ряда $n=15$ (см. рис. 8).

Строго это доказывается с помощью формулы Стирлинга, которая имеется в работе [61]. В данном же случае с помощью численного анализа получаем

$$C_{n,m} = \frac{0,8C_0}{\sqrt{n}} \cdot e^{-\frac{k^2}{2n}} \quad (39)$$

Зависимость осевых концентраций, полученная по формуле биномиального распределения для $n=10-1000$ при $k=\frac{n}{2}$, показана на рис. 10, а. Из анализа графика следует, что имеет место зависимость

$$C_{0,n} = \frac{0,8C_0}{\sqrt{n}} \quad n > 5. \quad (40)$$

Таким образом, при конвективном переносе рассеяние вещества вследствие фильтрационного эффекта происходит по

схеме случайных блужданий. Из этого следует, что распределение относительных количеств вещества в объеме рассеяния стационарно.

Формула (39) представляет дискретную функцию распределения, поскольку n — номер ряда и k — номер ячейки могут принимать только значения целых чисел. Переход к непрерывной функции можно осуществить с помощью следующих простых соотношений:

$$x = \gamma_1 \cdot k \cdot d; \quad y = \gamma_2 \cdot n \cdot d,$$

где γ_1, γ_2 — коэффициенты, зависящие от укладки зернистого материала соответственно в направлении оси x и y . В изотропной среде $\gamma_1 = \gamma_2$;

d — диаметр зерен пористой среды.

Выразив k и n с помощью указанных соотношений через непрерывные ординату и абсциссу, получим следующее выражение для непрерывной функции:

$$C_{x,y} = \frac{0,8C_0 \sqrt{\gamma_2 d}}{\sqrt{y}} \cdot e^{-\frac{2x^2}{\gamma_1 d y}}. \quad (41)$$

Зависимость (41) получена для неограниченной модели. Рассмотрим влияние границ на распределение концентраций в поле рассеяния. При этом представляют интерес два вида границ: непроницаемые продольные границы, направление которых в общем совпадает с направлением движения, и поперечные границы неоднородности. Рассеяние вещества происходит потому, что по мере движения с потоком-носителем вещество распределяется в закономерно увеличивающихся поперечных сечениях и расходах. Очевидно, будут оказывать влияние такие непроницаемые границы или свободные поверхности водоносных горизонтов, которые ограничивают области свободной поперечной дисперсии. Границы, создающие препятствие для поперечного рассеяния, должны нарушать при неизменном количестве вещества вид распределения и, следовательно, деформировать закономерность изменения концентраций в поле рассеяния, полученную для неограниченной модели. Характер деформации можно проследить, составляя таблицы рассеяния, подобные описанным, для различных схем ограниченной модели. Характер и степень деформации поперечного распределения концентраций понятны из рис. 11, *a* при сравнении нормального и деформированного графиков распределения, построенных с помощью таблиц рассеяния*. При рассмотрении последних

* К исследованию влияния непроницаемой границы на характер дисперсии вещества приложимо решение о случайных блужданиях в присутствии отражающей границы [61]. Здесь мы ограничимся качественным рассмотрением явления.

нетрудно убедиться, что степень деформации зависит от удаленности границы и анализируемого сечения от точки запуска индикатора так, что при значительном удалении деформированным может оказаться практически все сечение даже в полуограниченной схеме. Деформация зависит от конфигурации границ или степени ограничения. Очевидно, максимальной будет деформация модели с двухсторонним ограничением. Для рассматриваемой дисперсии — это означает четырехстороннее ограничение («труба»). Вопрос влияния непроницаемых границ изучался также П. Данелем [18]. Результаты его исследований ограниченной модели изображены в виде принципиальной схемы на рис. 11, б. Как видно, на некотором удалении от источника вследствие четырехстороннего ограничения происходит выравнивание концентраций по всему поперечному сечению до некоторой постоянной величины.

О влиянии границ неоднородности можно судить по виду формулы (41) и по выражению для параметра σ .

$$\sigma^2 = \frac{n}{4} = \frac{y}{4\gamma^2 d}. \quad (42)$$

σ обратно пропорциональна величине зерна фильтрующей среды. Вид распределения, как это следует из уравнения (41), не изменяется. Таким образом, если граница неоднородности является границей двух сред, различающихся по гранулометрическому составу, ее действие не приводит к изменению вида распределения, а изменяет величину параметра σ , т. е. интенсивность поперечного рассеяния. Она больше в мелкозернистых и меньше в грубозернистых водовмещающих породах. Влияние поперечных границ неоднородности на осевую закономерность убывания концентраций, выраженную в однородной среде прямолинейным графиком в координатах $\lg C - \lg y$, будет проявляться в переходе к ломаной кривой, прямолинейные участки которой соответствуют участкам водовмещающих пород однородного гранулометрического состава. При относительно частом чередовании пород различного гранулометрического состава осевая функциональ-

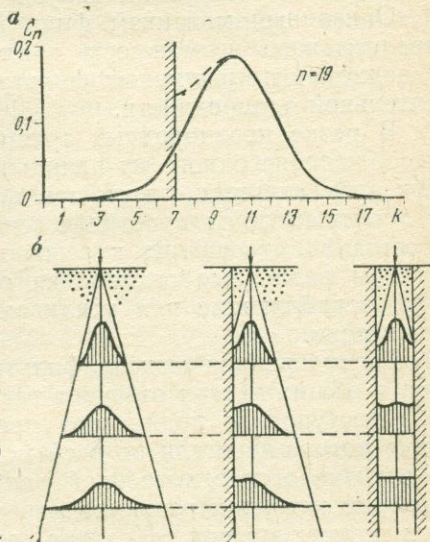


Рис. 11. Распределение вещества в поперечных сечениях в присутствии отражающих границ.

а — график, построенный по таблицам рассеяния; б — графики по П. Данелю

ная зависимость может перейти в корреляционную. Следовательно, характер деформации осевой закономерности в неоднородной пористой среде зависит от типа неоднородности: результатом упорядоченной неоднородности является изменение функциональной зависимости, при хаотической неоднородности функциональная зависимость может нарушаться и переходить в зависимость корреляционную.

Описанный механизм фильтрационной дисперсии позволяет предположить возможность аналогии в развитии этого явления в пористых и трещинных фильтрационных средах при их относительной однородности.

В резко неоднородных трещинных средах весьма вероятно несоблюдение одного из начальных условий — равенства расходов элементарных струек при ветвлении и смешении. Поэтому в зависимости от пространственного положения источника вещества по отношению к основным каналам фильтрации возможны различные отклонения от описанной модели, отклонения, ослабляющие или усиливающие эффект фильтрационной дисперсии.

Рассмотренная модель фильтрационной двухмерной дисперсии в общих чертах отвечает такой природной схеме, при которой поступление индикатора происходит на ограниченной ширине потока-носителя по всей мощности водоносного горизонта, в отличие от рассмотренной ранее более общей схемы, при которой источник вещества ограничен по фронту и по мощности подземных вод, в случае, когда имеет место трехмерная фильтрационная дисперсия.

Выражения для двух- и трехмерной дисперсии (34) и (39) практически идентичны. Это объясняется тем, что при исследовании трехмерной дисперсии частоты относились к количеству вещества, уловленного сборниками одного направления. Тем самым воспроизведен эффект двухмерной дисперсии, контролируемый вероятностью $p=0,5$. Если же количества вещества, уловленного в любой линии поперечного сечения, выражать через частоты, отнесенные к полному количеству вещества, проходящего через все сечение, то эффект рассеяния будет значительно большим, а выражение для относительных количеств — иным.

Результаты описанной серии экспериментов по механической модели выразим через величины, отнесенные к общему количеству просеянного песка (C_0), при этом получим следующую зависимость убывания осевых относительных количеств песка:

$$C_{n,m} = \frac{0,55C_0}{n}.$$

При сравнении выражений для осевых количеств в двух- и трехмерной моделях замечаем различия в показателе степени

для n , при двумерной дисперсии $\sigma = \sqrt{n}$, а при трехмерной $\sigma = n$.

3. Некоторые осложнения модели фильтрационной дисперсии

Рассмотренная простейшая модель случайных блужданий достаточно наглядно объясняет процесс рассеяния вещества при конвективном переносе. Однако эта модель не исчерпывает всех факторов, которые могут оказывать влияние на характер фильтрационной дисперсии в природных условиях. Рассмотрим действие некоторых из них.

Влияние формы источника-индикатора. При описании вероятностной модели дисперсии предполагалось, что поступление индикатора в поток-носитель осуществляется одной элементарной струйкой. Поступление потока-индикатора от реальных источников (природных или искусственных) имеет площадной характер, и это должно усложнить описанную картину рассеяния. Поступление вещества в двумерной модели на ограниченном отрезке поперечного сечения можно представить несколькими элементарными струйками так, как это показано на рис. 12.

Составим для этого случая таблицу рассеяния (см. рис. 12), подобную ранее описанной для случая с одной элементарной струйкой (см. рис. 2, а). Сравнение таблиц показывает, что они численно различны. Для условия запуска при наличии источника, имеющего определенные поперечные размеры, формируется участок неизменных концентраций вещества. Происхождение этого участка понятно из рис. 12: на некотором расстоянии от места запуска индикатора происходит слияние струек с одинаковыми концентрациями, что исключает разбавление на некотором прилежащем к источнику участке фильтрующей среды.

Анализ распределения относительных количеств по данным таблицы рассеяния (см. рис. 12) для ряда $n=15$ обнаруживает прямолинейность вероятностного графика (см. рис. 8, б). Следовательно, независимо от формы источника-индикатора распределение относительных количеств вещества в поперечном сечении уже на небольшом удалении от источника аппроксимируется гауссовой кривой. Сравнение величин параметров σ для ряда $n=15$ в схемах с одной и четырьмя элементарными струйками обнаруживает заметное различие: $\sigma_1^2 = 15$; $\sigma_4^2 = 17,5$.

Из этого следует, что при равных расходах индикатора и достаточном удалении от источника закономерность распределения вещества не зависит от геометрии источника. Геометрия реальных источников оказывает влияние на форму объема рассеяния, определяя его поперечные размеры и закономерности

распределения вещества в головной его части. Этот вывод подтверждается данными экспериментов на фильтрационном лотке.

Влияние скорости потока. Фильтрационная дисперсия возникает при движении вещества с потоком-носителем в фильтрующей среде. Очевидно, интенсивность дисперсии долж-

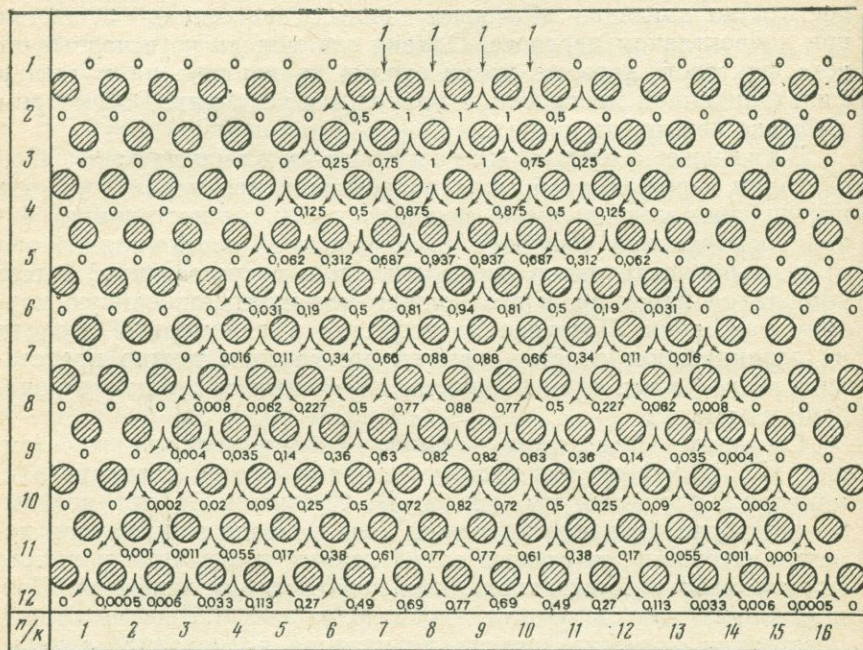


Рис. 12. Таблица рассеяния при поступлении вещества четырьмя струйками ($C_0=4$)

на зависеть от скорости этого движения. Однако в полученных уравнениях скорость потока подземных вод не нашла отражения. Поэтому формулу (39) для концентраций индикатора в любой точке области рассеяния следует рассматривать как математическую модель механизма рассеяния, а не как модель реального ореола. Влияние скорости потока можно рассматривать как дополнительный постоянный фактор дисперсии. Известно, что функция нескольких постоянных и случайных величин, распределенных нормально, сохраняет вид распределения (41). В этом случае усложняется лишь выражение для параметра σ . Можно предположить, что реальная закономерность изменения концентраций в поперечном сечении объема рассеяния сохранит вид нормального распределения с некото-

рым обобщенным параметром σ . Это предположение проверено опытным путем.

Деформация закономерностей распределения вещества в объеме рассеяния, вытекающих из модели случайных блужданий, за счет рассмотренных дополнительных факторов заключается в усложнении структуры параметра σ . В рассмотренном диапазоне условий будет сохраняться характер поперечного распределения и качественно изменяться продольное распределение вещества.

4. Основные свойства фильтрационной дисперсии, понятие об ореоле рассеяния

Рассмотрим некоторые общие закономерности рассеяния вещества в подземных водах, вытекающие из описанных свойств фильтрационной дисперсии. Фильтрующие среды обладают способностью рассеяния по отношению к потокам жидкостей. Эта способность реализуется при наличии потока вещества, являющегося частью общего потока. Наличие фильтрационной среды, постоянного потока подземных вод, обладающего некоторой средней скоростью, — все это вместе взятое входит в понятие водоносного горизонта. Следовательно, фильтрационная дисперсия — это явление, присущее водоносным горизонтам. Механизм фильтрационной дисперсии применительно к веществу-индикатору, поступающему в водоносный горизонт, заключается в прогрессирующем ветвлении элементарных струек, несущих индикатор, и их слиянии со струйками, не несущими или содержащими его в значительно меньших концентрациях. Поэтому фильтрационная дисперсия возможна при градиенте концентраций вещества в его источнике и в потоке подземных вод. Рассеяние вещества под действием указанного механизма происходит благодаря тому, что вещество распределяется в больших по сравнению с начальным и закономерно увеличивающихся в направлении потока поперечных сечениях (расходах). Следовательно, фильтрационная дисперсия возможна, если вещество индикатора поступает только с частью потока подземных вод (т. е. начальное сечение, по которому поступает индикатор, меньше сечения водоносного горизонта). Непроницаемые границы и свободная поверхность водоносного горизонта ограничивают фильтрационную дисперсию. При наличии полного ограничения потока подземных вод, что имеет место при двух боковых границах водоносного пласта, и при достаточном удалении от источника происходит постепенное выравнивание концентраций в поперечных сечениях и по достижении некоторой средней концентрации фильтрационная дисперсия прекращается. Величина конечной концентрации определяется соотношением расходов несущей вещество части потока к расходу остальной его части в начальном сечении. Таким

образом, необходимым и достаточным условием возникновения фильтрационной дисперсии в водоносных горизонтах является градиент концентраций индикатора в источнике и водоносном горизонте, что имеет место при поступлении индикатора только с частью потока в начальном сечении. Вследствие фильтрационной дисперсии вещества в фильтрующих средах формируется стационарный объем закономерно убывающих концентраций в виде конуса дисперсии. Закономерность убывания концентраций в конусе рассеяния описывается уравнением нормального распределения, т. е. функцией, быстро убывающей. Значит фильтрационная дисперсия представляет собой сильный фактор рассеяния. В результате на сравнительно коротких расстояниях может достигаться предел фиксируемых концентраций, определяющий стабильные границы конуса рассеяния. Эти границы зависят от чувствительности метода определения индикатора и амплитуды колебания его фона в подземных водах. Наличие фиксируемой замыкающей границы основания конуса рассеяния контролируется концентрацией, определяющейся балансом вещества.

Резюмируя вышеизложенное, можно отметить основные свойства фильтрационной дисперсии.

1. Явление фильтрационной дисперсии вещества в водоносных горизонтах возникает и практически ощущается при наличии значительного градиента концентраций индикатора в его источнике и водоносном горизонте ($C_0 \gg C_\Phi$), при расходе потока-индикатора, существенно меньшем расхода потока подземных вод ($Q_{\text{и}} < Q_{\text{п}}$).

2. Фильтрационная дисперсия формирует объем рассеяния, который в изотропной неограниченной и равномерно проницаемой среде имеет форму конуса. Пространственная закономерность распределения вещества в конусе рассеяния аппроксимируется уравнением нормального распределения.

3. Эффект фильтрационной дисперсии снижается в присутствии непроницаемых боковых границ пласта или свободной поверхности, что приводит к деформации конуса рассеяния и нарушению распределения вещества внутри него. При четырехстороннем ограничении на достаточном удалении от источника фильтрационная дисперсия прекращается, а конус дисперсии переходит в участок постоянных концентраций. Величина последней определяется соотношением расходов потока-индикатора и потока-носителя в начальном сечении.

4. Математический анализ механизма рассеяния позволяет сделать вывод о том, что фильтрационная дисперсия как неперенное свойство водоносных горизонтов является необходимым и достаточным фактором формирования ореолов рассеяния вещества в подземных водах.

Исходя из описанных основных свойств фильтрационной дисперсии, уточняется понятие ореола рассеяния. Под ореолом

рассеяния вещества в подземных водах предлагается понимать объем водоносного горизонта вне источника вещества, в пределах которого происходит закономерное уменьшение концентраций в направлении потока и нормально к нему от максимальной исходной до аналитически воспроизводимой на периферии. Иными словами, ореол — это фиксируемый участок объема рассеяния. Таким образом, сильный эффект фильтрационной дисперсии является необходимым и достаточным фактором формирования ореола рассеяния. Другие из возможных факторов могут усиливать рассеяние или деформировать ореол. Несмотря на то, что описанный процесс дисперсии является нестационарным в том смысле, что объем рассеяния в неограниченном пласте постоянно растет, а конечная концентрация лишь асимптотически в пределе стремится к нулю или фоновой концентрации элемента, мы имеем дело со стационарными или квазистационарными ореолами. Эта особенность находит отражение в определении ореола как участка фиксируемых концентраций. Распределение концентраций внутри ореола стационарно при постоянном поступлении вещества.

Особенности механизма фильтрационной дисперсии определяют зональность ореолов рассеяния. В направлении потока выделяются:

- 1) зона постоянных концентраций;
- 2) зона максимального убывания концентраций;
- 3) зона асимптотически убывающих концентраций.

Большая часть последней зоны в природных условиях аналитически не воспроизводима.

Глава 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

1. Основные задачи лабораторных исследований и методика моделирования

Задача лабораторных исследований заключалась в изучении трехмерной дисперсии вещества в фильтрационном потоке. Решение этой задачи предполагает реализацию схемы миграции Б, охарактеризованную в главе 2, когда под влиянием фильтрационной дисперсии формируются ореолы рассеяния вещества.

Лабораторными экспериментами исследовались закономерности временного и пространственного распределения вещества в ореоле рассеяния и влияние на них скорости фильтрационного потока, соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора, фактора гравитации, структуры гидродинамической сетки потока и границ модели.

Здесь и в дальнейшем потоком-индикатором называется поток воды с искусственно заданным повышенным содержанием элемента-индикатора; потоком-носителем называется поток, вмещающий поток-индикатор и содержащий фиксируемый индикатор в значительно меньших количествах или не содержащий его.

Результаты лабораторных исследований получены при моделировании процесса рассеяния вещества в потоке на фильтрационном лотке.

Опыты проводились на двух лотках, изготовленных из оргстекла и укрепленных металлическим каркасом (рис. 13).

Лоток 1: длина рабочей части 100 см, ширина 20 см, высота 50 см. По обеим боковым стенкам лотка расположены пьезометры по сетке 7×7 см. Лоток 2: длина рабочей части 150 см, ширина 20 см, высота 75 см; пьезометры на боковых стенках расположены по сетке 10×10 см. Пьезометры используются для измерения величины напора и для отбора проб воды на анализ.

Поток-носитель задавался подачей в верхний бьеф лотка водопроводной воды (минерализация 0,20—0,29 г/л; содержа-

ние хлор-иона 10—40 мг/л; рН от 6,7 до 8,3; состав гидрокарбонатный кальциево-натриевый).

Поток-индикатор представлен раствором поваренной соли (минерализация от 0,2 до 63,9 г/л). В качестве индикатора использовался ион хлора, который мигрирует в потоке в анионной форме и не вступает в химическое взаимодействие с мате-

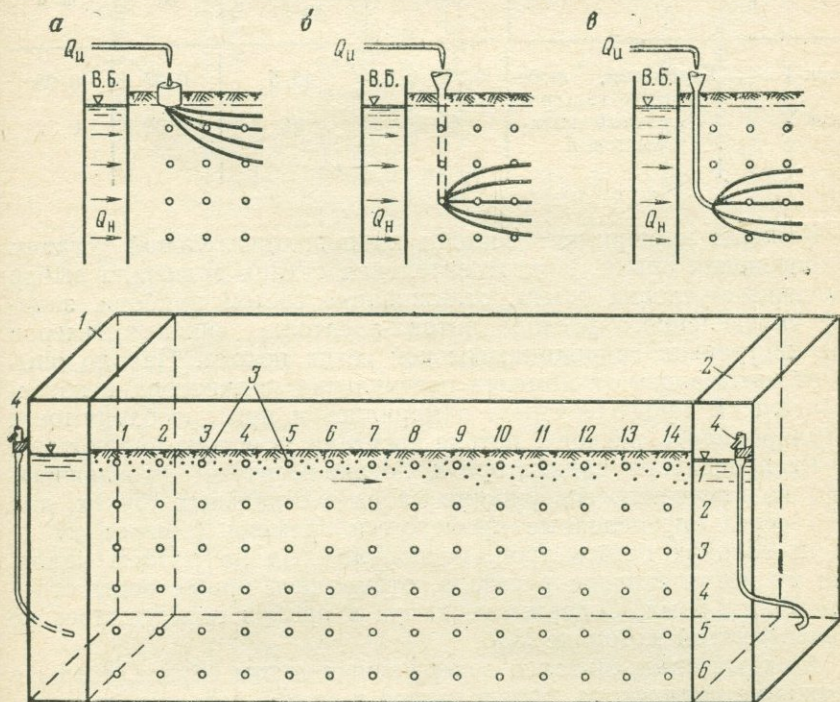


Рис. 13. Схема фильтрационного лотка.

1 — верхний бьеф; 2 — нижний бьеф; 3 — пьезометры; 4 — воронки, регулирующие уровень воды в бьефах.

Варианты подачи в поток-носитель раствора-индикатора:

а — с поверхности потока, б — внутрь потока через стеклянную трубку, в — внутрь потока через пьезометр

риалом фильтрующей среды. В опытах 34—37 (см. табл. 5) этот раствор смешивался с раствором К-флуоресцеина, который не взаимодействует с песком, а флуоресценция раствора позволяет упростить контроль за ходом эксперимента.

Раствор-индикатор подавался в поток-носитель по схемам, показанным на рис. 13. Поскольку источник индикатора находился у боковой стенки лотка, в лотке воспроизводилась как бы «половина» трехмерного ореола рассеяния, продольное сечение которого по оси совпадало с данной стенкой лотка.

В качестве фильтрующей среды использовались два типа песка, основные характеристики которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип песка	Характеристика песка	Размер частиц, мм	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пористость n_0	Водоотдача μ
Песок 1	Кварцевый, люберецкого карьера	0,25—0,5	43,5	0,37	0,23
Песок 2	Отсеянный полимиктовый	1—2	85	0,39	0,32

Каждый эксперимент состоял из подготовительной стадии и проведения опыта. Подготовительная стадия включала выбор граничных условий опыта, отлаживание систем прибора, задание определенного расхода потока-носителя, снятие замеров для построения гидродинамической сетки потока. Начало опыта отсчитывалось от момента поступления индикатора в поток-носитель. В процессе опыта замерялись и при необходимости регулировались расходы потока-носителя и потока-индикатора.

Распределение индикатора в потоке-носителе прослеживалось по изменению содержания хлора в отдельных точках, для чего через определенные промежутки времени (обычно 24 ч) из нескольких пьезометров, расположенных на разном удалении от места запуска раствора, отбирались пробы воды объемом около 5 мл. Содержание хлора в пробах определялось по общепринятой методике [30].

Каждый опыт считался завершенным в том случае, если содержание индикатора, определяемое в самом дальнем от источника пункте, не менялось в течение 1—3 сут. По окончании опыта из пьезометров отбирались пробы воды и определялось содержание индикатора. Продолжительность одного опыта составляла 7—20 сут.

Важное значение в методике проведения экспериментов имеет вопрос о представительности отбираемых через пьезометры проб для определения содержания индикатора в точке. Проведенные приблизительные расчеты свидетельствуют о том, что каждая проба характеризует объем радиусом около 2,2 см от центра пьезометра. В связи с этим возникает некоторая неопределенность при исследовании различных зон объема рассеяния вещества. При проведении экспериментов повторными отборами проб показано, что погрешность опробования потока через пьезометры по оси ореола рассеяния не превышает 1%. Наибольшее искажение содержания индикатора наблюдается при отборе проб из пьезометров, незначительно удаленных

№ опыта	Расход, см ³ /с			$\frac{Q_H}{Q_H}$	Минерализация раствора индикатора, г/л	Плотность раствора d , г/см ³	Содержание хлора, г/л		$\frac{C_H}{C_H}$	$\frac{C_H}{C_H}$	Скорость, см/с		Условия запуска индикатора
	потока-носителя Q_H	потока-индикатора Q_H	суммарный Q				в потоке-носителе C_H	в потоке-индикаторе C_H			фильтрации v_f , п.10 ⁻⁵	действительная, v_d , п.10 ⁻⁴	
8	0,0640	0,0105	0,0745	6,5	2,10	1,00150	0,033	1,26	38	8,9	2,40	С поверхности; см. рис. 13, а	
9	0,0666	0,0052	0,0718	12,2	2,22	1,00138	0,033	1,35	41	8,55	2,31	То же	
10	0,0616	0,0119	0,0735	5,2	20,58	1,0136	0,033	12,5	379	8,75	2,36	«	
11	0,0660	0,0124	0,0784	5,4	7,02	1,00465	0,033	4,26	129	9,32	2,52	«	
12	0,0641	0,006	0,0701	10,6	2,11	1,00150	0,040	1,28	32	8,35	2,25	«	
13	0,0630	0,006	0,0690	10,6	2,38	1,00155	0,040	1,44	36	8,21	2,22	Через трубку в точку 2-2; см. рис. 13, б	
14	0,0641	0,006	0,0701	10,6	0,27	1,00015	0,021	0,17	6,7	8,35	2,25	То же	
15	0,060	0,0125	0,0725	4,6	0,22	1,00015	0,020	0,135	6,4	8,65	2,34	С поверхности; см. рис. 13, а	
16	0,0633	0,006	0,0693	10,6	0,544	1,00035	0,028	0,33	11,8	8,25	2,22	Через трубку в точку 3-2 и с поверхности; см. рис. 13, б	
17	0,0633	0,006	0,0693	10,6	0,527	1,00035	0,028	0,32	11,4	8,25	2,22	Через трубку в точку 3-2; см. рис. 13, б	
18	0,0680	0,003	0,0710	21,0	0,557	1,00035	0,036	0,337	9,4	8,45	2,28	То же	
19	0,0552	0,0115	0,0667	5,1	63,9	1,04275	0,036	38,8	1078	—	—	С поверхности; см. рис. 13, а	
20	0,0646	0,0059	0,0705	10,9	0,58	1,00035	0,032	0,32	10	8,1	2,18	Через трубку в точку 3-2; см. рис. 13, б	
21	0,134	0,0065	0,141	20,6	0,51	1,00035	0,028	0,31	11,1	16,3	4,20	То же	
22	0,280	0,0068	0,287	41,0	0,53	1,00035	0,020	0,32	16	33,0	8,45	«	
23	0,100	0,0092	0,109	11,1	0,194	1,00015	0,032	0,12	3,75	12,5	3,21	«	
24	0,0995	0,0095	0,109	10,5	0,328	1,00017	0,028	0,199	7,1	12,5	3,21	«	
25	0,095	0,014	0,109	6,8	0,310	1,00017	0,025	0,185	7,6	12,5	3,21	«	
26	0,1041	0,0059	0,110	17,6	0,305	1,00017	0,025	0,188	7,6	12,6	3,23	«	
27	0,1026	0,0064	0,109	16,0	0,310	1,00017	0,025	0,189	7,6	12,5	3,21	«	
28	0,1059	0,0026	0,1085	40,7	0,310	1,00017	0,025	0,189	7,6	12,5	3,21	«	
29	0,0970	0,0115	0,1085	8,4	0,251	1,00016	0,014	0,152	10,9	7,75	2,09	«	
30	0,0776	0,00847	0,0861	9,2	0,275	1,00016	0,014	0,167	10,8	6,15	1,66	«	
31	0,0513	0,00608	0,0574	8,4	0,250	1,00016	0,007	0,152	21,7	4,1	1,11	«	
32	0,4466	0,0079	0,4545	56,5	62,0	1,042	0,014	37,6	26,85	32,0	8,65	С поверхности; см. рис. 13, а	
33	0,2353	0,0087	0,2440	27,2	37,9	—	0,014	23,0	1640	17,4	4,7	То же	
34	0,4856	0,00942	0,4950	52	—	—	0,018	0,64	—	—	—	Через пьезометры 2-2, б-2; рис. 13, а	
35	0,4046	0,00596	0,4140	43	1,04	—	—	—	—	—	—	Через пьезометр 2-4; см. рис. 13, а	
36	0,1103	0,00565	0,1160	18	0,620	1,00035	0,019	0,320	12,3	8,2	2,07	То же	
37	0,1090	0,0065	0,1155	16,8	0,600	1,00035	0,024	0,300	12,5	8,2	2,2	Через пьезометр 4-15; см. рис. 13, а	

Опыты 8—19 и 29—37 выполнены с песком диаметром 0,25—0,5 мм, опыты 20—28—с песком диаметром 1—2 мм. В опытах 32—34—поток трехмерный, в опыте 36—поток сходящийся двухмерный и в опыте 37—поток расходящийся.

от осевой части ореола. Здесь происходит завышение истинных содержаний в среднем на 10%. Очевидно, что такие погрешности опробования не оказывают существенного влияния на воспроизведение объема рассеяния

Всего проведено 37 опытов. В первых семи отработывалась методика экспериментов, и их результаты не использованы при характеристике процесса рассеяния индикатора в фильтрационном потоке. Опыты 8—31 и 35 проведены в условиях плоского одномерного фильтрационного потока. Опыты 36 и 37 — в условиях двухмерного плоского потока сходящегося (опыт 36) и расходящегося (опыт 37). В опытах 32, 33, 34 моделировался трехмерный поток, разгрузка которого осуществлялась в одной точке (табл. 5).

2. Рассеяние вещества в одномерном фильтрационном потоке

Трехмерное рассеяние вещества в одномерном фильтрационном потоке изучалось на проведенных 25 опытах (8—31 и 35; см. табл. 5). В результате выявлены закономерности временного и пространственного распределения вещества в объеме рассеяния и влияние на них скорости фильтрационного потока, соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора, действие границ модели и гравитации.

Закономерности рассеяния вещества во времени

Каждый опыт включал наблюдения за изменением содержания хлора во времени в отдельных точках. Результаты наблюдений оформлялись в виде графиков в координатах $C-t$. В качестве примера приведены графики (рис. 14), построенные по данным опытов 13 и 25 (по всем остальным экспериментам результаты аналогичны). На рис. 14 видно, что в любом наблюдательном пункте вначале отмечается медленное нарастание содержания хлора, которое затем сменяется резким его подъемом и вновь очень медленным увеличением. По прошествии определенного времени содержание хлора достигает определенной величины и в дальнейшем не изменяется. Такое явление зафиксировано в каждом опыте по всем наблюдательным точкам. Таким образом, есть основание утверждать, что в пределах модели постоянное содержание индикатора устанавливается по всему объему. Величина стабильного содержания индикатора (см. рис. 14) обратно пропорциональна расстоянию между точкой наблюдения и источником, а время достижения стабильного содержания прямо пропорционально этому расстоянию.

На рис. 15 представлены графики, построенные по данным двух групп опытов в координатах $t=f(x)$, где t — время достижения стабильного содержания индикатора в точке отбора про-

бы, x — расстояние от точки отбора пробы до источника индикатора. В опытах каждой группы действительная скорость потока была примерно одинакова: около $2,3 \cdot 10^{-4}$ см/с (для группы а) и около $3,2 \cdot 10^{-4}$ см/с (для группы б).

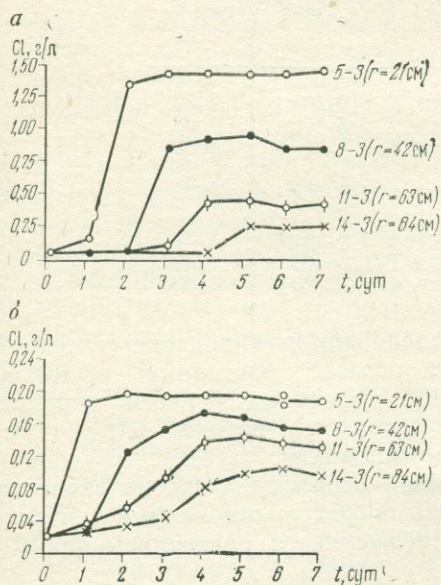


Рис. 14. Изменение содержания хлора во времени.

а — опыт 13; б — опыт 25, 5-3; 8-3 и т. д. — номера наблюдательных пьезометров

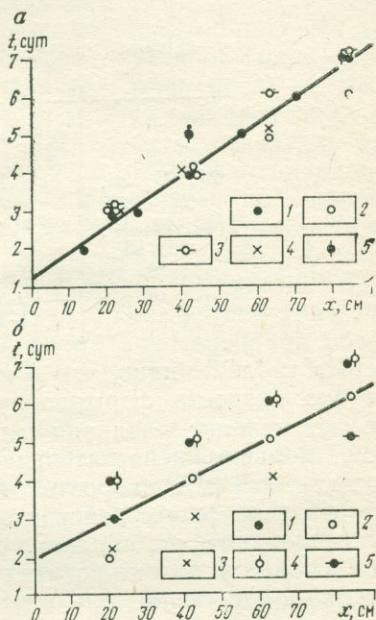


Рис. 15. Зависимость времени стабилизации содержания индикатора от расстояния между точкой наблюдения и местом запуска раствора-индикатора (ось ореола).

а — $v_D = 2,3 \cdot 10^{-4}$ см/с; 1 — опыт 12; 2 — опыт 14; 3 — опыт 15; 4 — опыт 17; 5 — опыт 18; б — $v_D = 3,2 \cdot 10^{-4}$ см/с; 1 — опыт 24; 2 — опыт 25; 3 — опыт 26; 4 — опыт 27; 5 — опыт 28

Угол наклона прямой линии на графиках рис. 15 характеризует среднюю скорость формирования объема рассеяния индикатора (v_c), которая определяется как $\frac{\Delta x}{\Delta t}$. Для опытов группы а она составляет $1,7 \cdot 10^{-4}$ см/с, для группы б — $2,4 \cdot 10^{-4}$ см/с. Скорость формирования объема рассеяния заметно меньше действительных скоростей потока. Это подтверждается и результатами опытов 29—33, в которых изменялась действительная скорость потока, а следовательно, и скорость формирования объема рассеяния. Зависимость средней скорости формиро-

вания поля рассеяния вещества v_e от действительной скорости потока v_d приведена в табл. 6.

Таблица 6

№ опыта	v_d , см/с	v_e , см/с	$\gamma = \frac{v_e}{v_d}$
32	$8,65 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1,73
33	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1,88
24, 25, 26, 27, 28	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	1,33
12, 14, 15, 17, 18	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	1,35
29	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	1,31
30	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	1,32
31	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	1,03

Из табл. 6 видно, что в исследованном диапазоне скоростей потока скорость формирования объема рассеяния вещества всегда меньше; различия между скоростями (γ) тем больше, чем больше действительная скорость потока. При $v_d = 1,11 \cdot 10^{-4}$ см/с скорость формирования объема рассеяния практически равна действительной скорости. Отличие скорости формирования стабильного объема рассеяния от действительной скорости потока-носителя объясняется рассеянием фронта потока-индикатора.

При разборе модели одномерного рассеяния вещества показано, что со средней действительной скоростью потока движется растворенное вещество с концентрацией $C = 0,5 C_0$. Меньшие содержания опережают этот фронт, а большие — отстают от него, причем с течением времени величины опережения и отставания возрастают (см. рис. 3). В опытах, где применялся краситель (флуоресцеин), такое распределение индикатора по фронту поля рассеяния фиксировалось визуально в виде каймы, обрамлявшей это поле. Таким образом, в любом пункте наблюдения стабильное содержание индикатора должно фиксироваться несколько позже, чем этого следовало бы ожидать, если принимать в расчет только действительную скорость потока. Очевидно эта разница во времени тем больше, чем больше ширина каймы L_p . Напомним, что в одномерной схеме L_p определяется по формуле (4). Из формулы (4) и уравнения эмпирической зависимости коэффициента продольной дисперсии D от скорости потока (см. главу 2, раздел 1) получим выражение

$$L_p = B \sqrt{\frac{0,228 v^{1,296}}{n} t}. \quad (44)$$

Из этого выражения видно, что ширина каймы находится в прямой зависимости от действительной скорости потока и времени. Следовательно, чем больше действительная скорость потока, тем больше «разрыв» между ней и скоростью формирования стабильной концентрации в данной точке (см. табл. 6).

Рассмотрим теперь происхождение начальной ординаты на графиках рис. 15. По условиям запуска раствора-индикатора формирование поля рассеяния начинается лишь после образования объема вокруг точки (куда подается индикатор), в пределах которого содержание индикатора остается таким же, как и в растворе-индикаторе. Это явление отчетливо наблюдается в опытах 34—37, выполненных с раствором, подкрашенным флуоресцеином. Размеры и форма такого объема зависят от расхода потока-индикатора, от соотношения расходов потока-индикатора и потока-носителя, от скорости потока-носителя и от местоположения источника индикатора в потоке (на поверхности потока или внутри его). Время формирования объема концентраций выражается начальной ординатой на графиках $t=f(x)$ (см. рис. 15).

Результаты изучения закономерностей рассеяния вещества во времени могут быть сформулированы следующим образом:

1) формирование объема рассеяния вещества завершается стабилизацией содержания индикатора внутри этого объема. Время достижения стабильного содержания прямо пропорционально расстоянию между пунктом наблюдения и источником индикатора, величина стабильного содержания находится в обратной зависимости от этого расстояния;

2) скорость формирования стабильного объема рассеяния вещества (v_c) находится в прямой зависимости от действительной скорости потока (v_d). В исследованном диапазоне величин последней v_c всегда меньше v_d , т. е. $\frac{v_d}{v_c} > 1$. С уменьшением скорости потока величина отношения приближается к единице, и при $v_d = 1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с $\frac{v_d}{v_c} \approx 1$.

Закономерности рассеяния вещества в пространстве

Результаты определения содержаний индикатора во всех наблюдательных точках в момент окончания каждого отдельного эксперимента позволяют получить ряд характеристик распределения стабильных содержаний индикатора в вертикальной плоскости продольного осевого сечения потока.

Анализ распределения элемента-индикатора в объеме рассеяния и поиски закономерностей этого распределения проводились в продольном (осевом) и поперечном сечениях.

По условиям опытов на формирование объема рассеяния индикатора оказывают влияние фильтрационная дисперсия,

скорость потока, величины расхода потоков, различия между минерализациями (плотностью) воды потока-носителя и потока-индикатора. Однако последний фактор как бы накладывается на поле рассеяния, сформировавшееся без его участия, без влияния гравитации. Поэтому вначале удобнее рассмотреть результаты, характеризующие рассеяние индикатора без влияния сил гравитации. Наиболее представительными в этом отношении являются результаты опытов 17, 18, 25, 27, 29, 30, 31 (см. табл. 5).

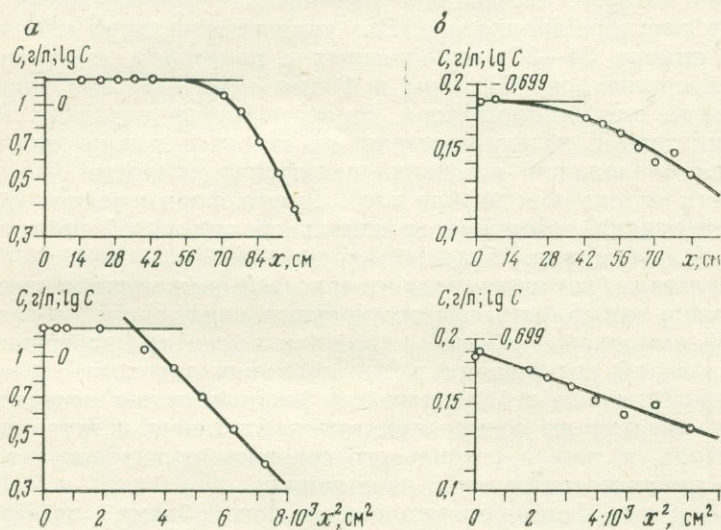


Рис. 16. Убывание содержания индикатора по оси стабильного ореола.
а — опыт 8; б — опыт 27

Продольная осевая закономерность изменения индикатора характеризуется наличием двух участков: участка неизменных начальных концентраций и участка закономерного их уменьшения (рис. 16).

Формирование участка неизменных концентраций, очевидно, происходит по схеме, описанной в главе 3. Действие объемного источника аналогично поступлению вещества несколькими элементарными струйками. Тогда вследствие ветвления и слияния элементарных струек, несущих исходную концентрацию (C_0), разбавления не происходит, и формируется некоторый участок неизменных концентраций.

Протяженность участка неразбавленных содержаний индикатора зависит от соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора, от скорости потока и плотности раствора индикатора (табл. 7).

Таблица 7

№ опыта	Коэффициент фильтрации песка, м/сут	Скорость потока, см/с	Плотность раствора, г/см ³	Расход раствора индикатора, см ³ /с	Отношение расходов	Протяженность участка неразбавленных содержаний, см
15	43,5	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,00015	0,0125	4,6	84
17	43,5	$2,22 \cdot 10^{-4}$	1,00035	0,006	10,6	45
8	43,5	$2,30 \cdot 10^{-4}$	1,0003	0,003	21,0	25
25	85	$3,21 \cdot 10^{-4}$	1,00017	0,0140	6,8	80
24	85	$3,21 \cdot 10^{-4}$	1,00017	0,0095	10,5	35
27	85	$3,21 \cdot 10^{-4}$	1,00017	0,0064	16,0	30
28	85	$3,21 \cdot 10^{-4}$	1,00017	0,0026	40,7	5

В табл. 7 представлены результаты по двум группам опытов, выполненных при различных величинах соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора, но при постоянстве всех прочих условий экспериментов. В сформированном объеме рассеяния длина участка неразбавленных содержаний находится в прямой зависимости от величины расхода потока-индикатора (см. табл. 7). С увеличением расхода индикатора длина этого участка возрастает и, наоборот, при уменьшении расхода — укорачивается (горизонтальные участки графиков на рис. 16).

Отчетливая прямая зависимость длины участка неразбавленных содержаний от действительной скорости потока устанавливается по результатам опытов 29, 30, и 31, в которых переменной была только скорость (табл. 8).

Таблица 8

№ опыта	Действительная скорость v_d , см/с	Участок неизменных концентраций, см
29	$2,09 \cdot 10^{-4}$	70
30	$1,66 \cdot 10^{-4}$	45
31	$1,11 \cdot 10^{-4}$	30

Обнаруженную зависимость протяженности участка неразбавленных содержаний индикатора от действительной скорости потока и соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора, по-видимому, можно объяснить тем, что их увеличение равнозначно увеличению первоначального поперечного сечения или числа струек потока-индикатора. Последнее (см. рис. 12) должно неизбежно приводить к увеличению длины участка неразбавленных содержаний.

Изложенное относится к условиям, в которых минерализации (плотности) потока-носителя и потока-индикатора равны или отличаются незначительно (рис. 17). Ось такого ореола горизонтальна и соответствует структуре гидродинамической сетки одномерного потока (см. рис. 17, б, опыт 18). Если раствор-индикатор тяжелее воды потока-носителя, поле рассеяния

формируется при заметном участии сил гравитации (см. рис. 17, в, опыт 19). В результате ось ореола смещается вниз от горизонтальной плоскости. Это отражается и на участке неразбавленных содержаний: чем больше влияние сил гравита-

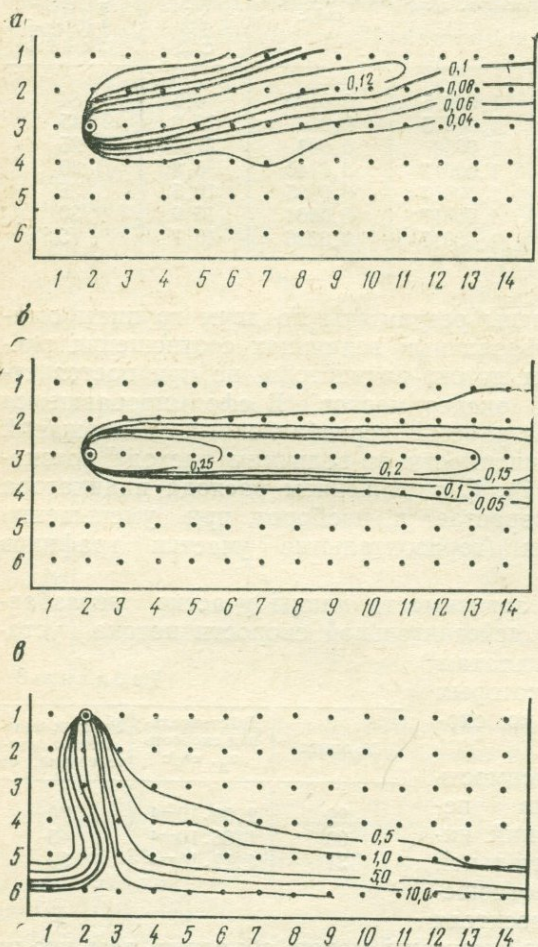


Рис. 17. Влияние минерализации раствора-индикатора на форму ореолов рассеяния вещества

а — опыт 23, $M=0,194$ г/л;
 б — опыт 18, $M=0,557$ г/л;
 в — опыт 19, $M=63,9$ г/л

ции на формирование ореола рассеяния, тем короче участок неразбавленных содержаний.

В пределах второго участка, в направлении движения потока-носителя по оси ореола наблюдается убывание содержания элемента индикатора. Характер убывания анализировался графически в координатах $C-x$ и $\lg C-x^2$, где C — содержание элемента-индикатора (г/л или мг/л), x — расстояние от точки наблюдения до конца участка неразбавленных концентраций.

В большинстве опытов второй участок графика $\lg C - x^2$ аппроксимируется прямой линией, которая описывается уравнением

$$\lg C_x = A - Bx^2, \quad (45)$$

где A — начальная ордината, численно равная логарифму исходного содержания элемента в растворе-индикаторе (C_0);

B — угловой коэффициент графика $\lg C - x^2$, равный

$$B = \frac{\lg C_{x_1} - \lg C_{x_2}}{x_2^2 - x_1^2}. \quad (46)$$

При переходе к непосредственной зависимости C от x получаем, что она достаточно хорошо аппроксимируется нисходящей ветвью кривой нормального распределения

$$C_x = C_0 e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{\text{пр}}^2}}, \quad (47)$$

где C_x — содержание индикатора в точке наблюдения;

C_0 — содержание индикатора в источнике;

x — расстояние от точки наблюдения до конца участка неразбавленных концентраций;

$\sigma_{\text{пр}}$ — параметр функции нормального распределения (здесь — параметр продольной дисперсии).

Зная величину начальной ординаты $A = \lg C_0$, равенство (46) можно записать:

$$\lg C_x = \lg C_0 - Bx^2. \quad (48)$$

Решая совместно уравнения (47) и (48) находим

$$B = \frac{1}{4,6 \cdot \sigma_{\text{пр}}^2}.$$

Отсюда получаем

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1}{4,6B}} = \sqrt{\frac{x_2^2 - x_1^2}{4,6(\lg C_{x_1} - \lg C_{x_2})}}. \quad (49)$$

Параметр $\sigma_{\text{пр}}$ характеризует степень продольного рассеяния индикатора в фильтрационном потоке. Понятно, что наиболее надежны значения этого параметра, вычисленные по результатам экспериментов, в которых различия между минерализациями (плотностями) воды потоков носителя и индикатора или отсутствуют или пренебрежимо малы (опыты 8, 9, 18, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30 и др., табл. 5).

Ранее (см. главу 3) высказано предположение, что осевая закономерность изменения концентраций должна зависеть от

скорости фильтрационного потока. Исследование этого вопроса выполнено по данным опытов 29, 30, 31, результаты которых сравниваются на рис. 18. Как видно на рис. 18, в соответствии с уменьшением скорости происходит уменьшение концентрации во всех точках наблюдения. Отсюда вывод: чем меньше скорость, тем больше рассеяния индикатора.

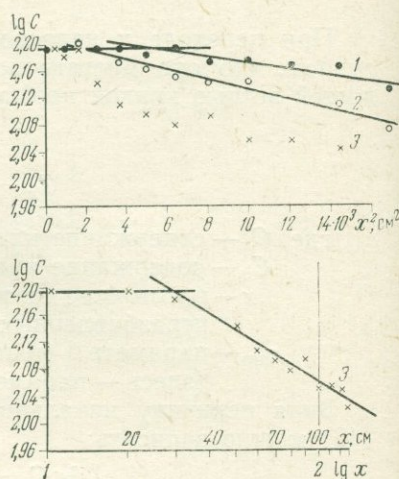
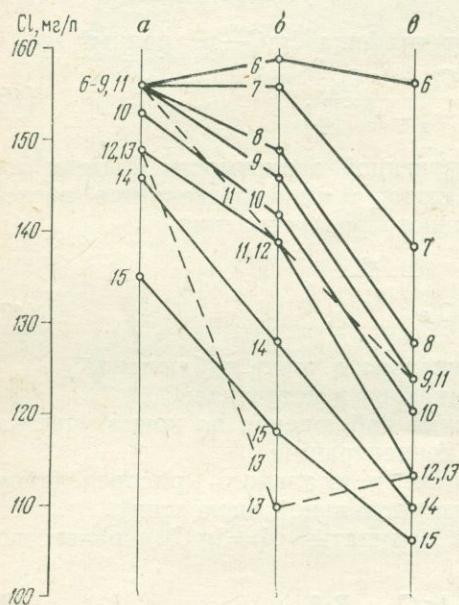


Рис. 18. Зависимость степени рассеяния индикатора от действительной скорости потока.

а — опыт 29, $v_d = 2,09 \cdot 10^{-4}$ см/с; б — опыт 30, $v_d = 1,66 \cdot 10^{-4}$ см/с; в — опыт 31, $v_d = 1,11 \cdot 10^{-4}$ см/с. 6—15 — номера пьезометров по вертикали

Рис. 19. Распределение содержания индикатора по оси ореола в зависимости от действительной скорости потока.

1 — опыт 29, $v_d = 2,09 \cdot 10^{-4}$ см/с; 2 — опыт 30, $v_d = 1,66 \cdot 10^{-4}$ см/с; 3 — опыт 31, $v_d = 1,11 \cdot 10^{-4}$ см/с

Влияние скорости выражается не только в этом, но и в изменении вида осевой зависимости, что иллюстрируется рис. 19. При $v_d \leq 1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с осевая зависимость аппроксимируется прямой в координатах $\lg C - \lg x$, а при $v_d \geq 1,66 \cdot 10^{-4}$ — в координатах $\lg C - x^2$.

При дальнейшем увеличении скорости вид осевой зависимости не изменяется, увеличивается лишь степень рассеяния, выражаемая параметром $\sigma_{пр}$. Чем больше скорость потока, тем меньше степень рассеяния. Для примера сравним данные опытов 29 и 30 (табл. 9).

Таким образом, скорость фильтрации является важным фактором, контролирующим пространственное распределение вещества в объеме рассеяния. Влияние скорости выражается в качественном и количественном изменении осевой зависимости: при малых скоростях она более простая, при скоростях $v_d \geq 1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с она усложняется и аппроксимируется нисходящей ветвью кривой нормального распределения. Количественно зависимость пространственного распределения вещества от скорости выражается правилом: чем больше скорость, тем меньше рассеяние.

В опытах 8, 9, 17 и 18 (см. табл. 5) исследовалось влияние соотношения расходов потока-носителя и потока индикатора на характер пространственного распределения. Ранее по результатам опытов 15, 17, 18 и 25, 24, 27, 28 (см. табл. 5) было показано, что от соотношения расходов зависит длина участка неизменных концентраций. По результатам опытов 8 и 9, 17 и 18 можно судить, что соотношение расходов существенно не сказывается на величине σ . Это видно на рис. 20, где графики осевого распределения вещества, построенные для случаев различных соотношений расходов, параллельны между собой, а следовательно, и величины σ близки.

Поперечное распределение индикатора в объеме рассеяния во всех опытах однотипно и иллюстрируется рис. 21. В осевом продольном сечении эпюры поперечного распределения имеют вид кривых нормального распределения. Проверка вида поперечного распределения выполнена с помощью вероятностного графика накопленных частостей, показанного на том же рисунке. Прямолинейность графика свидетельствует о непротиворечии анализируемого распределения закону нормального распределения. Очевидно, таким же будет распределение в любом направлении поперечного сечения. Следовательно, в однородной модели эпюра пространственного поперечного распределения есть гауссиан вращения.

Различия распределения индикатора в поперечных сечениях, разноудаленных от источника, выражаются величинами параметра σ_n или уклоном вероятностного графика. Чем больше удалено сечение от источника, тем больше σ_n , тем положе график (см. рис. 21).

Результаты лабораторного изучения пространственных закономерностей позволяют заключить следующее:

1) при реализации схемы миграции Б, предполагающей условие $\frac{Q_n}{Q_H} \ll 1$, формируется объем рассеяния индикатора с закономерным убыванием стабильных концентраций в продоль-

Таблица 9

№ опыта	$v_d \cdot n \cdot 10^{-4}$ см/с	$\sigma_{пр}$, см
29	2,09	208
30	1,66	148

ном и поперечном направлениях, который в соответствии с определением, данным в главе 3, можно квалифицировать как ореол рассеяния;

2) в отсутствие гравитационного эффекта закономерности пространственного распределения индикатора в объеме рассея-

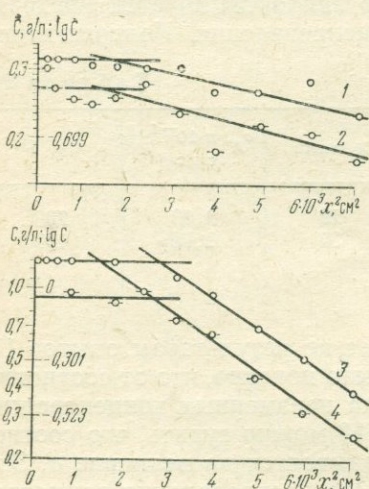


Рис. 20. Влияние соотношения расходов потока-носителя и потока-индикатора на распределение содержания индикатора по оси ореола.

1 — опыт 17, $\frac{Q_N}{Q_I} = 10,6$; 2 — опыт 18, $\frac{Q_N}{Q_I} = 21,0$; 3 — опыт 8, $\frac{Q_N}{Q_I} = 6,5$;
4 — опыт 9, $\frac{Q_N}{Q_I} = 12,2$

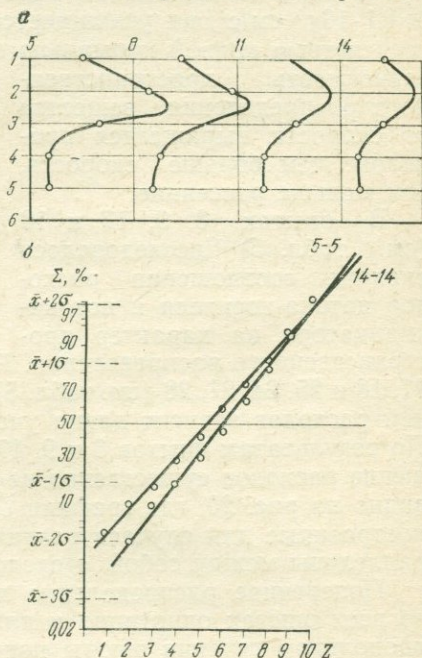


Рис. 21. Распределение содержаний индикатора в поперечных сечениях по вертикальной осевой плоскости стабильного ореола.

а — эпюры содержаний индикатора по сечениям; б — графики накопленных частостей; 5-5, 14-14 — номера сечений

ния аппроксимируются в поперечных сечениях гауссианом вращения с параметром поперечного рассеяния σ_{\perp} , возрастающим по мере удаления сечения от источника; в продольных осевых сечениях убывание концентраций в направлении потока аппроксимируется при $v_d \geq 1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с нисходящей ветвью кривой нормального распределения с параметром продольного рассеяния σ_{\parallel} , находящимся в обратной зависимости от скорости потока;

3) в головной части ореола формируется объем неизменных концентраций, протяженность которого прямо зависит от отношения $\frac{Q_N}{Q_I}$ и скорости фильтрационного потока;

4) основными факторами, контролирующими продольную и поперечную дисперсию и зональность ореола рассеяния, являются скорость потока фильтрации и соотношение расходов $\frac{Q_n}{Q_n}$.

Влияние гравитации и границ модели на форму ореола рассеяния

Ореол рассеяния изображается изолиниями содержаний элемента-индикатора в различных плоскостях сечения. В качестве оконтуривающей может быть принята изолиния, равная максимальному фоновому содержанию элемента в потоке-носителе.

Отметим, что в заданных условиях (длина фильтрационного лотка, скорость потока, соотношение расходов потока и др.) воспроизводилась только часть ореола рассеяния.

В тех случаях, когда минерализация раствора-индикатора равнялась или мало отличалась от минерализации воды потока-носителя, воспроизводился ореол рассеяния, характеризующийся конусообразной симметричной формой относительно своей оси. Вершина конуса рассеяния располагается в месте запуска индикатора.

Очень сильное влияние на форму ореола рассеяния оказывает разность между минерализацией (плотностью) воды потока-индикатора и потока-носителя. Зависимость формы ореолов рассеяния вещества от соотношения минерализации раствора-индикатора и потока-носителя исследовалась опытами 8, 10, 11, 15, 19, 20, 21, 22, 23. Минерализация раствора-индикатора обусловлена количеством хлористого натрия (см. табл. 5). В указанных опытах минерализация раствора-индикатора изменялась от 0,2 до 63,9 г/л, плотность, соответственно, от 1,00015 до 1,04275 г/см³.

Результаты опытов показывают, что минерализация раствора-индикатора влияет на распределение элемента-индикатора внутри ореола и на положение самого ореола внутри потока-носителя. В отличие от ореолов, формирующихся без участия гравитации, ореолы рассеяния, испытывающие ее действие, имеют ось, не совпадающую с вектором скорости, а направленную под углом к нему. Угол наклона оси тем больше, чем больше минерализация раствора-индикатора (табл. 10).

Табл. 10 составлена по результатам опытов, проведенных на песке с размером частиц 0,25—0,5 мм, коэффициентом фильтрации 43,5 м/сут при действительных скоростях потока (2,2—2,5) · 10⁻⁴ см/с. Эти данные позволяют заключить, что при заданных на модели условиях влияние гравитации существенно сказывается при десятикратном превышении минерализации потока-индикатора над минерализацией потока-носителя.

Минерализация раствора-индикатора, г/л	Плотность раствора-индикатора, г/см ³	Угол наклона ореола рассеяния к горизонтальной плоскости, градус
0,2	1,00015	0
0,5	1,00035	0,5
2	1,00150	8
7	1,00465	25
20,6	1,0136	44
63,9	1,04275	80

Если раствор-индикатор легче воды потока-носителя, то ореол рассеяния вещества поднимается вверх от горизонтальной плоскости, «всплывает» (опыт 23; см. рис. 17, а).

Здесь важно отметить, что во всех опытах воспроизводился ореол, как бы рассеченный пополам вертикальной плоскостью, на которой и наблюдалась картина распределения индикатора в осевом вертикальном сечении. В принятых условиях запуска индикатора по боковой стенке лотка деформирующего влияния на форму ореола эта стенка не оказывает [3].

Вторая боковая стенка лотка в проведенных опытах также не оказывала деформирующего влияния на форму ореола, поскольку индикатор не достигал этой стенки. Это условие проверялось во всех опытах определением индикатора в пробах, взятых по второй стенке лотка.

Свободная поверхность потока оказывает следующее действие на ореол рассеяния вещества. В случае равенства или близости минерализации воды обоих потоков и расположения источников на поверхности потока у стенок лотка воспроизводится $\frac{1}{4}$ часть ореола рассеяния (см. табл. 5, опыты 15 и 16). Если минерализация раствора-индикатора увеличивается до 2—7 г/л, то при положении источника также на поверхности потока, в головной части ореола рассеяния наблюдается значительная деформация, ореол здесь «подрезается» поверхностью потока.

Последующее увеличение минерализации раствора-индикатора вызывает все более и более крутое погружение ореола рассеяния. В результате верхняя граница уже не деформирует его в головной части, в этом случае здесь воспроизводится $\frac{1}{2}$ часть ореола. Однако в то же время очень значительные деформации ореола наблюдаются у нижней границы (см. рис. 17, в, опыт 19). Опытами, в которых источник индикатора размещен на глубине, внутри потока-носителя, при прочих равных условиях воспроизводилась $\frac{1}{2}$ ореола рассеяния, поскольку влияние верхней и нижней границ в этом случае исключалось (см. рис. 17, б, опыт 18).

3. Рассеяние вещества в двух- и трехмерных фильтрационных потоках

Влияние структуры гидродинамической сетки потока на рассеяние вещества исследовалось опытами 32—37 (см. табл. 5, рис. 22). Двухмерный поток исследовался серией опытов 35—37.

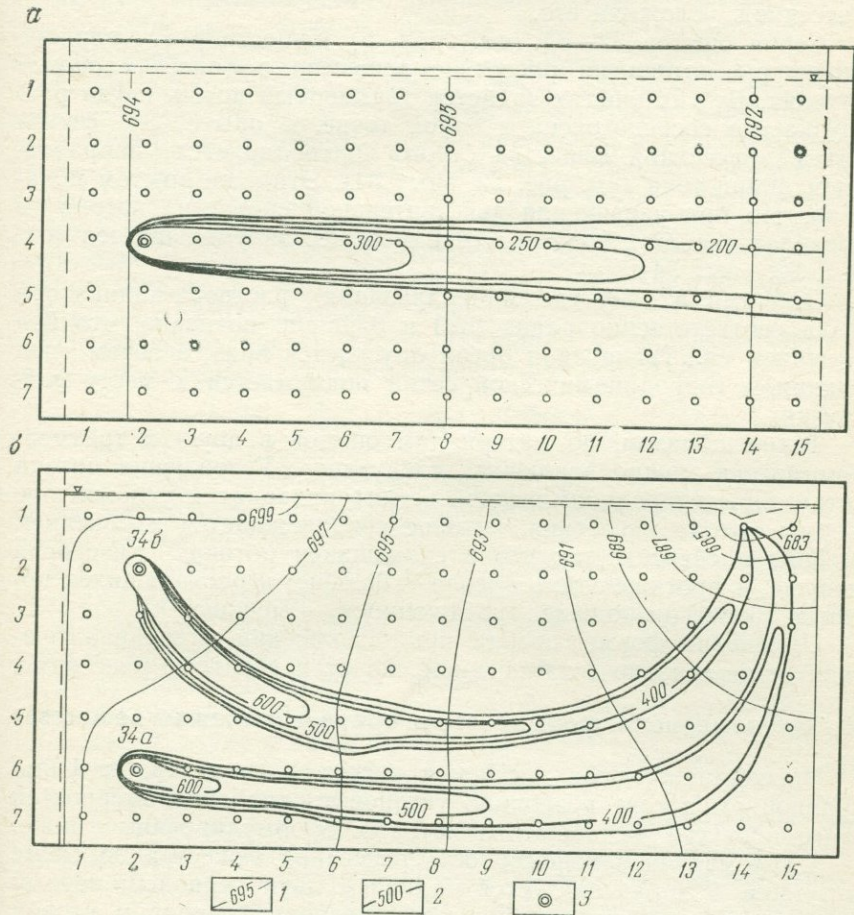


Рис. 22. Зависимость формы ореола рассеяния от структуры гидродинамической сетки.

a — опыт 35; *b* — опыт 34. 1 — изолинии равных напоров; 2 — изохлолы (мг/л); 3 — местоположение источника индикатора

В опыте 35 моделировался одномерный плоский поток, в опыте 36 — двухмерный сходящийся, в опыте 37 — двухмерный расходящийся при прочих одинаковых условиях. Угол рассеяния вещества, фиксируемый в этих опытах по флуоресценции

раствора в пределах ореола, составляет в плоском потоке (опыт 35) — 3,5—4° (см. рис. 22); в расходящемся потоке (опыт 37) — 25°; в сходящемся потоке (опыт 36) в головной части — 2,5—3°, в периферической части ореол сужается в соответствии с линиями тока и имеет форму сходящегося конуса.

Эта серия опытов свидетельствует, что изменение структуры потока приводит к значительной деформации формы объема рассеяния, усложняя его.

Серия опытов 32—34 (см. табл. 5) иллюстрирует влияние структуры потока на рассеяние вещества в более сложных случаях. В этих опытах задается трехмерный поток, когда разгрузка его сосредоточена в одной точке. В опыте 34 форма объема рассеяния вещества строго контролируется направлением линий тока (см. рис. 22, опыт 34). Этим же опытом показано, что при увеличении действительной скорости потока в пределах ореола степень рассеяния вещества уменьшается (см. рис. 22, опыт 34).

Опытами 32, 33, где минерализация раствора-индикатора была соответственно равна 62,0 и 37,9 г/л, показано, что под влиянием сил гравитации ореол опускается вниз, а затем под влиянием гидродинамической сетки поднимается к месту разгрузки.

Таким образом, по материалам опытов в двух- и трехмерном потоке можно заключить следующее. Усложнение потока (структуры гидродинамической сетки) приводит к усложнению формы ореола рассеяния, которое сопровождается изменением степени дисперсии, так что в сходящихся потоках дисперсия меньше, а протяженность ореола — больше; в расходящихся потоках дисперсия больше, протяженность — меньше.

Изменение формы ореола при усложнении гидродинамической сетки связано с изменением скорости в объеме рассеяния.

4. Закономерности формирования ореолов рассеяния вещества

Экспериментальное изучение рассеяния вещества в фильтрационном потоке позволило установить ряд закономерностей этого процесса, основные из которых сформулированы ниже.

1. Временная закономерность рассеяния вещества по схеме миграции *B* характеризуется наличием двух периодов: первый (начальный) период — время формирования ореола и второй период — время стабильного состояния ореола. По данным выполненных опытов получена экспериментальная зависимость времени формирования ореола рассеяния

$$T = T_0 + \gamma \frac{x}{v_d}, \quad (50)$$

где T_0 — начальная ордината графика $t = f(x)$, зависящая от условий поступления вещества из источника в водоносный горизонт (см. рис. 15);

γ — коэффициент, зависящий от времени прохождения передовой каймы в точке наблюдения;

x — расстояние от конца участка неразбавленных концентраций до интересующей точки;

v_d — действительная скорость потока.

Полученная эмпирическая зависимость позволяет прогнозировать время появления стабильной концентрации в любой точке на пути предполагаемого развития ореола рассеяния путем графической экстраполяции данных двух наблюдательных точек. Величины T_0 и γ аналитически не прогнозируемы.

2. Пространственные закономерности распределения вещества в ореоле на период стабильного состояния характеризуются наличием зонального ореола рассеяния, вблизи источника вещества формируется объем неизменных концентраций. В остальной части объема рассеяния происходит закономерное уменьшение содержания индикатора в направлении потока и нормально к нему. Для практических целей наибольший интерес представляет участок закономерного уменьшения содержания в направлении потока.

Проведенные эксперименты позволили установить следующую эмпирическую зависимость при $v_d \geq 1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с

$$\lg C_{x,0} = \lg C_0 - Bx^2,$$

где $C_{x,0}$ — содержание элемента-индикатора в точке, находящейся на расстоянии x от конца участка неразбавленных концентраций на оси ореола;

C_0 — содержание индикатора в пределах участка неразбавленных концентраций;

B — угловой коэффициент, зависящий от геометрии источника и скорости потока.

Полученная зависимость позволяет прогнозировать путем графической экстраполяции стабильную концентрацию вещества в любой точке в направлении вероятного развития ореола за пределами участка неразбавленных концентраций по данным опробования ореола в двух точках.

3. Формирование ореолов рассеяния и распределение стабильных концентраций в ореоле в лабораторных экспериментах может быть объяснено механизмом ветвления элементарных струек, который описан в главе 3. Механизм неравенства скоростей совместно с ветвлением оказывает заметное влияние на время формирования стабильных концентраций в точках наблюдения.

Глава 5

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Описываемые объекты исследования характеризуются сочетанием искусственных и природных факторов. Искусственными являются источники индикатора — это инженерные или естественные места складирования твердых и жидких отходов гидрометаллургических или химических производств, расположенных на поверхности земли. От мест складирования в водоносный горизонт поступает многокомпонентный поток-индикатор. Рассеяние потока-индикатора происходит в реальном водоносном горизонте в природной геохимической среде. По характеру действующих факторов и масштабам процесса такой способ исследования можно квалифицировать как натуральный эксперимент. По сравнению с математической и физической лабораторной моделью преимущество натурального эксперимента заключается в том, что он воспроизводит природные условия рассеяния при известных начальных условиях.

Для исследования объема рассеяния в натурном эксперименте используются один или сочетание нескольких индикаторов-микрокомпонентов, миграция которых происходит в однофазной приповерхностной геохимической среде.

Изучение микроколичеств индикатора в водоносном горизонте сопряжено с целым рядом неопределенностей, поэтому прежде чем приступить к непосредственному анализу закономерностей распределения микрокомпонента-индикатора необходимо оценить доступность этой задачи. С этой целью последующий анализ предваряется оценкой достоверности исходного материала, полученного на одном из двух изученных объектов.

1. Оценка достоверности гидрогеохимических построений

Известно, что достоверность гидрогеохимических построений обусловлена в основном точностью определения исследуемого признака, которая в значительной степени зависит от уровня случайных погрешностей. В существующих руководствах по методике определения микрокомпонентов приводятся нормы допустимых погрешностей, однако эти нормы получены на основе аналитических, лабораторных погрешностей. Лабо-

ракторные погрешности обычно контролируются с помощью стандартных растворов, по результатам контроля вычисляется относительная погрешность по формуле

$$\Delta_n = \frac{(C - x) \cdot 100}{C} \%, \quad (51)$$

где C — заданное содержание микрокомпонента;
 x — содержание, определяемое при контроле.

Относительные лабораторные погрешности нормируются в зависимости от класса содержания. К сожалению, очень часто в методической литературе не раскрывается статистического содержания приводимых норм.

Совершенно очевидно, что лабораторными погрешностями не исчерпываются все возможные погрешности определения микрокомпонента в целом. Имеется целый ряд дополнительных искажающих факторов, связанных с опробованием и хранением проб: сорбция микроколичеств индикатора стеклом, сорбция гидрооксидами железа, выпадающими из воды при ее аэрации, дополнительные поступления из обогащенной исследуемым микрокомпонентом взвеси и т. д. Значительные искажения возникают при опробовании скважин: погрешности, связанные с нарушением зональности в столбе воды при движении пробоотборника, погрешности за счет несовершенной герметизации пробоотборника и т. д.

Возникновение и величина этих погрешностей определяются в основном характером объекта (источник, колодец, скважина) и методикой опробования (тип пробоотборника, подготовка скважины, порядок опробования).

Следствия указанных искажений таковы, что отбираемые пробы лишь приблизительно воспроизводят истинную концентрацию вещества в данной точке, а результаты повторного опробования разными рейсами пробоотборника и даже результаты анализа проб, взятых из различных частей его, расходятся. Предлагаемые способы повышения достоверности определения путем совершенствования методики опробования и учета влияния искажающих факторов не всегда осуществимы при массовом опробования. Поэтому возникает необходимость установления уровня неизбежных погрешностей опробования, их нормирования и учета при гидрогеохимических построениях. Такой анализ можно осуществить по суммарным погрешностям.

Лабораторные погрешности и погрешности опробования составляют погрешность определения в целом или суммарную ошибку определения. Суммарные погрешности выявляются контрольным сравнением результатов анализа двух проб, отбираемых одним способом, в одном пункте, практически в один момент времени и анализируемых в одинаковых условиях. Контрольные пробы обозначаются шифрованными номерами и анализируются как рядовые. Результаты контроля шифрован-

ными пробами выражаются в виде относительной погрешности по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{ш}} = \frac{(x - y) \cdot 2 \cdot 100}{(x + y)} \%, \quad (52)$$

где x и y — определения в рядовой и шифрованной пробе. Поскольку истинное содержание здесь неизвестно, абсолютное расхождение относится к среднему между ними.

Обработка результатов контроля всех видов производится по правилам математической статистики. Анализ погрешностей и установление норм допустимых величин выполняется по выборочной совокупности погрешностей, частные значения которых вычислены указанным способом. В обработку результатов контроля входит проверка гипотез о распределении выборки, определение числовых характеристик погрешностей, анализ

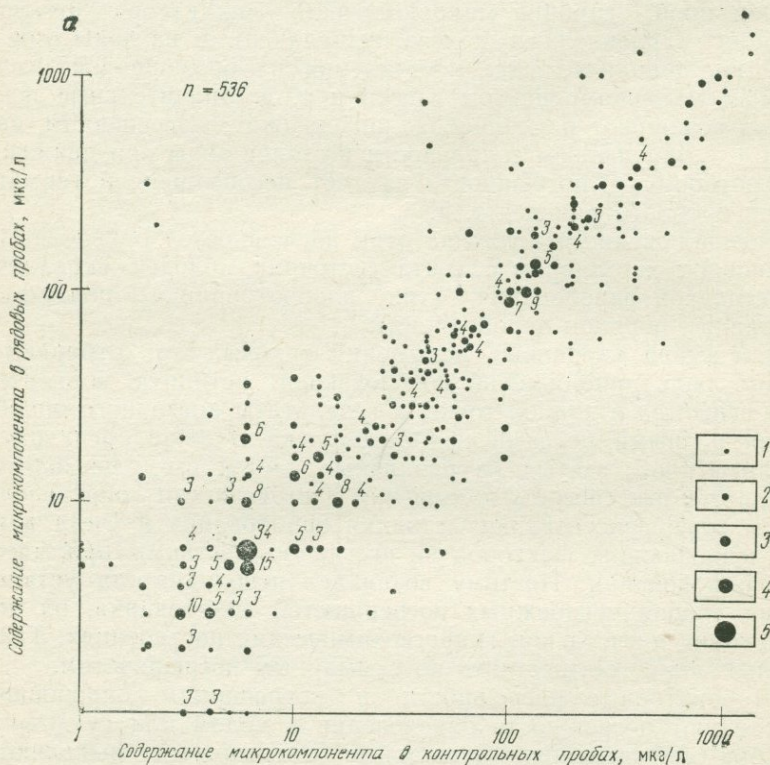
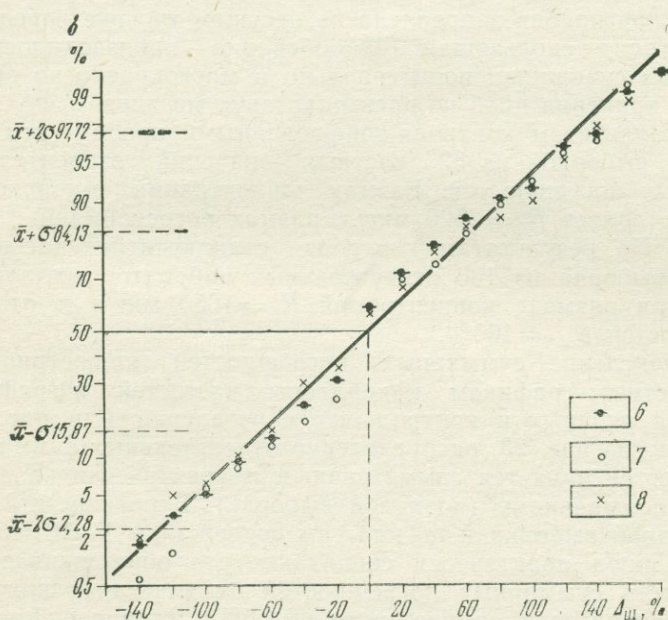


Рис. 23. График рассеяния содержаний микрокомпонента (а) и погрешностей определения
 1—4 — число определений с одинаковым результатом; 5 — число определений, для сокращенной выборки, класс содержаний 10—100 мкг/л, $n=536$; 7 — для сокращенной выборки, класс содержаний 1—3500 мкг/л, $n=536$;

структуры суммарной погрешности. Проверка гипотезы о распределении выборки позволяет обосновать наилучшие числовые характеристики. С этой точки зрения важно различать симметричные и асимметричные распределения. При симметричном распределении (нормальное, плоско- и островершинные) достаточными числовыми характеристиками являются среднеарифметическое и среднеквадратическое отклонения [55]. Наиболее наглядной графической формой представления выборок являются графики рассеяния абсолютных расхождений и вероятностные графики накопленных частостей относительных расхождений (рис. 23). С помощью последних проверяется гипотеза о распределении и вычисляются статистические оценки. Поскольку случайные погрешности разного знака равновероятны, то при достаточно больших выборках и симметричном распределении модальные значения равны нулю, имеет место симметрия относительно нуля.

При симметричном распределении выборки среднеарифметическое \bar{x} , среднеквадратическое отклонение суммарных погрешностей S и предельная погрешность p при заданной дове-



вероятностный график накопленных частостей относительных по-
микрoкомпонента (δ).

равное и больше пяти; δ — точки для полной выборки, класс содержа-
1—10 мкг/л, $n=160$; θ — для сокращенной выборки, класс содержаний
 $n=243$

рительной вероятности служат показателями точности определения микрокомпонентов.

Суммарные погрешности представляют собой итог погрешностей отдельных операций. Анализ структуры суммарных погрешностей производится по правилам сложения случайных величин. Если измеряемая величина является суммой двух других, результаты измерения которых независимы, т. е. если $x + y = z$, то

$$S_x^2 + S_y^2 = S_z^2. \quad (53)$$

По правилу квадратов слагаются все показатели точности при условии однотипности и симметрии распределений слагаемых [55]. Как показывает анализ отдельных примеров, даже в случае отклонения от однотипности распределений при небольшой асимметрии можно пользоваться указанной зависимостью без серьезных погрешностей.

Рассмотрим свойства суммарных погрешностей на примере поинтервального опробования подземных вод в скважинах.

Опробование производилось с целью изучения водного ореола рассеяния микрокомпонента. Пробы отбирались пробоотборником, состоящим из цилиндра и двух герметизирующих пробок. Нижняя пробка закреплена на несущем тросике неподвижно, верхняя — скользящая. Опробование производилось в нескольких скважинах поинтервально и многократно во времени. Срок хранения проб не превышал двух месяцев.

По результатам контроля шифрованными пробами мы располагаем выборкой из 536 частных значений относительных суммарных погрешностей. Размах концентраций микрокомпонента составляет $R_c = 3500$ мкг/л, размах погрешностей $R_\Delta = 200\%$. По результатам контроля стандартным раствором имеется выборка из 186 относительных лабораторных погрешностей при размахе концентраций $R_c = 1650$ мкг/л и размахе погрешностей $R_\Delta = 100\%$.

Распределение суммарных погрешностей иллюстрируется вероятностным графиком накопленных частостей и графиком рассеяния рядовых и контрольных определений (см. рис. 23). Как видно из рис. 23, распределение относительных суммарных погрешностей является симметричным и практически не противоречит нормальному (по целой выборке). Вероятностные графики полной выборки и по классам содержаний 1—10 мкг/л и 10—100 мкг/л практически совпадают, что обнаруживает независимость суммарных погрешностей от класса содержаний. Мода распределения равна нулю ($0 \pm 5\%$), среднеарифметическое $\bar{x} = 44\%$, среднеквадратическое $S = 58\%$, предельная суммарная погрешность при доверительной вероятности $\pm 2 S$ равна $p = \pm 120\%$.

Распределение лабораторных погрешностей зависит от класса содержаний. Среднеарифметическое лабораторных погреш-

ностей равно 20%, среднеквадратическое 25%, предел при доверительной вероятности $2S$ равен 50%. Сравним показатели суммарных и лабораторных погрешностей в табл. 11.

Таблица 11

Погрешность	Размер выборки n	Среднеарифметическое \bar{x} , %	Среднеквадратическое S , %	Предел при доверительной вероятности $\pm 2S$
Суммарная	536	44	58	120
Лабораторная	186	20	25	50
Опробования (по расчету)	—	39	53	109

Как видно, суммарная погрешность больше лабораторной по среднеарифметическому, среднеквадратическому и пределу более чем в два раза. Существенным в природе лабораторной и суммарной погрешности является зависимость первой и независимость второй от класса содержаний. Если представить суммарную погрешность как сумму лабораторной и погрешности опробования, то по правилу сложения можно вычислить числовые показатели последней. Рассчитанные по формуле (53) величины приведены в последней строке таблицы. Они оказались близкими показателям суммарной погрешности. В этом выражается свойство квадратической зависимости, при которой большее по абсолютной величине слагаемое практически определяет всю сумму. Таким образом, суммарная погрешность при данном способе исследования в основном определяется погрешностью опробования, а следовательно, и точность определения микрокомпонента определяется в основном результатами этой операции.

Полученные на конкретном цифровом материале нормы суммарной погрешности используются для оценки достоверности построений на тех же объектах, где они выявлены. Однако эти нормы можно рассматривать как общие применительно к данному способу опробования. Поскольку в суммарной погрешности преобладает погрешность опробования, которая в основном зависит от искажений, связанных с извлечением пробы, то полученные нормы можно распространить и на другие микрокомпоненты.

Определение интервалов дискретности

Значения изоконцентраций вещества при рисовке ореолов рассеяния, градации концентраций при рисовке гидрогеохимических карт, выделение классов концентраций при составлении корреляционных или вероятностных графиков не могут зада-

ваться произвольно или только по требованиям правил статистической обработки, все должно соразмеряться с точностью определения анализируемого признака. Такой подход в геологических дисциплинах является традиционным. Обычно ширина интервала принимается равной норме предельной ошибки. Однако в зависимости от заданной доверительной вероятности величина этой нормы принимается различной. Интервалы дискретности предлагается принимать равными $(0,7-2) S$, а в работе [19] — $1,3 S$. Ранее мы принимали за норму предельной погрешности величину $p=2S$. Это соответствует доверительной вероятности 0,95, следовательно, только в пяти случаях из ста суммарная ошибка может оказаться больше принятой величины.

Пользуясь полученной нормой предельной погрешности и исходя из того, что она относится к среднему между двумя определениями, находим соотношение между верхней и нижней границами интервалов дискретности

$$\frac{(x-y) \cdot 200}{(x+y)} = 120, \text{ откуда } x = 4y.$$

Значение нижней границы первого интервала принимается равным максимальному фоновому содержанию. В последующих расчетах верхняя граница предыдущего интервала является нижней границей последующего.

О достоверности прослеживания функциональных зависимостей

Если функциональная зависимость прослеживается по ограниченному числу точек, оценка достоверности особенно необходима. В этом случае решается вопрос реальности полученной зависимости определенного вида. Если же искомая зависимость прослеживается по большому числу точек, то их взаимное положение, как правило, бывает достаточным для суждения о реальности той или иной связи.

Рассмотрим правомерность заключения о наличии функциональной зависимости на примере, представленном на рис. 24.

Допустим, что прослеживание производится по данным

Таблица 12

Концентрации, по которым производится прослеживание $\frac{x+y}{2}$	Пределы возможных отклонений при норме 120%		
	X	Y	X-Y
1000	1600	400	1200
800	1280	320	960
100	160	40	120
16	29	10	19

разового опробования, т. е. каждая точка на графике есть результат анализа одной пробы. Воспользуемся найденной ранее нормой предельной суммарной погрешности ($p = \pm 120\%$) для определения пределов возможных отклонений по формуле (51). Результаты расчетов помещены в табл. 12.

Как видно из табл. 12, размах вероятных отклонений соизмерим или превышает сами анализируемые величины. Следовательно, закономерность их убывания, прослеживаемая по данным разового опробования, не может быть признана достоверной, хотя и не исключается возможность некоторого «везения», т. е. возможность получения предполагаемой зависимости и по данным одной партии проб. Разумеется, ориентироваться на такой счастливый случай не следует. Рассмотренный пример иллюстрирует общее правило: прослеживание функциональных закономерностей при данной норме погрешностей не может выполняться по данным разового опробования, для этого необходимо многократное опробование через промежутки времени, достаточные для восстановления зональности в столбе воды скважины.

Отсюда следует, что надежное установление функциональных зависимостей достигается постановкой стационарных наблюдений. Тогда каждая точка на графике является модой некоторой совокупности результатов анализа партии проб, а интервал вероятных отклонений сужается. Величина этого интервала будет зависеть от количества проб, которое можно найти из формулы доверительного интервала среднего, задавшись некоторой допустимой погрешностью. Например, для случая на рис. 24 за-

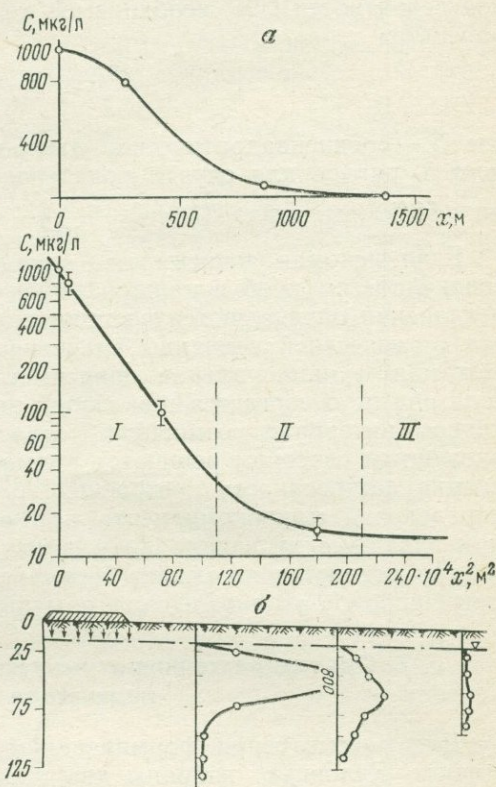


Рис. 24. Распределение элемента-индикатора в продольном (а) и поперечном (б) сечениях ореола рассеяния от хвостохранилища.

Вертикальным отрезком показан интервал вероятных погрешностей

даемса погрешностью 40%. Интервалы отклонений для каждой точки показаны вертикальными отрезками. Как видно, искомая закономерность воспроизводится при всех возможных значениях концентраций микрокомпонента в пределах заданного интервала отклонений. Таким приемом, т. е. на глаз, можно задаваться допустимой погрешностью. Для данного случая, при доверительной вероятности 0,95, необходимое количество проб находим из равенства

$$\frac{2S}{\sqrt{n}} = 40, \quad (54)$$

где S — среднее квадратическое отклонение суммарных погрешностей, равное для случая поинтервального опробования скважин 58% (см. табл. 11); $n = \frac{4 \times 58^2}{1600} = 8$.

Если искомая зависимость прослеживается по некоторым совокупностям проб в каждой точке, то интервалы возможных отклонений определяются по приведенной формуле в зависимости от известной величины среднее квадратическое отклонения. Искомая функциональная зависимость признается реальной, если она не отвергается при любой рисовке графика в установленном интервале возможных отклонений. Таким образом, указанным способом решаются прямая и обратная задачи, т. е. оценка достоверности построений по совокупности результатов определений микрокомпонента или определении числа проб при заданном интервале допустимых расхождений. Обе эти задачи решаются на основе среднее квадратического отклонения погрешностей, установленного опытным путем.

2. Ореолы рассеяния от искусственных источников индикатора

Для рассмотрения формирования ореолов рассеяния в природных условиях избраны два характерных объекта. В первом — источником индикатора является хвостохранилище, во втором — бассейн промстоков.

Природный эксперимент, связанный с хвостохранилищем, характеризуется относительно простыми условиями формирования ореола: постоянством расхода потока-индикатора, поступающего в водоносный горизонт, однородностью фильтрационных свойств порового водоносного горизонта, одномерным потоком подземных вод, сравнительно небольшим проявлением гравитационного эффекта. Природный эксперимент, связанный с бассейном промстоков, характеризуется сложными условиями: прерывистым поступлением потока-индикатора в водоносный горизонт, неоднородностью фильтрационных свойств трещинного водоносного горизонта, сложным потоком подземных вод, значительным проявлением гравитационного эффекта. Таким

образом, избранные для анализа натурные эксперименты представляют крайние случаи из возможного диапазона условий формирования ореолов рассеяния. Начальные условия в обоих случаях укладываются в схему миграции *Б*. На обоих объектах выполнены целевые исследования, позволившие обеспечить излагаемый далее анализ достоверной информацией.

Для исследования временных и пространственных закономерностей распределения индикатора использованы приемы, отработанные на лабораторных моделях ореолов.

Ореол рассеяния в относительно простых условиях формирования

Характеристика потока-носителя, источника и потока-индикатора. Поток-носитель представляет собой поток подземных вод пролювиального валунно-галечного водоносного горизонта с песчано-глинистым заполнителем. Мощность водоносного горизонта h изменяется в пределах 50—150 м, средняя мощность $h_{\text{ср}}=100$ м. Глубина свободного уровня подземных вод (мощность зоны аэрации) изменяется в пределах 20—40 м. Уклон грунтового потока I на участках источников индикатора равен 0,01 (рис. 25). Коэффициент фильтрации валунно-галечника в среднем $k_{\text{ср}}=25$ м/сут, водоотдача μ изменяется в пределах 0,2—0,25. Действительная скорость при пористости $n=0,2$ равна $v_{\text{д}}=1,25$ м/сут. В разрезе водоносный горизонт характеризуется относительно равномерной водопроницаемостью, представление о которой дает кривая действительной скорости, полученная по данным резистивиметрии (см. рис. 25).

Основное питание поток подземных вод получает далеко за пределами искусственных источников индикатора. Питание происходит за счет поглощения поверхностных вод в верхней части конуса выноса.

Расход потока подземных вод определяется по формуле Дарси

$$Q = k \cdot h \cdot I \cdot B,$$

где $k=25$ м/сут; $h=100$ м; $I=0,01$; B —ширина потока, принятая равной ширине источника индикатора по фронту потока-носителя; $B=600$ м.

Таким образом, $Q=25 \cdot 100 \cdot 0,01 \cdot 600 = 15\,000$ м³/сут.

Общая минерализация подземных вод находится в пределах 0,2—2 г/л. Вода гидрокарбонатно-сульфатного магниево-кальциевого типа. Фоновое содержание микрокомпонента в подземных водах в среднем 6 мкг/л, а в пределе $\bar{x}+2\sigma$ равно 20 мкг/л.

Хвостохранилище функционировало к моменту постановки данных исследований в течение 12 лет. Его размеры (на момент изучения) $600 \times 350 \times 15$ м; площадь основания $F=135\,000$ м².

Поток-индикатор представляет жидкую фазу хвостохрани-

лица. Фильтрация из него площадная, по всей площади основания. Расход потока-индикатора $Q_{\text{и}}$ определяется как разность подаваемой на хвостохранилище и возвращаемой жидкой фазы. Эта разность равна в среднем $Q_{\text{и}}=1100 \text{ м}^3/\text{сут}$. Расход потока-

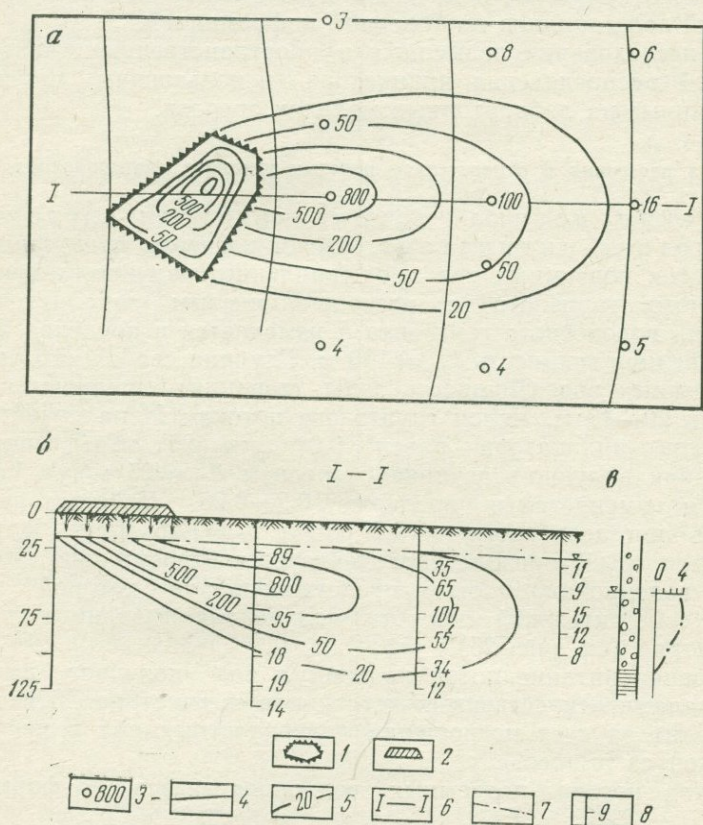


Рис. 25. Ореол рассеяния элемента-индикатора от хвостохранилища:

a — в плане; *б* — в разрезе; *в* — по глубине. 1 — границы хвостохранилища; 2 — хвостохранилище в разрезе; 3 — скважина и содержание микрокомпонента в водоносном горизонте; 4 — гидроизогипсы; 5 — изолинии содержания микрокомпонента; 6 — линия разреза; 7 — уровень подземных вод; 8 — место отбора пробы воды в скважине и содержание индикатора

индикатора в 14 раз меньше естественного расхода потока подземных вод в полосу, занятой источником индикатора.

Концентрация микрокомпонента-индикатора в источнике C_0 неравномерная. Представление о ее распределении дает карта изоконцентраций индикатора в жидкой фазе в теле хвостохранилища (рис. 26). Как видно, изолиния максимальной концентрации $C_0=1000 \text{ мкг/л}$ замыкается в центральной части источника вокруг прудков-отстойников жидкой фазы. Внешний кон-

тур обводненного объема хвостохранилища описывается изолинией $C_0=50$ мкг/л, средневзвешенная по площади концентрация $C_{0,ср}=100$ мкг/л. Общая минерализация потока-индикатора в водоносном горизонте 5—9 г/л.

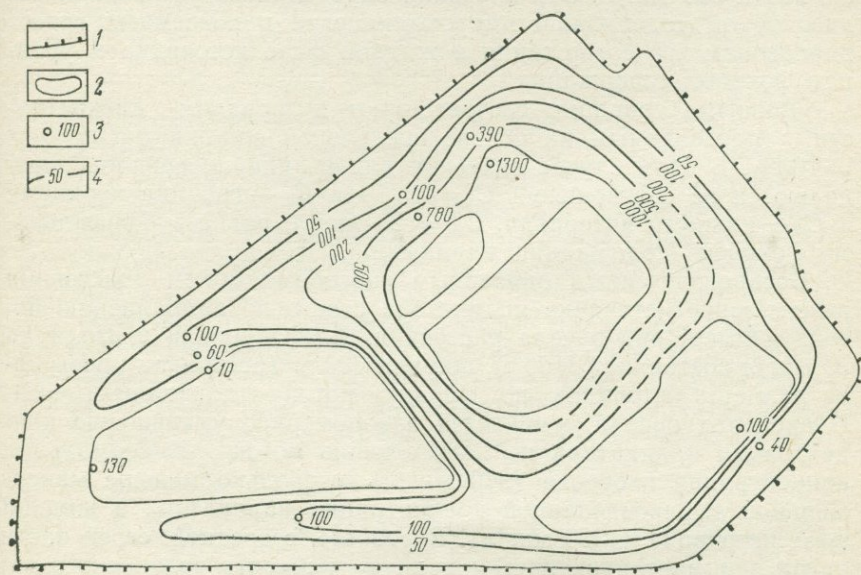


Рис. 26. Распределение элемента-индикатора в воде хвостохранилища (источник индикатора).

1 — границы хвостохранилища; 2 — контуры прудков; 3 — скважина и содержание в ней элемента-индикатора; 4 — изолинии содержаний элемента-индикатора

Прослеживание пространственных закономерностей изменения концентрации индикатора в потоке подземных вод. Исследование закономерностей рассеяния индикатора в потоке подземных вод производилось путем бурения скважин на участках водоносного горизонта, примыкающих к источникам индикатора, и в теле хвостохранилища; оборудования этих скважин фильтрами для поинтервального опробования и проведения стационарных наблюдений за изменением концентраций индикатора и факторами, контролирующими эти изменения в течение двух лет.

Особенности этого объекта заключаются в значительном превышении расхода потока-носителя $Q_n=15000$ м³/сут над расходом потока-индикатора $Q_n=1100$ м³/сут. Это начальное условие приближает изучаемый ореол к природным ореолам, формирующимся от рудных источников индикатора.

Пространственные закономерности распределения микрокомпонента, выявленные путем многократного поинтервального

опробования, видны на рис. 25. Карты и разрезы ореолов являются осевыми сечениями, построенными по направлениям наибольшего удаления от источника максимальных концентраций микрокомпонентов. Для построений избраны изолинии 20, 50, 200 и 500 мкг/л. Эти значения определялись установленным диапазоном содержаний микрокомпонента в подземных водах, диапазоном его содержания в жидкой фазе источника и уровнем фоновых содержаний.

Принятые градации соответствуют интервалам дискретности, определяемым на основе предельной ошибки $p=1,7 S=100\%$. В этом случае значения для границ интервалов определяются из соотношения $C_x=3C_y$, где C_x — граница верхнего, а C_y — нижнего интервала. $C_{y_1}=20$ мкг/л, равна максимальному фоновому содержанию индикатора.

Воспроизведенный описанным способом объем рассеяния развит ниже источника индикатора строго по направлению потока и имеет вид ореола рассеяния. Длина ореола в изолинии 20 мкг/л составляет 1100 м, ширина 700 м (несколько превышает размеры источника по фронту потока подземных вод). В пределах ореола отмечается закономерное уменьшение концентрации индикатора по направлению потока. Максимальная концентрация в ореоле (970 мкг/л), несколько меньше максимальной зафиксированной концентрации индикатора в жидкой фазе источника (1300 мкг/л). В разрезе, в средней своей части ореол занимает практически полную мощность водоносного горизонта в изолинии 20 мкг/л.

Как видно из рис. 24, осевая закономерность уменьшения концентрации индикатора по направлению потока напоминает ветвь кривой нормального распределения. Чтобы убедиться в этом, спрямляем эту зависимость с помощью записи уравнения нормального распределения в виде уравнения прямой $\lg C=A-Bx^2$.

Прямолинейность графика прослеживания концентрации индикатора по расстоянию в координатах $\lg C-x^2$ есть признак того, что исследуемая зависимость аппроксимируется нисходящей ветвью кривой нормального распределения. График состоит из трех участков (см. рис. 24): участок I проведен по трем точкам, удовлетворительно описывается уравнением нормального распределения $\lg C=A-Bx^2$, участок III ($C=\text{const}$) отвечает области постоянных средних фоновых концентраций и участок II переходный, асимптотический.

Оценим достоверность построения такого графика. График построен по результатам многократного опробования, причем для построения избран период относительно стабильного поступления индикатора из источника и стабильного положения уровня водоносного горизонта. Такие интервалы за двухлетний период наблюдений представлены по различным скважинам количеством проб от 6 до 16; чаще всего — это 10 проб. Распо-

лага величиной среднеквадратического суммарных погрешностей определения микрокомпонента ($S=58\%$), рассчитаем интервал вероятных отклонений концентраций индикатора в каждой точке при оценке ее выборкой из 10 проб при доверительной вероятности 0,95

$$\frac{2S}{\sqrt{n}} = 37\%.$$

Как видно, рисовка графика не может быть иной и с учетом возможных отклонений в рассчитанном интервале. Следовательно, осевая закономерность изменения концентрации индикатора, действительно, с достаточной для практики точностью представляется нисходящей частью кривой нормального распределения, асимптотически стремящейся к среднефоновой концентрации.

Известно, что важнейшим параметром кривой нормального распределения является среднеквадратическое. В данном случае среднеквадратическое нисходящей ветви, выраженное в линейных единицах, является удобной характеристикой осевой дисперсии. Определим его по графику на рис. 24 и по формуле (49)

$$B = \frac{1}{70 \cdot 10^4}; \quad \sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1}{4,6B}} = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^4}{4,6}} = 390 \text{ м.}$$

Поперечная закономерность изменения концентраций индикатора (см. рис. 24) близка полной кривой нормального распределения. В этом случае среднеквадратическое будет показателем поперечной дисперсии $\sigma_{\text{п}}$. Этот показатель возрастает с удалением сечения от источника индикатора. Результатом этого является заметное расширение ореола в направлении потока подземных вод.

Временные закономерности изменения концентрации индикатора в потоке подземных вод. Исследование ореола производилось по истечении 12-летнего периода его существования. Следовательно, явления, характерные для периода становления ореола, оказались недоступными для изучения. В последующий двухлетний период прослеживались только те временные закономерности, которые были вызваны факторами, действовавшими в период наблюдений. К ним относятся изменения в режиме источника индикатора и водоносного горизонта.

В периоды стабильного режима источника индикатора и водоносного горизонта наблюдались практически неизменные во времени концентрации индикатора во всех скважинах в пределах ореола (рис. 27). Из этого следует, что при постоянном расходе и концентрации потока-индикатора и неизменном уровне водоносного горизонта пространственные закономерности

распределения концентраций индикатора в ореоле неизменны во времени.

Рассмотрение характера изменения концентраций индикатора в зависимости от колебаний уровня подземных вод позволило выделить четыре типа связи. В целях объективности по каждой из представленных скважин временная закономерность прослеживается по максимальной и минимальной концентрации индикатора.

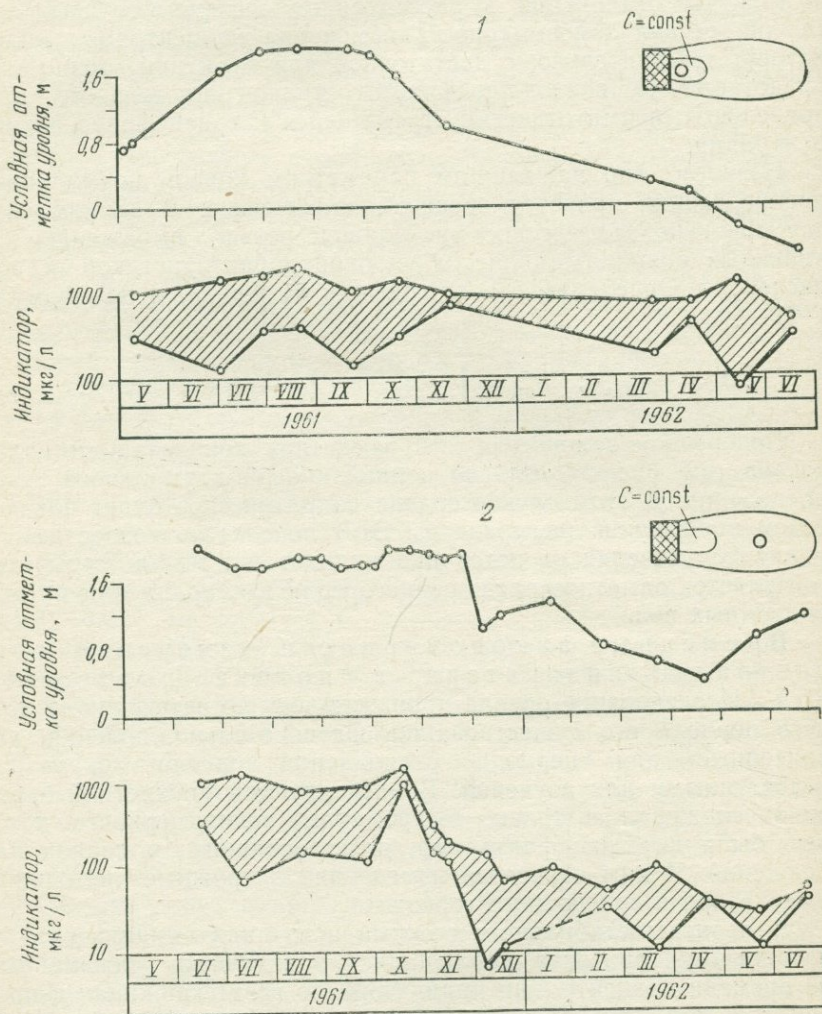
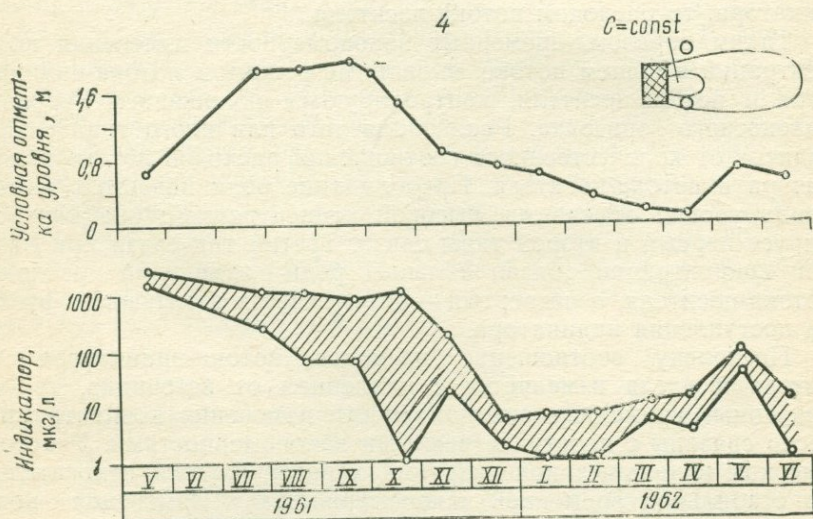
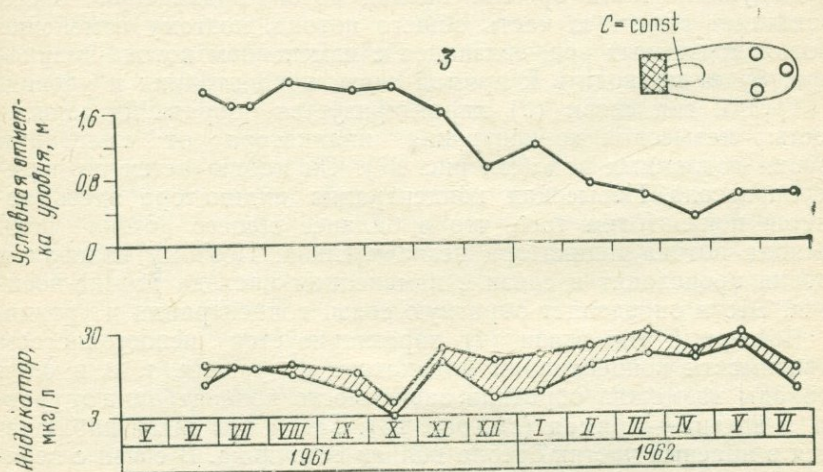


Рис. 27. Изменение уровня воды в скважине и

Первый тип связи (1) характеризуется независимостью постоянно высоких концентраций индикатора от колебания уровня подземных вод (см. рис. 27). Он отмечается в осевой части ореола, прилегающей к источнику индикатора. Строение этой части ореола почти целиком определяется режимом потока-индикатора. По существу это участок постоянных начальных концентраций, который не проявляется на графиках $\lg C-x^2$ лишь в связи с редкой сетью наблюдательных скважин. Таким



содержания в ней элемента-индикатора во времени

образом, бóльшая зависимость этой части ореола от режима потока-индикатора обуславливает отсутствие видимой связи с режимом водоносного горизонта.

Второй тип связи (2) характеризуется прямой зависимостью высоких концентраций индикатора от колебаний уровня подземных вод, т. е. при повышении уровня концентрация увеличивается, а при понижении — уменьшается (см. рис. 27). Он наблюдается для осевой, но более удаленной (по сравнению с предыдущей) части ореола. Расход потока-индикатора здесь составляет заметную часть общего потока, поэтому изменение уровня подземных вод, связанное с изменением потока-индикатора, будет приводить к прямой связи концентрации и уровня.

Третий тип связи (3) характеризуется обратной зависимостью невысоких концентраций индикатора от колебания уровня подземных вод (см. рис. 27). Он наблюдается по периферии ореола. Невысокая концентрация индикатора здесь является показателем того, что в балансе общего потока роль расхода потока-индикатора незначительна. Поэтому колебания уровня происходят в связи с изменением расхода потока-носителя. Это и определяет обратную связь концентрации и уровня.

Четвертый тип связи (4) характеризуется непостоянством зависимости концентрации индикатора от уровня, т. е. в одни периоды возможна обратная зависимость концентрации от уровня, в другие — прямая (см. рис. 27). Такой тип связи наблюдается в краевых частях ореола вблизи источника. В связи с переключением во времени очагов инфильтрации режим этих участков в отдельные периоды определяется то расходом потока-индикатора, то расходом потока-носителя.

Таким образом, временные закономерности изменения концентраций в общем потоке, вызванные режимом потока-индикатора и потока-носителя, контролируются положением уровня водоносного горизонта. Реализация того или иного типа связи зависит от количественного соотношения расходов потока-индикатора и потока-носителя. Преобладание роли первого в изменении уровня отмечается высокой концентрацией: оно контролирует первый и второй типы связи. Третий тип связи при низкой концентрации обязан бóльшей роли изменений расхода потока-носителя, а четвертый — определяется изменением фронта поступления индикатора.

Поскольку соотношение расходов потока-индикатора и потока-носителя изменяется с удалением от источника, то и описанные временные закономерности изменения концентраций тесно связаны с пространственными закономерностями. Участок высоких начальных концентраций характеризуется относительно стабильной временной закономерностью. Изменения концентрации индикатора возможны здесь за счет ощутимого изменения начальной концентрации в источнике. Участок высоких концентраций в осевой части ореола характеризуется менее

стабильной временной закономерностью. Изменения концентрации индикатора происходят здесь, как правило, за счет колебаний расхода и начальной концентрации потока-индикатора. Наименее стабильными являются периферийные участки ореола. Временные изменения в области относительно низких концентраций индикатора происходят вследствие изменения расхода потока-индикатора и потока-носителя, а также вследствие изменения начальной концентрации индикатора и фоновой — в потоке-носителе.

Постоянство во времени распределения концентраций внутри объема рассеяния объяснимо, оно непосредственно вытекает из свойств модели случайных блужданий [61] и подтверждено данными лабораторных экспериментов (см. главу 4). Но установленная натурным экспериментом стабильность нижней границы ореола, свидетельствующая об отсутствии продвижения вещества вниз по потоку, с этих позиций не объяснима и требует иного доказательства. Поэтому целесообразно воспользоваться простейшими балансовыми расчетами. Предметом таких расчетов является определение конечной концентрации вещества в некотором, достаточно удаленном от источника индикатора сечении объема рассеяния. В этом сечении вещество распространяется на всю мощность водоносного горизонта, которая определяет вертикальный размер сечения. В качестве минимальной ширины сечения условно принимается размер источника индикатора по фронту потока-носителя. Допускается, что в этом сечении вещество распределено относительно равномерно. Реальная эпюра распределения вещества в поперечных сечениях объема рассеяния определяется, как мы уже убедились, площадью под кривой нормального распределения. В значительно удаленном сечении реальная сложная эпюра весьма сглажена (см. рис. 24) и может быть приведена к простейшей равновеликой прямоугольной эпюре, а переменная в сечении концентрация — к приведенной средней величине. Эта величина условно названа конечной, так как в данном сечении как бы достигается предел разбавления исходной концентрации вследствие распределения вещества по всей мощности водоносного горизонта. Основное уравнение баланса вещества (без учета сорбции и фонового содержания его в подземных водах) будет иметь вид (для условия $Q_{\text{и}} \ll Q_{\text{н}}$)

$$C_{0,\text{ср}} \cdot Q_{\text{и}} = C_x \cdot Q,$$

где $C_{0,\text{ср}}$ — средневзвешенная концентрация микрокомпонента в источнике индикатора;

$Q_{\text{и}}$ — расход потока-индикатора;

C_x — средняя концентрация в сечении площадью $F = h \cdot B$ (h — мощность водоносного горизонта, B — размер источника индикатора по фронту потока);

Q — суммарный расход потока через это сечение.

Балансовое уравнение с учетом фонового содержания индикатора в потоке-носителе будет иметь несколько иной вид для тех же условий

$$C_{\phi} \cdot Q_{\text{н}} + C_{0, \text{ср}} \cdot Q_{\text{и}} = C_x (Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}),$$

откуда

$$C_x = \frac{C_{\phi} \cdot Q_{\text{н}} + C_{0, \text{ср}} \cdot Q_{\text{и}}}{Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}}. \quad (55)$$

Произведем расчет условной конечной концентрации для описанного ореола от хвостохранилища при известных приведенных ранее исходных данных: $C_{\phi} = 6$ мкг/л; $Q_{\text{н}} = 15\,000$ м³/сут; $C_{0, \text{ср}} = 100$ мкг/л; $Q_{\text{и}} = 1100$ м³/сут; $C_x = \frac{6 \cdot 15\,000 + 100 \cdot 1100}{15\,000 + 1100} = 12$ мкг/л.

Полученная величина условной конечной концентрации выше средней фоновой в потоке подземных вод (6 мкг/л), но меньше максимальной фоновой (20 мкг/л). Таким образом, концентрация индикатора в конце фиксируемого ореола практически не отличается от фона. При таком соотношении условной конечной и фоновой концентрации, т. е. по достижении предела фиксируемых концентраций, над уровнем фона возникают квазистационарные ореолы рассеяния вещества. Уменьшение концентрации вещества вниз по потоку происходит и за пределами нижней границы ореола, но в асимптотической, практически не фиксируемой области.

Таким образом, балансовые расчеты позволяют получить условную конечную концентрацию вещества в сечении, в котором вещество распределяется по всей мощности водоносного горизонта. Условная конечная концентрация служит показателем характера ореола. Если полученная концентрация соизмерима с фоновой, ореол, распространившись на всю мощность водоносного горизонта, далее практически не фиксируется; если же условная конечная концентрация получится существенно больше фоновой, ореол будет прослеживаться и далее. Условная конечная концентрация, определяемая балансовым расчетом, служит, таким образом, косвенным показателем протяженности ореолов.

Принимая гидрогеологические параметры водовмещающих пород и напорный градиент подземного потока на участке рассеяния постоянными, получим на основе уравнения (55) следующее соотношение

$$C_{0, \text{ср}} \cdot f = C_x \cdot F, \quad (56)$$

где F и f — площади сечения соответственно суммарного потока и потока-индикатора.

Применительно к природным объектам: месторождениям, рудопроявлениям и проявлениям минерализации рудного веще-

ства, как правило, имеет место соотношение $f \ll F$. Следовательно, природные ореолы — это ограниченные по протяженности квазистационарные образования.

Взаимоотношение между различными компонентами в ореоле. Искусственный источник описываемого ореола поставляют в водоносный горизонт многокомпонентный индикатор. Изучение взаимоотношения различных компонентов индикатора в ореоле представляет известный интерес с точки зрения познания механизма рассеяния. В данном случае в качестве вспомогательного компонента избран макрокомпонент-спутник. Размах его содержания в ореоле составляет около 4000 мг/л, содержание в источнике — порядка 5000 мг/л. Вспомогательный компонент, как и основной, поступает и мигрирует в водоносном горизонте в анионной форме. Необходимый диапазон концентраций основного и вспомогательного компонента набран по одной скважине, находящейся в головной части ореола. Результаты сопоставления представлены в виде графика на рис. 28. Как видно, между содержанием микрокомпонента (в мкг/л) и содержанием макрокомпонента (в мг/л) имеет место линейная зависимость. Эта зависимость получена при условии, что оба компонента имеют общий источник.

Поскольку эти компоненты мигрируют в анионной форме, возможность сорбционного убывания их из раствора исключается. Следовательно, факторы рассеяния основного и вспомогательного компонента являются общими. В результате мы наблюдаем линейную зависимость между этими компонентами.

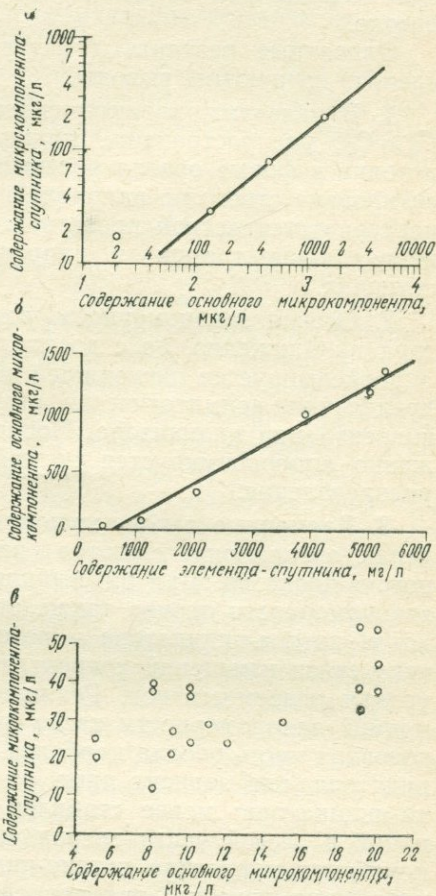


Рис. 28. Взаимосвязь между содержанием в воде элемента-индикатора (основной компонент) и сопутствующего элемента.

а, б — ореолы рассеяния; в — ареал рассеяния

Таким образом, наличие линейной зависимости между двумя компонентами в ореоле есть показатель общности источника и основного фактора рассеяния. Для прослеживания связи между двумя компонентами необходим представительный диапазон концентраций по одному из них. Этот диапазон может быть набран по одной или по нескольким скважинам в ореоле.

Описанные результаты натурального эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

1. В условиях, характеризуемых неравенствами $Q_{II} \gg Q_{II}$ и $C_0 \gg C_{ф}$, распространение индикатора в потоке-носителе происходит в форме ореола рассеяния, большая ось которого ориентирована строго по направлению потока. Строение ореола характеризуется четкой пространственной закономерностью изменения концентрации в направлении потока и в поперечных сечениях.

2. Осевая закономерность изменения концентрации индикатора приближенно, но с достаточной для практики точностью аппроксимируется нисходящей ветвью кривой нормального распределения, асимптотически стремящейся к средней фоновой концентрации индикатора. Поперечная закономерность приближенно аппроксимируется полной формой кривой нормального распределения.

3. Временные закономерности изменения индикатора в пределах ореола определяются режимом потока-индикатора и потока-носителя. При их стабильном режиме пространственные закономерности ореола также стабильны. При колебаниях расходов потока-индикатора и потока-носителя имеют место три типа связи изменений концентрации индикатора с колебаниями уровня подземных вод. Реализация того или иного типа временной закономерности тесно связана с зональностью ореола: головная часть ореола наиболее стабильна по концентрации индикатора, она зависит лишь от начальной концентрации потока-индикатора; менее стабилен участок повышенных концентраций в осевой части ореола, он зависит от начальной концентрации и расхода потока-индикатора; еще менее стабильна периферия ореола, она зависит от концентрации и расходов как потока-индикатора, так и потока-носителя.

4. В условиях ореола индикатор находится в растворе в форме анионных комплексов. Участие сорбции в уменьшении концентрации потока-индикатора в этих условиях практически исключается.

5. При простом конвективном переносе индикатора, игнорируя его рассеяние, можно было ожидать появление повышенных концентраций на расстояниях, определяемых временем действия источника $t = 12 \text{ лет} = 4400 \text{ сут}$ и действительной скоростью потока $v_d = 1,25 \text{ м/сут}$ $x = v_d \cdot t = 1,25 \cdot 4400 = 5500 \text{ м}$.

Фактически ореол в изолинии 20 мкг/л (на уровне максимальных фоновых концентраций) прослеживается на значительно меньшем расстоянии 1100—1500 м. Из этого следует, что движение индикатора в водоносном горизонте сопровождается сильным рассеянием (без участия сорбции), в результате которого концентрации индикатора задолго до прихода в расчетную точку уменьшаются до величин, практически не отличимых от фоновых концентраций.

6. Единство источника и основного фактора рассеяния является причиной наличия прямой линейной зависимости между различными компонентами потока-индикатора в ореоле рассеяния.

Ореол рассеяния в сложных условиях формирования

Характеристика потока-носителя, источника и потока-индикатора. Поток-носитель представляет собой поток подземных вод в эффузивах. Эффузивы с поверхности сильно выветрелые и трещиноватые, с глубиной степень трещиноватости уменьшается. Слаботрещиноватые породы, принятые за относительный водоупор, встречены на глубине 60—120 м. Мощность водоносного горизонта изменяется в пределах 55—115 м, средняя мощность равна 85 м. Глубина залегания свободного уровня подземных вод (мощность зоны аэрации) изменяется от 0 до 12,7 м в периоды межени. В паводковый период повышение уровня составляет 0,5—8,5 м. Водоносный горизонт связан с водоемом на севере и дренируется рекой на юге (рис. 29). Основное питание поток подземных вод получает за счет инфильтрации атмосферных осадков. Питание подземных вод по площади неравномерное. Значительное количество осадков поступает в поток на участках выхода эффузивов на поверхность. Расположение основных участков питания показано на рис. 29, а. Они характеризуются повышением уровня подземных вод на 5—8,5 м в периоды снеготаяния и выпадения большого количества осадков.

В уровнежном режиме подземных вод устанавливаются определенные закономерности в годовом и многолетнем разрезе. В течение года резкий подъем уровня наблюдается в середине апреля — начале мая, в мае — июле уровень остается высоким, а с августа и до марта следующего года происходит медленное снижение его.

В многолетнем разрезе отмечается чередование циклов лет высокого и низкого стояния уровня подземных вод, отображающих цикличность выпадения годовых сумм атмосферных осадков в районе.

Структура потока на участке определяется периодичностью питания и уровнями в реке и в водоеме. В периоды низкого положения уровня подземных вод водоем располагается на водо-

разделе, поток от водоема направляется к реке (см. рис. 29, а). Уклон потока в меженные периоды изменяется в пределах 0,0023—0,0030. При высоком положении уровня подземных вод водораздел смещается к югу от водоема, поток имеет сложную структуру (рис. 29, б). В такие периоды на участке между

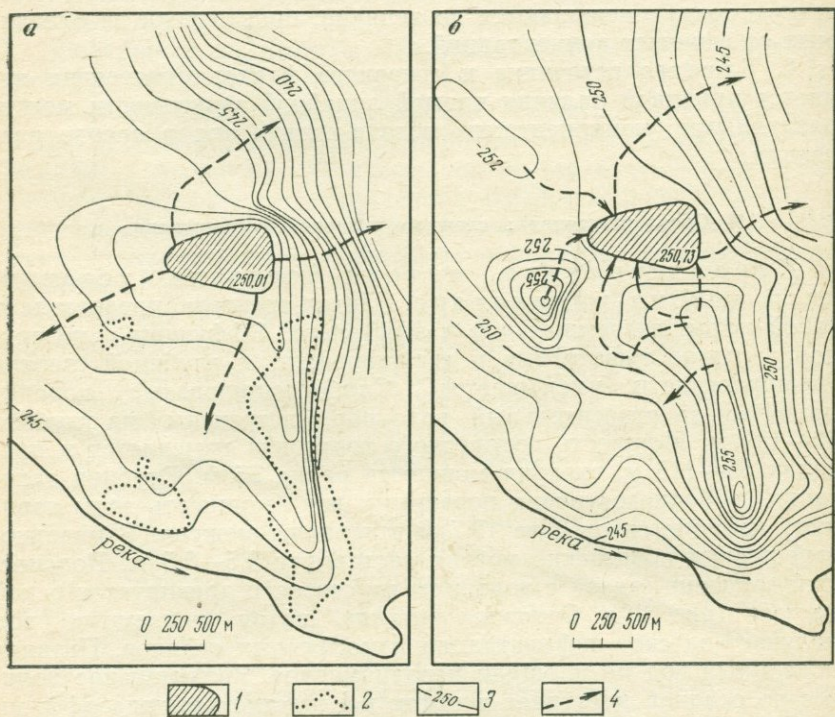


Рис. 29. Структура потока подземных вод при низком (а) и высоком (б) положении уровня.

1 — водоем-хранилище; 2 — участки питания подземных вод; 3 — гидроизогипсы; 4 — направление потока подземных вод

местным водоразделом и водоемом поток направлен к водоему, южнее водораздела — к реке.

Уклон потока на участке между местным водоразделом и рекой достигает величины 0,01. Водопроницаемость девонских эффузивов на участке изменяется от 7 до 70 м²/сут. В разрезе водоносный горизонт характеризуется уменьшением коэффициента фильтрации с глубиной. Большая водопроницаемость пород фиксируется в интервале глубин 15—60 м, ниже она постепенно затухает. Водоотдача в верхней части горизонта составляет 0,017—0,06, преобладают значения 0,02, в интервале глубин 30—50 м водоотдача в среднем равна 0,002. Расход

потока подземных вод Q_n определялся по формуле Дарси. На участке вблизи реки, где поток имеет постоянное направление, в меженные периоды среднее значение водопроницаемости km равно $40 \text{ м}^2/\text{сут}$, уклон потока I равен $0,0028$, ширина потока B , определенная как средняя по крайним линиям тока, равна 2600 м . Таким образом, $Q_n = 40 \cdot 0,0028 \cdot 2600 = 300 \text{ м}^3/\text{сут}$.

В периоды высокого положения уровня подземных вод с участка местного питания, расположенного к юго-востоку от водоема, в поток поступает $440 \text{ м}^3/\text{сут}$ чистых вод из расчета $Q_n = 20 \cdot 2000 \cdot 0,011 = 440 \text{ м}^3/\text{сут}$, где $km = 20 \text{ м}^2/\text{сут}$, $B = 2000 \text{ м}$, $I = 0,011$. На участке вблизи реки расход потока в периоды высокого положения уровня равен $Q_n = 40 \cdot 0,01 \cdot 2600 = 1040 \text{ м}^3/\text{сут}$, где $km = 40 \text{ м}^2/\text{сут}$, $I = 0,01$, $B = 2600 \text{ м}$. Таким образом, расход потока-носителя в зависимости от структуры потока изменяется от 300 до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Средний расход потока за многолетний период составляет $650 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Действительная скорость потока, определенная по продвижению нестабильного индикатора в интервале глубин $40\text{--}60 \text{ м}$, составляет $0,7\text{--}1,2 \text{ м/сут}$. Общая минерализация подземных вод равна $0,1\text{--}0,29 \text{ г/л}$. Вода гидрокарбонатная натриевая. Индикатор в подземных водах практически отсутствует.

Источником индикатора является естественный водоем, в который удаляются промышленные отходы. Водоем использовался как хранилище промышленных отходов к моменту постановки исследований уже в течение 22 лет. В соответствии со структурой потока поступление индикатора в южном направлении началось за 13 лет до описываемого момента. На момент исследования водоем имеет площадь 320 тыс. м^2 .

Поток-индикатор представляет собой водный раствор солей. Фильтрация раствора из водоема происходит по всей его площади.

Расход потока-индикатора определялся балансовыми расчетами. Поступление индикатора в поток прерывистое и зависит от соотношения уровней в водоеме и в горизонте подземных вод. При самом низком уровне подземных вод, отмеченном за 10 лет наблюдений, расход потока-индикатора составил $175 \text{ м}^3/\text{сут}$; при высоком положении уровня подземных вод поток-индикатор в поток-носитель не поступает. Средний расход потока-индикатора, определенный по 10 годам наблюдений, составляет $45 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Среднегодовой расход потока-индикатора в $14,5$ раза меньше среднегодового расхода потока-носителя или естественного расхода потока подземных вод, т. е. $\frac{Q_n}{Q_n} = \frac{650}{45} = 14,5$.

Поток-индикатор является многокомпонентным раствором. Прослеживание основных закономерностей производится по стабильному аниону, содержание которого в водоеме равно

41—54 г/л. Кроме того, раствор содержит стабильные компоненты в макро- и микроколичествах, которые мигрируют в катионной или анионной форме, и нестабильные компоненты, которые мигрируют в анионных или нейтральных комплексах.

Общее содержание солей в потоке-индикаторе около 70 г/л. Плотность раствора 1,08 г/см³. Основной индикатор мигрирует в анионной форме и не сорбируется суглинистым экраном водоема.

Прослеживание пространственных закономерностей изменения содержания индикатора в фильтрационном потоке. Исследование закономерностей формирования, строения и динамики ореолов рассеяния индикатора в потоке подземных вод производилось путем бурения скважин (50) на участке предполагаемого развития ореола, оборудования этих скважин для поинтервального опробования и проведения стационарных наблюдений в течение 10 лет за изменением содержания индикатора и факторами, влияющими на эти изменения. Условия формирования ореола определяются: превышением расхода потока-носителя ($Q_n = 650$ м³/сут) над расходом потока-индикатора ($Q_{II} = 45$ м³/сут); значительной плотностью раствора потока-индикатора, сложной гидродинамической сеткой потока и изменением ее во времени.

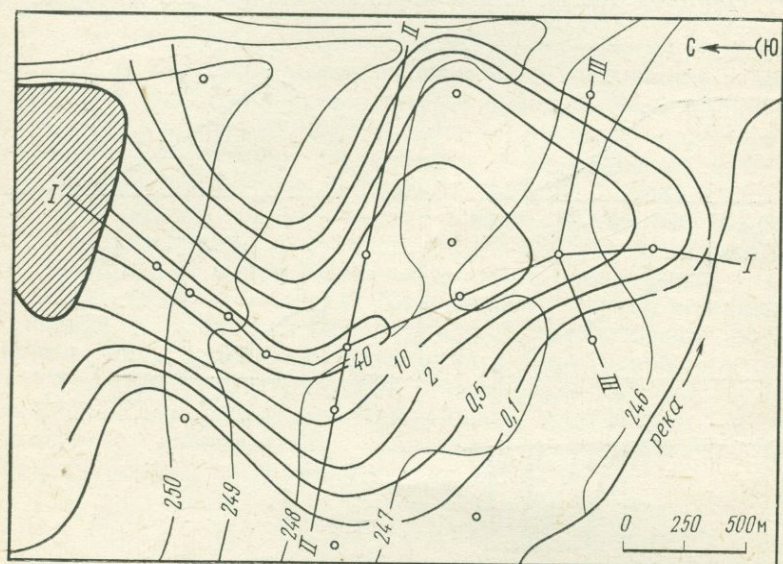
Пространственные закономерности распределения индикатора, выявленные на конечный момент исследований, показаны на рис. 30. Карта и разрез ореола построены по осевым сечениям в направлениях удаления от источника максимальных содержаний индикатора. Продольное осевое сечение ореола проходит по вертикальной плоскости, совпадающей с линиями тока от середины водоема (см. рис. 30, линия I—I). На плане показано положение ореола в плоскости максимальных содержаний индикатора, которая проходит на глубине 40—100 м. Для построений избраны изолинии содержаний: 0,1; 0,5; 2,0; 10; 40 г/л. Значимость изоконцентраций проверялась, исходя из доказанного выше положения, что изображение ореола в изолиниях будет представительным, если сечение превышает предельную погрешность разового определения компонента. При величине двойной предельной погрешности, равной $\pm 2S = 120\%$, имеет место зависимость $x = 4y$, где x и y — обоснованные значения изоконцентраций. В качестве исходного для расчета принимается содержание индикатора, равное 0,10 г/л.

Воспроизведенный описанным способом ореол рассеяния развит ниже источника индикатора в полном соответствии со структурой потока (см. рис. 30). Длина ореола в изолинии 0,1 г/л составляет 2700 м. Максимальная ширина — 1900 м в два раза превышает ширину водоема-источника.

В пределах ореола отмечается закономерное уменьшение содержания индикатора по направлению потока. Максимальная

концентрация индикатора в ореоле 45,0 г/л практически равна среднему значению концентрации индикатора в источнике.

Вблизи источника отмечается узкая полоса неразбавленной концентрации индикатора (оконтурена изолинией 40 г/л). Длина этой полосы 1360 м, ширина 100 м. Форма ореола рассеяния



I-I

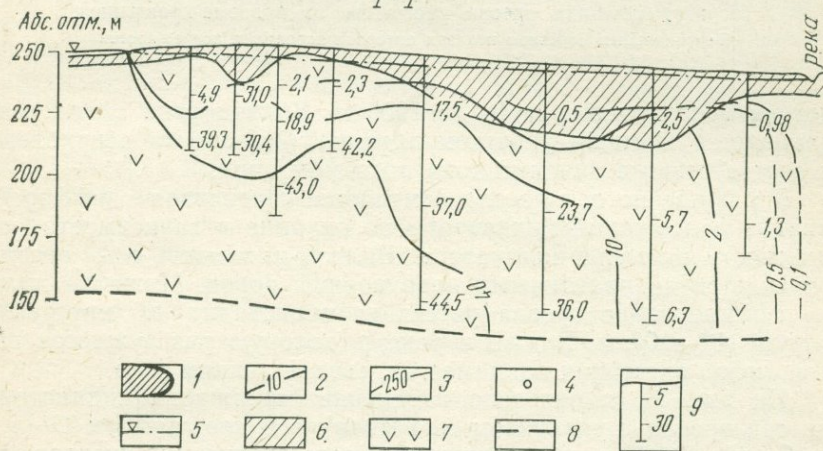


Рис. 30. Ореол рассеяния элемента-индикатора от водоема-хранилища.

1 — водоем-хранилище; 2 — изолинии содержаний элемента-индикатора; 3 — гидронзогипсы; 4 — скважина на плане; 5 — уровень подземных вод; 6 — суглинки; 7 — порфириты; 8 — условные изолинии элемента-индикатора; 9 — скважины на разрезе и содержание индикатора в водоносном горизонте

в плане определяется структурой потока. Вблизи водоема в периоды высокого положения уровня поток чистых вод направлен с местных участков питания, располагающихся к юго-западу и юго-востоку от водоема, к оси формирующегося ореола (см. рис. 30). Здесь ореол резко сужается, проходит по коридору шириной 400 м, длина коридора около 1200 м. Ниже по

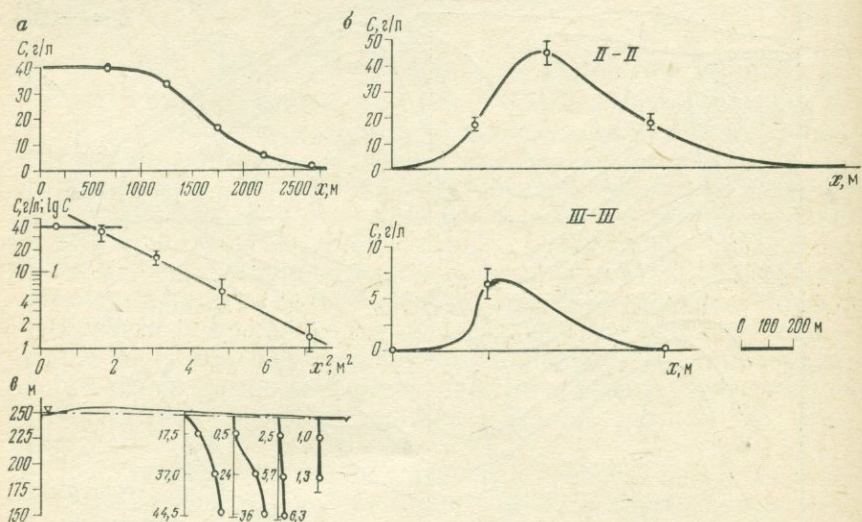


Рис. 31. Распределение элемента-индикатора в продольном (а) и поперечных (б и в) сечениях ореола рассеяния от водоема-хранилища.

Вертикальным отрезком показан интервал вероятных погрешностей

потоку ореол расширяется до 1900 м. Вблизи реки ореол раздваивается местным участком питания. Ось ореола искривлена в соответствии с линиями тока подземных вод.

В разрезе по оси ореола отмечается отчетливая дифференциация содержаний индикатора по глубине в зависимости от плотности раствора-индикатора. Вблизи источника ось ореола опускается до практически водоупорных пород. Ниже по потоку формирование ореола рассеяния происходит в интервале глубин 40—100 м. Ближе к реке, в которую разгружается поток, ореол рассеяния поднимается, следуя линиям тока.

На рис. 31, а показано изменение содержания индикатора по оси ореола с удалением от источника в координатах $C-x$ и $\lg C-x^2$. График прослеживания содержания индикатора по расстоянию в координатах $\lg C-x^2$ характеризуется наличием двух участков.

Первый — участок постоянных содержаний, второй — участок убывания содержаний, описывающийся зависимостью,

близкой к прямолинейной. Наличие участка постоянных содержаний характерно для ореолов рассеяния, однако в данном случае этот участок значительно длиннее, чем обычно встречается в природных ореолах — 1360 м. Такая его протяженность объясняется сложным характером движения потока и наличием периодов тока обратного направления на участке между водоемом и периодически формирующимся на пути потока водоразделом. Прямолинейность второго участка свидетельствует о том, что закономерность изменения содержания вещества в объеме рассеяния с приемлемой для практики точностью может быть аппроксимирована ветвью функции нормального распределения, которая спрямляется в координатах $\lg C - x^2$.

Достоверность построения такого графика оценивается, исходя из величины среднеквадратического суммарных погрешностей определения индикатора ($\pm S = 58\%$) и количества проб, отобранных в каждой точке, которое равно 3—15.

Рисовка графика не может быть иной и с учетом возможных отклонений в рассчитанном интервале. Следовательно, осевая закономерность изменения содержания с достаточной для практики точностью характеризуется нисходящей ветвью кривой нормального распределения. Важнейшим параметром кривой нормального распределения является среднеквадратическое. Определяется оно по графику на рис. 31, а.

$$B = \frac{1}{2,9 \cdot 10^6}; \quad \sigma_{пр} = \sqrt{0,215 \cdot 2,9 \cdot 10^6} = 790 \text{ м.}$$

Распределение вещества в сечении, перпендикулярном потоку, изучалось в направлении удаления от продольной оси ореола и по глубине (рис. 31, б). Эпюра изменения содержания индикатора с удалением от продольной оси ореола напоминает кривую нормального распределения. Эпюра сечения II—II относительно симметрична, но деформирована (имеет более крутые ветви, чем кривая нормального распределения) наличием периодических потоков чистых вод, направленных от участков питания водоносного горизонта к оси ореола.

В эпюре сечения III—III левая ветвь значительно деформирована наличием на пути потока участка местного питания водоносного горизонта. Эпюры изменения содержания индикатора по глубине в отдельных точках ореола показаны на рис. 31, в. Для них характерно увеличение содержания индикатора по глубине примерно в три раза. Эта деформация ореола обусловлена влиянием плотности раствора индикатора.

Закономерности изменения содержания индикатора в фильтрационном потоке во времени. Прослеживание изменения содержания индикатора в отдельных точках потока в пределах формирующегося ореола рассеяния проводилось в течение 10 лет путем поинтервального отбора и анализа проб воды из всех имеющихся скважин наб-

людательной сети. Графики изменения содержания индикатора во времени в скважинах, расположенных на оси ореола и в крайних частях его, показаны на рис. 32.

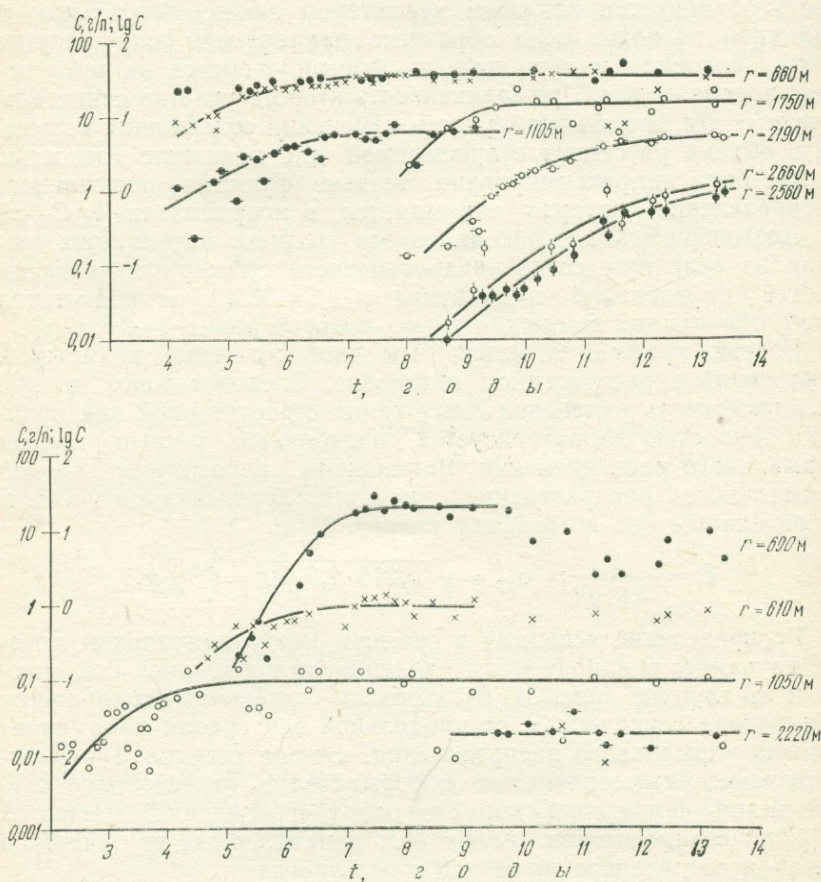


Рис. 32. Изменение содержания индикатора во времени.
 r — расстояние наблюдательной скважины от водоёма-хранилища

В отдельных точках по графикам в начальный период времени фиксируется рост содержания индикатора, затем по прошествии определенного времени от момента поступления индикатора в подземный поток содержание индикатора достигает относительно постоянной величины, предельной для данной точки. Исключение составляют две крайние скважины, в которых темп увеличения содержания индикатора значительно снизился, но стабилизация его не зафиксирована.

Время от поступления в скважину первых порций индикатора

тора до установления в ней стабильного содержания индикатора по скважинам, расположенным в периферической части ореола, составляет 5—6 лет.

К описываемому моменту стабильное содержание индикатора установилось в большей части ореола. Продолжается незначительное продвижение его в краевой части по фронту. Графики свидетельствуют о том, что время достижения стабильного содержания индикатора прямо пропорционально расстоянию между пунктом отбора пробы и водоемом, а величина стабильных содержаний индикатора обратно пропорциональна этому же расстоянию.

Сводный график (рис. 33), построенный для глубины 60 м по наблюдательным скважинам в координатах $t-x$ (t — время наступления стабильного содержания индикатора в опробуемой скважине, x — расстояние от водоема до скважины), свидетельствует о том, что время стабилизации содержания индикатора находится в прямой зависимости от расстояния. Уклон прямой характеризует скорость формирования стабильного ореола, которая определяется как $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ и составляет 1 м/сут. Действи-

тельная скорость потока-носителя равна 0,7—1,2 м/сут, т. е. скорость наступления стабильного режима индикатора в фиксируемых точках поля близка действительной скорости потока. Воспользовавшись зависимостью (50), получим, что для данных условий $\gamma \approx 1$.

В пределах стабильного ореола в отдельных скважинах отмечается обратная зависимость содержания индикатора в точке опробования от уровня подземных вод. На рис. 34 приведен график положения уровня водоносного горизонта и содержание индикатора на март каждого года. При понижении уровня содержание индикатора в потоке подземных вод повышается, и наоборот. Такая закономерность характерна для скважин, расположенных вблизи водоема между участками питания подземных вод. Это объясняется тем, что при повышении уровня подземных вод уменьшается поступление загрязненных вод в подземные воды и одновременно увеличивается поступление чистых вод с местных участков питания. И то и другое ведет к уменьшению содержания индикатора в пределах ореола рассеяния. С удалением от водоема и от участков питания эта закономерность не наблюдается. Такой характер связи содержания индикатора в подземных водах и уровня подземных вод обусловлен преимущественной ролью потока-носителя.

Взаимоотношение между различными компонентами в ореоле. Поскольку поток-индикатор является многокомпонентным раствором, то на данном примере представляется возможным проанализировать тип связи между различными компонентами, мигрирующими в фильтрационном потоке. Рассмотрим виды функциональной связи для следую-

щих пар компонентов: а) для пары стабильных компонентов, мигрирующих в анионной форме; б) для пары стабильных компонентов, мигрирующих один в катионной, другой — в анионной форме; в) для пары из одного стабильного и одного короткоживущего радиоактивного индикатора.

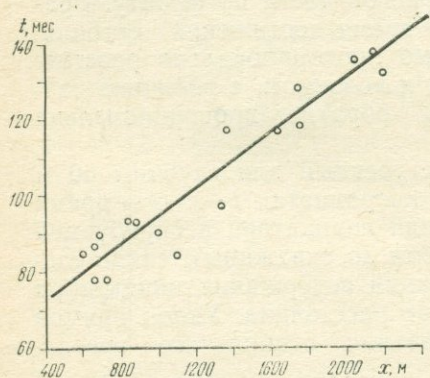


Рис. 33. Зависимость времени стабилизации содержания индикатора t от расстояния между наблюдательной скважиной и водоемом-хранилищем x

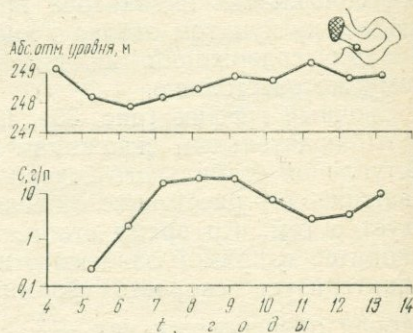


Рис. 34. Изменение уровня воды в скважине и содержания в ней элемента-индикатора

Для пары стабильных компонентов, мигрирующих в анионной форме, характерна прямолинейная функциональная зависимость. Эта зависимость выявляется по выборке, набранной по группе скважин в пределах ореола рассеяния. Наличие линейного типа связи свидетельствует о единстве факторов рассеяния, приводящем к пропорциональному уменьшению концентрации обоих индикаторов, независимо от их природы (рис. 35). Для пары стабильных компонентов, мигрирующих один в анионной, другой в катионной форме, характерна сложная криволинейная зависимость. Она представлена выборкой, набранной по группе скважин в пределах ореола. Кривая асимптотически переходит в участок, параллельный оси индикатора-аниона. Это означает, что при изменении концентрации аниона изменение содержания катиона идет медленнее и в пределе прекращается. Такая закономерность может иметь место по части скважин, попадающих в пределах ореола на участок сорбирующих грунтов, по скважинам, находящимся в несорбирующих или менее сорбирующих породах, сохраняется прямолинейная зависимость (см. рис. 35). Описываемый пример натурального эксперимента характеризуется сравнительно коротким периодом времени существования ореола (13 лет).

Для пары из одного стабильного и другого нестабильного компонента характерна криволинейная функциональная зави-

симость, которая может фиксироваться по одной или нескольким скважинам. Здесь имеет место плавная кривая, степень крутизны которой зависит от продолжительности жизни нестабильного индикатора. Это следует из сравнения кривых на рис. 35. Данный тип связи определяется тем, что убывание не-

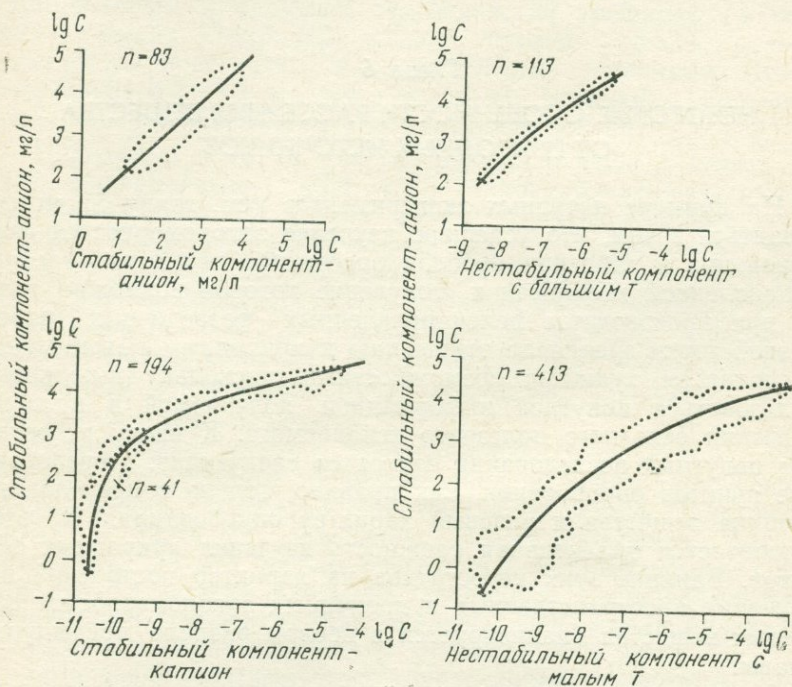


Рис. 35. Виды функциональной зависимости между различными компонентами в водном ореоле рассеяния (T — период полураспада нестабильных компонентов, мигрирующих в нейтральных и анионных комплексах)

стабильного компонента из раствора происходит быстрее. Присутствие линейного типа связи свидетельствует об однофакторности, а криволинейного о многофакторности рассеяния.

Таким образом формирование ореола в условиях сложного потока подземных вод, периодичности поступления индикатора в подземные воды при значительном проявлении эффекта гравитации происходит по тем же закономерностям, которые установлены лабораторными и натурными экспериментами: время формирования стабильных концентраций определяется уравнением (50), распределение стабильных концентраций по оси ореола происходит по уравнению (45). В данных условиях скорость формирования стабильных концентраций практически равна действительной скорости потока.

Глава 6

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАССЕЙНИЯ ВЕЩЕСТВА ОТ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

На примере натуральных экспериментов (см. главу 5) можно убедиться в том, что успешное изучение закономерностей формирования и строения ореолов рассеяния вещества требует направленной информации, получение которой возможно только при производстве целенаправленных разведочных работ. С этой точки зрения по отношению к природным объектам мы располагаем худшими возможностями, поскольку вынуждены пользоваться попутной информацией, получаемой в процессе разведки основного полезного ископаемого. К числу недостатков попутных исследований относятся следующие: сосредоточение пунктов опробования, как правило, только в пределах источника вещества и разовый характер опробования. В этом заключается объективная сложность изучения природных объектов. Влияние этих недостатков на характер построений при изучении пространственных и временных закономерностей рассеяния вещества анализируется в первом разделе предыдущей главы.

Указанные сложности ограничивают выбор представительных природных объектов. Тем не менее по тому ограниченному представительному материалу, которым мы располагаем, можно заключить, что рассеяние от природных источников вещества согласуется с закономерностями, выявленными при изучении натуральных экспериментов, но имеются и существенные отличия, объяснимые с позиции методических положений, полученных в предыдущих главах.

В нашем распоряжении для последующего анализа имеются две группы объектов: объекты с хорошо проявленными ореолами и объекты, характеризующиеся отсутствием ореолов.

1. Характеристика объема рассеяния от известных природных источников

Рассмотрим ореолы рассеяния рудного микрокомпонента от известных рудных тел. Анализируются два ореола от двух рудных тел, расположенных в аналогичных геологических и гидрогеологических условиях [25].

Поток-носитель представлен безнапорным потоком подземных вод в трещинном водоносном горизонте эффузивных и интрузивных скальных трещиноватых пород. Водоносный горизонт приурочен к зоне относительно равномерной трещиноватости, развитой до глубины 40—80 м от дневной поверхности (дно долины), и к редким тектоническим трещинам на больших глубинах. Подземные воды в условиях горного рельефа выходят на поверхность многочисленными родниками. Дебиты источников 0,2—0,5 л/с, реже до 10 л/с. В межень подземные воды почти полностью питают местные водотоки.

Подземные воды на участке рудопроявления 1 имеют общую минерализацию 0,53 г/л, гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый состав, pH-6,7. Среднее фоновое содержание микрокомпонента-индикатора в подземных водах 1 мкг/л. На участке рудопроявления 2 подземные воды сульфато-гидрокарбонатного натриево-кальциевого состава, общая минерализация 0,28 г/л, pH-7,3. Среднее фоновое содержание микрокомпонента-индикатора в подземных водах 0,5 мкг/л. Объектами опробования были источники, скважины, горные выработки в период межени.

Источниками рудного микрокомпонента-индикатора являются гидротермальные рудопроявления жильного типа. Поступление рудного элемента-индикатора в подземные воды происходит в условиях окисления. Зоны окисления развиты неглубоко, так что ореолы рассеяния в подземных водах формируются в верхней наиболее равномерно трещиноватой части водоносного горизонта. Максимальное содержание индикатора в подземных водах рудных тел достигало 4500 мкг/л.

Отношение максимальных концентраций индикатора, установленных в ближних к источнику пунктах (50 м), к среднему фоновому его значению в потоке-носителе равно для рудопроявления 1 $\frac{C_0}{C_{\phi}} = \frac{400}{1} = 400$, для рудопроявления 2 $\frac{C_0}{C_{\phi}} = \frac{1400}{0,5} = 2800$.

Сведения о расходах потока-индикатора и потока-носителя отсутствуют. Однако при жильном типе оруденения площадь поперечного сечения рудных тел много меньше площади поперечного сечения трещинного водоносного горизонта. Следовательно, при прочих равных условиях (I, km) можно предположить, что $Q_n \gg Q_{\phi}$, а $C_0 \gg C_{\phi}$ — условия, необходимые для формирования ореолов рассеяния в потоке подземных вод.

Графики прослеживания ореолов от рудопроявлений 1 и 2 в координатах $\lg C - x^2$ представлены на рис. 36. Графики иллюстрируют закономерное уменьшение концентрации индикатора с удалением от источника. Довольно отчетливо выделяются три участка: I — участок максимального линейного убывания концентраций, II — участок асимптотического убывания и

III — участок постоянных концентраций, практически не отличимых от средних фоновых значений.

Степень уменьшения концентрации или показатель рассеяния в сечении, близком к осевому, характеризуется среднеквадратическим, имеющим в данном случае линейную размерность. Величины этих показателей, полученные по угловым коэффициентам графиков прослеживания, приведены в табл. 13.

Как видно из табл. 13, величины σ различаются, но их можно считать несущественными из-за невысокой точности построений.

Описанные рудопроявления являются многокомпонентными источниками индикатора. Ореолы рассеяния от них прослеживались по основному и вспомогательному микрокомпонентам. Наиболее представительный набор концентраций основного микрокомпонента и спутника в пределах внутренней области ореола (в зоне максимального убывания концентраций) имеется по рудопроявлению 2. Оба микрокомпонента здесь находятся в подземных водах в анионной форме. Фоновое содержание спутника $C_{\phi} = 0,5$ мг/л, максимальное в ореоле вблизи источника $C_0 \approx 200$ мг/л, отношение $\frac{C_0}{C_{\phi}} = 400$.

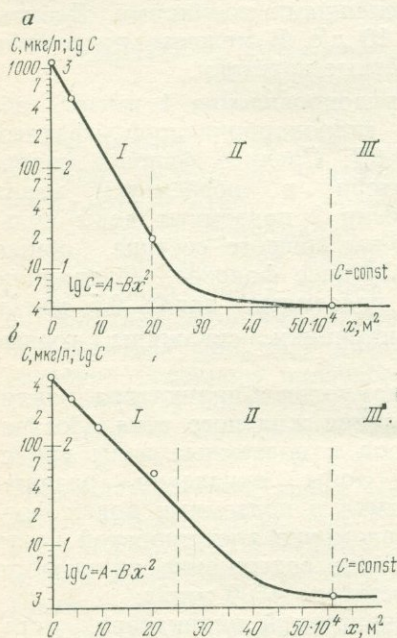


Рис. 36. Закономерность убывания содержаний элемента-индикатора от рудного источника (по данным В. И. Кочеткова).

а — от рудопроявления 2; б — от рудопроявления 1

Прослеживание взаимоотношения между основным и вспомогательными компонентами обнаруживает линейную зависимость между ними в пределах внутреннего участка ореола, участка максимального убывания концентраций. Заметное отклонение от прямой линии на графике (см. рис. 28, а) отмечается для наиболее удаленной точки (450 м), расположенной в начале асимптотического участка ореола. Наличие линейной зависимости является признаком общности источника и основного фактора рассеяния.

Таким образом, для данных природных ореолов, сформированных от рудных тел, характерна такая осевая закономер-

Таблица 13

Рудопроявление	C_{ϕ}	C_o/C_{ϕ}	B	σ
1	1	400	$\frac{1}{22,5 \cdot 10^4}$	220
2	0,5	2800	$\frac{1}{10 \cdot 10^5}$	145

ность убывания концентраций, которая возникает под влиянием фильтрационной дисперсии. Между различными признаками в ореоле отмечается линейная зависимость.

Далее разберем случай отсутствия ореольной части объема рассеяния.

Месторождение расположено на участке, сложенном нижнекембрийскими известняками и сланцами. Рудная сульфидная минерализация гидротермального типа приурочена к зоне скарированных известняков на контакте с интрузией нижнепалеозойских гранитов (рис. 37). Грунтовые, местами слабо напорные, воды заключены в зоне трещиноватости названных пород, из которых наиболее водообильны известняки. С поверхности на участке развит чехол элювиально-делювиальных накоплений мощностью до 10—12 м. С севера и востока участок ограничен неглубокими долинами ручьев, врезанными в древние породы на глубину до 12—15 м и выполненными песчано-глинистыми отложениями с галькой и гравием. В руслах этих ручьев происходит разгрузка подземных вод в виде восходящих родников, а пробуренные здесь скважины иногда самоизливаются. Глубина залегания подземных вод колеблется от 0 до 10—15 м и увеличивается в западном и юго-западном направлении к водораздельным поднятиям, которые служат областью питания описываемого трещинного водоносного горизонта.

Гидрогеохимическая характеристика участка в целом определяется преобладающими в его пределах водами известняков. Минерализация этих вод равна 300—370 мг/л, рН 7,5—8,0, состав — гидрокарбонатный кальциевый. При фоновых содержаниях сульфатов в подземных водах района около нуля, в водах участка сульфат-ион обнаружен в количествах до 50—40 мг/л, а в водах тектонических зон дробления — до 200 мг/л.

Основным поставщиком в воды исследуемого элемента служат сульфиды цинка и меньше свинца, локализованные на значительной площади и образующие трубообразные тела с почти вертикальным погружением на глубину. Вторичные минералы и зона окисления руд развиты крайне слабо.

По результатам гидрогеохимического опробования подземных вод участка по всем водопунктам установлено, что максимальное содержание элемента-индикатора (C_0) равно

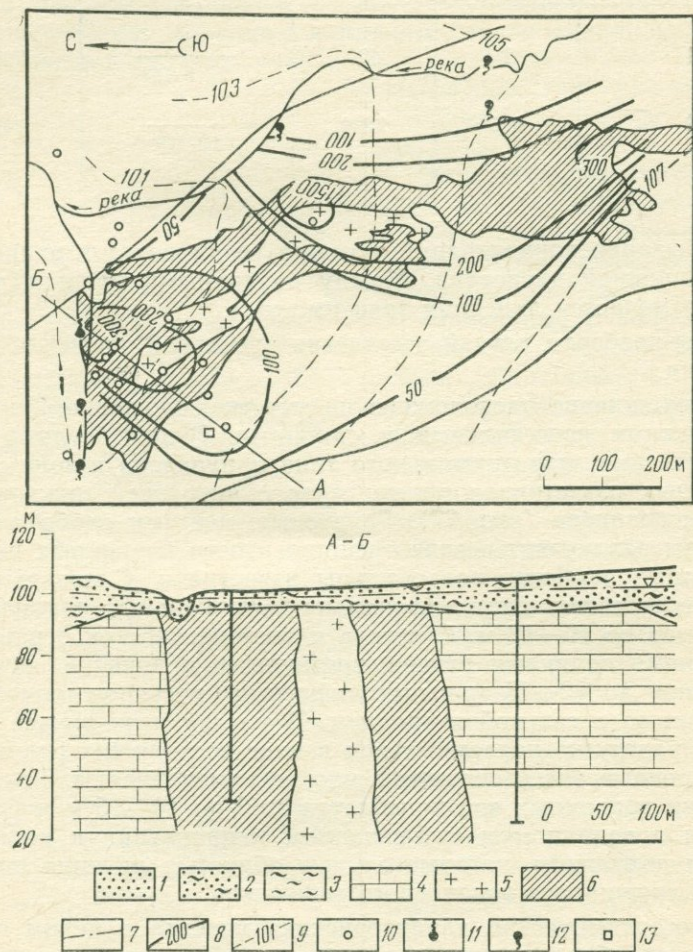


Рис. 37. Распределение содержаний цинка в подземных водах полиметаллического месторождения.

1 — пески; 2 — супеси; 3 — сланцы; 4 — известняки; 5 — граниты; 6 — зона рудной минерализации; 7 — уровень подземных вод; 8 — изолинии содержания цинка, мкг/л; 9 — гидроизогипсы; 10 — скважина; 11 — восходящий источник; 12 — нисходящий источник; 13 — колодец

1670 мкг/л, фоновое (C_{Φ}) — 30 мкг/л, отношение $C_0/C_{\Phi}=52$. Под влиянием изменений гидрометеорологических условий содержание рудного элемента меняется во времени. По данным несистематических наблюдений, в источнике, расположенном в

северной краевой части рудной зоны, содержание элемента меняется от 230 до 400 мкг/л, в самоизливающей скважине, находящейся примерно в 80 м к востоку от рудной зоны, в средней ее части — от 100 до 250 мкг/л.

Увеличение в воде содержания основного элемента обычно сопровождается одновременным ростом содержания сульфат-иона, что указывает на единый их источник и дает основание считать сульфат-ион надежным спутником основного элемента. Связь между этими элементами (см. рис. 28 в) корреляционная и сравнительно слабая. Такой вид взаимосвязи основного и сопутствующего элементов характеризует принадлежность исследуемой аномалии к источнику основного элемента.

Как видно из рис. 37, поток подземных вод разгружается в долинах ручьев, ограничивающих участок с севера и востока. Эти же долины служат естественными границами распространения в водах повышенных содержаний рудного элемента. Изолинии аномальных содержаний элемента практически не контролируются гидроизогипсами и в пределах участка отображают главным образом его геолого-структурные и минералогические особенности. По профилю А—Б, построенному вкрест гидроизогипс, содержание рудного элемента увеличивается в направлении потока и достигает максимума на границе рудной зоны, совпадающей с северной долиной ручья, где зафиксировано несколько восходящих родников. Еще более сложное распределение аномальных содержаний рудного элемента наблюдается в средней и южной частях участка, где по имеющимся данным закономерного убывания содержания элемента в водах не обнаруживается, а рисуется лишь в общем виде.

Приведенные материалы показывают, что в пределах участка водный ореол рассеяния рудного элемента отсутствует, так как почти сразу же за границами зоны рудной минерализации поток подземных вод ограничивается естественными дренами, поэтому ореол рассеяния дальнейшего развития не получает. Практически все опробованные водопункты представляют воды, непосредственно связанные с рудной минерализацией.

Таким образом, приведенный пример иллюстрирует случай, когда водный ореол рассеяния не развивается, так как рудная минерализация расположена в краевой части потока. Наблюдаемое распределение элемента-индикатора не является ореолом рассеяния в том понимании, которое дано в главе 3. Приведенные примеры свидетельствуют о более сложной форме объема рассеяния, формирующегося от природных объектов. В зависимости от конкретных условий ореольная часть этого объема имеет место или отсутствует. Для правильной квалификации объема рассеяния можно пользоваться соответствием или несоответствием пространственного распределения индикатора направлению и структуре потока подземных вод.

На приводимых далее примерах демонстрируется возможность решения обратной задачи — суждение об источнике гидрогеохимических аномалий по характеру пространственного распределения признака. Для примера выбраны типичные аномалии, проверенные бурением, по результатам которого выявлен источник индикатора.

Аномалия 1. Аномалия зафиксирована по содержанию рудного микрокомпонента 100—1500 мкг/л на фоне 50 мкг/л при отношении $\frac{C_0}{C_{\Phi}} = 30$. Она связана с подземными водами безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к песчано-глинистым аллохтонным по отношению к подстилающим их гранитам отложениям. Глубина уровня подземных вод 5—18 м. Общая мощность водоносного горизонта 8—18 м. В водоносном горизонте имеются линзы серых, темно-серых глин мощностью 1—4,5 м, протяженностью от 160 м и более. Водоносный горизонт ограничен руслом реки. Поток подземных вод направлен к руслу с разгрузкой в виде источников и мочажин. Таким образом, аномалия приурочена к краевой части потока подземных вод.

Химический состав подземных вод смешанный, среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, далее по содержанию — сульфат- и хлор-ионы, из катионов преобладает магний и кальций. Общая минерализация 0,8—3,8 г/л, рН=6,9—7,7. Микрокомпонент-индикатор находится в растворе в форме устойчивых комплексных анионов.

Форма потока подземных вод в течение года устойчива. Положение области питания и зоны разгрузки не зависит от гидрологического режима речки и неизменно во времени. Гидрогеологическая ситуация ясна из рис. 38.

Воспроизведенная в изоконцентрациях рудного микрокомпонента 100, 250 и 500 мкг/л аномалия имеет вытянутую вдоль склона форму с закономерным возрастанием концентраций по направлению потока подземных вод, участок максимальных аномальных концентраций пространственно совпадает с участком радиально сходящегося потока. Изолинии концентраций в общем сложны, прихотливы и не зависят (за исключением центральной части) от формы потока подземных вод.

Для оценки аномалии пробурены скважины по профилю А—Б в направлении, нормальном склону и поперечном по отношению к длинной оси аномалии.

Установлено, что источником микрокомпонента-индикатора являются рудные концентрации его, тяготеющие к темно-серым глинам, в форме рудных тел, залегающих согласно с линзами глин в нижней части склона долины и вытянутых вдоль него. Мощность рудных тел 1—9 м, протяженность 190—490 м.

Таким образом, установлено пространственное совпадение гидрохимической аномалии 1 с ее источником. Участок анома-

лий в этом случае не является ореолом рассеяния. Конфигурация изолиний отражает в грубой схеме пространственное распределение концентраций рудного микрокомпонента и изменение мощности рудного тела. На рис. 38 видно, что возрастание концентраций индикатора в подземных водах происходит от

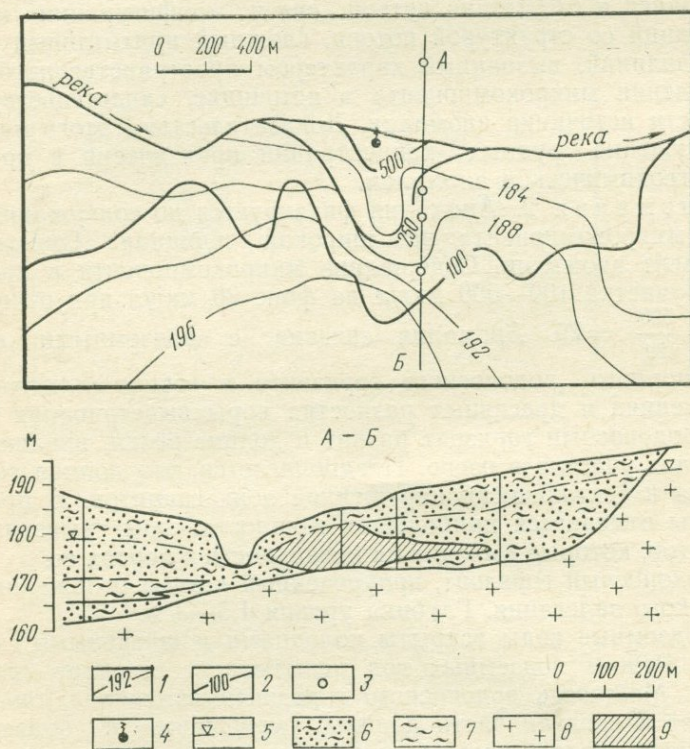


Рис. 38. Распределение содержаний элемента-индикатора в подземных водах участка Аномалия 1.

1 — гидроизогипсы; 2 — изолинии содержаний элемента-индикатора; 3 — скважина опорного разреза; 4 — источник; 5 — уровень подземных вод; 6 — супеси, суглинки; 7 — глины; 8 — граниты; 9 — рудное тело

периферии рудного тела к его центру, в этом же направлении возрастает мощность рудного тела и содержание микрокомпонента. Поскольку мощность рудного тела возрастает в направлении, совпадающем с направлением потока подземных вод, возникает обратная зональность гидрогеохимической аномалии. Развитию ореола по направлению потока препятствует то обстоятельство, что рудное тело практически примыкает к нижней границе потока.

В центральной части аномалии, пространственно совпадающей с центральной частью рудного тела и занимающей полную мощность водоносного горизонта, происходит стягивание наиболее высоких концентраций в связи с радиально сходящейся формой потока, обусловленной близостью разгрузки.

Таким образом, и в данном случае форма аномалии, выражающаяся в отсутствии четкой связи конфигурации изоконцентраций со структурой потока, сложный прихотливый характер изолиний, вызванный характером пространственного распределения микрокомпонента в источнике, свидетельствует о близости источника аномалии. Доказательством этого является обнаружение рудных концентраций практически в пределах гидрогеохимической аномалии.

Аномалия 2. Аномалия фиксируется по содержанию рудного микрокомпонента на широкой площади. Описывается фрагмент аномалии. Содержание микрокомпонента в пределах этого участка 100—500 мкг/л на фоне 20 мкг/л при отношении

$\frac{C_0}{C_{\Phi}} = \frac{500}{20} = 25$. Аномалия связана с подземными водами

безнапорного водоносного горизонта в озерно-аллювиальных отложениях и дресвяных разностях коры выветривания гранитов. Водоносный горизонт развит в долине речки, впадающей в пределах участка в озеро. Предполагается, что долина сформирована в тектонически нарушенной зоне гранитов. В пределах долины отмечается наибольшая мощность коры выветривания гранитов, которые выходят на поверхность в бортах ее.

Водоносный горизонт, приуроченный к этим отложениям, неглубокого залегания. Глубина уровня 1,5—3 м.

Подземные воды вскрыты колодцами и шнековыми скважинами. Режим подземных вод испытывает сезонное влияние речки. Мощность водоносного горизонта изменчива, она возрастает к средней части долины, уменьшаясь к бортам ее. Мощность верхней части водоносного горизонта, приуроченной к озерно-аллювиальным пескам, достигает 5—10 м. Химический состав подземных вод смешанный, преобладают воды сульфатные натриевые и магниевые. Общая минерализация 1,5—5 г/л.

Аномалия воспроизведена в основном изолинией 100 мкг/л и небольшим пятном в изолинии 500 мкг/л (по одной точке). Контур аномалии в изолинии 100 мкг/л сложный, площадь расплывчата, неправильной формы. Участок аномалии приурочен к участку долины с малой мощностью озерно-аллювиальных отложений и мощной корой (в том числе дресвяной) выветривания гранитов (рис. 39).

Аномалия в этой изолинии выходит в поле развития гранитов из поля развития аллохтонных отложений.

Аномалия вскрыта шнековыми скважинами при оконтуривании 100×100 м (при наличии колодцев сеть была более плотной).

В рыхлых разностях пород рудных концентраций не обнаружено, отмечалось повышение среднего содержания в коре гранитов. При вскрытии гранитов, не затронутых выветриванием, колонковыми скважинами глубиной 50 м рудных концент-

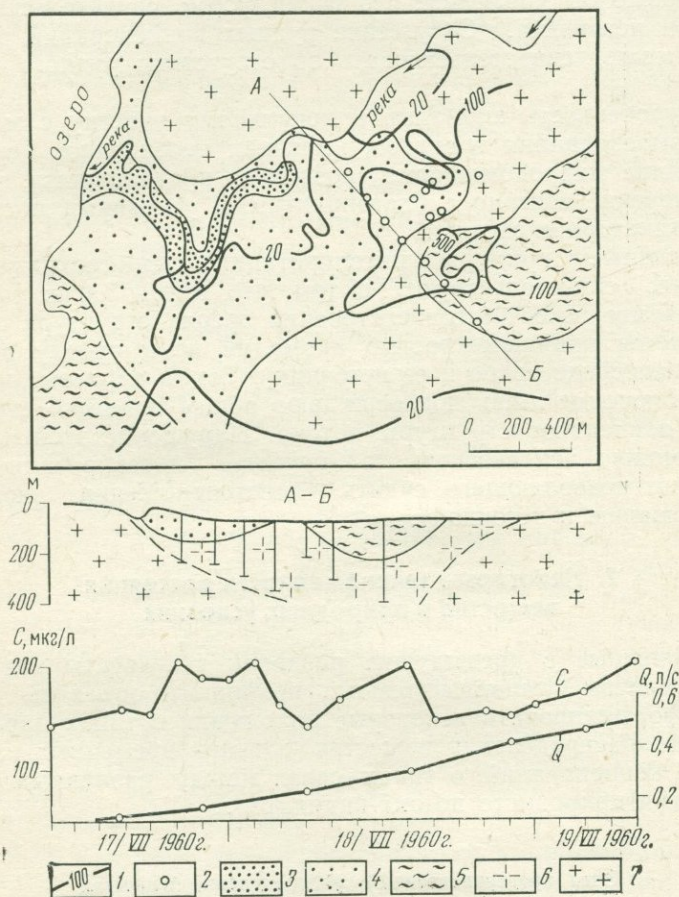


Рис. 39. Распределение содержаний элемента-индикатора в подземных водах участка Аномалия 2.

1 — изолинии содержаний элемента-индикатора; 2 — скважина опорного разреза и участка детальной проверки; 3 — пески аллювиальные; 4 — пески озерные; 5 — глины; 6 — кора выветривания гранитов; 7 — граниты

раций также не встречено. С поверхности и на глубине отмечались пятна повышенных средних содержаний микрокомпонента в гранитах. Из скважины была проведена откачка и прослежено изменение содержания микрокомпонента во времени, по результатам которой видно отсутствие закономерных изменений его при заметном возрастании дебита (см. рис. 39).

По результатам проверки аномалии можно заключить, что мы имеем дело не с ореолом рассеяния. Об этом свидетельствует расплывчатая форма аномалии, сложный прихотливый характер изолиний. На примере ранее рассмотренных аномалий можно было бы убедиться, что такая форма свидетельствует о близости источника. Отсутствие рудных концентраций в этом случае может свидетельствовать об отсутствии рудного источника.

Приуроченность аномалии к локальному участку с мощной корой выветривания гранитов, имеющих повышенное среднее содержание микрокомпонента, позволяет предположить, что ее возникновение связано с благоприятными условиями поступления индикатора в раствор.

Описанные примеры интерпретации гидрогеохимических аномалий свидетельствуют о том, что в некоторых случаях наблюдаемое несоответствие строения ореола структуре потока объясняется принадлежностью аномалий не к ореолу рассеяния, а непосредственно к ее источнику. Таким образом, описанные исключения лишь подтверждают общее правило: строение ореола зависит от структуры потока. Нарушение этой зависимости можно использовать в качестве интерпретационного признака, позволяющего судить о местоположении аномалии по отношению к источнику.

2. Некоторые закономерности рассеяния вещества в природных условиях

Полученные в предыдущих разделах результаты натуральных экспериментов и анализ типовых природных объектов позволяют сформулировать некоторые положения о типах пространственного распределения вещества, о типах временных изменений его концентраций, о типах связи между различными компонентами природного потока-индикатора.

Типы пространственного распределения вещества

Большинство природных источников рудного вещества характеризуется отсутствием сплошного распределения его в пределах внешнего контура. Месторождения полезных ископаемых представлены обычно рудными телами, разобщенными пространством вмещающих пород. Сами рудные тела представляют собой чередование рудных и безрудных интервалов. Эта сложность пространственного распределения вещества усугубляется неоднородностью фильтрационных свойств месторождений, которая, в частности, может приводить к несовпадению каналов фильтрации с рудными интервалами. Эти особенности природных объектов являются причиной того, что рассеяние ве-

щества в потоке подземных вод начинается уже внутри условного контура источника вещества.

Анализируя конкретные примеры распределения индикатора в подземных водах различных источников рудного индикатора, мы убедились в его пространственно незакономерном характере. Мы убедились также в том, что, как правило, пространственное распределение в источнике не контролируется структурой потока подземных вод. Распределение индикатора в подземных водах источника контролируется характером пространственного распределения его в твердой фазе, состоянием последней и геохимической обстановкой, определяющими условия перехода индикатора в раствор.

Мы имеем также достаточно убедительные примеры того, что за пределами источника распределение вещества носит функциональный характер. Важной особенностью этого типа распределения является четкая пространственная зависимость его от структуры потока подземных вод. За пределами источника распределение при неизменных геохимических условиях полностью контролируется факторами рассеяния.

Таким образом, объем рассеяния вещества от природных его источников состоит из двух областей: области с незакономерным и области с закономерным пространственным распределением индикатора. Первую из них, т. е. область в общем внешнем контуре источника вещества, мы назовем ареалом рассеяния, понимая под ареалом область распространения признака с незакономерным распределением его внутри этой площади. Термин ареал заимствован из биологии и уже давно используется в гидрогеохимии [31]. Часть объема рассеяния за пределами источника как область с функциональным характером продольного (по отношению к потоку) и поперечного распределения называется ореолом, термином традиционно укоренившимся в гидрогеохимии. Подобная квалификация объема рассеяния на две области позволяет выделить два типа пространственного распределения.

1. Ареальный тип характеризуется незакономерным пространственным распределением и отсутствием связи его со структурой потока. Ареальный тип распределения имеет место в пределах источника вещества, включая собственно месторождение, а также первичные и вторичные ореолы его в твердой фазе. С поисковой точки зрения ареалы представляют меньший интерес.

2. Ореольный тип характеризуется закономерным пространственным распределением и четкой связью его со структурой потока подземных вод. С поисковой точки зрения ореольная область объема рассеяния представляет наибольший интерес, поскольку она определяет информативность гидрогеохимического метода поисков. Однако, как следует из анализа целого ряда примеров, отсутствие ореолов у природных источ-

ников вещества — довольно распространенное явление. Рассмотрим некоторые причины этого.

Характер продольной и поперечной закономерности распределения вещества в рассмотренных примерах близок к полученным ранее эмпирическим закономерностям, из которых следует, что протяженность ореола определяется начальной и фоновой концентрацией индикатора. Чем выше начальная концентрация (C_0), тем протяженнее ореол, но чем выше фоновая концентрация (C_{Φ}), тем меньше фиксируемая часть ореола. Отношение $\frac{C_0}{C_{\Phi}}$ может служить качественным показателем протяженности ореола.

Косвенным показателем протяженности ореола является условная конечная концентрация, которая, согласно уравнению (56), прямо пропорциональна отношению площадей поперечного сечения источника и поперечного сечения водоносного горизонта $\left(\frac{f}{F}\right)$.

Таким образом, низкие отношения $\frac{f}{F}$ и $\frac{C_0}{C_{\Phi}}$ могут служить причиной отсутствия или слабой проявленности ореолов рассеяния вещества в подземных водах.

Следующей причиной отсутствия или слабой проявленности ореола является нахождение источника вещества в краевой части потока подземных вод, вблизи границы разгрузки (см. рис. 38).

Причиной ограниченного развития ореола в плане является структура потока подземных вод с преобладанием вертикального направления линий тока. В этих условиях, будучи направлены вниз, ореолы рассеяния в плане практически не выходят за внешний контур источника вещества.

Типы режима в объеме рассеяния

Под типом режима понимается характер изменений концентрации элемента-индикатора в зависимости от изменений расхода водоносного горизонта. Показателем изменения расхода водоносного горизонта служит положение уровня в скважинах или расход источников.

Результаты натуральных экспериментов, изложенные в предыдущей главе (см. рис. 27), позволили охарактеризовать четыре типа режима. Два из них — это типы, присущие искусственным источникам индикатора. Для них характерна обособленность расходов потока-носителя и потока-индикатора, так что возможны изменения одного без изменения другого, и наоборот. Кроме того, для искусственных источников вещества отмечается иногда изменение фронта поступления вещества.

Для природных объектов указанные особенности не характерны. Здесь можно выделить два типа режима:

а) ареальный, характеризующийся независимостью аномальной концентрации индикатора от изменений уровня подземных вод;

б) ореольный, характеризующийся обратной зависимостью аномальных концентраций индикатора от изменения уровня подземных вод, т. е. с повышением уровня происходит уменьшение концентрации, и наоборот.

Указанные типы возможны при условии нахождения источников вещества в зоне насыщения водоносных горизонтов.

Типы связи между различными признаками в объеме рассеяния

Поток-индикатор (природный или искусственный) — это многокомпонентный раствор. Характер связи между отдельными компонентами в зависимости от природы избранной пары признаков, реализации того или иного фактора рассеяния, от размещения анализируемой выборки в той или иной области объема рассеяния может дать ценную информацию как для диагностирования процесса, так и для определения пространственного положения аномалии в объеме рассеяния.

Ранее мы отмечали, что при общности источника вещества и факторов рассеяния наблюдается прямолинейная зависимость между концентрациями прямого и сопутствующего признака в ореолах, как от искусственного, так и природного источников вещества (см. рис. 28, а, б). Рассмотрен также пример слабой корреляционной связи двух признаков в ареале. Нарушение линейной связи между признаками является следствием нарушения общности источника, следствием сложности ареального пространственного распределения вещества.

Исходя из принципиальных различий в механизме рассеяния в ареальной и ореольной области, представляется возможным выделить два типа связи между различными признаками в объеме рассеяния:

а) ареальный тип, характеризующийся слабой корреляционной связью, либо отсутствием ее;

б) ореольные типы, характеризующиеся функциональной связью между двумя признаками.

Примеры ареальных и ореольных типов связи показаны на рис. 28, 35. Анализ указанных случаев подтверждает тот факт, что реализация того или иного типа связи контролируется наличием общности источника нескольких анализируемых признаков в ореоле или нарушением этой общности в ареале. Нарушение общности источника двух анализируемых компонентов в ареале связано с неоднородностью источника.

Реализация того или иного типа ореольной связи контролируется наличием общности факторов рассеяния нескольких

анализируемых признаков или нарушением этой общности. В первом случае, когда фактором рассеяния служит только фильтрационная дисперсия, имеет место линейная зависимость между двумя признаками. Примеры такой зависимости даны на рис. 28, а, б и рис. 35.

Если помимо фильтрационной дисперсии на один из анализируемых признаков действует еще и сорбция, функциональная связь между двумя этими признаками становится криволинейной (см. рис. 35).

Реализации этого типа связи предполагает нахождение одного из анализируемых признаков в катионной форме и ограниченный период проявления сорбции ввиду ограниченной сорбционной емкости природных сорбентов. Поэтому такой тип связи более характерен для искусственных ореолов, существующих ограниченное время и не характерен для природных ореолов.

Если помимо фильтрационной дисперсии дополнительным фактором убывания из потока одного из анализируемых компонентов является сравнительно малый период полураспада, то функциональная связь между стабильным и короткоживущим индикатором в ореоле будет криволинейной. Причем степень кривизны графика зависит от периода полураспада (см. рис. 35). Этот тип связи может иметь место и в природных ореолах рассеяния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение закономерностей рассеяния устойчивых в растворе форм вещества на уровне математических и физических моделей, а также с помощью натуральных экспериментов позволило уточнить понятие ореолов рассеяния, строение и условие их формирования. Исследуемые закономерности относятся к полностью водонасыщенным фильтрующим средам и таким источникам вещества; которые практически не оказывают гидродинамического влияния на структуру несущего потока подземных вод.

1. Под ореолом рассеяния вещества в подземных водах понимается та часть объема рассеяния за пределами источника вещества, внутри которой в полном соответствии со структурой потока происходит закономерное убывание концентраций от максимальных исходных до аналитически воспроизводимых на периферии. Анализ математических моделей, подтвержденный результатами лабораторных и натуральных экспериментов, позволяет квалифицировать ореолы как стационарные или квазистационарные образования, т. е. образования с постоянным во времени пространственным распределением вещества.

2. Формирование ореолов в водонасыщенной части водоносных горизонтов происходит при следующих основных условиях:

а) расход потока-индикатора существенно меньше расхода потока-носителя ($Q_{\text{и}} \ll Q_{\text{н}}$), т. е. вещество поступает в фильтрационный поток по части рассматриваемого сечения;

б) исходная концентрация устойчивых в растворе форм вещества много больше их фоновых концентраций в потоке подземных вод ($C_0 \gg C_{\text{ф}}$).

3. Формирование ореолов обязано фильтрационной дисперсии. Фильтрационная дисперсия — это явление рассеяния вещества при движении его в фильтрующей среде вследствие пористого характера последней. Механизм фильтрационной дисперсии применительно к потоку-индикатору, поступающему в водоносный горизонт, заключается в прогрессирующем ветвлении элементарных струек, несущих индикатор, и их слиянии со струйками, не несущими или содержащими его в значительно меньших концентрациях. Рассеяние вещества под действием данного механизма происходит благодаря тому, что вещество распределяется в больших (по сравнению с начальным) и закономерно увеличивающихся в направлении потока поперечных сечениях (расходах). Действие фильтрационной дисперсии в фильтрующих средах формирует стационарный объем рассеяния в виде конуса дисперсии. Закономерность убывания концентраций в конусе рассеяния аппроксимируется уравнением нормального распределения, т. е. функцией, быстро убывающей. Следовательно, фильтрационная дисперсия представляет собой сильный фактор рассеяния. В результате на сравнительно коротких расстояниях может достигаться предел фиксируемых концентраций, определяющий стабильные границы ореола рассеяния. Анализ механизма рассеяния позволил заключить, что фильтрационная дисперсия как явление, присущее всем фильтрующим средам, и как процесс с сильным конечным эффектом является необходимым и достаточным фактором формирования ореолов рассеяния вещества в подземных водах. Ее действие не зависит от химической природы устойчивых в растворе форм вещества.

4. Другим возможным фактором рассеяния является сорбция вещества водовмещающими породами. Ее действие может усиливать действие фильтрационной дисперсии. В отличие от последней, действие сорбции зависит от химической природы форм вещества, устойчивых в растворе. Для веществ, мигрирующих в форме нейтральных и анионных комплексов сорбция не является фактором рассеяния. В этой роли она выступает лишь по отношению к катионным формам. Действие сорбции как фактора рассеяния ограничено в этом случае во времени наступлением сорбционного равновесия. В зависимости от размеров объема рассеяния и природы сорбирующих пород это время может изменяться в широких пределах, достигая нескольких десятков лет. Следовательно, сорбция может быть реальным фактором рассеяния применительно к ореолам кати-

онных форм вещества, формирующимся от искусственных источников его с ограниченным временем действия. Влияние сорбции при формировании искусственных ореолов качественно не изменяет ни временные, ни пространственные закономерности распределения вещества, а изменяет параметры соответствующих уравнений. По отношению к естественным ореолам, существующим геологически длительное время, сорбция как фактор рассеяния не имеет значения.

5. Установленные особенности формирования и строения ореолов рассеяния вещества в подземных водах позволили подойти к анализу природных объектов. Исследования показали, что от рудных источников вещества формируются сложные объемы рассеяния, состоящие из ареальных и ореольных частей. Под ареальной областью понимается та часть объема рассеяния, которая пространственно совпадает с источником вещества или незначительно превышает его. Для ареалов характерно незакономерное пространственное распределение вещества и независимость его от структуры потока подземных вод, слабая корреляционная зависимость между различными компонентами или полное отсутствие таковой, независимость концентраций индикатора от изменений расхода потока. Для ореола же характерно закономерное пространственное распределение вещества и четкая зависимость его от структуры потока подземных вод, функциональные типы связи между различными элементами, обратные типы режима концентрации и расхода (уровня). Эти различия между ареальной и ореольной частями объема рассеяния можно использовать для интерпретации гидрогеохимических аномалий.

6. Особенности строения ореолов рассеяния, исследованные на лабораторных моделях и в натуральных условиях позволили объяснить довольно распространенные случаи слабой проявленности или отсутствия ореолов от рудных объектов. Причиной этого могут явиться малая величина отношения $\frac{f}{F}$ — условие, возникающее при малых размерах рудного объекта по сравнению с сечением водоносного горизонта, малая величина отношения $\frac{C_0}{C_{\phi}}$, фильтрационная неоднородность и анизотропия трещинных водоносных комплексов и нахождение рудных объектов в краевой части потока подземных вод. Эти обстоятельства можно использовать при оценке возможностей гидрогеохимического метода в том или ином районе.

Изложенные положения можно использовать для решения некоторых практических задач, хотя доведение их до уровня инженерных рекомендаций потребует известной доработки.

7. Различия в типах режима, типах связи между различными элементами-индикаторами и в пространственном распреде-

лении индикатора в ареальной и ореольной частях объема рассеяния можно использовать для интерпретации гидрогеохимических аномалий, для квалификации их на ареальные и ореольные аномалии, что уже само по себе определяет их пространственное положение по отношению к источнику. Это определяет также схему их дальнейшей проверки. Ареальные аномалии, находящиеся практически на площади вероятного источника индикатора, следует оценивать исходя из геологических особенностей участка. Отсутствие рудных концентраций в водовмещающих породах вблизи ареальной аномалии свидетельствует о нерудной природе аномалии. Оценка ореольной аномалии требует подхода к вероятному источнику вещества по характеру распределения повышенных концентраций индикатора в подземных водах вблизи аномалии. Можно рекомендовать типовую начальную схему размещения скважин при проверке ореольных аномалий. Если аномалия зафиксирована по одному водопункту, необходимо пробурить еще две скважины так, чтобы имеющиеся три точки находились в вершинах равностороннего треугольника. По ним определяется направление потока и содержание индикатора. Затем по линии нормальной к гидронизогипсам, проходящей через одну из вершин треугольника (водопункт с максимальным содержанием индикатора) бурятся еще две скважины. По трем точкам, лежащим на линии в направлении потока, уточняется вид осевой или близкой к осевой зависимости содержания индикатора от расстояния. Могут быть два вида зависимости — прямые в координатах $\lg C - \lg x$ или $\lg C - x^2$. Возможность той или иной из них определяется величиной скорости потока подземных вод. По виду осевой зависимости можно оценить примерное расстояние до источника индикатора, что определит размеры участка для последующего размещения скважин.

8. С помощью установленных временных и пространственных закономерностей распределения стабильных концентраций можно осуществлять прогнозирование распространения загрязнения в подземных водах при решении задач охраны окружающей среды. По начальному периоду распространения вещества на начальном участке загрязнения с помощью двух-трех наблюдательных скважин устанавливается вид зависимостей $\lg C - \lg x$ или $\lg C - x^2$, а также $T - x$. Затем, способом линейной экстраполяции осевых закономерностей изменения концентраций определяется содержание индикатора в интересующей точке, после чего по временной зависимости тем же способом линейной экстраполяции определяется время достижения этого содержания. Предлагаемый способ опирается на эмпирические зависимости, справедливые в условиях схемы Б, поэтому такому прогнозу должен предшествовать анализ схемы миграции, возможной в данных конкретных условиях.

9. Закономерности рассеяния вещества в подземных водах

могут быть использованы пока в общем виде при генетических построениях и оценке сохранности оруденения.

Рассеяние вещества — это неперенное явление природы, действующее в широком диапазоне природных условий с высоким конечным эффектом. Характер и степень дисперсии вещества определяется схемой миграции. В схеме Б эффект рассеяния может быть настолько большим, что первоначально высокие концентрации вещества, поступающие в водоносный горизонт на расстояниях в сотни метров от источника вещества практически рассеиваются до уровня фона. При этом вероятность дальней миграции бывает весьма сомнительной. Учет закономерностей рассеяния при генетических построениях можно осуществить квалификацией схем миграции и приближенными балансовыми расчетами.

Более определенное приложение могут иметь закономерности рассеяния вещества к вопросам оценки сохранности месторождений полезных ископаемых. Переход полезного компонента из твердой фазы в подземные воды — это только первая фаза миграции. Дальнейшее определяется закономерностями дисперсии вещества при конвективном переносе его. В условиях, благоприятных для реализации фильтрационной дисперсии, может происходить необратимый процесс разрушения месторождений, в условиях, ограничивающих дисперсию, — лишь перераспределение вещества при прочих равных условиях. Рассеянию вещества способствует принадлежность разрушающихся месторождений к водоносным горизонтам большой мощности, изотропия фильтрационных свойств, неограниченный характер водоносных горизонтов, радиально расходящаяся форма потока подземных вод. Рассеяние ограничивается приуроченностью месторождений к водоносным горизонтам малой мощности, анизотропией фильтрационных свойств, ограниченным характером водоносных горизонтов, сходящейся формой потоков подземных вод. На основе условий, способствующих или препятствующих дисперсии, можно разрабатывать критерии для прогнозной оценки поисковых площадей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Албул С. П. Классификация рассеянного состояния рудных элементов в природной воде в связи с геохимическими поисками рудных месторождений.— В кн.: Тезисы докладов на науч.-техн. совещании по гидрогеологии и инженерной геологии. Секция геохимии. М., 1963, с. 13—16.
2. Албул С. П. Рудопоисковая гидрогеохимия. М., Изд-во Университета Дружбы народов им. П. Лумумбы. 1969. 344 с.
3. Баум В. А. Исследование процесса перемешивания в потоке жидкости, протекающей в трубах, заполненных кусковым материалом.— «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук», 1953, № 9, с. 1317—1329.
4. Боचेвер Ф. М., Орадовская А. Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений. М., «Недра», 1972. 129 с.
5. Бродский А. А. Основы гидрогеохимического метода поисков сульфидных месторождений. М., «Недра», 1964. 260 с.
6. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М., «Мир», 1971. 446 с.
7. Веригин Н. Н. Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелниорации и гидротехники.— «Изв. АН СССР, Отд. техн. наук», 1953, № 10, с. 1369—1382.
8. Веригин Н. Н., Шержуков Б. С. Диффузия и массообмен при фильтрации жидкостей в пористых средах.— В кн.: Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М., 1969, с. 237—277.
9. Гавришин А. И. Гидрогеохимические исследования с применением математической статистики и ЭВМ. М., «Недра», 1974. 144 с.
10. Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. Труды Первого Всесоюз. совещания по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Под ред. В. И. Красникова, М., 1957. 468 с.
11. Гидрохимические исследования. (Методические указания по геологической съемке масштаба 1:50 000, Вып. 10). Л., «Недра», 1970. 376 с. Авт.: Е. Е. Белякова, Ю. К. Бурков, О. М. Гирфанова и др.
12. Гидрохимический метод поисков рудных месторождений в аридных и полуаридных областях. М., Госгеолтехиздат, 1962, 268 с. Авт.: Е. Е. Белякова, А. А. Резников, Л. Е. Крамаренко и др.
13. Гидрогеохимический метод поисков рудных месторождений в Центральной Казахстане. (Методическое пособие). Л., «Недра», 1971. 152 с. Авт.: Г. Ф. Ларионов, Г. Б. Свешников, Л. Я. Тененбаум, И. А. Иванова.
14. Голева Г. А. Гидрогеохимические поиски скрытого оруденения. М., «Недра», 1968. 292 с.
15. Гольдберг В. М. Подземное захоронение промстоков химической промышленности (опыт и задачи гидрогеологических исследований). М., 1968. 79 с. (ВСЕГИНГЕО).
16. Грабовников В. А. Применение балансовых расчетов к изучению ореолов рассеяния вещества в подземных водах.— «Советская геология», 1972, № 2, с. 137—144.
17. Грабовников В. А., Самсонова Л. М. Влияние формы нахождения урана в растворах на сорбцию его природными минеральными образованиями.— «Геохимия», 1968, № 10, с. 1250—1259.
18. Данель П. Измерение потока подземной воды.— В кн.: Гидрогео-

логия и гидрология аридной зоны земного шара. Вып. 2. М., 1959, с. 165—182.

19. Движение различных индикаторов в потоке подземных вод.—«Изв. АН УзбССР. Сер. физ.-мат. наук», 1964, № 6, с. 43—47. Авт.: А. А. Абдуллаев, А. Т. Захидов, Е. М. Лобанов, Б. К. Хантов.

20. Засухин Г. Н., Логинова Л. А. Опыт применения геохимических поисков колчеданных месторождений на Южном Урале. М., Госгеолтехиздат, 1963. 136 с.

21. Зверев В. П. О механизме массопереноса растворенного вещества в верхних частях земной коры.—«Докл. АН СССР», 1972, т. 206, № 6, с. 1449—1452.

22. Казанский А. Б. Теория фильтрационной диффузии и приложение ее к задачам гидрологии и гидрогеологии. М., «Наука», 1973. 134 с.

23. Королев М. Е. Закономерности распределения микрокомпонентов в природных водах Енисейского края. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 1973. 192 с.

24. Коротков А. И., Павлов А. Н. Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. Л., «Недра», 1972. 184 с.

25. Кочетков В. И. Использование водных ореолов рассеяния при поисках слепых урановых рудных тел.—В кн.: Вопросы прикладной радиогеологии. Вып. 1. М., 1963, с. 260—269.

26. Крайнов С. Р. Геохимия редких элементов в подземных водах (в связи с геохимическими поисками месторождений). М., «Недра», 1973. 296 с.

27. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Изд-во АН СССР, 1952. 538 с.

28. Лисицин А. К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). М., «Недра», 1975. 248 с.

29. Методическое руководство по гидрогеохимическим поискам рудных месторождений. М., «Недра», 1973. 184 с. Авт.: П. А. Удодов, С. Л. Шварцев, Н. М. Рассказов и др.

30. Методическое руководство по определению микрокомпонентов в природных водах при поисках рудных месторождений. Под ред. И. Ю. Соколова. М., Госгеолтехиздат, 1961. 288 с.

31. Некоторые закономерности распределения урана в подземных водах.—В кн.: Труды II Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии в Женеве. Т. 3. М., 1959, с. 134—159. Авт.: А. И. Германов, С. Г. Батулин, Г. А. Волков и др.

32. Николаевский В. Н., Розенберг М. Д. Движение двух взаимнорастворимых жидкостей в пористой среде.—«Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Механика и машиностроение», 1959, № 2, с. 32—37.

33. Огильви А. Н. О разбавлении загрязненного потока грунтовых вод.—В кн.: Материалы III Всесоюзного симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Ч. 1. Москва—Таллин, 1969, с. 162—168.

34. Огильви А. Н. Роль гидродинамических процессов в самоочищении загрязненных подземных вод (на примере района г. Дзержинска). [Автореф. канд. дисс.] М., 1970. 29 с.

35. Огильви Н. А. Некоторые вопросы теории гидрогеохимических полей.—«Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», 1959, № 18, с. 3—24.

36. Опыт разработки гидрохимических методов поисков рудных месторождений. Под ред. А. А. Бродского и В. И. Красникова. М., Госгеолтехиздат, 1959. 104 с.

37. Орадовская А. Е. Некоторые экспериментальные данные о коэффициенте диффузии (дисперсии) в горных породах.—«Труды ВНИИ ВОДГЕО. Инженерная геология», 1969, вып. 22, с. 99—102.

38. Орадовская А. Е., Бочеввер Ф. М. Приближенный расчет растворения пластовых солей в основании гидротехнических сооружений.—«Труды ВНИИ ВОДГЕО. Гидрогеология», 1964, вып. 6, с. 9—14.

39. Письмен Л. М., Кучапов С. И., Левич В. Г. Поперечная диффузия в зернистом слое.—«Докл. АН СССР», 1967, т. 174, № 3, с. 650—653.
40. Патрашев А. Н., Аругюнян А. Х. Диффузия солей при одномерной фильтрации.—«Изв. НИИ Гидротехники». 1941, т. 30, с. 64—78.
41. Радужкевич Л. В. Теория динамики адсорбции на реальном зерне адсорбента.—«Докл. АН СССР», 1947, т. 57, № 5, с. 1123—1126.
42. Рачинский В. В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. М., «Недра», 1964. 136 с.
43. Резников А. А. Полевая гидрохимическая лаборатория типа 1950 г. М., Госгеолтехиздат, 1954. 52 с.
44. Рошаль А. А., Шестаков В. М. Методика полевых определений миграционных параметров пласта.—В кн.: Мат.-лы. 1-го респуб. научно-технич. совещания. Вып. I. Киев, 1970, с. 75—79.
45. Самсонов Б. Г., Самсонова Л. М. Оценка достоверности гидрохимических построений.—«Экспресс-информация ОНТИ—ВИЭМС. Серия гидрогеол. и инж. геол.». 1973, № 7, с. 7—20.
46. Сафмэн П. Теория дисперсии в пористой среде.—В кн.: Механика № 2 М., 1960, с. 1—33.
47. Серебрянников В. С. Сезонные изменения содержания урана в подземных водах.—В кн.: Материалы по геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. М., 1959, с. 218—223.
48. Смирнов А. А., Щербаков А. В. Методические указания по интерпретации и проверке радиогидрогеологических аномалий с целью поисков урановых месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1957, 34 с.
49. Смирнов С. И. Происхождение солёности подземных вод седиментационных бассейнов. М., «Недра», 1971. 216 с.
50. Сыромятников Н. Г. Миграция изотопов урана, радия и тория и интерпретация радиоактивных аномалий. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1961. 79 с.
51. Токарев А. Н., Щербаков А. В. Радиогидрогеология. М., Госгеолтехиздат, 1956. 264 с.
52. Удодов П. А., Матусевич В. М., Григорьев Н. В. Гидрохимические поиски в условиях полужакрытых геологических структур Томь-Яйского междуречья. Томск. Изд-во Томского ун-та, 1965. 202 с.
53. Удодов П. А., Онуфриёнок И. П., Париков Ю. С. Опыт гидрогеохимических исследований в Сибири. Методика и результаты работ. М., «Высшая школа», 1962. 192 с.
54. Хокс Х. Е., Уэбб Д. С. Геохимические методы поисков минеральных месторождений. М., «Мир», 1964. 448 с.
55. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М., «Мир», 1972. 381 с.
56. Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. М., 1961. 100 с. (ВОДГЕО).
57. Шестаков В. М. К теории фильтрации растворов в грунтах.—В кн.: Вопросы формирования химического состава подземных вод. М., 1963, с. 192—213.
58. Шестаков В. М. О кинетике сорбции на грунтах.—В кн.: Гидрогеологические основы подземного захоронения промстоков. М., 1969, с. 17—23.
59. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1973. 327 с.
60. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., «Мир», 1970. 368 с.
61. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии. М., Изд-во иностр. лит., 1947. 168 с.
62. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования. М., «Атомиздат», 1965, 308 с. Авт.: С. Г. Батулин, Е. А. Головин, О. И. Зеленова и др.
63. Aronofsky J. S., Heller J. P. Diffusion Model to Explain Mixing of Flowing Miscible Fluids in Porous Media.—«Trans AIME», 1957, v. 210, N 12, p. 345—349.
64. Bruch J. C. Two—Dimensional dispersion experiments in a porous

medium. — «Journ. Water Resources Research», June 1970, v. 6, N 3, p. 791—800.

65. De Josselin de Long. Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits. — «Trans. Am. Geophys. Un.», 1959, N 39, p. 67—74.

66. Harleman D. R. F., Rumer R. R. Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium. — «Journ. fluid mechanics», 1963, v. 16, pt. 3, p. 385—394.

67. Houpes J. A., Harleman D. R. F. Dispersion in Radial Flow from a Recharge Well. — «Journ. of Geophys. Research», 1967, v. 72, N 14, p. 3595—3607.

68. Ogata A. and Banks R. B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. — Prof. Paper 411—A, V, S, G, S, Wash., 1961, 7 p.

69. Orcutt R. G., Rifai M. N., Klein G. and Kaufman W. J. Underground movement of radioactive wastes. — «Sewage and Industrial Wastes», 1957, v. 29, N 7, p. 791—804.

70. Robertson I. B. and Barraclough I. T. Radioactive and chemical-waste transport in groundwater at National Reactor Testing Station, Idaho; 20-year case history and digital model. Prepr. Pap. 2nd Int. Symp. Underground Waste Management and Artificial Recharge, 1973, v. I, p. 291—322.

71. Sheidegger A. E. Statistikal hidrodinamics in porous media. — «Journ. Appl. Phys.», 1954, N 25, p. 994.

72. Sheidegger A. E. General theory of dispersion in porous media. — «Journ. of Geophys. Research», 1961, v. 66, N 10, p. 3273—3278.

73. Taylor G. I. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. — «Proc. Roy. Soc.», 1953, v. 219, N 1137, p. 186—203.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Физическая сущность процессов миграции и рассеяния вещества в подземных водах	5
1. Миграция	5
2. Рассеяние	5
Глава 2. Математические модели процессов миграции и рассеяния вещества в подземных водах	11
1. Детерминированные модели	11
2. Статистические модели	36
3. Основные схемы миграции и рассеяния вещества в подземных водах	41
Глава 3. Фильтрационная дисперсия вещества	43
1. Механизм фильтрационной дисперсии	44
2. Фильтрационная дисперсия при конвективном переносе	51
3. Некоторые осложнения модели фильтрационной дисперсии	57
4. Основные свойства фильтрационной дисперсии, понятие об ореоле рассеяния	59
Глава 4. Результаты лабораторного изучения ореолов рассеяния вещества	62
1. Основные задачи лабораторных исследований и методика моделирования	62
2. Рассеяние вещества в одномерном фильтрационном потоке	66
3. Рассеяние вещества в двух- и трехмерных фильтрационных потоках	79
4. Закономерности формирования ореолов рассеяния вещества	80
Глава 5. Результаты натуральных экспериментов	82
1. Оценка достоверности гидрогеохимических построений	82
2. Ореолы рассеяния от искусственных источников индикатора	90
Глава 6. Некоторые особенности рассеяния вещества от природных источников	114
1. Характеристика объема рассеяния от известных природных источников	114
2. Некоторые закономерности рассеяния вещества в природных условиях	124
Заключение	128
Список литературы	133

ИБ № 718

*Валерий Аркадьевич Грабовников, Вольдемар Захарович Рубейкин,
Лилия Михайловна Самсонова, Борис Григорьевич Самсонов*

**ФОРМИРОВАНИЕ И СТРОЕНИЕ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ
ВЕЩЕСТВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ**

Редактор издательства *Л. Н. Федорова*

Обложка художника *В. Т. Дружкова*

Художественный редактор *В. В. Евдокимов*

Технические редакторы *О. А. Болтинова, О. Н. Ласточкина*

Корректор *К. Н. Ильина*

Сдано в набор 19/XI 1976 г. Подписано в печать 2/II 1977 г. Т-00539 Формат 60×90^{1/16}
Бумага № 2 Печ. л. 8,5 Уч.-изд. л. 9,02 Тираж 1350 экз. Заказ 2537/6011-2 Цена 90 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета
Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва,
Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

