Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCI, 1982 г.

УДК 556.34 : 532.5.001.57

ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИИ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАССОЛОВ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Ф.Г.АТРОЩЕНКО, Н.С.ПЕТРОВ, А.Н.ШАРЫЙ

Проблема охраны подземных вод от загрязнения в соледобывающих районах страны с каждым годом становится все более актуальной, что обусловлено постоянным ростом объемов минерализованных промышленных стоков, поступающих в водоносные горизонты из технических водоемов (шламохранилищ, рассолосборников и т.п.). Масштабы неблагоприятных последствий подобного воздействия на подземные воды иллюстрирует опыт эксплуатации некоторых калийных месторождений Соликамской группы. В статьях настоящего сборника (см. статьи Короткова А.И., Головиной Н.Г. и Мироненко В.А., Мольского Е.В., Атрощенко Ф.Г.) дан анализ условий загрязнения подземных вод, происходящего под влиянием утечек из шламохранилища БКРУ-2. Не меньший интерес представляет прогноз дальнейшего изменения гидрохимической обстановки в области влияния этого шламохранилища.

В общем случае такой прогноз должен учитывать следующие важные механизмы миграции и характерные особенности фильтрационной схемы:

1) сосредоточенный характер инфильтрации рассолов из бассейна (несовершенного по степени вскрытия пласта), удельная интенсивность которой сопоставима с удельным расходом естественного потока на участке загрязнения подземных вод;

2) развитие процессов гравитационной дифференциации вещества в пласте за счет резких различий в плотности пластовых и сточных вод;

3) наличие гидродисперсионных эффектов продольного и поперечного рассеяния;

4) гетерогенную емкость и проницаемость вмещающих пород (трещиновато-пористые известняки и песчаники), усложняющие картину миграции за счет кинетического обмена веществом между трещинами и пористыми блоками.

Прогноз изменения гидрохимической обстановки под действием отмеченных факторов с помощью известных аналитических или численных методов связан с определенными математическими и вычислительными трудностями; кроме того, пока недостаточно исследована и сама физическая природа процессов.

Поэтому вполне целесообразно изучение некоторых закономерностей миграции рассолов на физических моделях.

Уже на первом этапе исследований, связанном в основном с анализом физических аспектов проблемы движения разноплотностных жидкостей методом лабораторного моделирования, мы стремились максимально приблизить модельные условия к реальному объекту гидрогеологических изысканий - участку шламохранилища БКРУ-2. Это позволит, сравнивания результаты лабораторных опытов с положением на реальном объекте, оценить возможности физического моделирования в целом.

Для обоснования интерпретационной схемы физического моделирования сопоставим исходные уравнения гидродинамики и массопереноса, записанные для натурной и модельной обстановки:

для реальных пластовых условий

$$\frac{\partial}{\partial x^{н}}\left(\frac{K_x^{н}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{н}}{\partial x^{н}}\right)+\frac{\partial}{\partial y^{н}}\left(\frac{K_y^{н}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{н}}{\partial y^{н}}\right)+\frac{\partial}{\partial z^{н}}\left[\frac{K_z^{н}}{\bar{\rho}}\left(\frac{\partial H^{н}}{\partial z^{н}}+\bar{\rho}-1\right)\right]=0;$$

$$\frac{K_x^{н}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{н}}{\partial x^{н}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x^{н}}+\frac{K_y^{н}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{н}}{\partial y^{н}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial y^{н}}+\frac{K_z^{н}}{\bar{\rho}}\left(\frac{\partial H^{н}}{\partial z^{н}}+\bar{\rho}-1\right)\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial z^{н}}+n^{н}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t^{н}}=$$

$$-\delta_x^{н}\frac{\partial}{\partial x^{н}}\left(K_x^{н}\frac{\partial H^{н}}{\partial x}\frac{\partial\rho}{\partial x^{н}}\right)+\delta_y^{н}\frac{\partial}{\partial y^{н}}\left(K_x^{н}\frac{\partial H^{н}}{\partial x}\frac{\partial\rho}{\partial y^{н}}\right)+\delta_z^{н}\frac{\partial}{\partial z^{н}}\left(K_x^{н}\frac{\partial H^{н}}{\partial x^{н}}\frac{\partial\rho}{\partial z^{н}}\right); \quad (1)$$

для модельных условий

$$\frac{\partial}{\partial x^{м}}\left(\frac{K_x^{м}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{м}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y^{м}}\left(\frac{K_y^{м}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{м}}{\partial y^{м}}\right)+\frac{\partial}{\partial z^{м}}\left[\frac{K_z^{м}}{\bar{\rho}}\left(\frac{\partial H^{м}}{\partial z^{м}}+\bar{\rho}-1\right)\right]=0;$$

$$\frac{K_x^{м}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{м}}{\partial x^{м}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x^{м}}+\frac{K_y^{м}}{\bar{\rho}}\frac{\partial H^{м}}{\partial y^{м}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial y^{м}}+\frac{K_z^{м}}{\bar{\rho}}\left(\frac{\partial H^{м}}{\partial z^{м}}+\bar{\rho}-1\right)\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial z^{м}}+n^{м}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t^{м}}=$$

$$=\delta_x^{м}\frac{\partial}{x^{м}}\left(K_x^{м}\frac{\partial H^{м}}{\partial x^{м}}\frac{\partial\rho}{\partial x^{м}}\right)+\delta_y^{м}\frac{\partial}{\partial y^{м}}\left(K_x^{м}\frac{\partial H^{м}}{\partial x^{м}}\frac{\partial\rho}{\partial y^{м}}\right)+\delta_z^{м}\frac{\partial}{\partial z^{м}}\left(K_x^{м}\frac{\partial H^{м}}{\partial x^{м}}\frac{\partial\rho}{\partial z^{м}}\right). \quad (2)$$

В уравнениях (I) и (2) приняты следующие обозначения: $\bar{\rho}=(\rho-\rho^{0})/(\rho_0-\rho^{0})$ - относительная плотность раствора; ρ_0 - исходная плотность раствора в бассейне; ρ^{0} - плотность пластовых вод; ρ - текущая плотность смешанной жидкости; H - функция напора; x, y z - декартовы координаты, ось x совпадает с направлением вектора средней скорости естественного фильтрационного потока, ось z совпадает с направлением вектора силы тяжести; t - время; K_x, K_y, K_z - компоненты коэффициента фильтрации; δ_x, δ_y, δ_z - компоненты константы гидродисперсии; индексы н и м указывают, что параметр отражает процессы, протекающие соответственно в натурных и модельных условиях. В уравнениях (I)-(2) принято $\bar{\rho}=\bar{\rho}^{н}=\bar{\rho}^{м}$.

Вводя масштабные коэффициенты геометрического подобия α_x, α_y и α_z, получим соотношения, связывающие между собой аргументы и коэффициенты систем уравнений (I) и (2):

$$\alpha_x = \frac{x^н}{x^м}, \quad \alpha_y = \frac{y^н}{y^м}, \quad \alpha_z = \frac{z^н}{z^м}, \quad H^н \approx \alpha_z H^м; \tag{3}$$

$$\frac{\alpha_y^2}{\alpha_x^2} = \frac{K_y^н K_x^м}{K_y^м K_x^н}, \quad \frac{\alpha_z^2}{\alpha_x^2} = \frac{K_z^н K_x^м}{K_z^м K_x^н}; \tag{4}$$

$$\frac{\delta^н}{\delta^м} = \alpha_x, \quad \frac{\delta_y^н}{\delta_y^м} = \frac{\alpha_y^2}{\alpha_x}, \quad \frac{\delta_z^н}{\delta_z^м} = \frac{\alpha_z^2}{\alpha_x}; \tag{5}$$

$$\frac{t^н}{t^м} = \frac{\alpha_x^2 \, n^н K_x^м}{\alpha_z \, n^м K_x^н} \tag{6}$$

Легко проверить, что подстановка полученных соотношений (3)-(6) в уравнение (I) или (2) делает эти уравнения полностью тождественными.

При расчетах приняты следующие параметры водоносного пласта и песчаного материала, использованного для засыпки лабораторного лотка: $K_x^н = K_y^н = 5$ м/сутки; $K_z^н = 0{,}5$ м/сутки; $K_x^м = K_y^м = K_z^м = 10$ м/сутки; $\delta_x^м = 0{,}005$ м; $\delta_y^м \approx \delta_z^м \approx 0{,}0005$ м; пористость блоков $n^н = 0{,}06$; $n^м = 0{,}35$; средняя мощность водоносного горизонта $m^н = 110$ м, модели $m^м = 0{,}7$ м.

Следует заметить, что при выборе геометрических размеров физической модели, имитирующей процессы миграции в пласте, мощность которого весьма незначительна в сравнении с его протяженностью, соблюсти равенство вертикального α_z и плановых α_x и α_y линейных масштабов довольно трудно. В этих условиях целесообразно коэффициент α_z определять по соотношению мощностей $m^н$ и $m^м$, а плановые масштабные коэффициенты α_x и α_y подбирать расчетом так, чтобы выполнялись соотношения подобия для коэффициентов анизотропии пласта и модели: $\alpha_z = m^н/m^м = 1{,}57 \cdot 10^2$; $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_{x,y} = \alpha_z \sqrt{\frac{K_x^н K_z^м}{K_z^н K_x^м}} = 4{,}96 \cdot 10^2$.

Такой подход к выбору масштабных коэффициентов при интерпретации данных моделирования фильтрации разноплотностных жидкостей вполне оправдан и с физической точки зрения: минерализованные растворы с повышенной плотностью весьма быстро достигают подошвы пласта, поэтому его ограниченность по мощности с самого начала развития процесса определяет в значительной степени особенности внутрипластовой миграции; напротив, миграция рассолов к внешним плановым гидродинамическим границам пласта - достаточно длительный процесс, в течение которого эти границы весьма слабо влияют на перенос, что позволяет считать пласт неограниченным по простиранию.

Для пересчета модельного времени $t^м$ на натурное $t^н$ из формулы (6) используем зависимость $t^н = 537\, t^м$.

Известные значения констант модели $\delta^{м}$ и $\delta'^{м}$ позволяют рассчитать по линейным зависимостям (5) константы продольной и поперечной (плановой и профильной) гидродисперсии $\delta^{н}$ и $\delta'^{н}$, которые отражают рассеивающие характеристики натурного пласта: $\delta_x^{н} \approx 2{,}5$ м; $\delta_y^{н} = \delta_z^{н} \approx 0{,}025$ м. Таким образом, модель занижает показатели поперечного рассеяния, которые для трещиноватых пород должны быть, как минимум, на один-два порядка выше.

Опыты проводились в фильтрационном лотке, который представляет собой прямоугольный короб, состоящий из рабочей камеры размером I,7 х I,I4 х 0,7 м, заполненной разнозернистым песком, и двух камер питания - дренажа. По всему объему рабочих камер располагались гирлянды резистивиметров, с помощью которых фиксировались пространственные и временные изменения минерализации воды. В рабочей камере лотка задавался одномерный фильтрационный поток с расходом $Q_e^{м} = 8{,}33$ л/ч посредством подачи водопроводной воды (минерализация 0,I г/л) в камеру питания; установившийся перепад уровней между разгрузочной камерой и камерой питания 0,04 м. Раствор поваренной соли (исходная минерализация 250 г/л) подавался из бассейна диаметром 0,I м, сооруженного в рабочей камере лотка на расстоянии I,35 м от нижнего бьефа; расход из бассейна $Q_0^{м} = I{,}86$ л/ч. Заданное на модели соотношение расходов $Q_0^{м} / Q_e^{м} = I/4{,}5$, что примерно отвечает соотношению $Q_0^{н} / Q_e^{н}$ в природных условиях (расход естественного потока в пределах ореола загрязнения $Q_e^{н} \approx$ II0 л/с, а из шламохранилища БКРУ-2 - $Q_0^{н} \approx 25$ л/с).

Рассмотрим прежде всего физические закономерности миграционного процесса, которые проявились в модельном эксперименте. Для этого воспользуемся результатами наблюдений за изменением общей минерализации солей в определенных точках потока, которые позволили получить картину распределения солей в вертикальной плоскости продольного осевого сечения потока (рис.I), а также в плановых его проекциях (рис.2).

Анализ моделирования позволил условно выделить три основных временных этапа эволюции объемного ореола рассеяния: I) образование соленого тела и опускание его к подошве пласта; 2) продвижение соленого тела по подошве пласта и формирование дисперсионной зоны; 3) стабилизация границ соляной интрузии во времени.

Итак, картина миграции в целом носит объемный - трехмерный - характер, причем на весь процесс массопереноса сильно влияют гравитационные силы, возникающие за счет различий в плотностях инфильтрующейся жидкости и потока-носителя. Так, на первом этапе наблюдается крутое погружение интрузии соленых вод, которая довольно быстро достигает нижней границы пласта; при этом практически вся интрузия представлена неразбавленными растворами, имеющими исходную минерализацию. Влияние естественного потока здесь мало ощутимо. На более поздних этапах миграции гравитация также определяет повышенные скорости продвижения "языка" рассолов по подошве пласта.

Дальнейшая инфильтрация из бассейна приводит к росту размеров ореола соленых вод, причем в его строении уже отчетливо выделяются две зоны: внутренняя - ядро, представленная неразбавленными рассолами, и внешняя - зона дисперсионного рассеяния, в пределах которой содержание компонентов

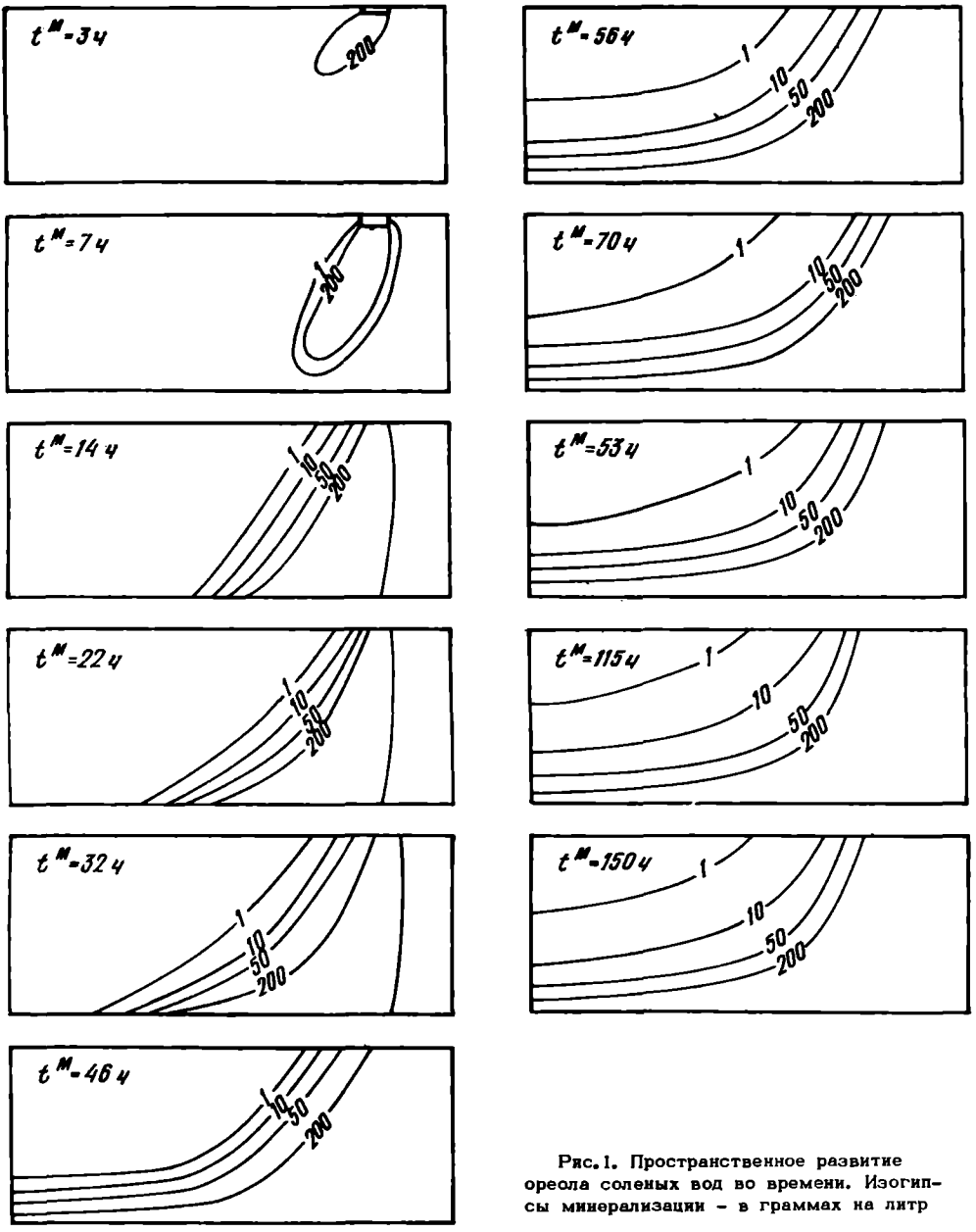


Рис. 1. Пространственное развитие ореола соленых вод во времени. Изогипсы минерализации – в граммах на литр

меняется от исходных до фоновых значений. Ядро интрузии является непроницаемым для пресных пластовых вод, причем скорость его горизонтального перемещения, как показывают простейшие расчеты, значительно (на порядок и более) уступает скорости транзитного потока подземных вод. Такое соотношение в скоростях приводит к тому, что пластовая жидкость, омывая тело концентрированных рассолов с боковых сторон, сносит часть вещества, иду-

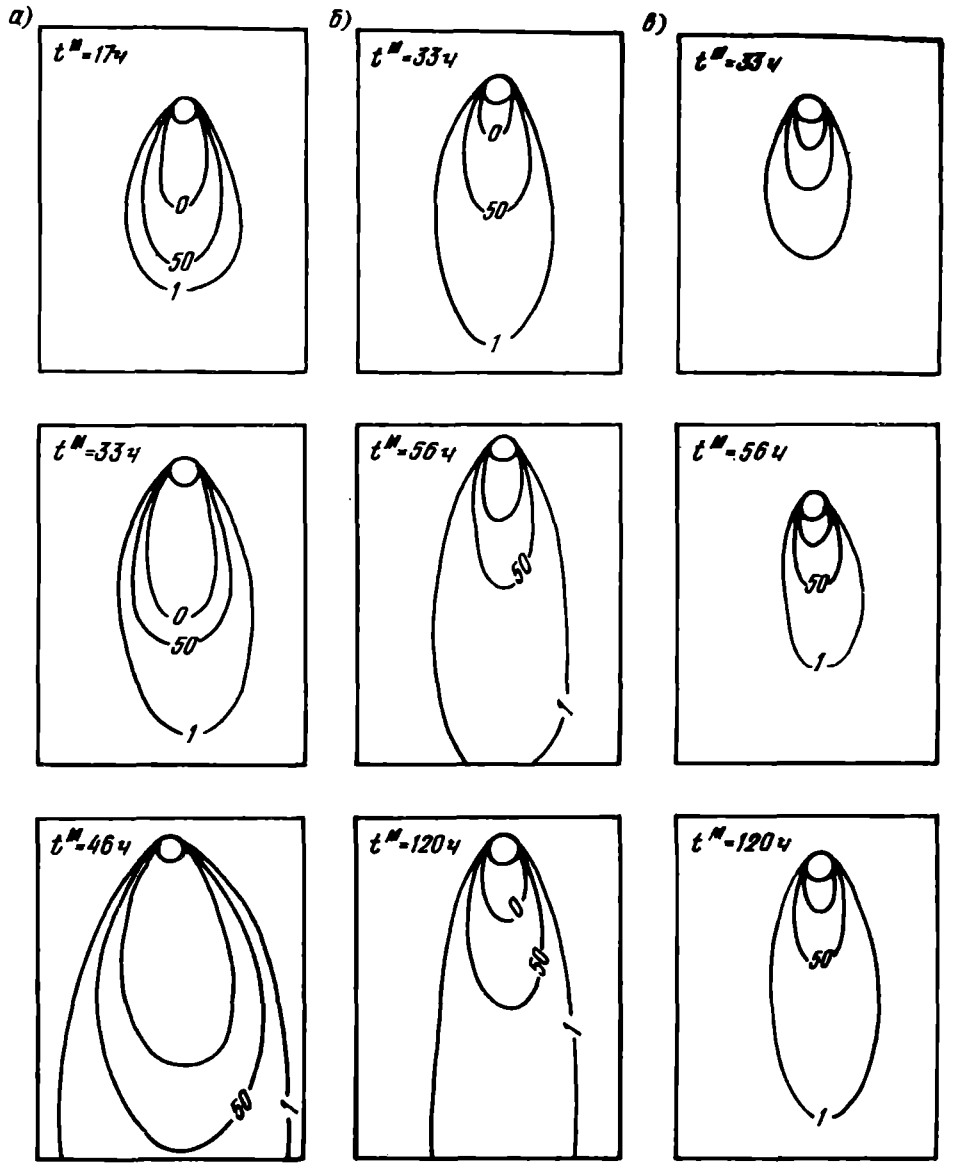


Рис.2. Плановое развитие ореола соленых вод на различные моменты времени и различной глубине h : а - h = 55 см; б - h = 42 см; в - h = 35 см

щего на формирование дисперсионной зоны. Размеры переходной зоны становятся сопоставимыми с размерами самого ядра.

Наконец, третий этпа характеризуется устойчивым пространственно-временным положением ореола: наблюдается стационарное распределение концентрации солей в плане и разрезе потока. Стабилизация подтверждается и балансовыми оценками; количество соли, поступающей из поверхностного бассейна в единицу времени становится равным потоку вещества на выходе модели.

Уже из самого общего качественного сопоставления результатов моделирования с данными натурных наблюдений следует, что на модели получена картина, физически подобная той, которая имеет место на участке загрязнения подземных вод рассолами шламохранилища БКРУ-2. Кроме того, выведенные выше из критериев подобия (3)-(6) пересчетные масштабные коэффициенты позволяют использовать данные моделирования и для количественного анализа процесса миграции разноплотностных жидкостей применительно к натурному объекту. Правда, ограниченная протяженность лабораторной модели дает представление о развитии реального загрязнения пермского водоносного комплекса в пределах области размером $L_x^н \times L_y^н \approx 670$ м x 280 м ($L_x^н = \alpha_x L_x^м$, $L_y^н = \alpha_y L_y^м$). Так как фронт рассолов достигает разгрузочной камеры за $t^м = 40$ ч, то временной диапазон, в пределах которого справедливы оценки для натурного объекта, составляет $t^н \approx 2{,}5$ года.

Основываясь на результатах моделирования, можно считать установленным:

I) время достижения интрузией подошвы пермского водоносного комплекса составляет около I60 суток (5,5 месяцев) с момента заполнения хвостохранилища рассолами;

2) ядро интрузии неразбавленных рассолов в средней плоскости пласта имеет размеры 200-250 м, что примерно в 2-3 раза ниже величины интрузии, наблюдаемой в настоящее время ($t^н =$ II лет);

3) скорость продвижения „языка" рассолов по подошве пласта в начальный период 0,3 м/сутки (около I00 м/год);

4) зона дисперсионного рассеяния в направлении потока пресных вод протягивается на I50-200 м, а в ортогональном направлении на 50-I00 м.

Выводы

I. Исследования уже на первом этапе показали, что физическое моделирование - достаточно эффективный инструмент для изучения особенностей формирования и развития объемных миграционных потоков. Количественный переход от модельных к натурным условиям осуществляется в соответствии с предложенными масштабными коэффициентами.

2. Вместе с тем весьма сложно, а подчас и невозможно добиться на модели адекватного отражения дисперсионных эффектов: во-первых, константы плановой и профильной поперечной дисперсии почти всегда оказываются резко заниженными (в пересчете на натурные условия); во-вторых, при моделировании практически невозможно имитировать макродисперсию, имеющую место в природных гетерогенных средах.

3. Наиболее надежных результатов следует ожидать от моделирования при оценке начальных, резко нестационарных, этапов миграции, пока ведущее значение имеют конвективный и гравитационный механизмы массопереноса, а роль гидродисперсии в формировании ореола рассеяния невелика. Напротив, при длительном нахождении растворов в пласте, когда картина миграции в значительной степени определяется развитием дисперсионных явлений, моделирование может давать резко смещенные оценки, зачастую непригодные даже для качественных прогнозов.