

УДК 556.388:621.039+621.039.58

© 1996 г.

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ОЗЕРА  
КАРАЧАЙ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ***Е.Г. Дрожко, И.А. Иванов  
Россия, г. Озерск, ПО "Маяк"**Л.М. Самсонова, Н.А. Василькова, А.В. Глаголев, К.С. Тер-Саакян  
Россия, г. Москва, ГП "Гидроспецгеология"**А.И. Зинин, Г.А. Зинина  
Россия, г. Обнинск, ГНЦ ФЭИ*

Представлено краткое описание гидрогеологических условий района озера Карачай и существующей системы мониторинга. Описаны две версии численной геофильтрационной модели GEON - плановая и трехмерная. Основные задачи, решаемые с помощью модели, включают в себя прогноз развития ореола загрязнения в водоносном горизонте и оценку последствий планируемых инженерных мероприятий. Даны характеристики программного обеспечения модели, ее информационного насыщения. На основании сопоставления фактических и расчетных характеристик подземного потока сделан вывод об адекватности модели реальным условиям. Приведены результаты прогнозных расчетов.

Защита чистых подземных вод и реабилитация загрязненных подземных вод являются задачами большого социального и экономического значения. Практическое решение этих задач требует детального знания процессов движения подземных вод и переноса загрязнений.

Оценка степени влияния производственной деятельности ПО "Маяк" на загрязнение подземных и поверхностных вод проводится путем систематического контроля по режимной сети, включающей к 1995 году 452 гидрогеологических скважины, гидростворы и гидропосты на поверхностных водотоках и точки наблюдений на

поверхностных водоемах в пределах контролируемой зоны. Существующая система наблюдений дала возможность оценить масштаб, структуру и состав загрязнения подземных и поверхностных вод и проследить изменение его во времени.

Специалистами ПО "Маяк" совместно с сотрудниками ведущих российских научных и производственных организаций (ГП Гидроспецгеология, ИГЕМ РАН, ИГФ УрО РАН, ВНИПИЭТ, ИБФ, ИВХАН, ГЕОХИ и др.) выполнен большой объем комплексных геолого-геофизических, гидрогеологических и гидрогеохимических работ с применением современных методов исследований (теле-

фотометрия, опробование подземных вод с использованием пакерной системы, гидрохимический картаж скважин, петрографические исследования загрязненных водовмещающих пород и др.). Это позволило уточнить параметры загрязнения подземной гидросферы, тектоническое строение района, гидрологический режим поверхностных водотоков и водоемов [1].

Проведенные работы помогли с высокой степенью достоверности охарактеризовать геологические, структурно-тектонические и гидрогеологические условия, определяющие миграцию компонентов-загрязнителей в подземных водах рассматриваемого района.

#### 1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СИСТЕМА МОНИТОРИНГА РАЙОНА ОЗЕРА КАРАЧАЙ

Бессточное озеро Карачай, расположенное в междуречье верховьев р.Теча и р.Мишеляк, эксплуатируется как хранилище жидких радиоактивных отходов. Среднеактивные отходы сбрасываются в озеро Карачай (или водоем-9, В-9), начиная с 1951 года. В настоящее время в В-9 сосредоточено около 120 млн. Ки радионуклидов.

Подземные воды приурочены к трещиноватым породам скального фундамента, зоне коры выветривания и аллювиальным отложениям р. р. Теча и Мишеляк. Степень трещиноватости изменяется в широком диапазоне как в плане, так и по глубине. С глубиной трещиноватость затухает. За нижнюю границу водоносного горизонта принимается глубина, на которой трещиноватость уменьшается на 90% от общей трещиноватости скального массива. Ниже этой глубины слаботрещиноватая толща может рассматриваться как относительный водоупор. Мощность водоносного горизонта изменяется от 50-80 метров до 130-190 метров.

Водоносный горизонт имеет атмосферное питание. Уровень водоносного горизонта

определяется количеством выпадающих атмосферных осадков. Глубина до воды от поверхности земли изменяется от 0.2 м до 22 м. Инфильтрационное питание подземных вод непостоянно во времени и неравномерно распределено по территории.

Водопроницаемость водоносного комплекса может быть квалифицирована как резко неоднородная. Результаты полевых и лабораторных исследований показывают, что коэффициент водопроницаемости изменяется в диапазоне 0-800 м<sup>2</sup>/сут для различных участков района. Величина коэффициента фильтрации уменьшается с глубиной. Наиболее проводимые породы находятся в интервале 10-40 м.

Средняя величина водоемкости пород равна: 0.02-0.03 - для верхней части водоносного горизонта, 0.005-0.007 - для средней части и 0.0007-0.0002 - для нижней.

Основной вклад в загрязнение подземных вод вносит оз. Карачай. За время эксплуатации водоема как хранилища в подземные воды поступило порядка 410<sup>6</sup> м<sup>3</sup> промышленных растворов, плотность которых изменялась в диапазоне 1.02-1.09 г/см<sup>3</sup>. Техногенные растворы и подземные воды взаиморастворимы. Скорость потока подземных вод - 0.2 - 0.7 м/сут. В настоящее время сброс технологических отходов в этот водоем значительно сокращен. С 1986 года начата поэтапная ликвидация В-9.

Система мониторинга подземных вод включает:

- гидрологические наблюдения за уровнями, химическим и радионуклидным составом поверхностных вод в реках, озерах, хранилищах, каналах;
- гидрогеологические наблюдения за уровнями подземных вод и их химическим и радионуклидным составом;
- гидрогеологические наблюдения за дебитами эксплуатационных скважин водозаборов и качеством откачиваемой воды.

Систематические наблюдения за подземными водами начаты в 1964 году и осуществляются через систему наблюдательных скважин.

Систематические наблюдения за миграцией загрязнений в подземных водах по всему району были начаты в 1970 году и продолжаются по настоящее время.

Замеры уровней расходов в реках и каналах проводятся по 12 гидрологическим постам по методике Гидромета. Замеры уровней в озерах и водоемах-хранилищах осуществляются также по государственным методикам.

Система мониторинга подземных вод позволила установить пространственно-временные закономерности распространения раствора повышенной плотности в потоке подземных вод. Главными факторами миграции являются конвективный перенос и плотностная конвекция. Миграции вещества сопутствуют его рассеяние, обусловленное фильтрационной дисперсией, физико-химическое взаимодействие с водовмещающими породами, а также радиоактивный распад.

Конечной целью гидрогеологических исследований является оценка необходимости и возможности искусственной локализации очага загрязнения в водоносном горизонте. В связи с этим актуальна задача прогнозирования развития ореола под действием естественных процессов, а также оценки последствий возможных инженерных мероприятий. Прогнозные расчеты должны дать ответ на вопрос о месте и величине разгрузки загрязненных вод в речную сеть и на поверхность земли и оценить концентрации радионуклидов в разгружающемся потоке, предсказывать эффективность защитных мероприятий для предотвращения разгрузки в реку Мишеляк или ухода загрязнения за пределы контролируемой зоны.

Практически единственным методом решения названных задач является математическое моделирование процесса, что объясняется сложностью гидрогеологических

условий, требующих учета при реализации прогнозных оценок. Это прежде всего:

- высокая плотность раствора-загрязнителя;
- сильная пространственная неоднородность геофильтрационных и емкостных свойств;
- относительно высокий уровень подземных вод в области распространения загрязнения и наличие гидравлической связи подземных и поверхностных вод;
- существенная трехмерность процесса миграции загрязнения в подземных водах, обусловленная гравитационной конвекцией в районе В-9 и разгрузкой в поверхностные водоемы и водотоки.

## 2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО РАЗРАБОТКЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РАЙОНА ПО "МАЯК"

Вопрос о создании численных моделей распространения загрязнений в подземных водах района ПО "Маяк" был поставлен в 1990 году. Разработка моделей проводится совместно сотрудниками ГГП Гидроспецгеология, Физико-энергетического института и ПО "Маяк". С самого начала работа велась одновременно по двум направлениям. Первое направление - математическое описание явления и разработка программного обеспечения для моделирования, второе - собственно построение моделей. Второе направление включает обеспечение модели необходимыми исходными данными, калибровку и валидацию моделей, выполнение прогнозных расчетов.

Для рассматриваемого района характерно уникальное в гидрогеологической практике количество прямых исходных данных - около 300 точек опытного определения параметров, режимная сеть с 30-летним периодом наблюдений, контроль водного баланса источника. Высокий уровень исходной информации позволяет при всех известных объективных погрешностях и неопределенностях исходных данных надеяться на возможность построения модели, адекватной

природным условиям.

Все компьютерные программы разрабатывались с учетом специфических гидрогеологических условий района ПО "Маяк", которые описаны выше.

### 2.1. Общая характеристика программного обеспечения

Анализ исходной информации позволяет сделать вывод о существенно трехмерном характере миграции загрязнения в районе оз. Карачай. Таким образом, речь идет о построении модели, относящейся к классу многопараметрических с пространственно-распределенными параметрами, модели многофакторного нестационарного процесса.

Создание модели осуществляется поэтапно. Разрабатывается система разно-масштабных моделей. На первом этапе в региональном масштабе строится общая геофильтрационная модель и решается нестационарная задача фильтрации в плановой постановке. На ее основе выделяются границы трехмерных подобластей субрегионального масштаба, где нельзя игнорировать трехмерность потока. В субрегиональном масштабе решается нестационарная трехмерная задача фильтрации-миграции с учетом плотностной конвекции и эволюции формы свободной поверхности подземных вод. Учитывается также рельеф поверхности относительного водоупора, так как предполагается аккумуляция загрязнителя во впадинах поверхности водоупора в силу плотностной конвекции.

В 1991-1993 годах была разработана программа GEON-2D для моделирования плановой нестационарной фильтрации и миграции нейтрального компонента [2]. В двумерной плановой постановке задача формулируется в приведенных напорах путем осреднения гидравлических свойств по глубине с учетом ряда допущений. Программа рассчитана на большие размерности сеток и имеет сравнительно высокое быстродействие.

GEON-2D - удобный инструмент для решения обратных задач, таких как калибровка моделей, получение оценок пористости по полевым данным о форме ореола и т.п. Плановая модель разрабатывалась как основа для трехмерной, обеспечивающая последнюю граничными условиями и плановыми параметрами.

В 1993 г. появилась первая версия трехмерной программы GEON-3D, в начале 1995 г. - дополненная и переработанная версия. Программа GEON-3D предназначена для совместного решения уравнений сохранения массы раствора, концентрации растворенных примесей и эволюции формы свободной поверхности подземных вод. Это трехмерная конечно-разностная программа для мощных персональных компьютеров. Она генетически связана с двумерной (плановой) программой GEON-2D, которая вошла в состав GEON-3D как процессор граничных условий. Используется на компьютерах типа IBM PC AT/486 с операционной системой MS-DOS. В качестве геометрического элемента модели рассматривается многогранная призма, опирающаяся на контур зоны плановой неоднородности, и имеющая кусочно-однородное распределение свойств по вертикали, которое не зависит от такового для соседних призм. Программа автоматически отображает описанную геометрию на заданную неравномерную конечно-разностную сетку и осредняет параметры по ячейкам сетки.

Возможно решение стационарных и нестационарных задач.

Естественно, что на начальном этапе исследований мы не ставили цель учесть все сложнейшие физико-химические взаимодействия раствора-загрязнителя с водовмещающими породами. Основное допущение модели - плотность раствора связана с одной нейтральной компонентой (нитрат-ион). Допускается наличие нескольких компонент-трассеров, которые не влияют на плотность раствора и не взаимодействуют между собой,

но могут быть подвержены радиоактивному распаду и могут задерживаться в процессе сорбции-десорбции. Гидродисперсия учитывается для всех компонент.

Ненасыщенный поток в зоне аэрации не моделируется. Инфильтрационное питание поступает непосредственно на свободную поверхность подземных вод.

Задача формулируется в терминах уровня свободной поверхности  $h(x,y,t)$ , гидравлического напора  $H(x,y,z,t)$ , компонент вектора скорости  $V_x(x,y,z,t)$ ,  $V_y(x,y,z,t)$ ,  $V_z(x,y,z,t)$  и объемной концентрации.

Уровень свободной поверхности определяет верхнюю границу насыщенного потока. Гидравлический напор связан с давлением формулой

$$P = P_{atm} + \rho_0 \cdot g(H(x, y, z, t) - z) \quad (1)$$

Компоненты вектора скорости связаны с напором с помощью закона Дарси:

$$\begin{aligned} V_x(x, y, z, t) &= -K_f \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \\ V_y(x, y, z, t) &= -K_f \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \\ V_z(x, y, z, t) &= -K_f \cdot \left( \frac{\partial H}{\partial z} + \beta C \right) \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнении (2) учтена линейная связь между плотностью раствора и концентрацией в форме

$$\rho = \rho_0(1 + \beta C) \quad (3)$$

Баланс объема раствора в области насыщения выражается уравнением

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = -Q \quad (4)$$

где  $Q$  - плотность стоков через отка-

чивающие скважины,

$\Phi$  - эффективная пористость.

На нижней границе (поверхность водоупора) ставится условие непроницаемости. Граничные условия на верхней поверхности подземных вод динамически разбиваются на три группы:

1. Зоны и участки, где имеется гидравлическая связь подземных и поверхностных вод (озера, реки, болота). Граничные условия зависят от текущего режима связи подземных и поверхностных вод.

2. Область разгрузки на земную поверхность (верхняя граница подземных вод выходит на земную поверхность:  $h(x,y,t) = \sigma(x,y)$ ). В области разгрузки задается условие 3-го рода

$$\left( \vec{V}, \vec{n} \right) = \alpha_w (H - \sigma(x, y)), \quad (5)$$

где  $\sigma(x,y)$  - уровень земной поверхности,  $\alpha_w$  - эмпирический коэффициент.

Область верхней границы, где выполнено условие  $h(x,y,t) < \sigma(x,y)$ . В этом случае граничные условия имеют вид:

$$H(x,y,h(x,y,t),t) = h(x,y,t), \quad (6)$$

$$\Phi \cdot \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial t} = W_{in}(x,y,t) - W_{ev}(x,y,h(x,y,t),t) + V_z(x,y,h(x,y,t),t) - \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial x} \cdot V_x(x,y,h(x,y,t),t) - \frac{\partial h(x,y,t)}{\partial y} \cdot V_y(x,y,h(x,y,t),t), \quad (7)$$

где  $W_{in}$  - скорость инфильтрации,  $W_{ev}$  - скорость испарения со свободной поверхности.

Условие (6) означает равенство давления на свободной поверхности атмосферному давлению.

Уравнение эволюции уровня свободной поверхности (7) с граничными условиями и с ограничением на уровень свободной



поверхности представляет собой нелинейную краевую задачу типа задачи Стефана. При решении этой задачи одновременно с уровнем свободной поверхности определяются границы зон разгрузки на поверхность земли и режимы гидравлической связи с поверхностными водами (озера, реки).

На частях боковой поверхности моделируемого объема задается либо условие непроницаемости, либо условие Дирихле для гидравлического напора. Используется гидростатическое приближение для распределения давления по глубине боковой поверхности. Нестационарные значения гидравлического напора получаются в результате расчета по программе GEON-2D двумерной плановой модели расширенной области.

В качестве начальных условий для решения нестационарных задач используется стационарное решение для чистой воды с данными, соответствующими начальному моменту времени. Результат любого шага решения нестационарной задачи можно использовать как начальные условия для решения другой нестационарной задачи.

Миграция загрязнителя описывается уравнением конвективно-дисперсионного переноса:

$$\Phi(x, y, z) \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = \nabla \cdot (\hat{D} \nabla C) - Q \cdot C \quad (8)$$

На выходных границах, то есть на всех участках внешней границы, на которых имеет место неравенство

$$(\vec{V}, \vec{n}) > 0, \vec{n} - \text{внешняя нормаль}$$

задается условие отсутствия дисперсионного тока

$$(\vec{n}, \nabla C) = 0.$$

Вода, поступающая через входные элементы границы, считается чистой, в области источника задается условие  $C = C_{\text{sou}}(t)$ .

Тензор дисперсии выражается формулой

$$\hat{D} = \left( D_{ii} + \alpha_i \cdot |\vec{V}| \right) \cdot \hat{I} + (\alpha_1 - \alpha_i) \cdot \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}^T}{|\vec{V}|} \quad (9)$$

Для решения нелинейных систем применяется квазиньютоновская итерационная техника, основанная на приближенной линеаризации.

Линейные алгебраические системы решаются методом сопряженных направлений с переобуславливанием матрицы системы по схеме неполной факторизации, предложенной Н.И. Булеевым. Используются свойства монотонности и разреженности матриц линейных систем.

Организация программы GEON-3D тесно связана с ее функциональным назначением. Программа состоит из значительного числа независимых выполняемых модулей, и это позволяет решать большие задачи с помощью многостадийного и многосеансного подхода. Модули связаны по данным через общую базу данных варианта. Результаты нестационарного расчета архивируются и помещаются в архив варианта для последующей обработки. Вычислительные и графические модули GEON-3D написаны на языке С и используют динамическое распределение оперативной памяти. Ограничения по размерности конечно-разностных сеток определяются только объемом оперативной памяти.

## 2.2. Разработка моделей

В 1993 году на базе программы GEON-2D была построена региональная геофильтрационная модель района промышленных водоемов-хранилищ жидких радиоактивных отходов (район озера Карачай). Большой объем контрольной информации позволяет использовать при моделировании калибрационные процедуры для согласования

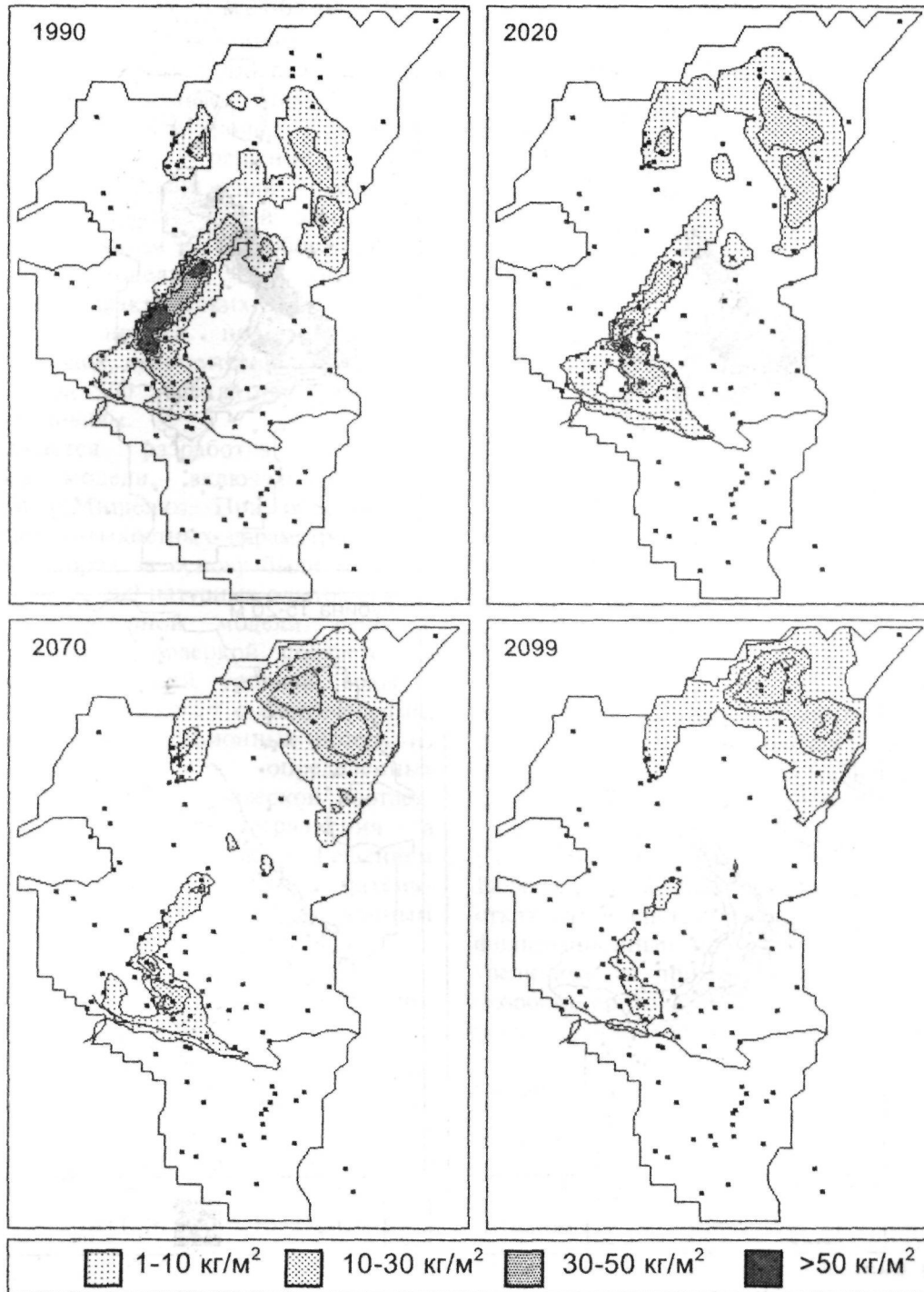


Рис.1. Плотность распределения нитрат-иона по площади

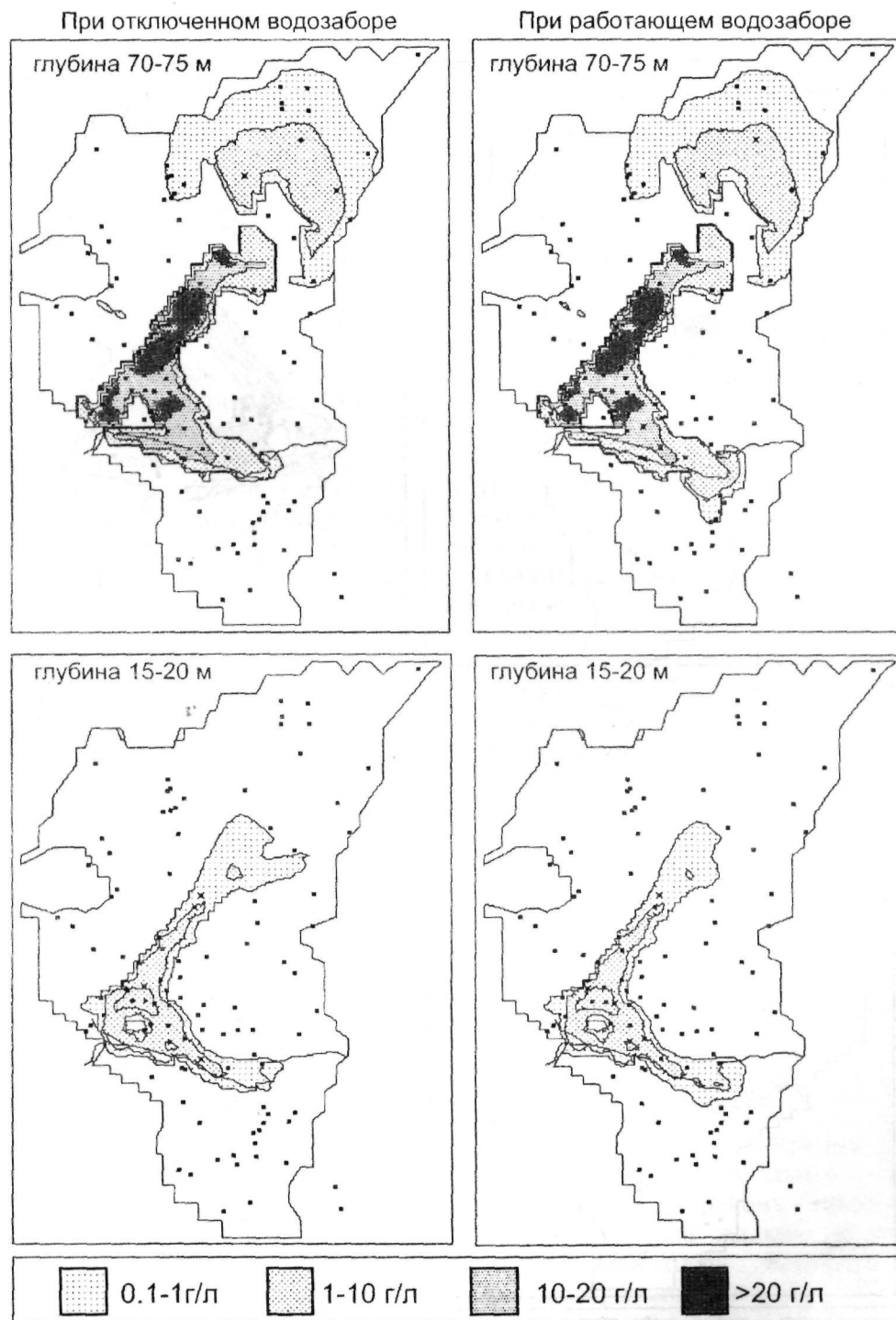


Рис.2. Ореол загрязнения подземных вод на 2040 год



имеющихся исходных данных. Для анализа соответствия расчетной динамики потока реально протекающим процессам привлекались прямые данные прослеживания ореола. После корректировки параметров системы выполнено решение прямой нестационарной задачи для расчетного периода 1951-1989 гг. Такой эвристический расчет является одним из способов проверки адекватности модели. На основании сопоставления фактических и расчетных характеристик потока подземных вод-уровней, расходов, действительной скорости - сделан вывод об адекватности модели реальным условиям.

Продолжается разработка локальной трехмерной модели, включающей озеро Карачай и р.Мишельяк. При обосновании фильтрационно-емкостных параметров водонасыщающих пород за основу были приняты результаты более 300 натуральных опытов. Также как и в двумерной модели решение контролировалось проверкой соответствия рассчитанных значений уровней воды в наблюдательных скважинах с фактическими, сопоставлением фильтрационных потерь из водоема расчетных и определенных балансовыми методами, проверкой соответствия распространения загрязнения в натуральных условиях и на модели. Решением эвристических задач показано, что математическая модель не противоречит данным натуральных наблюдений.

### 3. Прогнозные оценки состояния подземных вод

С использованием разработанной модели были выполнены прогнозные расчеты миграции загрязнения до 2100 года. Характер миграции вещества-загрязнителя после ликвидации В-9 показан на рис.1, где представлено распределение плотности нитрат-иона по площади (интеграл по толщине водоносного горизонта). С момента ликвидации источника ореол начинает

деградировать. Результаты прогнозных расчетов показали, что ореол загрязнения нитрат-иона к 2000 году получит выход к реке Мишельяк. Определены места возможной разгрузки в реку.

Существенными параметрами, определяющими величину разгрузки в реку, являются мощности, коэффициенты фильтрации и сорбционные емкости рыхлых отложений долины реки. Для проведения корректных прогнозных расчетов необходимо в ближайшее время сосредоточить натурные исследования в долине реки.

Расчеты также показали, что к 2010 году ореол загрязнения по нитрат-иону подойдет к бассейнам-хранилищам низкоактивных отходов (водоемы В-4, В-10).

Модельными расчетами исследовалось влияние работы водозабора п. Новогорный на распространение загрязнения в подземных водах. Установлено, что при работе водозабора происходит подтягивание к нему загрязненных подземных вод. В случае вывода водозабора из эксплуатации ореол загрязнения в соответствии со структурой потока будет распространяться в подрусловом потоке реки (рис.2), при этом более тяжелые растворы занимают более низкие горизонты.

Сопоставление результатов прогнозных расчетов при различных условиях работы Новогорного водозабора показывает, что при отключении системы водозаборных скважин фильтрационный приток в реку Мишельяк увеличивается примерно на 30%. При этом скорость притока вещества (нитрат-ион) в реку увеличивается незначительно. Это следствие того, что в реку разгружаются растворы низкой концентрации (дифференциация потока по плотности).

Построенная модель позволяет определить различные компоненты баланса вещества: сколько вещества задерживается в емкости водоносного горизонта, сколько поступает на поверхность на участках понижений рельефа земли, сколько разгружается в долину реки Мишельяк, сколько поступает в поверх-

ностные промышленные водоемы Течинского каскада водоемов и водозаборные скважины.

В процессе разработки модели района озера Карачай накоплен определенный опыт численного моделирования фильтрации подземных вод, миграции загрязнений, подходов к выбору и обоснованию геофильтрационных параметров и верификации геомиграционных моделей. Этот опыт служит побудительным мотивом для совершенствования математического обеспечения и, собственно, модели. Развитие и совершенствование модели проводится по следующим направлениям:

- насыщение модели новой геологической информацией;
- расширение моделируемой области на восток и юго-запад;
- расширение и углубление математической постановки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Алексахин А.И., Самсонова Л.М., Глаголев А.В. Современное состояние подземной гидросферы в районе ПО "Маяк". / Вопросы радиационной безопасности. Журнал ПО "Маяк". - Минатом РФ, №1, 1996, С. 11-19.
2. Дрожко Е.Г., Самсонова Л.М., Василькова Н.А., Петров А.В., Зинин А.И., Зинина Г.А., Гинкин В.П. Компьютерная модель нестационарной миграции растворов в подземных водах. / В сборнике докладов ГНЦ ФЭИ Обнинского симпозиума 15 Менделеевского съезда по общей и прикладной химии "Радиоэкологические проблемы в ядерной энергетике и при конверсии производства". - Обнинск, 1995, С. 33-43.