

УДК 556.388:621.039+621.039.58

© 1997 г.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБЪЕКТНОГО  
МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ ВОД***Е.Г. Дрожко**Россия, Озерск, ПО "Маяк"**Б.Г. Самсонов**Россия, Москва, Всероссийский Институт Минерального Сырья**Л.М. Самсонова, Н.А. Василькова**Россия, Москва, ГПИ Гидроспецгеология**А.И. Зинин, Г.А. Зинина**Россия, Москва, ГИЦ Физико-энергетический институт*

Представлена система оценки экологической допустимости техногенных объектов в зависимости от их вида. Объектом рассмотрения является мониторинговая оценка, применимая для действующих и завершенных производств. Дана структура современной системы экологического мониторинга. Рассматривается объектный мониторинг, особенностью которого является необходимость количественной оценки воздействия конкретных источников на вероятные объекты ущерба. В данном случае источником ущерба являются жидкие отходы промышленных производств, объектом ущерба - подземная гидросфера. Обоснована необходимость создания численных математических моделей на базе продолжительного объектного мониторинга. Описана общая схема создания математической модели на примере геофильтрационной модели миграции загрязнения от озера Карачай.

Основные категории современной гражданской инженерии - это экономическая целесообразность решений при экологической их допустимости. Доказательство экологической допустимости становится постепенно дополнительным разделом любой инженерной деятельности.

Основным содержанием экологических разделов является оценка воздействия объектов техносистемы на окружающую среду, проектирование природоохранных мер и прохождение Государственной экологической экспертизы. Реализация этих обязательных этапов экологической деятельности в инженерной сфере возможна при соответствующем информационном обеспечении.

Решение задач информационного обеспечения требует постановки натуральных исследо-

ваний. Очевидно, характер таких исследований зависит от вида рассматриваемых объектов техносистемы: действующие, завершенные и проектируемые. Для информационного обеспечения оценок последствий действующих и завершенных производств практикуются мониторинговые исследования, применительно к проектируемым объектам проводятся типовые исследования в составе разведочных и изыскательских работ на предпроектных стадиях. Эти работы обеспечивают лишь одноразовый съем информации. Оценка последствий воздействия проектируемых объектов техносистемы на окружающую среду (ОВОС) будет полностью прогнозной и в значительной степени приближенной. Оценка последствий действующих и завершенных объектов дается по факту проявления воздействия и поэтому бо-

лее достоверна. Одна из функций мониторинговых оценок - это коррекция предпроектных прогнозов.

Предметом настоящей работы является мониторинговая оценка последствий.

В Российской Федерации с 1993 года существует единая государственная система экологического мониторинга ЕГСЭМ. С 1994 -го года в стране действует базовая подсистема - государственный мониторинг геологической среды (ГМГС), в составе которой выделена подсистема государственного мониторинга подземных вод (ГМПВ). Концепция ГМПВ Роскомнедр по масштабности и содержанию наблюдений выделяет объектный, локальный и региональный мониторинг.

Предметом данного рассмотрения является объектный мониторинг. Под объектным мониторингом ГМГС понимается прослеживание воздействия природных и техногенных процессов на геологическую среду в системе: источник воздействия - объект вероятного ущерба. Объектный мониторинг в таком понимании для прослеживания воздействия не ограничивается геологической средой, а включает наблюдения за режимом источника воздействия, в частности, объекта техносистемы.

Особенностью объектного мониторинга в изложенном его понимании является необходимость количественной оценки воздействия конкретных источников на вероятные объекты ущерба. Это обстоятельство определяет соответствующий уровень информационного обеспечения, который предполагает получение исходных данных для оценки воздействия по факту проявления. В задачу информационного обеспечения в связи с этим входит представление опытных данных в форме, доступной для анализа и осуществления прогнозных расчетов.

Объектный мониторинг подземных вод (ГМПВ), избранный предметом данного обсуждения, призван исследовать воздействия действующих источников ущерба на подземную гидросферу.

Источники ущерба в подземной гидросфере, связанные в значительной степени с жид-

кими отходами промышленных производств, обуславливают гидродинамическое, гидрохимическое, радиационное и тепловое воздействие на подземные воды. Оценка последствий этих видов воздействия относится к типовым задачам динамики подземных вод, решаемым аналитическими методами, эмпирическими приемами и методами математического моделирования. В общем, решение подобных задач сводится к построению модели распространения последствий указанных видов воздействия в фильтрующей среде геологического массива.

Решение задач экологической направленности отличается от типовых задач динамики подземных вод степенью сложности. Сложность задач экологической направленности обусловлена особенностями техногенных растворов, проникающих в подземные воды. Это - повышенная плотность потоков индикаторов загрязнения, многообразие индикаторов воздействия разной физико - химической природы, неравномерный режим поступления техногенных растворов и другие особенности. За счет этого возрастает число факторов, контролирующих процесс миграции и рассеяния вещества, поступающего с потоком - индикатором загрязнения. Так что возможностей традиционных приемов уже недостаточно для осуществления прогнозных расчетов.

Наиболее полный учет природных и технологических факторов воздействия источников жидких отходов достигается созданием численных математических моделей распространения загрязнения в подземной гидросфере. Однако, для создания численных математических моделей требуется такой объем опытной информации, получение которого достигается постановкой достаточно продолжительного объектного мониторинга. С другой стороны, содержание и объем информации, получаемой при объектном мониторинге, обязывает завершить эту работу математической моделью, воспроизводящей закономерности распространения загрязнения наиболее полно и достаточно наглядно, так что результаты решения становятся доступными для широкого круга специалистов.

Основные аспекты математического моделирования распространения загрязнения в подземных водах от действующих источников жидких технологических отходов можно рассмотреть на примере достаточно показательного объекта, широко известного под названием озеро Карачай, расположенного на территории ПО "Маяк". С 1951 года этот природный бессточный (по отношению к поверхностному стоку) водоем используется как хранилище жидких радиоактивных отходов радиохимических производств. Отводимые в этот бассейн технологические растворы содержат радионуклиды различной физико-химической природы - источники всех видов излучения - и остаточные компоненты стабильных технологических реагентов в макроколичествах.

Сумма растворенных веществ составляет 30 - 144 г/л при объемной массе 1.016 - 1.09 г/куб. см. Содержание радионуклидов, переменное во времени, многократно превышает нормы ДК<sub>Б</sub>.

С экологической точки зрения хранилище жидких радиоактивных отходов такого состава рассматривается как источник ущерба подземной гидросфере, а в определенных условиях и земной поверхности.

Бессточный по отношению к поверхностному стоку природный бассейн оказался изначально подверженным подземному стоку. Подъем уровня в бассейне, связанный с поступлением технологических растворов, еще более увеличил фильтрационные потери из хранилища. Поток индикаторов загрязнения за счет фильтрационных потерь стал постоянным источником загрязнения подземных вод.

Систематические наблюдения за распространением загрязнения в подземных водах ведутся с 1964 года, для чего к 1995 году было задействовано 189 наблюдательных скважин, через которые производятся наблюдения за уровнем подземных вод и их химическим и радионуклидным составом. Проводятся наблюдения за поверхностными водоотоками и водоемами района хранилища и непосредственно за сбросами технологических растворов с фиксацией уровней в хранилищах, расходов сброса, химического и радионуклидного состава.

Комплекс наблюдений за распространением загрязнения подземных вод от хранилища жидких отходов рассматривается как объективный мониторинг подземных вод. За 30 лет мониторинга получен такой объем информации, который потребовал поиска наиболее эффективного способа ее представления, доступного анализу и обеспечивающего прогнозные расчеты. Практически единственным способом такого представления мониторинговой информации является математическое моделирование процесса массопереноса. Общая схема создания и использования математической модели показана на рис. 1.

Как видно, работа начинается с содержательной подготовки исходных данных, получаемых непосредственно при мониторинге и сопутствующих исследованиях. Исходная информация условно подразделяется на три блока: характеристика свойств геологического массива, характеристика источника воздействия и связанный с предыдущими выводной блок по характеристике основных факторов распространения загрязнения.

В геологическом отношении район озера Карачай представляет собой массив эффузивных пород, представленных порфиридами и их туфами. Покровные отложения, развитые локально, представлены глинистыми корами выветривания, делювием и аллювием.

Фильтрационные свойства массива обусловлены трещинной проницаемостью. Трещиноватость гипергенного и тектонического происхождения затухает с глубиной.

Массив трещиноватых пород скального облика включает, таким образом, трещинный, безнапорный водоносный горизонт. За нижнюю границу его принимается условно граница зоны активной трещиноватости. Ниже слаботрещиноватая часть массива рассматривается как относительный водоупор. Эта условная поверхность водоупора сложного рельефа определяет колебания мощности водоносного горизонта от 50 до 190 м. Водоносный горизонт имеет атмосферное питание, неравномерное во времени и по площади.



Рис. 1. Схема разработки геомиграционной модели

Глубина свободной поверхности водоносного горизонта от поверхности земли 0.2 - 22 м. Участки разгрузки приурочены к долинам р. Течи и ее притоков р. Мишеляк и р. Зюзелга.

Водопроницаемость трещинной фильтрационной среды неоднородная, размах значений коэффициента водопроницаемости достигает 800 кв. м/сут. Имеет место хаотическая неоднородность водопроницаемости в плане. По глубине отмечается уменьшение водопроницаемости, наибольшей она является

в интервале 10-40 м.

Средняя величина водоемкости пород равна 0.02 - 0.03 для верхней части, 0.005 - 0.007 для средней части и 0.0002 - 0.0007 для нижней части водоносного горизонта [1].

Озеро Карачай, приспособленное для хранения среднеактивных отходов радиохимического производства, или бассейн - накопитель 9, рассматривается как источник гидродинамического, гидрохимического и радиационного воздействия на подземные воды.



Гидродинамическое воздействие, связанное с поступлением жидких отходов, выражается в подъеме уровня бассейна и увеличении объемной массы растворов в нем. Колебания уровня бассейна и уровня связанных с ним подземных вод определяют изменение во времени величины фильтрационных потерь бассейна. Фильтрационные потери формируют непрерывный поток индикаторов загрязнения, поступающий в поток подземных вод. Поток подземных вод в районе расположения хранилища становится носителем растворенного загрязняющего вещества. Поток - индикатор и поток - носитель представлены взаимнорастворимыми жидкостями, так что гидрохимическое воздействие водоема 9 при непрерывном потоке индикаторов выражается в формировании в подземных водах все возрастающего объема смешения.

Важной характеристикой источника воздействия является состав техногенных растворов. По миграционным способностям компоненты разной физико - химической природы разделены на четыре группы [6]:

- стабильные анионы и нейтральные компоненты (нитрат-ион, ацетат-ион, сульфат-ион и некоторые другие);
- стабильные катионы (натрий, магний, кальций);
- радиоактивные элементы, мигрирующие в форме анионных и нейтральных комплексов с подгруппами по периоду полураспада до 15 лет (третий, рутений-106, кобальт-60) и более 15 лет (америций-241);
- радиоактивные элементы, мигрирующие в форме катионов и катионных комплексов с подгруппами по периоду полураспада до 15 лет (церий-144, цирконий-95, ниобий-95, сурьма-125) и более 15 лет (стронций-90, цезий-137, плутоний -239, уран-238, нептуний-237).

Характеристики свойств геологического массива и источника воздействия позволяют выделить основные факторы распространения загрязнения, которые представляют содержание начального выводного блока:

- загрязнение обусловлено фильтрационными потерями бассейна 9, формирующими

- поток - индикатор переменного режима;
- распространение загрязнения в недрах обусловлено потоком - носителем, т.е. потоком подземных вод по конвективной схеме;
- распространение загрязнения подземных вод сопровождается уменьшением концентраций индикаторов загрязнения в направлении вектора скорости потока - носителя вследствие рассеяния вещества;
- основными факторами рассеяния вещества являются фильтрационная дисперсия, радиоактивный распад и задержка индикаторов твердой фазой геологического массива;
- повышенная плотность раствора обуславливает вертикальную дифференциацию растворов в водоносном горизонте.

Совокупное и неравнозначное действие указанных факторов определяют пространственные формы распространения индикаторов загрязнения в подземных водах, физической моделью которых является ореол рассеяния индикаторов.

Под ореолом рассеяния понимается такой объем распространения индикатора в подземных водах за пределами его источника, в котором в соответствии со структурой потока - носителя происходит закономерное уменьшение концентраций индикатора от максимальной в источнике до аналитически осязаемой на периферии. Поскольку индикаторы загрязнения разной природы подвержены воздействию различных сочетаний факторов рассеяния, то различными будут и их ореолы, в частности, протяженности ореолов в направлении вектора скорости.

Таким образом, целью последующих шагов, обозначенных на схеме (рис.1), является математическое описание многокомпонентного ореола рассеяния. Необходимым условием математического описания является схематизация области предстоящего моделирования.

Под схематизацией природных и техногенных условий понимается их формальное описание, допускающее приложение математического аппарата и последующее применение вычислительной техники. Схематизация определяется целью создаваемой модели.

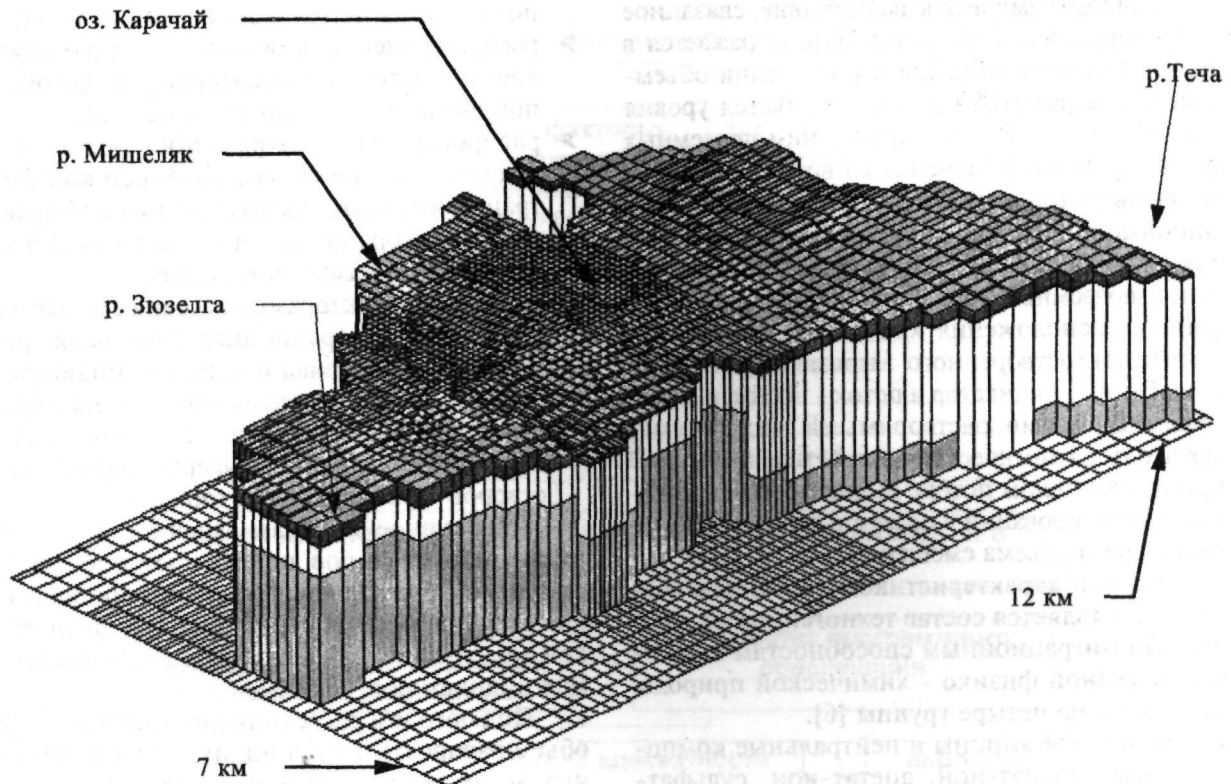


Рис. 2. Геометрия области моделирования (GEON-3D)

Одним из предметов схематизации является ограничение области моделирования. В данном случае область моделирования включает район источника ущерба - оз. Карачай с вероятными объектами ущерба и элементами ландшафта, определяющими структуру потока подземных вод. Кроме того, эта область должна быть обеспечена фактическим материалом. С учетом этих соображений в качестве области моделирования избрана площадь в пределах междуречья Зюзелга - Теча, имеющая природные гидродинамические границы (рис.2).

Следующим предметом схематизации является источник воздействия на подземные воды - собственно водоем 9. Он представляется в последующих операциях как участок постоянного напора реального контура. Для

обозначения сложного состава потока - индикатора должен быть избран представительный трассер. В качестве такового избран нитрат-ион. Содержание его в растворе-загрязнителе максимально, а набор факторов рассеяния минимален, так что протяженность ореола такого трассера будет максимальной. Кроме того, в качестве частных трассеров используются индикаторы - представители каждой из выделенных групп компонентов. Плотность раствора задается как функция концентрации нитрата, установленная опытным путем.

Основным содержанием схематизации фильтрационного поля является учет фильтрационной и емкостной неоднородности водоносного горизонта. Опытным путем установлен хаотический характер фильтрационной

неоднородности. Показателем фильтрационных свойств среды избран коэффициент водопроводимости. По этому признаку фильтрационное поле представлено мозаичной структурой при постоянстве коэффициента водопроводимости в каждом элементе неоднородности в плане и по мощности. Отрисовка мозаичной структуры выполнена с учетом реального положения натуральных опытов с коррекцией границ элементов неоднородности по геологической карте.

Емкостная неоднородность также представлена мозаичной структурой. Коэффициент водоемкости для выделяемых элементов емкостной неоднородности определяется как функция коэффициента фильтрации, установленная путем проведения численных исследований.

Осуществляется схематизация условий питания водоносного горизонта. Безнапорный трещинный водоносный горизонт получает атмосферное питание на локальных участках поверхности, благоприятных для проникновения атмосферных осадков непосредственно в фильтрующую среду. Для районирования области моделирования по условиям питания используется зависимость годовой амплитуды колебаний свободного уровня подземных вод от величины годовой суммы осадков, прослеженная по сети наблюдательных скважин. Величина атмосферного питания в долях от годовой суммы осадков задается пропорционально амплитуде колебаний уровня истекшего года.

Математическая постановка задачи, как этап математического моделирования, включает следующие исследовательские шаги:

- основные допущения и предпосылки,
- дифференциальные уравнения,
- постановка начальных условий,
- постановка граничных условий.

Анализ исходных данных позволяет определить существенно трехмерный характер миграции растворенного вещества, по крайней мере вблизи оз. Карачай и в районе разгрузки потока подземных вод в реку Мишеляк. Следовательно, необходимо создание многопараметрической модели с пространственно распределенными параметрами, изменяющими-

ся во времени, и с учетом различных факторов, контролирующих процесс [1].

Создание модели осуществляется поэтапно. Вначале рассматривается нестационарная задача фильтрации для всей области моделирования в плановой постановке (площадь моделируемой области 200 кв. км). На ее основе выделяются границы трехмерных подобластей (рис.2), где нельзя игнорировать трехмерность потока. Далее решается нестационарная трехмерная задача миграции с учетом плотностной конвекции и эволюции формы свободной поверхности подземных вод. Учитывается рельеф относительного водоупора.

Плотность раствора определяется концентрацией нитратов, которые не сорбируются вмещающими породами в процессе миграции. Отсюда основное допущение модели - плотность раствора связана с одним нейтральным индикатором (нитрат-ион). Учитывается линейная связь между плотностью раствора и концентрацией. При этом допускается наличие нескольких трассеров, не влияющих на плотность потока - индикатора и не взаимодействующих между собой. Среди них индикаторы, подверженные радиоактивному распаду и задержке твердой фазой геологического массива вследствие физико-химического взаимодействия. Пространственно - временные распределения концентраций или активностей радиоактивных загрязнений описываются уравнениями миграции трассеров с учетом равновесной сорбции (с заданными коэффициентами распределения) и радиоактивного распада, в которых используется поле скорости, полученное при решении системы уравнений переноса раствора нитратов переменной плотности. Фильтрационная дисперсия учитывается для всех индикаторов.

Ненасыщенный поток в зоне аэрации не моделируется. Атмосферное питание поступает непосредственно на свободную поверхность потока - носителя.

Задача формулируется в терминах уровня свободной поверхности, гидравлического напора, компонент вектора скорости и объемной концентрации. Свободная поверхность



определяет верхнюю границу потока - носителя. На свободной поверхности давление принимается равным атмосферному. Система основных дифференциальных уравнений вместе с уравнением движения уровня свободной поверхности и другими граничными условиями представляет собой нелинейную краевую задачу типа задачи Стефана. При ее решении определяются также границы зон разгрузки и режимы гидравлической связи с поверхностными водами.

На боковой поверхности моделируемого объема задается либо условие непроницаемости, либо условие Дирихле для гидравлического напора. Используется гидростатическое приближение для распределения давления по глубине боковой поверхности.

На верхней поверхности водоносного горизонта допускаются граничные условия одного из трех типов [1]:

- участки гидравлической связи поверхностных и подземных вод с граничными условиями, зависящими от текущего режима связи;
- области разгрузки на земную поверхность, где задано условие 3-го рода;
- участки свободной поверхности с условиями инфильтрации атмосферных осадков.

В качестве начальных условий для решения нестационарных задач используется стационарное решение для чистой воды с данными по начальному моменту времени.

Миграция индикаторов загрязнения описывается известным уравнением конвективно-дисперсионного массопереноса. На внешней выходной границе задается условие отсутствия дисперсионного переноса. На входных элементах границы поток считается чистым.

Источник загрязнения в модели описывается заданием концентрации индикатора в водоеме В-9 как известной функции времени.

После завершения этапа математической постановки задачи разработка математической модели распространения загрязнения в подземных водах предполагает решение следующих задач (рис. 1):

- определение способа дискретизации исход-

ных дифференциальных уравнений и построение численной схемы,

- разработка программного обеспечения,
- проведение эвристических расчетов,
- оценка адекватности модели.

К 1993 году была разработана программа GEON-2D [1] для моделирования плановой нестационарной фильтрации и миграции нейтрального компонента. В двумерной плановой постановке задача формулируется в приведенных напорах путем осреднения гидравлических свойств по глубине с учетом принятых допущений.

Программа рассчитана на большие размерности сеток и имеет сравнительно высокое быстродействие. GEON-2D - используется для решения обратных задач, калибровки моделей, оценок пористости по опытным данным. Программа плановой модели является основой для трехмерной модели.

В 1995 году создана программа GEON-3D, предназначенная для совместного решения уравнений сохранения объема раствора, переноса растворенных примесей и эволюции формы свободной поверхности водоносного горизонта. Это трехмерная конечно-разностная программа для мощных персональных компьютеров. Она генетически связана с двумерной 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 [1].

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 [3].

Наличие комплекса программ и большой объем опытной информации, используемый для контроля, позволяет осуществлять при моделировании калибрационные процедуры для

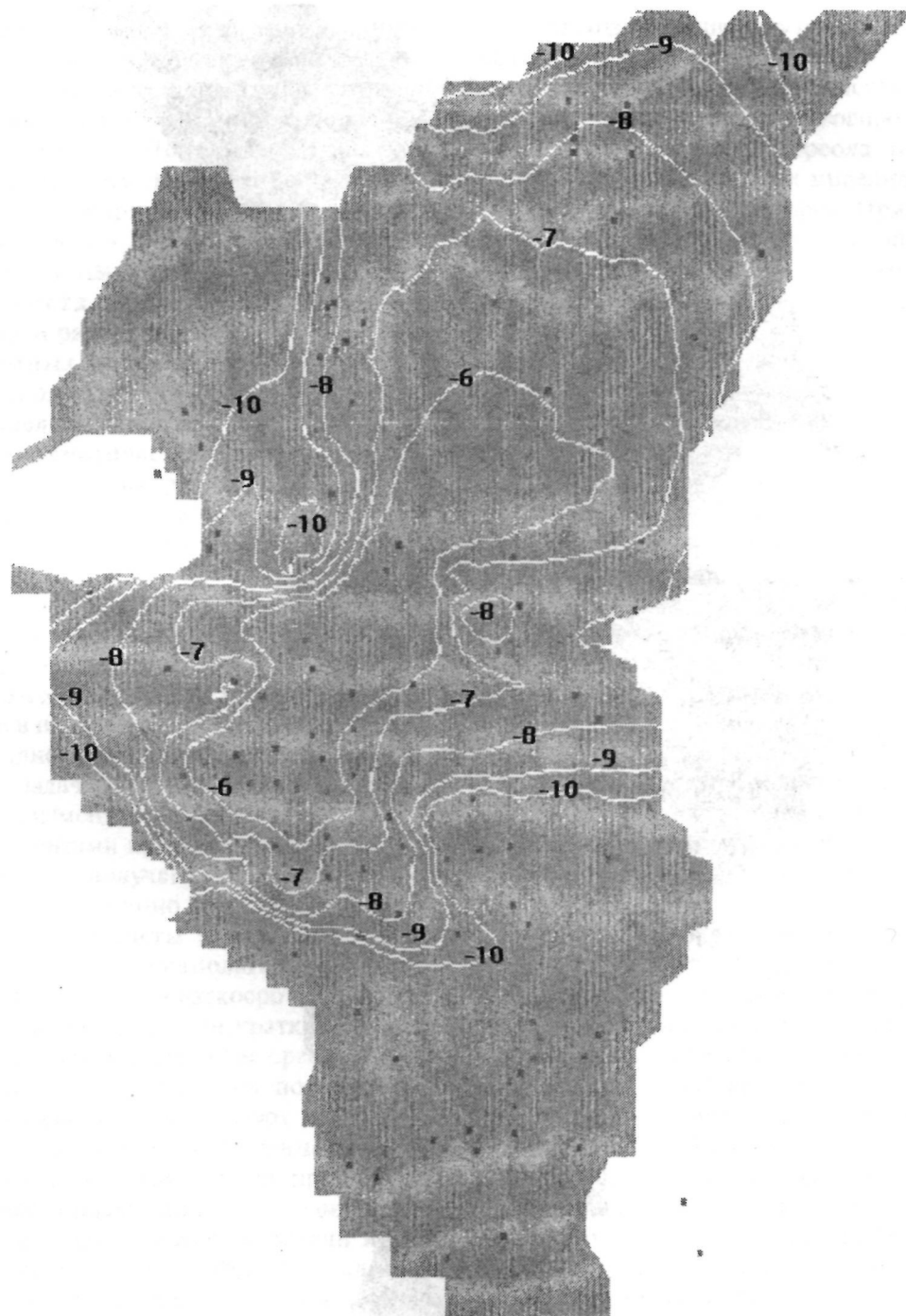


Рис. 3. Расчетный ореол загрязнения в изолиниях логарифма активности Sr-90 (на глубине 40-50 м от поверхности земли), Ки/л на 2000 г.



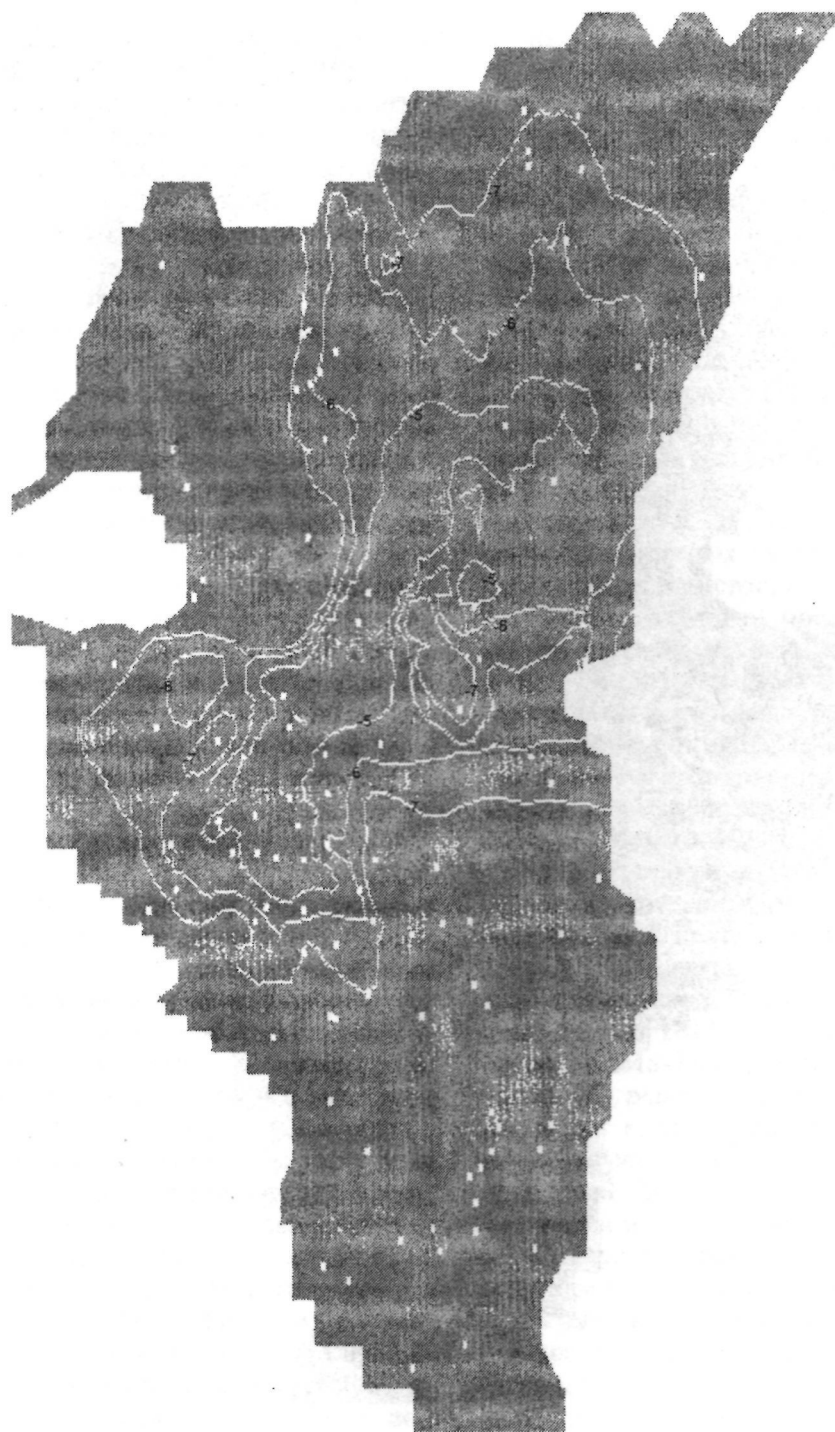


Рис. 4. Расчетный логарифм плотности распределения Sr-90 в водоносном горизонте (интеграл по глубине произведения активности и пористости), Ки/м<sup>2</sup>, 2000 г.

согласования имеющихся исходных данных. Для этого привлекались фактические результаты замеров уровней и расходов потоков подземных вод и результаты прослеживания ореола загрязнения. После корректировки параметров системы выполнено решение прямой нестационарной задачи для расчетного периода 1951 - 1989 гг. Такой эвристический расчет является одним из способов оценки адекватности модели. Сопоставление фактических и расчетных характеристик потока подземных вод - уровней, расходов, действительной скорости потока - носителя позволяет сделать вывод об адекватности построенной математической модели распространения загрязнения реальным условиям. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для прогнозных расчетов.

Пространственная модель постоянно обновляется с учетом новых данных по геологии, гидрогеологии, трещиноватости пород и т. п.

Математическая модель распространения загрязнения в потоке подземных вод обеспечивает оперативное решение обширного перечня прогнозных задач. При этом первоначальная версия может изменяться в соответствии с проектными вариантами природоохранных мер. В этом отношении полученную модель можно определить как постоянно действующую.

Прогнозные расчеты с использованием полученной модели предполагают решение задач двух видов: задачи краткосрочных и долгосрочных прогнозов. Задачи краткосрочного прогноза воспроизводят развитие ореола в ближайшие 5-10 лет, ситуацию на потенциальных объектах ущерба, определяют набор индикаторов на этих объектах, концентрация которых на прогнозный период превышает нормы, прослеживают динамику изменения представительных индикаторов. Задачи краткосрочного прогноза решаются при условии сохранения существующего режима источника ущерба в расчетный период.

Задачи долгосрочного прогноза на срок в десятки - первые сотни лет решаются при условии прекращения сброса промстоков. Результаты долгосрочного прогноза воспроизводят закономерность деградации ореола, определяют баланс вещества в пределах моделируемой области и динамику индикаторов. Примеры прогнозных проработок служат основой для рекомендаций по природоохранным мерам.

Последствия природоохранных мер прогнозируются с помощью модельных решений. Отдельные фрагменты решений показаны на рис. 3, 4.

По отзывам отечественных и зарубежных экспертов данная модель представляет собой пока единственный в своем роде пример. Со временем такие модели должны стать обязательным элементом объектного мониторинга, поскольку их применением достигается полнота использования опытной информации и, следовательно, достоверность прогнозов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Самсонова Л.М. и др. Гидрогеологические условия района озера Карачай и численное моделирование миграции загрязнений в подземных водах. - Вопросы радиационной безопасности. 1996. №4. С.5-14.
2. Дрожко Е.Г., Самсонова Л.М., Василькова Н.А. и др. Компьютерная модель нестационарной миграции растворов в подземных водах. Сб. докладов ГНЦ ФЭИ Обнинского симпозиума 15 Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. "Радиоэкологические проблемы в ядерной энергетике и при конверсии производства", 1995, С.33-43.
3. Н.И. Булеев. Пространственная модель турбулентного обмена. Москва, Наука, 1989, С.343.
4. В.А. Мироненко. Гидрогеология - экологически ориентированная научная дисциплина. - Вестник Российской Академии наук, 1996, т. 66, №10, С.875-879.