

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ

На правах рукописи

Рудаков Дмитрий Викторович

ОБОСНОВАНИЕ МОНИТОРИНГА РАДИОАКТИВНОГО  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ

05.26.05 — Инженерная экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК — 1996

Диссертация являе  
Работа выполнена  
верситете.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00743821 (P)

профессор, доктор физико-математических наук СМІРНОВ Сер-  
гей Александрович

профессор, доктор технических наук САДОВЕНКО Иван Алек-  
сандрович

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук, академик Украинской эко-  
логической академии наук ШАПАРЬ Аркадий Григорьевич

доцент, кандидат геолого-минералогических наук ПРИХОДЬКО  
Виталий Антонович

Ведущее предприятие - Институт геологических наук НАН Укра-  
ины

Защита состоится *27 декабря* 1996 г. в *12* час на за-  
седании специализированного совета Д 03.06.01 в Государственной  
горной академии Украины по адресу: 320027, г.Днепропетровск, пр.  
Карла Маркса, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии.

Автореферат разослан *26 ноября* 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,

кандидат технических наук

А.В.ЗБЕРОВСКИЙ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в Украине, как и во многих странах мира, значительно обострились экологические проблемы в связи с загрязнением окружающей среды радиоактивными веществами (РВ). Происходит быстрое накопление радиоактивных отходов (РАО), подлежащих переработке и захоронению. На уранодобывающих предприятиях накоплены миллиарды тонн отходов переработки руд, миллионы м<sup>3</sup> радиоактивных шахтных вод ежегодно сбрасываются в гидросеть без должной очистки. В 1992 г. на территории стран СНГ хранилось около 160 т остеклованных РАО суммарной активностью  $3.6 \cdot 10^6$  Ки, а на площадках АЭС — около 135000 м<sup>3</sup> жидких отходов (35000 Ки), 80000 м<sup>3</sup> отвержденных отходов (800 Ки) и 100000 м<sup>3</sup> твердых отходов.

Особая значимость проблемы радиоактивного загрязнения на Украине обусловлена последствиями чернобыльской катастрофы. Ввиду большой роли ядерной энергетики в топливно-энергетическом комплексе Украины надежная изоляция РАО в горно-геологической среде представляет одну из важнейших экологических проблем. При этом требует особого внимания предотвращение радиоактивного загрязнения подземной гидросферы, которое характеризуется большой длительностью, сложностью контроля и трудноустранимостью.

Проекты захоронения РАО в горных выработках должны быть обоснованы с точки зрения минимизации экологического ущерба в результате возможного загрязнения подземных вод и связанных с ними поверхностных водоемов и водотоков. Кроме того, в зонах существующего радиоактивного загрязнения необходим правильный выбор параметров защитных мероприятий, направленных на уменьшение степени такого загрязнения до безопасного уровня.

Существующие в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) захоронения РАО траншейного типа нуждаются в корен-

ной реконструкции с учетом современных норм радиационной безопасности. Известные методы прогноза и контроля миграции РВ в подземных водах, с помощью которых обосновываются защитные мероприятия, далеко не в полной мере соответствует сложности решаемых проблем. В связи с этим возникает актуальная научно-прикладная задача создания научно обоснованной системы прогноза и контроля радиоактивного загрязнения в зонах расположения объектов радиационной опасности.

Целью настоящей работы является разработка эффективной методики математического моделирования миграции радионуклидов в геофильтрационных потоках для обоснования параметров прогноза и контроля радиоактивного загрязнения подземных вод с выработкой рекомендаций по геоэкологическому мониторингу.

Идея работы заключается в применении методов источников, интегральных преобразований и статистических испытаний теории математической физики для расчета, прогноза и контроля динамики распространения РВ в подземных водах.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

1. Полнота математического описания реальных процессов миграции РВ в подземных водах обеспечивается разработанной моделью массопереноса радионуклидов в водонасыщенных горных породах с учетом в ней цепочки распада, реальной формы выработок, используемых для захоронения РАО, а также нестационарности источников загрязнения наряду с другими факторами процесса.

2. Характер распределения РВ в зоне радиоактивного загрязнения подземных вод определяется формированием в ней нестационарных подзон с максимальными, минимальными концентрациями, переходной между ними, а также перемещением по потоку подзоны максимальных концентраций дочерних радионуклидов.

3. Схема организации радиоэкологического мониторинга, ба-

вирующая на моделях подземной миграции радионуклидов, включает разработанный комплекс типовых процедурных и инженерных блоков, который позволяет обоснованно рассчитывать и регламентировать параметры сети контроля, а также технических средств ограничения загрязнения горно-геологической среды.

Методика исследований основана на комплексном использовании аналитических методов (источников, интегральных преобразований) и метода статистических испытаний (Монте-Карло) для моделирования миграции радионуклидов в подземных водах; методов естественно-геологического и инженерного анализа с использованием результатов лабораторных и натурных измерений миграционных параметров для построения моделей объектов, корректировки их параметров и интерпретации полученных результатов. Численный анализ результатов моделирования и выполнение прогнозов проведены на современных ЭВМ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением фундаментальных положений и законов теории массопереноса в горных породах, законов математической физики, апробированных на практике результатов экспериментальных исследований и методов математического моделирования на ЭВМ. Достоверность выполненных прогнозов подтверждается хорошей согласованностью полученных расчетных результатов с фактическими данными на конкретных объектах. Относительная погрешность результатов моделирования не превышает 5 - 10%.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- обоснована математическая модель массопереноса радиоактивных веществ в геофильтрационных потоках, которая позволяет учитывать их техногенное поступление в подземные воды из неглубоких захоронений РАО различной формы, размеров и простран-

ственного положения, миграцию дочерних радионуклидов;

- впервые получены аналитические решения ряда актуальных плановых и пространственных задач миграции РВ, что дало возможность учитывать мгновенные и действующие с переменной во времени интенсивностью площадные и объемные источники радиоактивного загрязнения (включая дочерние радионуклиды) при прогнозах загрязнения подземных вод;

- установлены закономерности формирования зон радиоактивного загрязнения в потоках подземных вод и динамики выноса РВ в водоемы и водотоки, позволяющие рассчитывать характеристики миграции и размеры зон загрязнения с учетом его состава при проведении радиоэкологического мониторинга.

#### Практическое значение работы:

- созданы программные средства на современных ЭВМ для решения задач прогноза и контроля миграции РВ в различных техногенных и природных условиях;

- разработана методика расчета параметров зон радиоактивного загрязнения с учетом дочерних радионуклидов, выноса РВ в водоемы и водотоки, пространственной миграции радионуклидов из объемных источников загрязнения;

- разработана методика определения параметров защитных мероприятий (дренаж, ликвидация источника загрязнения) по снижению радиоактивного загрязнения подземных и связанных с ними поверхностных вод;

- разработаны рекомендации по обоснованию размещения и режима работы сети радиоэкологического контроля подземных вод.

Разработанные методики применимы при проведении радиоэкологического мониторинга на предприятиях горной промышленности по добыче радиоактивного сырья, предприятиях, выполняющих работы по подземному захоронению РАО, карьерах по добыче строи-

тельных материалов (гранитов) с повышенной радиоактивностью.

Реализация результатов работы. Результаты выполненного в диссертации прогноза миграции трития в подземных водах в районе "Пункта захоронения радиоактивных отходов" (ПЗРО) на севере Украины переданы в спецкомбинат "Радон" и внедрены при обосновании радиоэкологического мониторинга и природоохранных мероприятий.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях по итогам научно-исследовательских работ, семинарах кафедр вычислительной математики и математической кибернетики, прикладной газовой динамики и тепло-массообмена Днепропетровского университета (1994-1996), на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Днепропетровской горной академии (1995), на кафедре прикладной математики Днепропетровского технического университета железнодорожного транспорта (1996), на международной научно-технической конференции в Белорусской политехнической академии (г.Минск, 1995), на международной научно-практической конференции по экологии и устойчивому развитию (г.Днепропетровск, 1995).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 7 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и приложения. Содержит 203 страницы машинописного текста, 33 рисунка и 11 таблиц.

Автор искренне благодарен научным руководителям, доктору физ.-мат. наук, проф. Смирнову С.А. и доктору тех. наук, проф. Садовенко И.А. за помощь в работе и ценные указания. Автор также выражает признательность сотрудникам лаборатории моделирования гидрогеологических процессов Днепропетровского отде-

ления Украинского государственного Института минеральных ресурсов (ДО УкрГИМР) за предоставленные материалы и содействие в работе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Приведенный в диссертации анализ известных работ отечественных и зарубежных авторов по рассматриваемой проблеме позволил сделать следующие выводы.

Экологически опасное долговременное загрязнение геологической среды вызывается техногенным поступлением высокотоксичных РВ при работе предприятий по добыче урановых руд, эксплуатации хранилищ РАО, объектов атомной промышленности. Типичными источниками радиоактивного загрязнения подземной среды являются: рудные склады и отвалы, подвергаемые ветровой и водной эрозии; хвостохранилища, заполненные жидкими и твердыми отходами; захоронения высокотоксичных отходов в отработанных шахтах и рудниках; приповерхностные хранилища средне- и низкоактивных отходов ("могильники"). При отсутствии или нарушении герметичности инженерных барьеров растворенные РВ проникают в зону аэрации и водоносные горизонты. Дальнейшее распространение радионуклидов, приводящее к загрязнению подземных и поверхностных вод, источников водоснабжения, обусловлено в первую очередь факторами миграции в водоносных пластах.

Для предотвращения экологического ущерба, вызываемого загрязнением подземных вод, необходима организация системы геомониторинга в зонах существующего и предполагаемого расположения объектов радиационной опасности. Основными задачами мониторинга, сформулированными в работах В.М.Гольдберга, Ю.А.Израиля, В.А.Мироненко, Н.С.Огняника, А.Б.Ситникова, Э.В.Собоновича, А.Г.Шапаря, В.М.Шестопалова, Е.А.Яковлева, являются: определе-

ние зон радиоактивного загрязнения, путей поступления радионуклидов в геологическую среду и их миграции в ней, наблюдение за уровнями и масштабами загрязнения, проведение защитных мероприятий. Неотъемлемой частью мониторинга являются методы прогноза и контроля радиоактивного загрязнения подземных вод.

Среди этих методов наиболее перспективными становятся методы математического моделирования. Они позволяют прогнозировать возможные загрязнения подземной гидросферы при различных технологических режимах эксплуатации объектов радиационной опасности, чтобы управлять развитием экологической обстановки. На современном уровне представлений о механизме подземной миграции адекватное описание рассматриваемых процессов дает математическая модель гидродисперсии (конвективной диффузии), основные положения которой сформулированы в работах Бера, Н.Н.Веригина, Фрида. Широкое развитие методов моделирования подземной миграции связано в работах Ф.М.Бочевера, В.И.Лаврика, В.И.Лялько, В.А.Мироненко, А.Я.Олейника, А.Б.Ситникова, В.М.Шестакова, а также Пиндера, Фринда, Ханта и других.

Однако для решения практических задач в большинстве случаев используются упрощенные зависимости, недостаточно отражающие форму, размеры, характер действия источников загрязнения, пространственный характер миграции. Миграция дочерних радионуклидов в подземных водах фактически не изучалась и не отражена в известных моделях. В результате затрудняется выработка рекомендаций по организации геоэкологического мониторинга за состоянием подземных и поверхностных вод, а также по проектированию горных работ в связи с проведением защитных мероприятий для предотвращения экологического ущерба в зонах объектов радиационной опасности.

Учитывая изложенное, в работе соответственно поставленной цели сформулированы задачи исследований: 1) обосновать и разработать математическую модель миграции радионуклидов в водонасыщенных горных породах с учетом цепочки распада, адекватным отражением геометрической формы и характера действия источников поступления РВ; 2) провести эффективную вычислительную реализацию предложенных методов прогноза миграции РВ на современных ЭВМ; 3) разработать на основе математического моделирования и программных средств методику прогноза характеристики процесса радиоактивного загрязнения подземных вод (в том числе раомеров зоны загрязнения, количества РВ, выносимых с фильтрационным потоком в водоемы и водотоки) при различных параметрах технологических и гидрогеохимических процессов; 4) выработать рекомендации по обоснованию технологии геэкологического мониторинга (на основе решения прикладных задач для реальных объектов).

На основании фундаментальных положений теории массопереноса в горных породах и законов радиоактивного распада в диссертации построена математическая модель миграции радионуклидов в потоках подземных вод с учетом распада по цепочке. Дифференциальные уравнения

$$\operatorname{div}(D_1 \operatorname{grad} C_1 - v C_1) + Q_1 - \frac{\partial N_1}{\partial t} - \lambda_1(n C_1 + N_1) = \frac{\partial(n C_1)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(D_j \operatorname{grad} C_j - v C_j) + p_j \lambda_{j-1}(n C_{j-1} + N_{j-1}) - \lambda_j(n C_j + N_j) + Q_j = \frac{\partial(n C_j)}{\partial t} \quad (2)$$

описывают массоперенос материнского радионуклида ( $j = 1$ ) и продуктов его распада — дочерних нуклидов ( $j = 2, \dots, s$ );  $C_j, N_j$  — концентрация радионуклида в растворенном и сорбированном состояниях соответственно;  $D_j$  — тензоры дисперсии;  $\lambda_j$  — постоянные распада;  $v$  — вектор скорости фильтрации. При сорбции боль-

шинства радионуклидов, удовлетворительно описываемой линейной изотермой Генри, имеет место  $N_j = \bar{K}_{d,j} C_j$ , причем  $n_{e,j} = \bar{K}_d + n$  — эффективная пористость,  $\bar{K}_d$  — коэффициент распределения в условиях равновесия,  $n$  — активная пористость.

Непрерывно действующие источники поступления РВ в подземные воды моделируются кусочно-непрерывными функциями  $Q_j$ , мгновенные источники (разовые утечки радиоактивных растворов) — с помощью неоднородных начальных условий  $C_0$ . Применительно к реальным задачам проведена типизация границ области подземного массопереноса, в соответствии с которой сформулированы условия второго и третьего рода, характерные для наиболее часто встречающихся на практике границ. Сформулированы условия применимости двумерной в плане модели.

С использованием метода источников впервые получены точные решения задачи совместного массопереноса материнского и первого дочернего радионуклида в двумерной неограниченной области при наличии в ней мгновенных и непрерывно действующих источников материнского вещества. Полученные выражения для прямоугольного источника имеют следующую структуру:

$$C_1(x, y, t) = C_0 e^{-\bar{\lambda}_1 t} \Phi(\alpha_{1,x}) \Phi(\alpha_{1,y}) + K \int_0^1 \bar{q}(\theta) e^{-\bar{\lambda}_1 \theta} \Phi(\beta_{1,x}) \Phi(\beta_{1,y}) d\theta, \quad (3)$$

$$C_2(x, y, t) = C_0 \sigma_n \bar{\lambda}_1 e^{-\bar{\lambda}_1 t} \int_0^1 e^{(\bar{\lambda}_1 - \bar{\lambda}_2) \omega} S(\gamma_{1,x}) S(\gamma_{1,y}) d\omega + \bar{\lambda}_1 \sigma_n n_{e,1} K \cdot$$

$$\cdot \int_0^1 \int_0^1 (1 - \omega) \bar{q}((1 - \theta)(1 - \omega)) e^{-\bar{\lambda}_1 \theta (1 - \omega) - \bar{\lambda}_2 \omega} S(\delta_{1,x}) S(\delta_{1,y}) d\theta d\omega; \quad (4)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  — наборы аргументов введенных автором интегральных функций  $\Phi$  и  $S$ , зависящих от параметров процесса и пространственного положения источника;  $C_0, K, \sigma_n$  — коэффициенты краевой задачи. Полученные выражения для многоугольного источника описываются в виде суммы также введенных автором интегральных

функций  $U$  и  $V$ , причем количество слагаемых в решении определяется числом огибающих ломаной, являющейся контуром многоугольника. Сочетание данных геометрических форм позволяет с необходимой точностью аппроксимировать практически любые встречающиеся на практике контуры источников загрязнения.

Автором обоснован метод расщепления дву- и трехмерных линейных краевых задач нестационарного массопереноса с неоднородным уравнением и начальным условием и с однородными граничными условиями. Если свободный член уравнения и начальные условия представимы как произведение функций одной переменной, то решение задачи имеет вид:

$$C(x, y, z, t) = e^{-\lambda t} C_x(x, t) C_y(y, t) C_z(z, t) + t \int_0^1 e^{-\lambda \theta} \frac{q(1-\theta)}{n_e} C_x(x, t\theta) C_y(y, t\theta) C_z(z, t\theta) d\theta, \quad (5)$$

где  $C_x, C_y, C_z$  — полученные независимо друг от друга решения одномерных нестационарных задач. Используя (5) в совокупности с методом интегральных преобразований, впервые получены точные решения ряда дву- и трехмерных задач массопереноса, когда скорость фильтрации направлена под углом к границе водоносного пласта. На основе этих решений выведены формулы для определения поступления РВ с подтопленным стоком в поверхностные воды через границу области фильтрации.

Тестирование алгоритмов численного интегрирования полученных решений на ЭВМ с помощью системы *Mathematica* в среде *Windows* показало, что вычислительная погрешность не превышает  $10^{-8} + 10^{-5}$  в широком диапазоне изменения реальных значений параметров процесса.

Автором разработан алгоритм численного решения задач прогноза миграции РВ в пространственных областях сложной формы и структуры, основанный на методе статистических испытаний. Этот

алгоритм предусматривает построение цепей Маркова на основе дискретизации краевой задачи на неравномерной сетке. Значение концентрации РВ в точке области миграции  $P_0$  в момент  $t$  определяется так:  $C(P_0, t) = 1/N \sum_{i=1}^N W_i$ , где  $N$  — число статистических испытаний,  $W_i$  — определяемое значение концентрации в результате  $i$ -го испытания; при этом  $W_i$  зависит от параметров физического процесса. Существенные преимущества метода проявляются при часто встречающейся на практике необходимости расчета миграции только в нескольких наиболее важных контрольных точках области. Разработанный алгоритм оттестирован с помощью аналитических решений автора. Вычисления проводились при различных параметрах физического процесса и численного алгоритма. При  $N=500$  и 5000 более 2/3 всех значений имели погрешность менее 5%, а около 9/10 — менее 10%; точность значительно улучшалась при дроблении сетки и увеличении  $N$ .

С использованием разработанных программных средств, а также машинной графики на серии типовых примеров моделирования выявлены важные закономерности подземной миграции РВ. Выделены и классифицированы по характеру изменения концентрации и ее градиента подзоны ореола радиоактивного загрязнения подземных вод вблизи площадных и объемных источников РВ. Установлен эффект смещения подзоны максимальных концентраций дочернего радионуклида относительно источника материнского вещества (на 10-20% и более от протяженности зоны загрязнения). Показано, что наличие контакта с поверхностными водами на границе области фильтрации приводит к снижению концентрации РВ до 2 и более раз в приграничной зоне по сравнению со случаем, когда граница представляет собой участок высачивания. Установлена зависимость уменьшения суммарного выноса радионуклида в поверхностные воды с подземным стоком в случае равного поступления

РВ в водоносный горизонт при удалении источника загрязнения от границы; указанная зависимость носит экспоненциальный характер и определяется параметрами миграции и распада. Количественно оценено влияние сорбции радионуклида в глинистом водоупоре: за счет этого фактора величина  $C$  вблизи водоупора может снижаться более чем в 3-5 раз. Влияние указанного фактора существенно возрастает с увеличением глубины источника РВ в водоносном пласте.

С помощью разработанной методики моделирования можно обоснованно определять: параметры инженерных мероприятий по охране подземных вод (защитного дренажа, ликвидации источника загрязнения), а также зону активного контроля за распространением РВ. Так, в рассмотренном случае расположения хранилища отходов, содержащих Sr-90, в береговой зоне водоема (сложенной аллювиальными песками) ликвидация источника загрязнения спустя 5 или 10 лет после начала попадания РВ в подземные воды снижает вынос Sr в водоем в течение 50 лет в 7.15 и 3.56 раза соответственно. В качестве второго варианта инженерной защиты водоема промоделировано устройство горизонтального дренажа, заглубленного в водоносный горизонт на 0.2 его мощности и расположенного между захоронением и берегом водоема на расстоянии 300 м от последнего. Установлено, что перехват радиоактивных подземных вод на участке длиной, превышающей линейные размеры источника в 7 раз, может исключить не только загрязнение водоема, но и подземных вод в прибрежной полосе. При этом максимальная удельная активность дренажных вод достигает 10ДК<sub>В</sub>, а расход дрены — около 300 м<sup>3</sup>/сут.

Разработанные методика моделирования и программные средства предназначены для обоснования мониторинга радиоактивного загрязнения подземных вод в зонах влияния объектов радиационной опасности. С их помощью, используя показатель суммарного

ДК<sub>В</sub>, возможно выполнить прогноз развития загрязнения в пространстве и во времени, определив такие его нестационарные характеристики: 1) зоны загрязнения вблизи источников поступления РВ сложной формы и при неоднородном составе самого загрязнения (с учетом дочерних радионуклидов); 2) периоды превышения допустимых концентраций в контрольных точках области фильтрации; 3) время достижения загрязненными водами контрольных точек, водоемов и водотоков; 4) количество РВ, выносимых с подземным стоком в поверхностные воды; 5) время достижения загрязнения до нижней границы водоносной толщи при учете вертикальной миграции и т.д. При этом учитывается суммарное влияние всех источников РВ, расположенных на рассматриваемой территории. Результаты прогноза позволяют дать количественную оценку экологической опасности загрязнения, выработать рекомендации по обоснованию сети наблюдений за подземной миграцией РВ, определить оптимальные параметры инженерных мероприятий по охране подземных вод. Экологическая опасность радиоактивного загрязнения может усиливаться при наложении влияния техногенных загрязняющих веществ другого происхождения.

Ввиду многообразия конкретных условий подземной миграции РВ достоверный прогноз указанных выше характеристик возможен на основе типизации техногенных и природных условий на объекте радиационной опасности. Предлагаемая автором схема типизации базируется на выделении ключевых признаков, определяющих рассматриваемый объект: а) по характеру загрязнения (его состав, экологическая опасность, продолжительность действия источников загрязнения, степень их контакта с подземными водами); б) по сфере влияния (подземные, поверхностные воды, воздушный бассейн); в) по масштабам воздействия (локальный, региональный); г) по условиям миграции в геологической среде (режим фильтрационного по-

тока, структура области миграции, типы границ). Различным сочетаниям техногенных и природных условий соответствуют разработанные автором типовые схемы миграции РВ в подземных водах, с помощью которых решены важные в экологическом отношении практические задачи.

Аналитическим методом выполнен прогноз миграции Sr-90 в подземных водах вблизи ЧАЭС из расположенных там пунктов временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО) траншейного типа (ПВЛРО "Припять", "Песчаное плато", "Нефтебаза"). В частности показано, что максимальный прогнозируемый суммарный вынос Sr с подземным стоком в р. Припять на данном участке в течение ближайших десятилетий из этих ПВЛРО не превысит нескольких Ки/год.

Также аналитическим методом выполнен прогноз миграции РВ в подземных водах в районе объекта по переработке и захоронению РАО в зоне отчуждения ЧАЭС. Результаты расчетов свидетельствуют, что даже в неблагоприятных условиях (отсутствие инженерных барьеров, минимальная сорбционная емкость горных пород, максимально возможная скорость фильтрации) наиболее подвижный Sr-90 распространится в верхнем водоносном горизонте за проектный период 300 лет на расстояние не более 700-800 м в сторону рек Припять и Уж, удаленных от объекта на 10 и 6 км соответственно.

В сложных гидрогеологических условиях в районе ПЗРО на севере Украины методом статистических испытаний выполнен прогноз миграции трития из хранилищ РАО. Расчеты проведены на проектный период до 2025 г. при таких вариантах дальнейшей эксплуатации объекта: а) его консервация; б) перезахоронение отходов из негерметичных емкостей начиная с 1996 г. Показано, что вариант "б", в отличие от консервации, даст возможность к 2025 г. добиться уменьшения концентрации трития в подземных водах вблизи объ-

екта ниже ДК<sub>Б</sub>. Максимальный среднегодовой вынос трития в ближайший ручей прогнозируется на уровне 3.2-3.6 Ки/год. Рассчитан вариант защиты поймы и вод ручья, предусматривающий сооружение защитного дренажа в сочетании со слабопроницаемой стенкой в грунте: это даст уменьшение потока трития в ручей более чем в 2.5 раза.

Исходя из анализа выявленных закономерностей подземной миграции РВ и с учетом опыта решения практических задач сформулированы рекомендации по организации и проведению радиологического мониторинга подземных вод. Предложена схема такого мониторинга (см. рис.), предполагающая на первоначальном этапе проведение исследований природных и техногенных условий на объекте с учетом охарактеризованной выше схемы типологии. Следующий этап предусматривает выполнение прогнозов радиоактивного загрязнения на основе математической модели объекта. В соответствии с результатами прогноза обосновываются структура наблюдений (контроля) за состоянием подземной гидросферы и параметры инженерных мероприятий активного характера, проводимых со строгим соблюдением нормы радиационной безопасности. Данные наблюдений, отражающие изменения в системе "объект - горно-геологическая среда", должны использоваться для корректировки модели объекта и выполняемых прогнозов.

Предложена также схема радиологического контроля подземных вод. Она предусматривает размещение, оборудование и эксплуатацию пунктов контроля (скважин, шурфов) на основе прогнозов подземной миграции. В соответствии со схемой выделяются пункты контроля: интенсивности источника загрязнения (в том числе активности захороненных отходов), мест утечек РВ, скорости их миграции, ширины и размеров зоны загрязнения, интенсивности поступления РВ с подземным стоком в водоемы и водотоки, активности

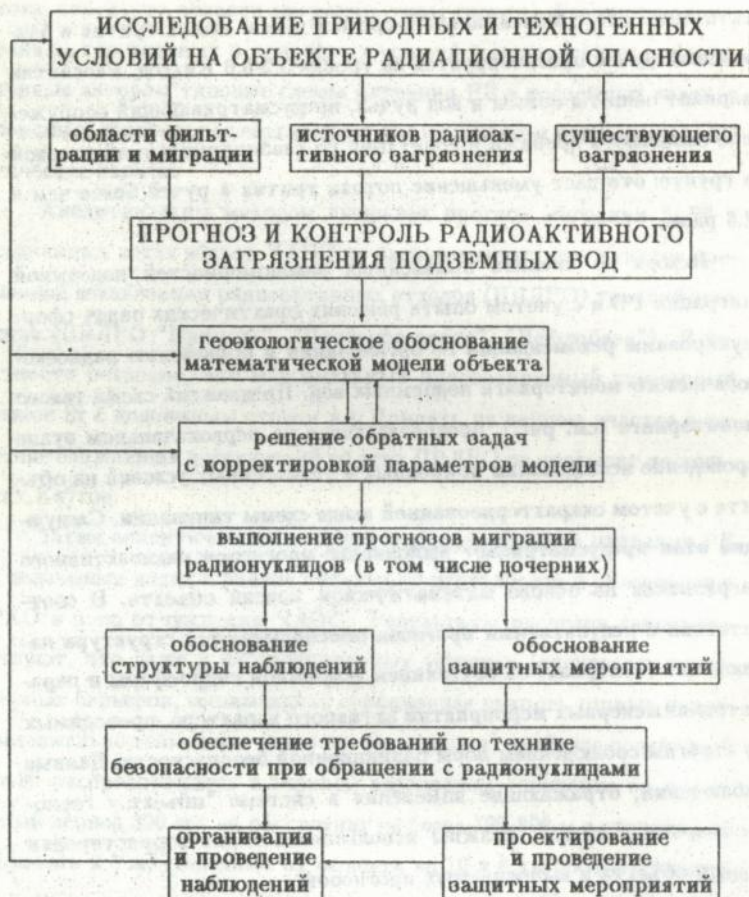


Рис. Блок-схема геоэкологического мониторинга радиоактивного загрязнения подземных вод

поверхностных вод. На основе данных наблюдений и результатов прогнозов устанавливаются частота отбора проб в указанных пунктах контроля (с интервалами от 2 до 10 мес), расстояния между ними в плане (от 10 до 150 м) и по верикали (не реже чем 10-15 м по глубине водоносного пласта). Указанные характеристики режимной сети в приведенных диапазонах варьируют в зависимости от фильтрационных и миграционных свойств горных пород. Сеть радиоэкологического контроля должна сгущаться с учетом структуры подземного потока по мере приближения к источнику загрязнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача обоснования геоэкологического мониторинга радиоактивного загрязнения подземных вод при захоронении РАО, включающаяся в установлении закономерностей формирования зон загрязнения радионуклидами на основе моделирования миграции, позволивших разработать рациональную схему радиоэкологического мониторинга подземных вод и методики расчетов параметров загрязнения и технических средств защиты, что имеет важное научное и практическое значение в области инженерной экологии.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Обоснована математическая модель массопереноса радионуклидов в геофильтрационных потоках, учитывающая основные факторы процесса: распад по цепочке, форму, пространственное положение захоронений РАО, характер утечек РВ из них, а также дисперсию, конвекцию и сорбцию в горных породах.

2. Для ряда практически важных плановых и пространственных задач миграции, в том числе дочерних радионуклидов, с применением метода источников, преобразования Лапласа и обоснован-

ного автором метода расщепления получены аналитические решения, учитывающие основные типы техногенных и природных условий при неглубоком захоронении РАО. Разработан алгоритм метода статистических испытаний для решения задач миграции РВ в пространственных областях сложной формы и структуры.

3. Разработаны программные средства, эффективно реализующие на ЭВМ аналитические решения автора. Проведено тестирование программных средств для решения задач прогноза миграции РВ методом статистических испытаний в фильтрационных потоках сложной структуры, показана достаточная точность получаемых результатов для практических целей.

4. Установлены закономерности формирования зон радиоактивного загрязнения в плановых и пространственных фильтрационных потоках с учетом миграции дочерних радионуклидов при наличии внутри области площадных и объемных источников загрязнения. Выявлена роль различных факторов, определяющих интенсивность выноса РВ с подземным стоком в водоемы и водотоки.

5. Разработана методика прогноза характеристик радиоактивного загрязнения подземных вод в типичных для этого процесса техногенных и природных условиях, а также методика определения параметров защитных мероприятий (дренажа, ликвидации источника загрязнения) для снижения интенсивности подземного стока РВ в водоемы и водотоки.

6. Решены практические экологические задачи прогноза и контроля миграции радионуклидов. Дан прогноз миграции Sr-90 в р. Припять из расположенных вблизи ЧАЭС захоронений РАО. Проведено исследование экологической опасности объекта в зоне отчуждения ЧАЭС по переработке и захоронению РАО с точки зрения загрязнения подземных вод. Выполнен прогноз миграции трития в районе ПЗРО на севере Украины, обоснованы параметры возмож-

ных защитных мероприятий; результаты этого прогноза переданы в спецкомбинат "Радон" и внедрены при проведении радиоэкологического мониторинга на данном объекте.

7. Обоснован комплекс показателей радиоактивного загрязнения подземных вод, подлежащих прогнозу и контролю в зонах влияния объектов радиационной опасности. Проведена типизация условий миграции радионуклидов с учетом характерных для данного процесса природных и техногенных факторов. Разработана структурно-функциональная схема геоэкологического мониторинга радиоактивного загрязнения подземных вод. Предложена схема рациональной организации и режима работы сети радиоэкологического контроля, основанная на выявленных закономерностях подземной миграции РВ, позволяющая уменьшить затраты на проведение контроля при одновременном повышении его технической эффективности.

Основные положения и результаты работы освещены в следующих публикациях:

1. Рудаков Д.В. Математическая модель радиоактивного загрязнения подземных вод // Вопросы прикладной математики и математического моделирования, Днепропетровск, ДГУ, 1994. — С. 27-31.

2. Рудаков Д.В. Решение задачи подземного переноса радионуклидов методом Монте-Карло // Вопросы прикладной математики и математического моделирования, Днепропетровск, ДГУ, 1995. — С. 50-52.

3. Рудаков В.К., Рудаков Д.В. Аналитические модели радиоактивного загрязнения подземных вод // Геологический журнал, К., 1995. — N 2. — С. 99-103.

4. Смирнов С.А., Рудаков Д.В. Использование систем аналити-

ческих преобразований для решения сложных задач математической физики // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф., Минск, 1995. — Ч 1. — С. 116.

5. Рудаков Д.В. Математическое моделирование радиоактивного загрязнения подземной гидросферы // Тез. докл. межд. науч.-практ. конф., Днепропетровск, 1995. — Т 1. — С. 67.

6. Рудаков Д.В. Розв'язання задачі масопереносу радіоактивних речовин у підземних водах при дії джерел складної форми. — Деп. в ГНТБ України 20.07.94, рег. N 1315, УК94. — 15 с.

7. Рудаков Д.В. Исследования и математическое моделирование процессов радиоактивного загрязнения подземных вод. — Деп. в ГНТБ Украины 03.01.95, рег. N 53, УК95. — 29 с.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: [3] — построение математической модели, получение аналитических решений, проведение расчетов на ЭВМ, [4] — тестирование алгоритма расчета миграции на ЭВМ.

#### ANNOTATION

Rudakov D.V. Substantiation of groundwater radioactive pollution monitoring on the base of radionuclide migration modeling. Thesis for obtaining a scientific degree of "Candidate of Technical Sciences" on the speciality 05.26.05 — "Engineer ecology". State Mining Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 1996.

The new methods to solve forecast and control tasks of groundwater radioactive pollution are defended. Analytical and numerical models allow to reflect adequate the non-steady indices of radioactive pollution with due to regard for decay chain. The program complex for personal computers has worked out. The practical ecological tasks including for Chernobyl nuclear power plant zone have solved. The technology to organize and carry out geoecological monitoring of groundwater radioactive

pollution has grounded. 7 papers have published.

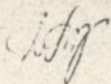
### АНОТАЦІЯ

Рудаков Д.В. Обґрунтування моніторингу радіоактивного забруднення підземних вод на основі моделювання міграції радіонуклідів. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.26.05 - "Інженерна екологія", Державна гірничо академія України, Дніпропетровськ, 1996.

Захищаються нові методи розв'язання задач прогнозу і контролю радіоактивного забруднення підземних вод. Аналітичні та чисельні моделі дозволяють адекватно відображати несталі показники радіоактивного забруднення з урахуванням ланцюга розпаду. Розроблено комплекс програм на ПЕОМ. Вирішені практичні екологічні задачі, у тому числі по зоні ЧАЕС. Обґрунтовано технологію раціональної організації та проведення геоекологічного моніторингу радіоактивного забруднення підземних вод. Опубліковано 7 наукових праць.

Ключові слова: радіоактивне забруднення, підземні води, моделювання, інженерний захист, моніторинг.

Пошукувач



Рудаков Д.В.

тип. ФГУ за г. 2433-100.

320486

AB 36.262