

Н. И. Панасюк, А. М. Алферов, Г. В. Левин, Н. Б. Стариков

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ В РАЙОНЕ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

Выполнено моделирование миграции ^3H и ^{90}Sr в геологической среде от объекта «Укрытие» по пути фильтрации грунтовых вод первого от поверхности аллювиально-четвертичного водоносного горизонта с использованием трехмерной геофильтрационной модели и верификацией полученных результатов по данным натурных наблюдений.

Ключевые слова: математическое моделирование, массоперенос, тритий, стронций, объект "Укрытие".

Для моделирования процессов геомиграции в водонасыщенных грунтах в геолого-гидрогеологических условиях объекта "Укрытие" и прилегающей к нему территории была использована программа Visual MODFLOW. Программа служит для численного моделирования гидродинамических процессов, а также процессов массопереноса веществ с фильтрационным потоком в насыщенных водой грунтах. Программа моделирует многослойные гидрогеологические среды с напорным и безнапорным режимом фильтрации. Трехмерная геофильтрация подземных вод описывается в общем виде дифференциальным уравнением в частных производных как

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где H - значения напора; K - коэффициент фильтрации; W - значения источника инфильтрации; s - емкость грунта; t - время

Для грунтов с выраженной анизотропией коэффициенты K и s , характеризующие фильтрационные и емкостные свойства водовмещающих грунтов, являются функцией координат x , y , z . Для решения уравнения (1) программой используется конечно-разностный метод с неявной схемой решения с дискретизацией временной и пространственных координат. Решается система алгебраических уравнений, число которых определяется дискретизацией моделируемого пространства и времени. Система алгебраических уравнений решается относительно распределения искомым функций напора, расхода подземных вод в моделируемой среде методом итераций. Программа Visual MODFLOW предлагает несколько методов их решения. Неявная схема решения устойчива и обладает хорошей сходимостью решения, достаточной для практического использования.

Поскольку основным механизмом массопереноса в водонасыщенных грунтах является конвекция с фильтрационным потоком для моделирования геомиграционных процессов массопереноса нейтрального мигранта, обладающего деструкцией, используется решение дифференциального уравнение конвективно-дисперсионного переноса в водонасыщенных грунтах в направлении с координатами x , y , z вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} - V_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} - V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \lambda c + w(x, y, z, t) = n_0 \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (2)$$

где c - концентрация мигранта в воде; D - коэффициент дисперсии; V_x , V_y , V_z , - скорости фильтрации в направлении x , y , z ; n_0 - активная пористость; $w(x, y, z, t)$ - интенсивность распределенного поступления мигранта в водоносный горизонт; λ - физический параметр распада мигранта.

Для моделирования гидрогеомиграционных процессов в районе объекта "Укрытие" был использован фрагмент фильтрационной региональной модели размером 8×13 км, ограниченной с севера р. Припять, а с востока прудом-охладителем. Схематизация геологогидро-

© Н. И. Панасюк, А. М. Алферов, Г. В. Левин, Н. Б. Стариков, 2011

геологических условий предполагает пространственную фильтрацию в двух водоносных горизонтах с перетоком через разделяющий их слабопроницаемый слой "киевского мергеля". Дискретизация области моделирования в плане проводилась неравномерной сеткой. Шаг сетки изменялся от 200 до 50 м. Исходя из изученности геологического строения и гидрогеологических условий по вертикали, была принята трехслойная модель, состоящая из двух водоносных горизонтов и одного разделяющего их слабопроницаемого слоя. Для водонасыщенных грунтов первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта, представленного четвертичными отложениями, был принят коэффициент фильтрации, равный 10 м/сут в районе террасы и 15 м/сут в районе поймы. Для второго напорного водоносного горизонта, представленного песками эоценовых отложений бучакско-каневских свит, коэффициент фильтрации был принят равным 5 м/сут. Значения коэффициента фильтрации для слабопроницаемого слоя, разделяющего эти два водоносных горизонта, представленного эоценовыми отложениями "киевского мергеля", был принят для большей части моделируемой территории равным 0,0003 м/сут.

Выделенный фрагмент в районе объекта "Укрытие" с более детальной разбивкой области фильтрации был использован для имитационного моделирования численного эксперимента с целью оценки объемов возможных поступлений "блочных" вод с различными концентрациями трития в первый от поверхности водоносный горизонт. Вначале решалась фильтрационная задача относительно напоров H , расходов Q и компонент векторов скоростей фильтрации V_x, V_y, V_z . Граничные и начальные условия для решения уравнения (1) принимались на основании региональной модели.

После решения фильтрационной задачи и получения поля со значениями вектора скоростей фильтрации в пространстве и во времени на имитационной модели решалась гидрогеомиграционная задача. В результате ее решения была определена концентрация трития C_T и возможный объем поступления "блочных" вод w из нижних помещений объекта "Укрытие" за период после аварии 1986 г. Как известно, тритий обладает высокой миграционной способностью из-за отсутствия его сорбции твердой фазой грунта ($K_d = 0$) и включением его в молекулу воды. Тритий образуется в реакторах при тройном делении урана и плутония в твэлах [1], а также при активации дейтерия, гелия, бора и лития (примесь в графите) нейтронами [2].

Геомиграционная задача решалась в предположении, что источником поступления трития в водоносный горизонт являются блочные воды. Интенсивность поступления блочных вод на уровень грунтовых вод $w = 1,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ (175 мм/год), была оценена ранее балансовым способом по содержанию хлора в грунтовых и блочных водах [3]. Концентрация трития $C_T = 23 \text{ 000 Бк/л}$ была установлена в блочных водах в 1997 г. [4]. Постоянная распада трития $\lambda = 0,000155/\text{сут}$. Вывод результатов расчетов распространения ореола концентраций трития от объекта "Укрытие" с потоком грунтовых проводился на различные моменты времени от 30 до 11 000 сут. Принятая интенсивность поступления блочных вод (175 мм/год) с концентрацией трития 23000 Бк/л принималась для расчетного периода 7300 сут, составляющего 20 лет после аварии.

Для сравнения результатов прогнозных расчетов на модели с фактическими в качестве индикаторов согласования были использованы данные радиогидрогеологического мониторинга по содержанию трития в скважинах 9-1А, 4-Г и С-3Б, расположенных в грунтовых водах, прошедших путь фильтрации под объектом "Укрытие". По результатам прогнозных расчетов программой Visual MODFLOW были построены графики изменения концентрации трития в грунтовых водах во времени, которые показали значительное несоответствие данных прогнозных расчетов при принятых исходных данных фактическим значениям. Очевидно, что объемы и концентрации поступления воды из блока должны быть другими. Дальнейшая верификация результатов прогнозных расчетов на модели проводилась методом последовательных приближений значений $w(t)$ (объем поступления "блочных" вод) и $C_T(t)$ до

тех пор, пока содержание трития в грунтовых водах в наблюдательных скважинах не приблизится к фактическим.

Было выполнено имитационное моделирование различных вариантов. В результате численного эксперимента на модели были получены распределения значений $w(t)$ и $C_T(t)$ (табл. 1), при которых содержание трития на модели имеет наименьшие отклонения от фактических. В сводной таблице приведены объемы поступлений блочных вод с содержанием в них трития для различных интервалов времени, принятых при имитационном моделировании.

Таблица 1. Величины возможных поступлений блочных вод в четвертичный водоносный горизонт

Интервал поступлений, сут	Интенсивность поступлений блочных вод		Содержание трития в блочных водах	
	м ³ /сут	мм/год	Бк/л	мг/л
0 - 183	12,3	1800	1080000	$3,0 \cdot 10^{-6}$
183 - 5840	1,2	175	23000	$6,4 \cdot 10^{-8}$
5840 - 7300	1,2	175	6000	$1,67 \cdot 10^{-8}$

По результатам принятых значений $w(t)$ и $C_T(t)$ программой Visual MODFLOW построены графики расчетных и фактических значений концентрации трития в грунтовых водах (рис. 1 и 2).

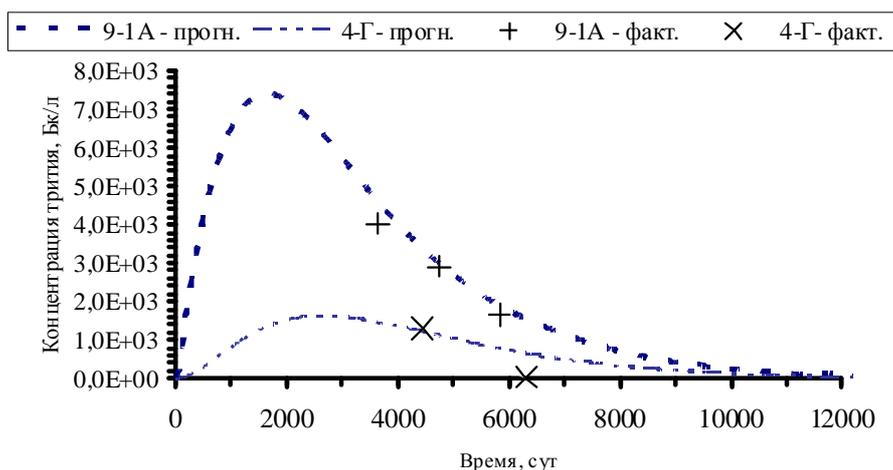


Рис. 1. Изменения концентрации трития в скважинах 9-1А и 4-Г по результатам моделирования при найденных значениях $w(t)$ и $C_T(t)$.

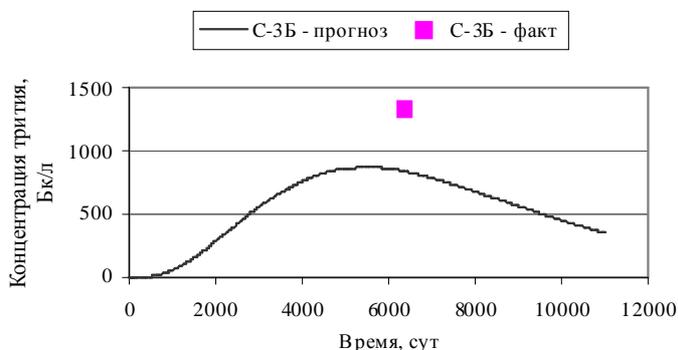


Рис. 2. Изменения концентрации трития в скважине С-3Б по результатам моделирования при найденных значениях $w(t)$ и $C_T(t)$.

Первый временной интервал продолжительностью 183 сут с интенсивностью поступлений блочных вод в грунтовые воды 12,3 м³/сут с концентрацией трития 1080000 Бк/л мо-

жет соответствовать периоду разрушения 4-го энергоблока и поступления технологической воды и атмосферных осадков до завершения строительства объекта "Укрытие". После сооружения объекта "Укрытие" над разрушенным блоком величина поступления блочных вод должна резко сократиться и может составить $1,2 \text{ м}^3/\text{сут}$. Концентрация в блочной воде трития 23000 Бк/л принята по данным определения этого изотопа водорода при проведении радиогидрогеологического мониторинга в 1997 г. В последующий период продолжительностью до 7300 сут при той же величине поступления блочных вод $1,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ концентрация трития может составить около 6000 Бк/л , что подтверждается результатами радиогидрогеологических исследований в 2003 г. [5]. В последующий период через 7300 сут (20 лет) величина поступления блочных вод в водоносный горизонт была принята равной нулю. На верифицированной таким образом геомиграционной модели были выполнены прогнозные расчеты распространения трития с грунтовыми водами от объекта "Укрытие" в направлении геофильтрации на север в сторону оз. Азбучин. Результаты распределения концентраций трития для этих исходных данных в районе объекта "Укрытие" приведены на рис. 3.

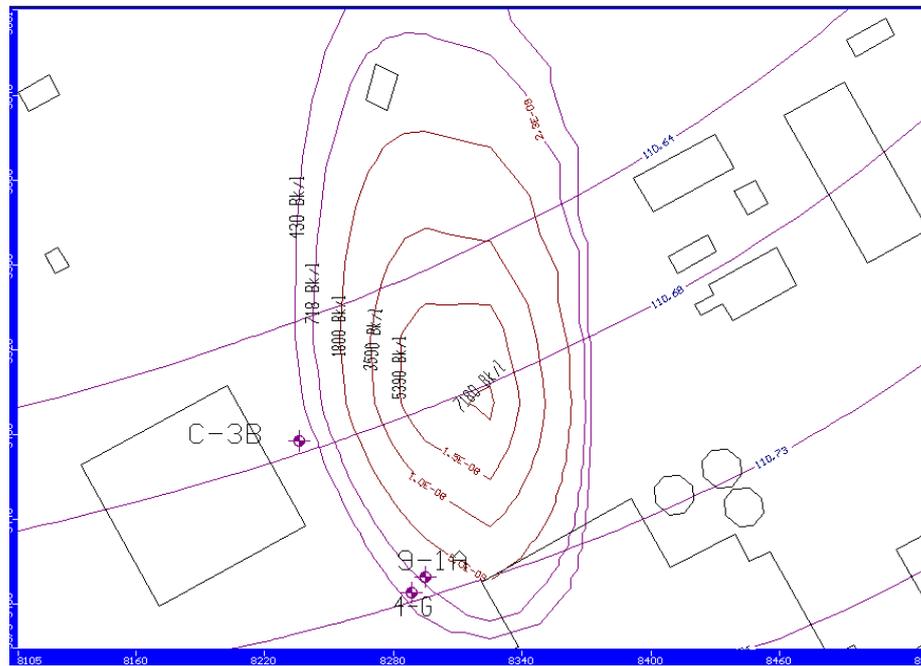


Рис. 3. Распределение концентраций трития в грунтовых водах в районе объекта "Укрытие" через 7300 сут с момента начала поступления блочных вод в окружающую среду в объеме и с концентрацией, установленной по результатам численного моделирования.

При принятых значениях поступлений блочных вод в геологическую среду периферия фронта распространения трития на момент времени 7300 сут по изолинии концентрации трития 718 Бк/л ($2,0 \cdot 10^{-9} \text{ мг/л}$) продвинется от блока на расстояние около 240 м в отличие от результатов прогнозных расчетов на неверифицированной модели, когда эта изолиния продвинулась за тот же период времени только на 75 м.

Скорость миграции фронта распространения мигранта определяется истинной скоростью движения подземных вод и контролируется активной пористостью водовмещающих грунтов n_0 , входящей в правую часть уравнения (2).

Для полученных при моделировании значениях поступлений блочных вод был выполнен также прогноз распространения ^{90}Sr грунтовыми водами на север от объекта "Укрытие". При этом в дифференциальное уравнение в частных производных (2), описывающее процесс переноса и распада радионуклида, вводится дополнительный член $\frac{\partial N}{\partial t}$, учитывающий кинетику массообмена между водой и твердой фазой грунта. Для практических расчетов содержа-

ние в грунте мигранта N связывается с концентрацией C в виде изотермы сорбции $\frac{\partial N}{\partial t} = k_d \frac{\partial C}{\partial t}$, где $k_d = \frac{\partial N}{\partial C}$ коэффициент распределения, который в общем случае зависит от концентрации C в соответствии с изотермой сорбции. При использовании линейной изотермы Генри $k_d = \text{const}$.

Сорбционная способность грунтов увеличивается с уменьшением их фракции, что приводит к увеличению удельной поверхности грунта и увеличению контакта воды с поверхностью зерен породы. Так, у некоторых разновидностей глин удельная поверхность может достигать нескольких сотен квадратных метров на 1 г грунта [6]. Поглощающая способность песком ^{90}Sr определяется в значительной степени их механическим составом, величина k_d может изменяться от значений, близких к 0 и до 12 [7]. Увеличение содержания глинистых и пылеватых частиц в песках увеличивает значение k_d до 250.

Содержание ^{90}Sr в блочных водах было принято 1000000 Бк/л (0,000198 мг/л), что соответствует осредненному значению объемных активностей ^{90}Sr за весь период наблюдений в точке наблюдений 30 помещения 001/3 (результаты измерений отделения ядерной и радиационной безопасности ИПБ АЭС НАН Украины). Принятая концентрация ^{90}Sr задавалась на модели для всего расчетного периода времени (7300 сут) с объемами воды, принятыми для моделирования процесса переноса трития грунтовыми водами. Постоянная распада стронция $\lambda = 0,000065/\text{сут}$. Характер и скорость распространения фронта ^{90}Sr от объекта "Укрытие" отличается от фронта распространения трития в первую очередь за счет сорбционных свойств водовмещающих грунтов, которые учитываются одной из трех изотерм сорбции (Генри, Ленгмюра, Фрейндлиха). При моделировании миграции ^{90}Sr в районе объекта "Укрытие" учитывалась изотерма Генри, представляющая собой частный случай изотермы Ленгмюра, вводом значения коэффициента распределения k_d .

В качестве индикатора согласования прогнозных и фактических данных были использованы определения объемной активности ^{90}Sr в грунтовых водах в скважинах 4-Г, 9-1А, расположенных возле первого уступа каскадной стены объекта "Укрытие" и в скважине С-3Б, расположенной в 75 м севернее скважины. 4-Г. В наблюдательной скважине 4-Г, начиная с конца 2003 г., наблюдается повышение объемных активностей ^{90}Sr до значений, которые превысили контрольный уровень 200 Бк/л [8]. Фактические значения содержания ^{90}Sr по вышеприведенным скважинам, которые использовались для верификации геомиграционной модели переноса ^{90}Sr потоком грунтовых вод от объекта "Укрытие", приведены в табл. 2.

Таблица 2 Фактические значения объемных активностей ^{90}Sr (Бк/л) в грунтовых водах

Номер скважины	Дата	Отсчет времени на шкале модели, сут	Бк/л	Средняя отметка фильтра скважины
4-Г	13.04.99	4735	16	108,09
	05.02.04	6494	96	
	06.04.04	6555	190	
	01.12.04	6794	180	
9-1А	15.04.04	6564	5	102,17
С-3Б	22.04.04	6571	1	103,10

При моделировании переноса ^{90}Sr с грунтовым потоком от объекта "Укрытие" в месте расположения скважины 4-Г использовались четыре фактических значения, приведенные в табл. 2. При верификации модели степень соответствия расчетных результатов фактическим можно оценивать с помощью выражения для определения средней квадратичной относительной ошибки [9]. Среднюю квадратичную ошибку можно определить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4} \left[\left(\frac{\Delta c_1}{c_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c_2}{c_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c_3}{c_3} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c_4}{c_4} \right)^2 \right]} 100 \%, \quad (3)$$

где $\Delta c_1, \Delta c_2, \Delta c_3, \Delta c_4$ - абсолютные ошибки; c_1, c_2, c_3, c_4 - фактические значения содержания ^{90}Sr в скважине 4-Г на моменты времени 4735, 6494, 6555 и 6794 сут.

При принятой ошибке отклонений расчетных значений от фактических для скважины 4-Г параметр верификации k_d составил 2,0. В таком же порядке для разных значений k_d был найден расчетные изменения значений объемных активностей, которые наилучшим образом сходятся с данными фактических измерений в скважинах 9-1А и С-3Б. В районе скважины 9-1А коэффициент распределения k_d составил 200, в районе скважины С-3Б коэффициент k_d был близок к нулю. Результаты верификации модели приведены на рис. 4.

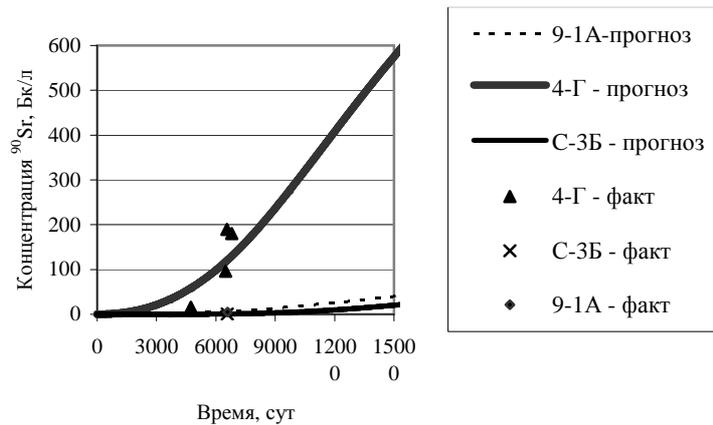


Рис. 4. Результаты калибровки гидрогеомиграционной модели переноса ^{90}Sr в районе объекта "Укрытие".

Разброс значений миграционного параметра k_d может быть вызван профильной и плановой неоднородностью осадочных водовмещающих пород, которая определяется генетическими особенностями различных отложений и их слоистостью, которые можно воспроизвести на более детальной крупномасштабной модели. Кроме того, существует разница в положении фильтров водоприемных частей скважин 9-1А и 4-Г, которая составляет 6 м, т.е. скважины характеризуют различные по глубине сечения водоносного горизонта, которые могут отличаться по своим сорбционным свойствам.

Для уточнения объемов поступления блочных вод в окружающую среду, принятых по результатам моделирования, помимо величин возможных поступлений воды в разрушенный взрывом блок в виде атмосферных осадков, при проведении пожарных мероприятий, поступлений из напорного бассейна необходимо оценить водный баланс внутри блока за период с конца апреля по ноябрь 1986 г. (завершение строительства объекта "Укрытие") с учетом объемов воды оставшейся в: 1) в помещениях бассейна-барботера; 2) технологических каналах; 3) барабанах-сепараторах; 4) боковой биологической защите; 5) нижних водяных коммуникациях. Кроме того, необходимо проводить специальные исследования для определения основных миграционных параметров, входящих в дифференциальные уравнения, для обоснования гидрогеохимических моделей подземных вод.

К недостаткам программы следует отнести неучет ею влияния ионного состава грунтовых вод. Так, с повышением содержания ионов кальция происходит снижение скорости сорбции ^{90}Sr твердой фазой грунта и величины коэффициента распределения k_d , что приводит к увеличению распределительного отношения h , величины, обратной коэффициенту распределения k_d .

На верифицированных моделях можно проводить различные имитационные эксперименты по очистке грунтовых вод от радионуклидов при различных объемах их поступлений в водоносный горизонт. Методы имитационного численного моделирования являются эффективными для получения количественных оценок и прогнозирования состояния экосистемы подземных вод, а также при установлении реакции экосистемы на воздействие различных техногенных и антропогенных факторов.

В условиях локальной зоны и наблюдаемых процессов в районе объекта "Укрытие" методы численного моделирования можно применять для воспроизведения процессов взаимодействия объекта "Укрытие" с окружающей средой с момента аварии по настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 245 с.
2. Ленский Л.А. Физика и химия трития. – М.: Энергоиздат. 1981. – 111 с.
3. Панасюк Н.И., Рудько В.М., Алферов А.М. и др. Современное распределение радиоактивных веществ в геологической среде локальной зоны объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. – 2000. – Вып. 6. - С.160 – 168.
4. Водобмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. – К.: ИГН НИЦРПИ, 2000. - Ч. 2. - С. 87 - 124.
5. Отчет о НИР "Радиогидроэкологический мониторинг в районе объекта "Укрытие". - ИПБ АЭС НАН Украины. - Чернобыль, 2004.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М, 1963. – 635 с.
7. Белицкий А.С., Орлова Е.И. Охрана подземных вод от радиоактивных загрязнений. – М.: Медицина, 1968. – 208 с.
8. Контроль неорганизованных выбросов из объекта "Укрытие": (Отчет о НИР, дог. 154/04) / ИПБ АЭС НАН Украины. - Чернобыль, 2004.
9. Лаврик В.І. Методи математичного моделювання в екології. – К.: Вид. дім "КМ Академія", 2002. – 203 с.

М. І. Панасюк, А. М. Алфєров, Г. В. Левин, М. Б. Стариков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМІГРАЦІОННИХ ПРОЦЕСІВ У ВОДОНАСИЧЕНИХ ГРУНТАХ У РАЙОНІ ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ"

Виконано моделювання міграції ^3H і ^{90}Sr в геологічному середовищі від об'єкта "Укриття" на шляху фільтрації грунтових вод першого від поверхні алювіально-четвертинного водоносного горизонту з використанням тривимірної геофільтраційної моделі з верифікацією отриманих результатів із даними натурних спостережень.

Ключові слова: математичне моделювання, масоперенос, тритій, стронцій, об'єкт "Укриття".

M. I. Panasyuk, A. M. Alfyorov, G. V. Levin, M. B. Starikov

MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMIGRATORY PROCESSES IN WATER- SATURATED SOIL IN AREA OF OBJECT "UKRYTTYA"

It is executed modelling of migration ^3H and ^{90}Sr in the geological environment from object "Ukryt-tya" on a way of a filtration of subsoil waters of the first from a surface alluvial-quaternary water-bearing horizon with use of three-dimensional geofiltrational model and verification of the received results with the data of in-situ measurements.

Keywords: mathematical modelling, mass transfer, tritium, strontium, object "Ukryttya".

Поступила в редакцію 10.02.11