

УДК 539.163 : 502.175

Ситуационное моделирование в прогнозе загрязнения подземной гидросферы

П.В. Амосов, Н.В. Новожилова

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния ориентации и размера модуля с опасными отходами относительно произвольного направления потока подземных вод на уровень их загрязнения. Расчеты пространственного распределения гидравлического напора и долгоживущего радиоактивного трассера выполнены с использованием программы PORFLOW.

Abstract. The paper contains results of study of influence of module (with hazardous waste) orientation and size in relation to arbitrary direction of the underground water flows on level of its contamination. Calculations of hydraulic pressure distribution and long-lived radioactive tracer have been carried out using PORFLOW software.

Ключевые слова: ориентация и размер модуля, опасные отходы, подземная гидросфера
Key words: module orientation and size, dangerous waste, underground hydrosphere

1. Введение

В Горном институте КНЦ РАН решение вопросов охраны окружающей среды, возникающих при подземном размещении радиационно опасных объектов, занимает видное место. Одна из таких задач – оценка и минимизация загрязнения подземных вод (ПВ) при различных сценариях эволюции объектов на базе ситуационных моделей. Напомним, что ситуационная модель – это модель, представляющая собой описание ситуаций, в которых предстоит действовать изучаемому объекту. Одной из особенностей ситуационного моделирования при оценке влияния подземного радиационно опасного объекта на загрязнение окружающей среды является возможность комплексного учета множества факторов, показателей, критериев, сложных математических и инженерных задач. Конечным итогом такого исследования является совокупность вариантов, из которого и осуществляется выбор наиболее безопасного способа размещения указанного выше объекта.

Настоящая публикация посвящена исследованию влияния пространственного расположения модуля с опасными отходами по отношению к направлению потока ПВ на уровень загрязнения подземной гидросферы. Анализ результатов конечного числа вариантов позволил авторам сформулировать ряд положений, выполнение которых обеспечивает снижение опасного воздействия на ПВ площадок размещения изучаемых объектов.

2. Методические подходы

Исследования базируются на численных экспериментах, выполненных с помощью верифицированного программного продукта PORFLOW (метод конечных разностей). В двухмерной постановке на площади 100×100 м рассмотрена следующая задача. Поток ПВ, направление которого изменяется от 0° до 90° , омывает модуль с опасными отходами (рис. 1). При этом выполняется условие постоянства вектора градиента гидравлического напора на территории площадки (численное значение $0,01$ м/м), а размеры модуля имеют следующие значения: 10×30 м, 10×50 м, 10×70 м. Естественно, что для каждого значения угла φ направления потока ПВ при неизменных пространственных аппроксимациях задаются соответствующие граничные условия распределения напора (Амосов, 2010). В указанной работе приведена как постановочная часть рассматриваемой задачи, так и результаты исследования пространственного загрязнения ПВ для модуля с отходами, размеры которого составляют 10×10 м (вариант максимальной компактности).

Задача решается в два этапа: на 1-м определяется пространственное распределение напоров и поле скорости; на 2-м решается уравнение переноса загрязнения с учетом физико-химического взаимодействия трассера с материалами моделируемой

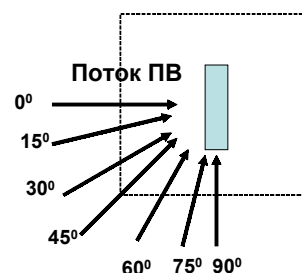


Рис. 1. Ориентация модуля с отходами по отношению к направлению потока ПВ

области. Вариант, когда угол φ потока ПВ равен 0° , авторы называют поперечным расположением объекта, когда 90° – продольным.

В области отходов использовалась модель мгновенного растворения, что справедливо для такого важного изотопа в оценках безопасности объектов с радиоактивными отходами, как ^{129}I . Заметим, что для указанной модели растворения начальное значение загрязнения в области источника зависит от размера модуля. Временной интервал расчетов процесса распространения загрязнения выбран в 10 тыс. лет, а полная активность источника, приходящаяся на единицу высоты модуля, составляет $3 \cdot 10^9$ Бк. Коэффициент распределения этого долгоживущего несорбирующегося во вмещающей породе мигранта (практически пассивный стабильный трассер, что обеспечивает прогноз максимальных площадей загрязнения) в материале источника принят равным $0,064 \text{ м}^3/\text{кг}$.

3. Результаты расчетов и их анализ

Представим некоторые результаты, касающиеся пространственного распределения радиоактивного загрязнения и динамики загрязнения в точках контроля анализируемым изотопом при указанных выше вариациях параметров. Как и ранее (Амосов, 2010), для построения пространственного загрязнения использовалось два значения уровня изолиний: минимальное – $1300 \text{ Бк}/\text{м}^3$, что соответствует уровню вмешательства (УВ) по анализируемому изотопу (Нормы..., 2009), и максимальное – $7260 \text{ Бк}/\text{м}^3$, что определяется отношением предела годового поступления изотопа к величине годового потребления воды и пищи.

Пространственное распределение радиоактивного загрязнения

Рис. 2 иллюстрирует пространственное распределение изотопа ^{129}I на 10 тысяч лет при расположении объекта изоляции, когда угол φ потока ПВ равен 15° , а размер модуля варьируется от $10 \times 30 \text{ м}$ до $10 \times 70 \text{ м}$.

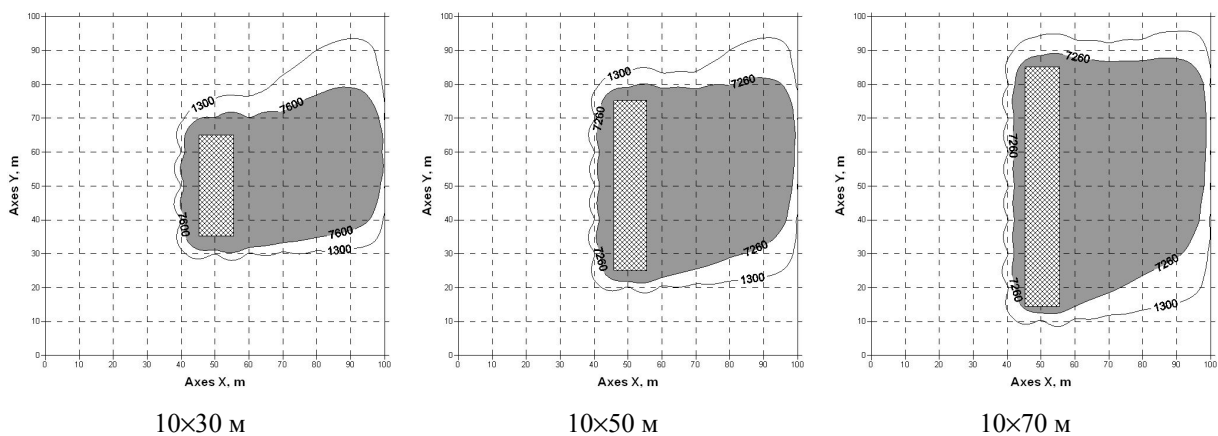


Рис. 2. Пространственное распределение изотопа ^{129}I на 10 тыс. лет при угле φ потока ПВ 15° для разных размеров модуля

Как видно на рис. 2, пошаговое увеличение размера объекта вызывает рост площади загрязнения с уровнем выше $1300 \text{ Бк}/\text{м}^3$ примерно на 800 м^2 . Указанный прирост обеспечивается за счет увеличения "фронта" загрязнения. Несложно оценить площади загрязнения выше УВ моделируемого пространства в предложенном варианте размещения объекта с ростом его размера: $10 \times 30 \text{ м}$ – $\sim 2240 \text{ м}^2$; $10 \times 50 \text{ м}$ – $\sim 2940 \text{ м}^2$; $10 \times 70 \text{ м}$ – $\sim 3670 \text{ м}^2$.

Если при компактном размещении отходов указанный уровень загрязнения прогнозируется на 20 % площади моделирования (Амосов, 2010), то при максимальном размере модуля с отходами площадь с таким же уровнем загрязнения выше 35 % рассматриваемой территории.

На рис. 3 представлено пространственное распределение загрязнения ПВ изотопом ^{129}I в зависимости от угла потока подземных вод для модуля размером $10 \times 70 \text{ м}$.

Изменение угла φ потока ПВ от 0° до 90° при фиксированном положении модуля размером $10 \times 70 \text{ м}$ вызывает уменьшение площади загрязнения с уровнем выше $1300 \text{ Бк}/\text{м}^3$ примерно на 2400 м^2 . Площади загрязнения выше УВ моделируемой области в предложенном варианте размещения объекта для разных углов φ потока ПВ: 0° – $\sim 4760 \text{ м}^2$; 15° – $\sim 4740 \text{ м}^2$; 30° – $\sim 4900 \text{ м}^2$, 45° – $\sim 4820 \text{ м}^2$, 60° – $\sim 4550 \text{ м}^2$, 75° – $\sim 3790 \text{ м}^2$, 90° – $\sim 2340 \text{ м}^2$.

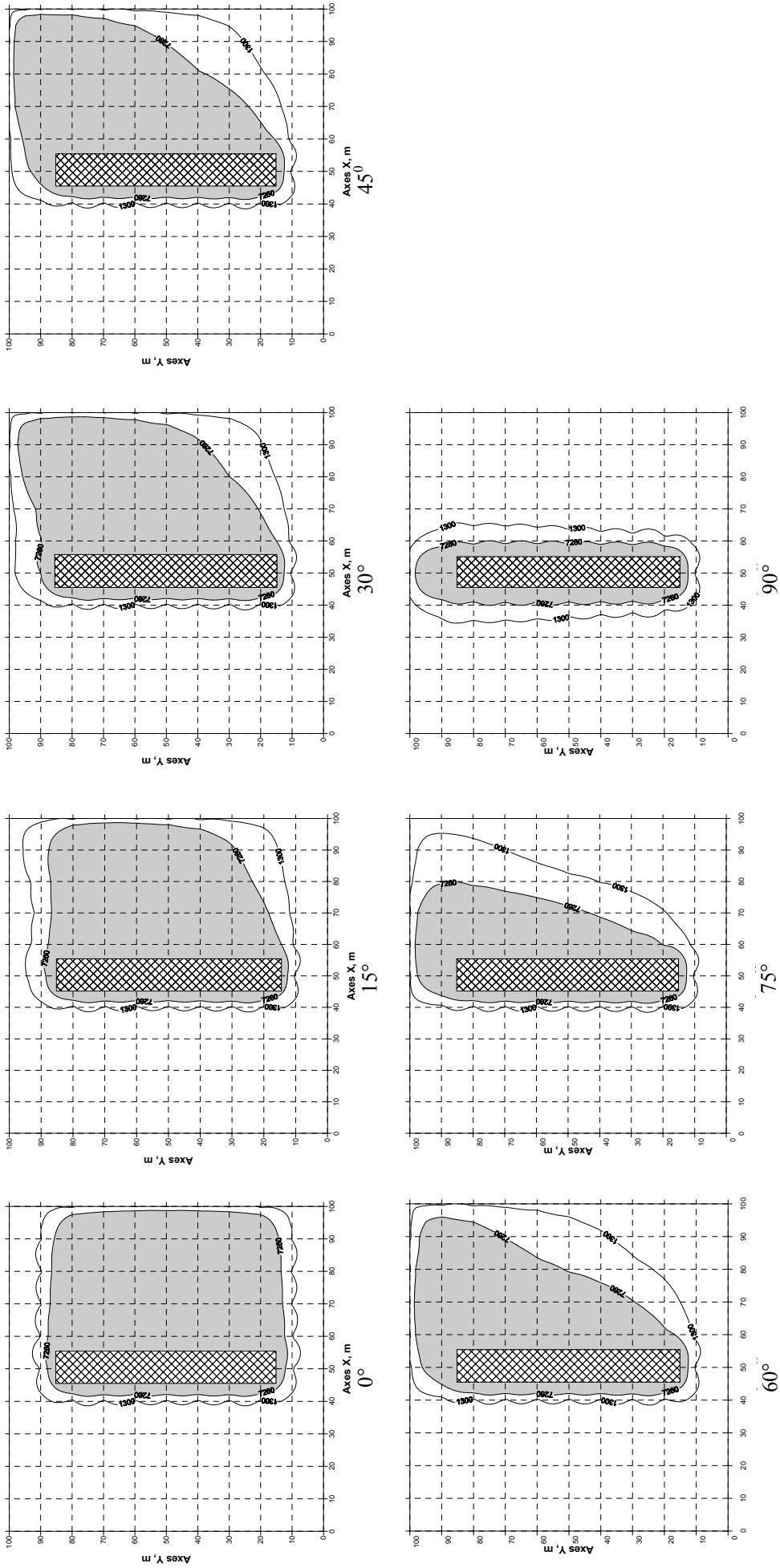


Рис. 3. Пространственное распределение изотопа ^{129}I на 10 тысяч лет для модуля размером 10x70 м при вариации угла φ потока ПВ

Если при поперечном размещении модуля площадь загрязнения выше УВ прогнозируется приблизительно на 50 % площади моделирования, то при продольном расположении отходов аналогичный параметр анализа немного выше 20 % рассматриваемой территории.

В табл. 1 приведены значения площадей загрязнения для изолиний, соответствующих УВ, когда угол φ потока ПВ составляет 0° , 45° и 90° , а размеры модуля с радиационно опасными отходами изменяются от 10×10 м до 10×70 м. Можно отметить несколько моментов:

при поперечном обтекании модуля площадь загрязнения для максимально компактного размещения отходов в 3 раза меньше, чем для объекта размером 10×70 м;

для угла φ потока подземных вод, равного 45° , для модуля размером 10×10 м площадь загрязнения не ниже УВ составляет 35 % от площади моделирования, а при размерах модуля 10×70 м – почти 50 %;

при продольном обтекании модуля площадь загрязнения увеличивается приблизительно на 800 м^2 , что составляет всего 8 % от площади моделирования.

Напрашивается вывод, что при продольной ориентации модуля нет острой необходимости в дополнительном компактировании отходов.

Таблица 1. Площадь загрязнения для изолинии УВ, м^2

Угол φ потока ПВ	Размеры модуля с отходами			
	10×10 м	10×30 м	10×50 м	10×70 м
0°	1530	2410	3500	4760
45°	3520	3820	4310	4820
90°	1530	1940	2140	2340

Анализ результатов численных экспериментов и для других размеров модуля с отходами позволил заметить, что наименьшая площадь загрязнения фиксируется, когда угол φ потока ПВ равен 90° . При продольном расположении объекта отсутствует сильная зависимость площади загрязнения моделируемой области от размера самого объекта.

Дополнительно, с целью определения количественных показателей загрязнения моделируемой площади при произвольном угле φ , были построены графики зависимостей площадей загрязнения для разных размеров исследуемого радиационно опасного объекта от угла φ потока, омывающего этот объект. На рис. 4 и 5 представлены графические результаты, характеризующие зависимости площадей загрязнения для двух указанных выше значений уровней изолиний: минимального – 1300 Бк/м^3 и максимального – 7260 Бк/м^3 , соответственно.

Оказалось, что представленные на рис. 4 и 5 кривые хорошо описываются полиномами 4 степени

$$S(\varphi) = \beta_1 + \beta_2\varphi + \beta_3\varphi^2 + \beta_4\varphi^3 + \beta_5\varphi^4,$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ и β_5 – параметры полиномов, рассчитанные с помощью стандартной подпрограммы RCURV (FORTRAN POWER STATION), φ – угол потока ПВ, измеряемый в градусах, S – площадь загрязнения, м^2 .

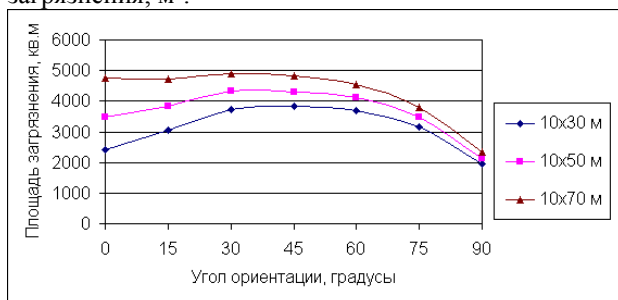


Рис. 4. Площадь загрязнения для уровня изолиний 1300 Бк/м^3

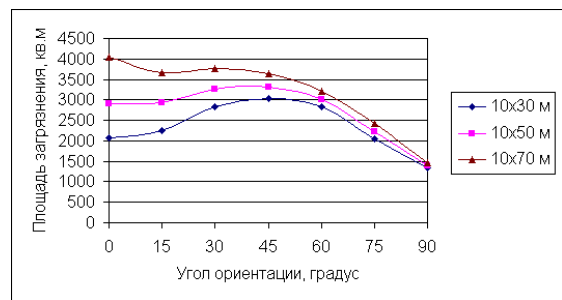


Рис. 5. Площадь загрязнения для уровня изолиний 7260 Бк/м^3

Полученные зависимости характеризуются высоким значением коэффициента корреляции (выше 0,99). Анализ кривых свидетельствует, что продольный вариант размещения модуля с отходами наиболее предпочтителен. Для модуля с размерами 10×30 м и 10×50 м максимальные площади загрязнения прогнозируются при угле φ около 45° . Для модуля с размерами 10×70 м указанный факт не подтверждается, что, по мнению авторов, объясняется влиянием граничных условий и требует увеличение размеров площадки моделирования.

Анализ загрязнения гидросферы в точках контроля

Динамика загрязнения изотопом ^{129}I и максимальные концентрации при вариации размеров исследуемого объекта и направления потока подземных вод проанализированы для точек контроля, расположенных в 10 м от внешних границ модели (рис. 6).

На рис. 7 представлен график зависимости максимальных концентраций ^{129}I от направления потока подземных вод в трех точках контроля 1, 5 и 9.

Поведение кривых, представленных на рис. 7, соответствует "физике" рассмотренных процессов. В частности, при увеличении размеров объекта происходит уменьшение концентрации в источнике, а уменьшение расстояния от точки контроля до источника загрязнения приводит к росту концентрации в этой точке.

Дополнительно, в табл. 2 приведены значения максимальной концентрации и номера точки контроля, в которой зафиксирован этот максимум, для разных размеров исследуемого объекта при вариации направления потока ПВ.

Анализ данных таблицы позволяет заметить, что максимумы концентрации в точках контроля в целом соответствуют направлению потока подземных вод. В рамках принятой модели растворения уровень загрязнения в точках контроля определяется направлением потока подземных вод (угол φ) и расстоянием до источника загрязнения.

4. Заключение

В двухмерной постановке выполнен анализ потенциального загрязнения подземной гидросферы при вариации размеров модуля с отходами, характеризующихся высоким показателем растворения (более 10 М), а также угла φ между направлением потока ПВ и стенками модуля для условия постоянства вектора гидравлического градиента на локальной площадке размером 100×100 м.

Анализ результатов расчетов пространственного распределения загрязнения показал, что продольный вариант размещения модуля с отходами представляется наиболее предпочтительным с позиций минимума загрязнения подземной гидросферы.

Анализ результатов расчетов загрязнения в точках контроля свидетельствует, что в рамках принятой модели растворения уровень загрязнения определяется направлением потока подземных вод (угол φ) и расстоянием до источника загрязнения.

Для устранения влияния краевых условий авторы предполагают увеличить размер моделируемой площадки, а также выполнить аналогичные исследования для модели предела растворимости.

Литература

Амосов П.В. К вопросу о влиянии ориентации модуля с опасными отходами на загрязнение подземной гидросферы. *Вестник МГТУ*, т.13, № 4/2, с.881-886, 2010.
 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М., *Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора*, 100 с., 2009.

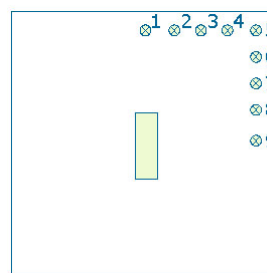


Рис. 6. Расположение точек контроля по отношению к модулю с отходами

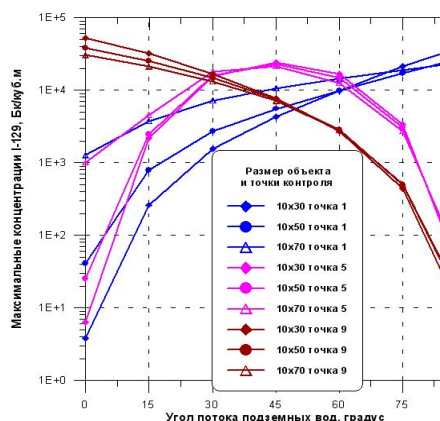


Рис. 7. Зависимость максимальных концентраций ^{129}I от направления потока ПВ

Таблица 2. Максимальные концентрации (Бк/м³·10⁵) и номер точки контроля, в которой зафиксирован этот максимум, при вариации размеров объекта и направления потока ПВ

Угол φ потока ПВ	Размеры модуля с отходами		
	10×30 м	10×50 м	10×70 м
0°	5,2 (т. 9)	3,8 (т. 9)	3,0 (т. 9)
15°	4,8 (т. 8)	3,5 (т. 8)	2,8 (т. 7)
30°	3,3 (т. 7)	3,2 (т. 7)	2,7 (т. 6)
45°	2,7 (т. 6)	2,4 (т. 6)	2,5 (т. 4)
60°	2,6 (т. 3)	2,5 (т. 3)	2,6 (т. 3)
75°	2,7 (т. 2)	2,4 (т. 2)	2,2 (т. 2)
90°	4,1 (т. 1)	2,8 (т. 1)	2,4 (т. 1)