

УДК 622.537/.538 : [502.51 : 504.5+556.338](470.21)

## Анализ альтернативного сценария "скважина откачки" (на примере площадки Сайда-губа)

П.В. Амосов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты

<sup>2</sup> Физико-энергетический факультет Кольского филиала ПетрГУ, кафедра теплофизики

**Аннотация.** В статье на примере площадки Сайда-губа проанализирован вероятностный сценарий "Скважина откачки", входящий в нормативных документах по оценке безопасности радиационно-опасных объектов в перечень процессов и событий, обусловленных деятельностью человека. Проанализированы изменения в скоростных полях течения подземных вод и уровней загрязнения пассивным стабильным трассером на территории площадки по сравнению со сценарием нормальной эволюции. Определены коэффициенты чувствительности по параметру расхода откачки из скважины для точек контроля.

**Abstract.** In the paper on the example of the site Sayda bay the probabilistic scenario "Pumping well" has been analyzed. The scenario is included in the list of processes and events conditioned by human activity according to the normative document on estimation of safety radiation-dangerous object. The changes in velocity field of the flow of underground water and level of the contamination passive stable tracer on the site territory in contrast to the normal evolution scenario have been analyzed. The sensitivity coefficients on the parameter of the pumping rate from the well for the control points have been calculated.

### 1. Введение и постановка задачи

Статья представляет результаты исследований, которые являются естественным продолжением изысканий по проблеме экологической безопасности подземных радиационно-опасных объектов в северо-западном регионе, ранее выполненных автором с коллегами (Амосов, 2007). В указанной работе был рассмотрен так называемый сценарий нормальной эволюции объекта относительно его дальнего поля. В частности, на основе комплексного использования современной информационной, инструментальной и методической базы была создана гидрогеологическая модель и рассчитаны скоростные поля потока подземных вод, выполнены численные эксперименты по переносу пассивного стабильного трассера во вмещающем массиве из установленного места расположения объекта хранения/захоронения радиационно-опасных материалов.

Для качественной и количественной оценки консервативного загрязнения вмещающего массива был использован фактор разбавления  $F_D$ , который определяется как отношение концентрации в точках контроля ( $C$ ) к условной постоянной концентрации на границе раздела нарушенной зоны и дальнего поля ( $C_0$ ) объекта, т.е.  $F_D = C/C_0$  (Предварительная оценка..., 2000). Другими словами, фактор разбавления  $F_D$  есть относительная функция пространственных и временной переменных, т.е.  $F_D(x, y, z, t)$ . Этот параметр может служить консервативным количественным показателем загрязнения геологической среды. С учетом определяемого в задаче высвобождения активности в ближнем поле радиационно-опасного объекта максимального значения концентрации (граница раздела ближнего и дальнего поля) такой подход позволяет (с помощью соответствующей биосферной модели, например, в простейшем случае – потребление загрязненной питьевой воды) выйти на оценку экологической безопасности объекта.

Нормативные документы России и МАГАТЭ предписывают изучение, помимо сценария нормальной эволюции, также и альтернативных или вероятностных сценариев эволюции объектов. С этой целью и был рассмотрен и проанализирован сценарий "Скважина откачки". Этот сценарий входит в перечень процессов и событий, обусловленных деятельностью человека (например, использование населением подземных вод для хозяйственных нужд). Было сделано консервативное предположение, что скважина откачки располагается в наиболее критичном направлении от объекта. В частности, для рассматриваемой площадки таким является северо-восточное направление. Местонахождение скважины определено на расстоянии примерно 150 м от проекции центра объекта на поверхность. На рис. 1 схематически показано расположение точек контроля и скважины откачки. Заметим, что скважина откачки в данной ситуации может выступать еще одной точкой контроля. Для выполнения численных экспериментов, как и ранее, был использован компьютерный код AQUA3D (Groundwater flow..., 1998). Предполагалось, что через скважину из 1-го слоя модели непрерывно отводится 1 м<sup>3</sup>/час подземных вод.

## 2. Результаты и анализ численных экспериментов

Результаты выполненных численных экспериментов представлены на рис. 2-4 и табл. 1 и 2. Рис. 2а и 2б позволяют рассмотреть изменения поля скорости в выбранном фрагменте площадки Сайда-губа для условий сценария нормальной эволюции (рис. 2а) и для вероятностного сценария – "Скважина откачки" (рис. 2б). Наиболее существенное изменение имеет место именно в области расположения скважины. В результате непрерывного отвода подземных вод в окрестности этой скважины происходят самые заметные изменения поля скорости: значения компонент скорости возрастают на порядок.

Наиболее существенным индикатором указанных изменений, помимо векторов скорости, служат коэффициенты разбавления: как их пространственное распределение (см. рис. 3а и 3б), так и их значения в точках контроля (см. табл. 1).

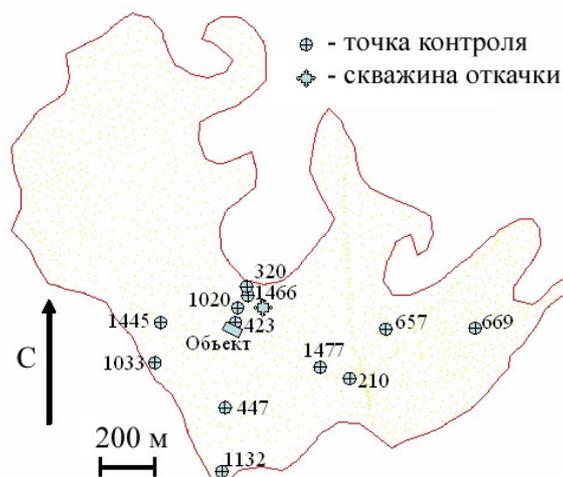
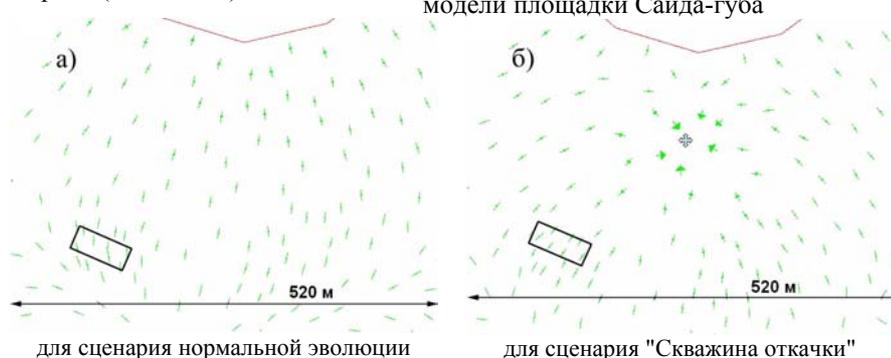


Рис. 1. Схема расположения точек контроля и скважины откачки в 1-м слое и объекта в 4-м слое модели площадки Сайда-губа

Рис. 2. Фрагменты рассчитанных полей скорости подземных вод в 1-м слое модели площадки Сайда-губа. Прямоугольником здесь и далее отмечено примерное расположение объекта в 4-м слое модели



Представленные на рис. 3а пространственные распределения относительной концентрации загрязнения, или факторов разбавления, еще не позволяют конкретизировать преимущественное направление движения загрязнения, тем более, что они практически повторяют аналогичные пространственные распределения для условий сценария нормальной эволюции. Поэтому дополнительно для 1-го слоя модели на рис. 3б та же ситуация изображена с другим разрешением по величине загрязнения, выбранным на основе минимальных и максимальных значений загрязнения в этом слое. Рис. 3б значительно отличается от рис. 3а, особенно в непосредственной близости от объекта. На рис. 3б прекрасно видно, что основная масса загрязнения в 1-м слое модели по-прежнему устремляется непосредственно в Сайда-губу в северо-северо-восточном направлении, но по сравнению со сценарием нормальной эволюции (см. рис. 4) имеется очевидное различие. Пятно с максимальным уровнем концентрации на рис. 3б оказывается существенно большего размера. При этом оно смещено в том же северо-северо-восточном указанном направлении по отношению к положению подземного объекта на незначительное расстояние (примерно 90 м от проекции центра хранилища до центра пятна), но с заметным отклонением к месту расположения скважины откачки.

Количественным показателем указанных изменений в пространственном распределении коэффициентов разбавления могут служить данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты разбавления в точках контроля площадки Сайда-губа для условий сценария нормальной эволюции (СНЭ) и для вероятностного сценария "Скважина откачки" (СО)

№ узла	Вариант расчета		№ узла	Вариант расчета	
	СНЭ	СО		СНЭ	СО
320	$1.317 \cdot 10^{-3}$	$1.273 \cdot 10^{-3}$	1445	$4.703 \cdot 10^{-5}$	$1.158 \cdot 10^{-5}$
1033	$9.517 \cdot 10^{-5}$	$3.113 \cdot 10^{-5}$	1132	$3.233 \cdot 10^{-6}$	$1.261 \cdot 10^{-6}$
1477	$2.271 \cdot 10^{-6}$	$1.009 \cdot 10^{-6}$	447	$8.184 \cdot 10^{-6}$	$3.081 \cdot 10^{-6}$
423	$2.237 \cdot 10^{-3}$	$3.752 \cdot 10^{-3}$	210	$6.453 \cdot 10^{-7}$	$2.301 \cdot 10^{-7}$
1020	$1.997 \cdot 10^{-3}$	$2.954 \cdot 10^{-3}$	657	$3.947 \cdot 10^{-8}$	$4.767 \cdot 10^{-9}$
1466	$1.519 \cdot 10^{-3}$	$1.862 \cdot 10^{-3}$	669	$1.656 \cdot 10^{-11}$	$1.801 \cdot 10^{-12}$

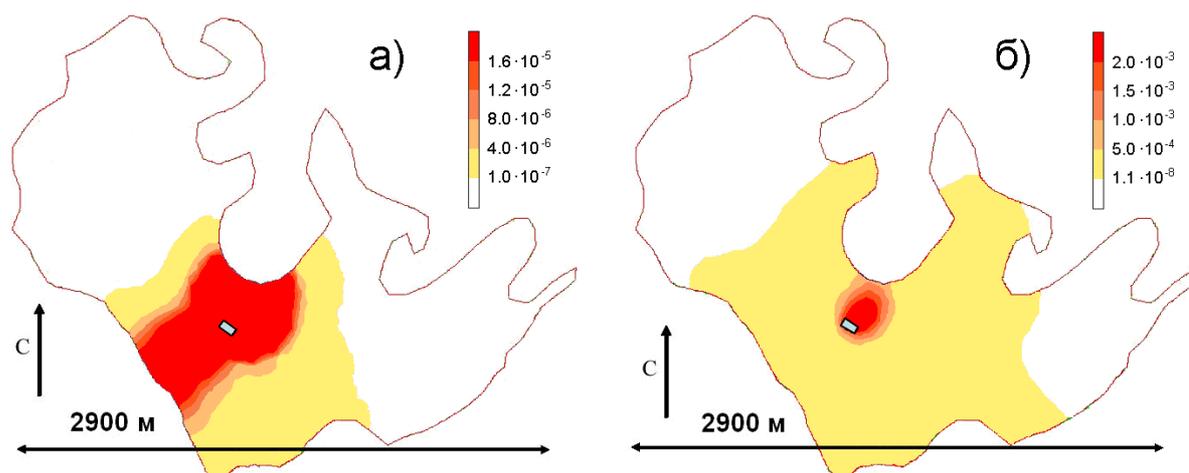


Рис. 3. Пространственное распределение относительной концентрации стабильного пассивного трассера в 1-м слое модели площадки Сайда-губа (время 1.5 млн суток) для условий сценария "Скважина откачки". Схемы а) и б) отличаются разрешением по величине загрязнения.

Анализ числовых значений факторов разбавления для площадки Сайда-губа показывает, что они, как и для сценария нормальной эволюции, могут быть собраны в следующие группы.

Первую группу с уровнем разбавления  $(1\div 4) \cdot 10^{-3}$  в единицах относительной концентрации составляют факторы разбавления в точках контроля северо-северо-восточного направления с номерами 320, 1466, 423, 1020. При этом для узла 320 наблюдается обусловленное большей удаленностью от объекта и изменением поля скорости небольшое снижение в величине относительной концентрации (см. табл. 1). Для остальных точек контроля отмечается увеличение значений коэффициентов разбавления, причем для узлов 423, 1020 этот рост практически полугорный. Выбранное северо-восточное направление по-прежнему остается наиболее критическим.

Для всех остальных точек контроля в силу нового скоростного поля имеет место уменьшение значений факторов разбавления, что делает все направления, за исключением северо-северо-восточного, более безопасными.

Вторую группу с уровнем разбавления порядка  $(1\div 4) \cdot 10^{-5}$  в тех же единицах относительной концентрации формируют факторы разбавления в точках контроля юго-западного направления с номерами (1445, 1033). По сравнению со сценарием нормальной эволюции отмечается снижение указанного параметра от двух до четырех раз.

Третью группу с уровнем разбавления на уровне  $10^{-7}$ - $10^{-6}$  в единицах относительной концентрации образуют факторы разбавления в точках контроля южного и юго-восточного направлений с номерами (447, 1132 и 1477, 210 соответственно). Для этих точек контроля снижение значений факторов разбавления составляет 2-3 раза.

И, наконец, в четвертую группу с разбавлением менее  $10^{-8}$  в единицах относительной концентрации можно отнести факторы разбавления в точках контроля восточного направления с номерами (657, 669). Для указанных точек контроля в сценарии скважины откачки имеет место снижение значений факторов разбавления практически на порядок.

Отдельно отметим новую точку контроля – местоположение скважины откачки. Если в сценарии нормальной эволюции фактор разбавления для этой точки составлял  $8.8 \cdot 10^{-4}$  в единицах относительной концентрации, то для условий анализируемого вероятностного сценария это значение выросло почти в два раза и составляет  $1.5 \cdot 10^{-3}$  в тех же единицах измерения.

Дополнительно для коэффициентов разбавления в точках контроля выполнены расчет и анализ чувствительности для параметра расхода  $q$  в скважине откачки. Для этого использован нормализованный коэффициент чувствительности  $k$ , определяемый посредством известного соотношения

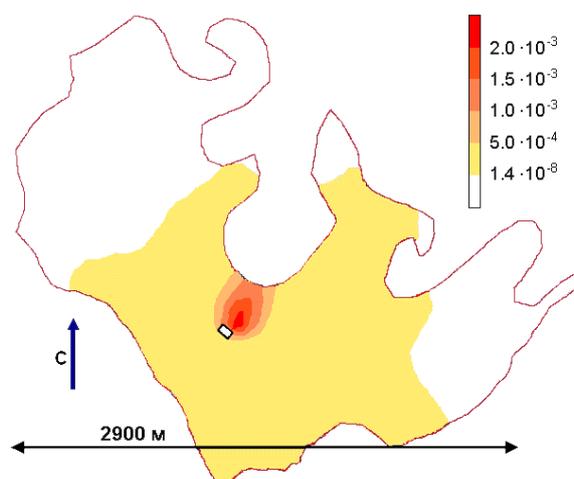


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для условий сценария нормальной эволюции

$$k = \frac{(F_D - F_D^0)/F_D^0}{(q - q^0)/q^0},$$

где  $F_D^0$  – значение фактора разбавления при эталонном расходе  $q^0$ ;  $F_D$  – значение фактора разбавления при расходе  $q$ . Анализ чувствительности выполнен при новом значении расхода равном  $q = 1.01 q^0$ , т.е. больше эталонного ровно на 1%. В этой ситуации расчет коэффициента чувствительности в каждой точке контроля существенно упрощается. Табл. 2 прекрасно иллюстрирует и знак, и величину коэффициента чувствительности в 12-ти точках контроля.

При известном изменении величины расхода в скважине откачки, используя приведенное выражение и данные табл. 2, достаточно просто оценить возможное значение коэффициента разбавления для любой точки контроля. Следует отметить достаточно высокое значение коэффициентов чувствительности в точках контроля с номерами 210, 657 и 669. причем знак коэффициентов чувствительности в этих точках контроля демонстрирует, что с ростом величины расхода в скважине откачки значения факторов разбавления будут снижаться. Вместе с тем имеется ряд точек контроля (например, 423 и 1020), коэффициенты чувствительности для которых положительны, что означает увеличение значений факторов разбавления с ростом расхода откачки. Отдельно отметим точку контроля, привязанную к местоположению скважины откачки. Расчеты дают положительный коэффициент чувствительности, что физически вполне естественно, со значением 0.13.

Таблица 2. Коэффициенты чувствительности  $k$  в точках контроля площадки Сайда-губа для условий вероятностного сценария эволюции "Скважина откачки"

№ узла	$k$						
320	- 0.39	423	+ 0.32	1445	- 0.95	210	- 1.13
1033	- 0.71	1020	+ 0.20	1132	- 0.95	657	- 2.17
1477	- 0.99	1466	- 0.05	447	- 0.88	669	- 2.22

### 3. Заключение

На основе ранее созданной цифровой гидрогеологической модели площадки Сайда-губа проанализирован альтернативный сценарий эволюции подземного радиационно-опасного объекта – "Скважина откачки". Продемонстрирована работоспособность используемого методического подхода для вероятностного сценария эволюции объекта. В целом, основные результаты выполненного анализа можно сформулировать следующим образом:

- выполнены расчеты скоростного поля течения подземных вод в условиях функционирования постоянно действующей скважины откачки и проанализировано изменение скоростного поля в этих условиях по сравнению со сценарием нормальной эволюции;
- проведены расчеты по переносу пассивного стабильного трассера в дальнем поле объекта и выполнен анализ и сравнение результатов расчетов пространственно-временного распределения трассера, являющегося консервативным количественным показателем загрязнения геологической среды, для условий рассмотренных сценариев эволюции объекта;
- продемонстрировано практически 2-х кратное увеличение загрязнения подземных вод в выбранном месте потенциального водозабора;
- определены коэффициенты чувствительности для всех точек контроля, позволяющие выполнять оценки уровней загрязнения точек контроля при вариации скорости откачки подземных вод.

**Благодарности.** Автор выражает свою искреннюю признательность зам. главного редактора "Вестника МГТУ" О.В. Мартыненко за колоссальную помощь в подготовке презентабельных изображений результатов исследований.

### Литература

AQUA3D Groundwater flow- and contaminant transport model (version 3.4). *Vatnaskil Consulting Engineers*, 86 p., 1998.

**Амосов П.В., Наумов А.В., Новожилова Н.В.** Радиогеоэкология: использование цифровой гидрогеологической модели размещения экологически безопасной площадки для подземного радиационно-опасного объекта. *Инженерная экология*, № 3, с.3-13, 2007.

Предварительная оценка безопасности: отчет по задаче 6 проекта ТАСИС R4.10/95 "Повышение безопасности обращения с радиоактивными отходами в северо-западном регионе России. Размещение радиоактивных отходов. Этап 2". *Горный институт КНЦ РАН (Россия), BELGATOM, SCK-CEN (Бельгия), Апатиты - Мол.*, 238 с., 2000.