

УДК 622.32 : 504

Эффект "проводящего" канала в пористой среде

П.В. Амосов^{1,2}, Н.В. Новожилова¹

¹ Горный институт КНЦ РАН

² Физико-энергетический факультет КФ ПетрГУ, кафедра теплофизики

Аннотация. Проведены численные эксперименты загрязнения подземных вод при выводе из эксплуатации горизонтальной горной выработки, оказавшейся незапечатанной. Исследовано пространственно-временное распределение загрязнения при постоянном гидравлическом градиенте, но при различных значениях коэффициента гидравлической проводимости в выработке. Показано, что с позиций охраны окружающей среды по завершению эксплуатации подземных горных выработок оставлять их в незапечатанном виде недопустимо.

Abstract. The numerical experiments of ground water contamination have carried out for horizontal mining working put out of operation and turned to be unsealed. Spatial-temporal contamination distribution has been studied under constant hydraulic gradient but under different coefficient of hydraulic conductivity in the mining working. It has been shown that from the environmental perspective it is not allowed to leave the mining workings unsealed after its closure.

Ключевые слова: горная выработка, численный эксперимент, коэффициент гидравлической проводимости, пространственное загрязнение

Key words: mine working, numerical experiment, hydraulic conductivity coefficient, spatial contamination

1. Введение

Для проведения компьютерных экспериментов примем, что имеет место распространение загрязнений из незапечатанной горизонтальной горной выработки. Такое событие возможно, например, в силу неверной оценки гидрогеологических условий или недостаточно эффективных защитных мероприятий (*Аварийные ситуации...*, 2011). Предположим, что по прошествии некоторого времени происходит восстановление природного режима потока подземных вод, в частности, затопление выработки и постепенный вынос техногенных загрязнений (например, нефтепродуктов) во вмещающий горный массив.

2. Концептуальная и математическая модели

При решении задачи по определению пространственно-временного распределения загрязнений во вмещающем массиве будем использовать методы численного моделирования. Имеем водонасыщенную пористую среду, в пространстве которой имеются искусственные "проводящие" каналы (вертикальная и горизонтальная горные выработки). Для конкретизации расчетов область моделирования принимается в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами 3000×380×180 м (рис. 1а) по осям X, Y и Z соответственно. Геометрические размеры выработок следующие: сечение 5×5 м, глубина залегания горизонтальной выработки 60 м от верхней границы модели, ее протяженность – 800 м. Схематично расположение выработок в массиве представлено на рис. 1а. На рис. 1б и 1в показаны сечения – вдоль оси Y (горизонтальное) и вдоль оси Z (вертикальное) соответственно. Выработки на рисунках отмечены темным цветом.

Математическая модель исследуемых процессов аналогична модели, используемой авторами в задачах оценки безопасности подземных радиационно опасных объектов (*Амосов и др.*, 2006; *Амосов, Новожилова*, 2008; *Мельников и др.*, 2010). В качестве "инструмента" исследования и выполнения численных расчетов использовался верифицированный программный продукт PORFLOW (*Runchal*, 1997).

На первом этапе до выхода на стационарный режим выполняется расчет пространственного распределения гидравлических напоров, что позволяет получить поле скорости, а на втором этапе определяется пространственно-временное распределение загрязнения. В задаче авторами рассматривался в качестве загрязнителя пассивный стабильный трассер. По этой причине используемое в математической модели уравнение переноса примеси, приведенное в работах (*Амосов и др.*, 2006; *Амосов, Новожилова*, 2008; *Мельников и др.*, 2010), упрощается.

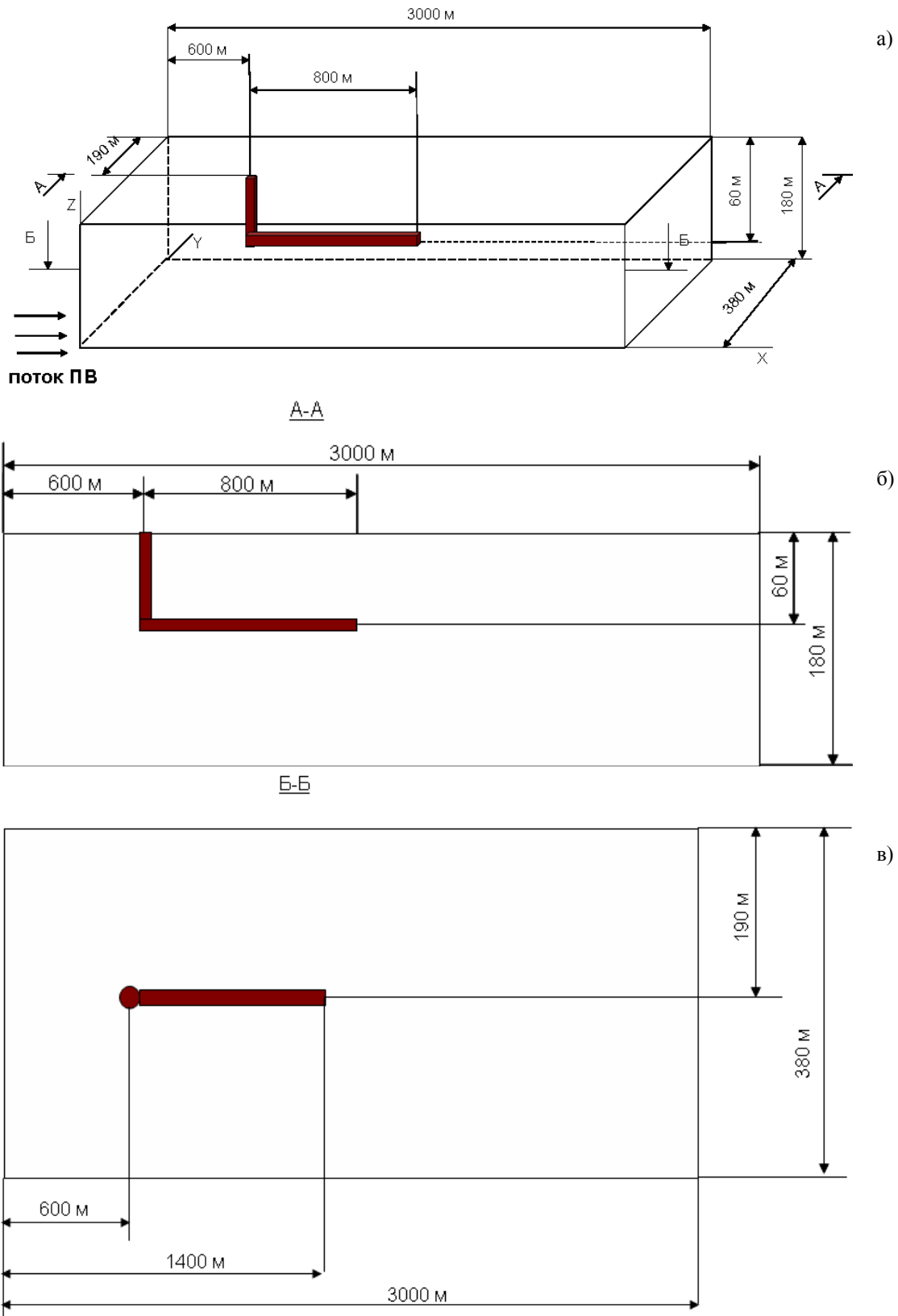


Рис. 1. Схематичное расположение модели и выработки (а), горизонтального (б) и вертикального (в) сечений, проходящих через выработки

Несколько слов относительно принятых исходных данных, оказывающих влияние как на структуру поля скорости, так и на процесс миграции трассера. Предполагается, что поток подземных вод (ПВ) движется параллельно горизонтальной выработке вдоль оси X под действием некоторого гидравлического градиента (например, 0,01 м/м). Коэффициент гидравлической проводимости и пористость вмещающего массива изменяется с глубиной и соответствует принятой в работе (Амосов и др., 2006) данным: от 10^{-7} до 10^{-8} м/с и от 0,02 до 0,005 соответственно. Заметим, что горизонтальная выработка располагается в области массива с коэффициентом гидравлической проводимости, равном 10^{-7} м/с.

Коэффициент гидравлической проводимости в выработках проварьирован в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-6} м/с. Вариация коэффициента гидравлической проводимости в выработках может быть оправдана тем, что, во-первых, эти подземные сооружения не имеют идеально гладкой поверхности стенок; во-вторых, в затопленных выработках могло остаться оборудование, которое использовалось при проведении горнопроходческих работ и которое будет препятствовать движению ПВ.

Предварительно был промоделирован также тривиальный вариант неповрежденного вмещающего массива.

3. Анализ результатов расчетов

Проанализировано два выходных параметра расчетов: поле скорости и пространственное распределение загрязнения по разным сечениям осей Z и Y. В частности, по оси Z были проанализированы 4 сечения из 21 (вертикальные сечения): 150; 80; 60 и 10 м от поверхности модели, которая выбрана на уровне "зеркала" грунтовых вод. По оси Y результаты расчетов анализировались для сечения (горизонтального), которое проходит непосредственно через выработку.

Для визуализации скоростных полей в указанных сечениях использовался программный код SURFER. Для построения скоростных полей был выбран метод интерполяции "Nearest Neighbor", тогда как для пространственного распределения загрязнений применялся метод "Kriging". Определенные аргументы в пользу выбора указанных методов интерполяции приведены в ранней работе авторов (Амосов и др., 2006), а также в публикации (Амосов, Новожилова, 2011). Выполненный авторами анализ по выбору методов интерполяции расчетных данных пространственного распределения загрязнения (Амосов, Новожилова, 2011) позволяет дополнительно рекомендовать к использованию следующие методы: "Triangulation with Linear Interpolation", "Radial Basis Function", "Radial Basis Function". В то же время, весьма нефизичные результаты отображения получаются при обращении к таким методам, как "Inverse Distance to a Power", "Polynomial Regression", "Moving Average".

Поле скорости

Исключительно с целью лаконичности изложения картину скоростного поля представим восьмью рисунками (из 16 подготовленных и проанализированных авторами). В частности, на рис. 2, а-г и 3, а-г изображены скоростные поля в вертикальном и горизонтальном сечениях, проходящих через выработки, для 4-х рассмотренных ситуаций.

Из рис. 2а видно, что скоростное поле потока ПВ в природном вмещающем массиве однородно (в сечении). При этом значение модуля скорости составляет 10^{-9} м/с. Рис. 3а отражает факт изменения значений коэффициентов гидравлической проводимости и пористости по глубине неповрежденного вмещающего массива. Эффект наличия "проводящего" горизонтального канала наиболее отчетливо проявляется на рис. 2, б-г и 3, б-г. Именно в месте расположения выработки наблюдаются максимальные значения вектора скорости в вертикальном сечении (горизонтальные компоненты являются доминирующими) и заметные вертикальные потоки по направлению к уровню грунтовых вод в горизонтальном сечении. При максимальном значении коэффициента гидравлической проводимости в канале (10^{-4} м/с) прогнозируются самые высокие скорости течения ПВ в горизонтальной выработке: на уровне $2,5 \cdot 10^{-6}$ м/с (рис. 2б и 3б). Кроме того, на этих же рисунках отчетливо видно проявление высоких проводящих свойств вертикальной выработки, выражающееся в существенном нарушении структуры поля скорости вблизи нее.

Постепенное уменьшение значения коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале (рис. 2, в-г и 3, в-г) приводит к "смягчению" эффекта проводящего канала, что вполне физично, поскольку происходит определенное выравнивание параметров модели, определяющих структуру потока ПВ. В результате, за исключением непосредственно области горизонтальной выработки, структура поля скорости стремится вернуться к однородности.

Пространственное распределение загрязнения

Пространственное распределение загрязнения анализировалось для двух моментов времени: 100 и 500 лет. На более продолжительные отрезки времени прогнозируются состояния загрязнения подземной гидросферы практически по всей площади моделирования. На рис. 4, а-в и 5, а-в приведены пространственные распределения в горизонтальном сечении загрязнения пассивного трассера для указанных моментов времени и с учетом вариации коэффициента гидравлической проводимости в канале.

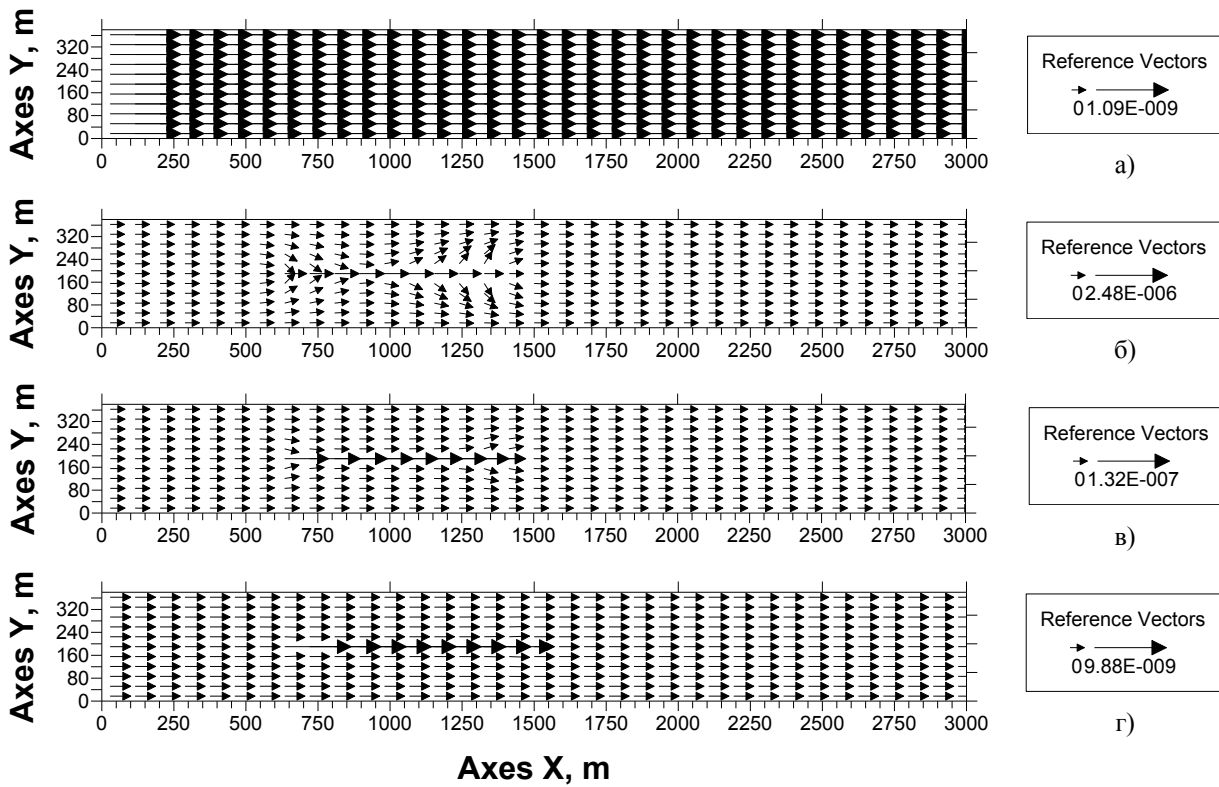


Рис. 2. Картина поля скорости в вертикальном сечении, проходящем через горизонтальную выработку, при вариации коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале:
а) 10^{-7} ; б) 10^{-4} ; в) 10^{-5} ; г) 10^{-6} м/с

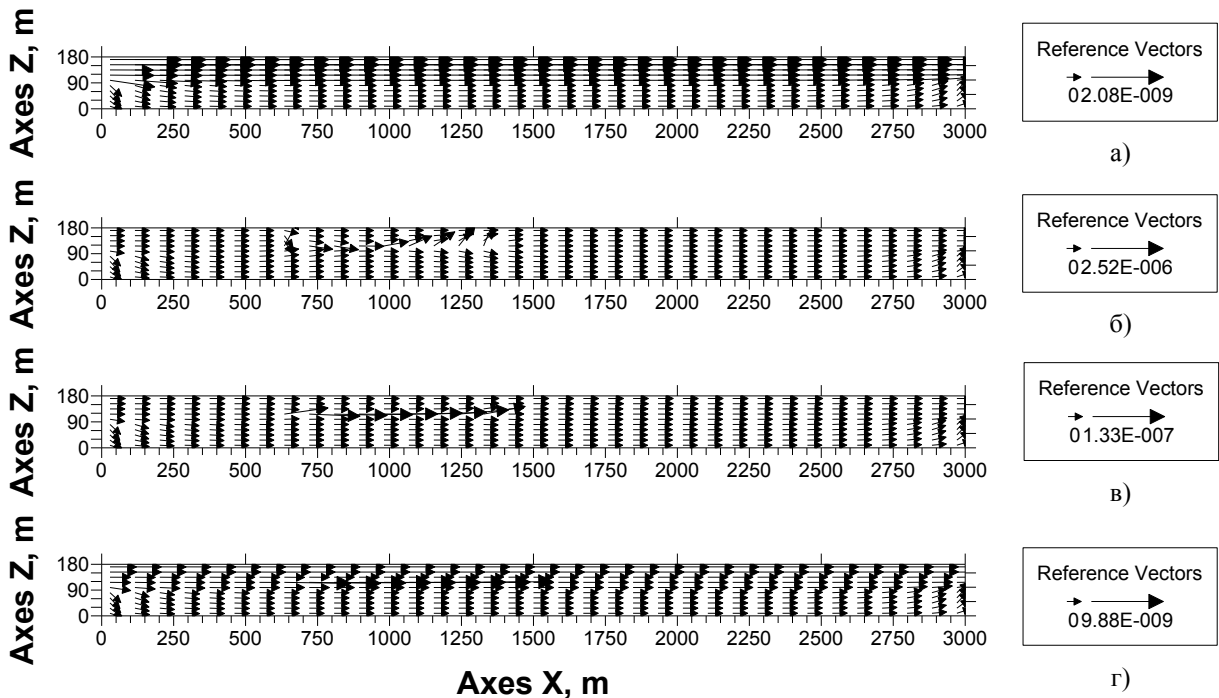


Рис. 3. Картина поля скорости в горизонтальном сечении, проходящем через горизонтальную выработку, при вариации коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале:
а) 10^{-7} ; б) 10^{-4} ; в) 10^{-5} ; г) 10^{-6} м/с

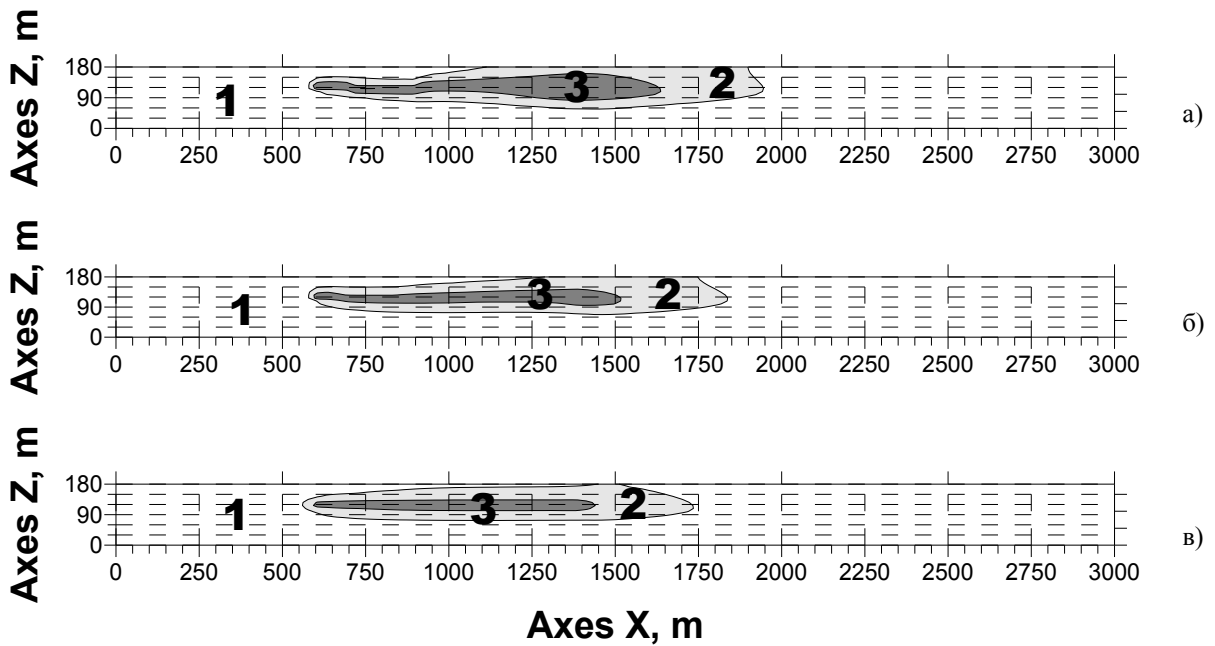


Рис. 4. Пространственное распределение трассера в горизонтальном сечении на 100 лет при вариации коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале:
 а) 10^{-4} ; б) 10^{-5} ; в) 10^{-6} м/с (1 – $C < 0,05$ отн. ед.; 2 – $0,05 < C < 0,5$ отн. ед.; 3 – $C > 0,5$ отн. ед.)

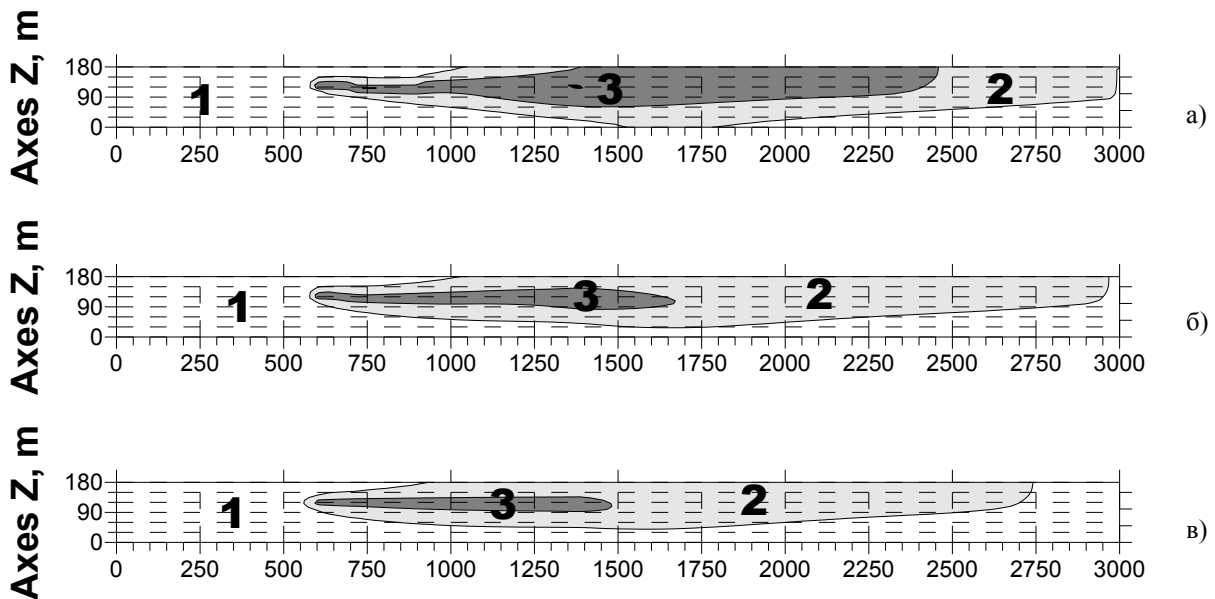


Рис. 5. Пространственное распределение трассера в горизонтальном сечении на 500 лет при вариации коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале:
 а) 10^{-4} ; б) 10^{-5} ; в) 10^{-6} м/с (1 – $C < 0,05$ отн. ед.; 2 – $0,05 < C < 0,5$ отн. ед.; 3 – $C > 0,5$ отн. ед.)

Поскольку при решении миграционной задачи в области канала поддерживалось постоянное значение концентрации примеси на уровне единицы (имитация модели предела растворимости), то рассчитанные значения концентрации можно рассматривать как загрязнение в относительных единицах (отн. ед.). Для анализа авторы выбрали два уровня изолиний: 0,05 отн. ед. и 0,5 отн. ед., т.е. снижения уровня загрязнения в 20 и 2 раза соответственно.

Приведем некоторые особенности загрязнения, обусловленные, в первую очередь, структурой потока ПВ при варьируемых значениях коэффициента гидравлической проводимости в "проводящем" канале:

– менее чем за 100 лет загрязнение 0,05 отн. ед. достигает уровня грунтовых вод независимо от величины коэффициента гидравлической проводимости канала;

– более быстро такой вертикальный подъем загрязнения прогнозируется для условия по коэффициенту гидравлической проводимости в канале равному 10^{-4} м/с, что, в принципе, уже можно было ожидать по предсказанному полю скорости (рис. 3б);

– примерно через 500 лет загрязнение 0,05 отн. ед. достигает правой границы области моделирования при величине коэффициента гидравлической проводимости в канале 10^{-4} и 10^{-5} м/с;

– загрязнение, соответствующее половине концентрации в области источника, не поднимается до уровня грунтовых вод при минимальном и среднем значениях коэффициента гидравлической проводимости в канале. В то же время, для максимального коэффициента гидравлической проводимости загрязнение выше 0,5 отн. ед. простирается по уровню грунтовых вод на весьма существенные расстояния.

Дополнительно в подтверждение к приведенным особенностям в таблице представлены примерные координаты границ распределения загрязнения вдоль оси X на уровне 0,05 и 0,5 отн. ед. в рассматриваемом горизонтальном сечении на указанные выше моменты времени. При указанных геометрических размерах горизонтальной выработки (рис. 1а) не составляет труда выполнить оценку расстояний, прошедших трассером на указанном уровне вниз по потоку.

Таблица. Координаты границ пространственного распределения загрязнения вдоль оси X в горизонтальном сечении, м (уровень изолиний 0,05/0,5 отн. ед.)

Время, лет	Коэффициент фильтрации, м/с		
	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
100	1950/1640	1840/1510	1740/1450
500	3000/2470	2970/1660	2749/1490

4. Заключение

Результаты проведенного анализа показывают: с позиций охраны окружающей среды недопустимо по завершению эксплуатации подземных горных выработок оставлять их в незапечатанном виде.

Представляется, что требуется выполнить ряд инженерных мероприятий (запечатывание, полное или частичное; сооружение бетонных "пробок") по переводу водопроводящих свойств материала-заполнителя выработок (например, коэффициент гидравлической проводимости) в состояние, максимально близкое к параметрам окружающего массива.

При существенных различиях в значениях коэффициента гидравлической проводимости выработки и вмещающего массива прогнозируются быстрые по времени и масштабные в пространстве загрязнения подземных вод.

Литература

Runchal A. PORFLOW a software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media. *User's manual (version 3.07)*, 326 p., 1997.

Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Ч. 2. URL: <http://www.allofremont.com.podzemnoeprostranstva/49.html>, 2011.

Амосов П.В., Наумов А.В., Новожилова Н.В. Минимизация радиационного воздействия на население при подземном захоронении не подлежащего переработке отработавшего ядерного топлива в кристаллических породах Кольского полуострова (2 этап). *Вестник МГТУ*, т. 9, № 3, с.403-407, 2006.

Амосов П.В., Новожилова Н.В. О выборе метода интерполяции для анализа расчетных и экспериментальных данных. *Тез. докл. на XIV межрегион. науч.-практ. конф., 7-8 апр. 2011 г., Апатиты, КФ ПетрГУ*, ч. 1, с.16-17, 2011.

Амосов П.В., Новожилова Н.В. Радиогеоэкология: моделирование эволюции подземного объекта долговременного хранилища радиационно опасных материалов (связанного с наличием конвективного потока подземных вод через инженерные барьеры). *Инженерная экология*, № 2, с.28-42, 2008.

Мельников Н.Н., Амосов П.В., Новожилова Н.В. Геоэкология: загрязнение подземной гидросферы в зависимости от ориентации и размера модуля с радиационно опасными материалами. *Инженерная экология*, № 4, с.26-38, 2010.