

УДК 556.3

В.Н. Самарцев¹

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЛАТЕРАЛЬНОМ ПОТОКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рассмотрена проблема оценки загрязнения водозабора подземных вод. Источник загрязнения известен, но прогноз поступления загрязнителя к водозаборным скважинам осложнен из-за высокой антропогенной нагрузки на участок водозабора. При прогнозировании использовалось моделирование миграции на сеточных конечно-разностных моделях. Приводится оценка влияния учета неоднородности водоносного горизонта при создании модели на результаты моделирования.

Ключевые слова: гидрогеология, математическое моделирование, загрязнение подземных вод, пакет Modflow, водозабор.

Problem of estimation of groundwater intake pollution is considered. Source of contamination is known, but forecast of migration of pollutant is complicated due to high groundwater usage in area. Forecast was conducted with mathematical modelling of pollutant migration on finite-difference models. In this paper evaluation of influence of heterogeneity given into consideration for different model meshes and ways of implementation of wells is presented.

Key words: hydrogeology, modeling, groundwater contamination, modflow, water intake.

Введение. Моделирование преимущественно латеральной миграции загрязнения на расстояние, существенно превышающее мощность пласта, в котором происходит миграция, обычно производится при помощи плановых моделей. В.М. Шестаков [Шестаков, 1995], используя обобщенную предпосылку Дюпюи, показал, что в плановом потоке с инфильтрационным питанием наличие вертикальной фильтрации приводит к деформации сетки движения по вертикали, особенно при изменении коэффициента фильтрации по мощности пласта. Цель работы — оценка влияния вертикальной неоднородности на результаты моделирования миграции загрязнителя в латеральном безнапорном потоке подземных вод. Исследование проводилось для модели геофильтрации и геомиграции сорбируемого загрязнителя к водозабору подземных вод в безнапорном потоке, в скважинах которого обнаружен этот загрязнитель. Источником загрязнения служат заводские поля фильтрации, расположенные на расстоянии 4–5 км от водозабора. Загрязнитель — некаль, поверхностно-активное вещество, использовавшееся в производстве. Для прогнозирования дальнейшего поступления некаля к водозабору и составления рекомендаций по его защите созданы и откалиброваны модели геофильтрации и миграции некаля. Использовались конечно-разностные модели на прямоугольных сетках (MODFLOW [Harbaugh et al., 2000] и MT3DMS [Zheng et al., 1999]). Полученные в модельных экспериментах результаты соответствовали наблюдаемой истории

распространения некаля только на качественном уровне. Для анализа возможных причин отличия фактических и модельных концентраций построена детальная модель вертикальной неоднородности пласта.

Моделирование миграции некаля. Рассматриваемый водозабор расположен в 5–6 км от берега водохранилища и представляет собой два трехкилометровых ряда скважин, расстояние между рядами 500 м. На участке водозабора эксплуатируется только безнапорный водоносный горизонт. Он приурочен к аллювиальным отложениям, преимущественно к пескам неогенового и четвертичного возраста, мощность которых изменяется от 40 до 60 м. Этот водоносный горизонт подстилается слабопроницаемыми девонскими отложениями. Пески неогенового возраста в целом имеют большую проницаемость, чем четвертичные. В районе рассматриваемого водозабора грунтовый водоносный горизонт эксплуатировался в разное время 9 разными водозаборами. Этим обусловлена сложная история распространения загрязнения, что требует применения математического моделирования.

В первую очередь была построена и откалибрована геофильтрационная модель. Для калибровки использованы многолетние замеры уровня подземных вод в 53 скважинах. Большой объем данных режимных наблюдений позволяет заключить, что после калибровки геофильтрационная модель воспроизводит существующие условия. Следующим

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, вед. инженер; e-mail: vnsamartsev@gmail.com

шагом было создание на ее основе геомиграционной модели. На геомиграционной модели получено, что за счет сброса загрязненных вод на поля фильтрации завода с 1949 г. в течение 18 лет в районе между водохранилищем и водозабором сформировалась устойчивая область загрязнения подземных вод некалем, существующая до настоящего времени.

Согласно результатам эпигнозного моделирования миграции, область загрязнения достигла зоны захвата потока подземных вод водозабором со стороны водохранилища. В последние 10–15 лет сформировалась узкая полоса загрязненных вод, мигрирующая в сторону водозабора (рис. 1), которая в 2004 г. достигла центральной части первого ряда скважин водозабора. В связи с этим одна наиболее загрязненная скважина с 2008 г. не эксплуатируется. Прогнозное моделирование работы водозабора после 2008 г. показало, что при сохранении конфигурации водозабора область загрязнения локализуется в центральной части ряда скважин, и за прогнозный период не произошло ее значительного расширения.

При этом прогнозная концентрация некаля в загрязненных скважинах составляет около 2–5 мг/л. Однако уже в середине 2009 г. в одной из водозаборных скважин концентрация некаля достигла 9,6 мг/л, что существенно выше модельных значений.

Вертикальная неоднородность. Предполагается, что наблюдаемое расхождение значений модельной и наблюдаемой в водозаборных скважинах концентрации некаля обусловлено упрощенной вертикальной схематизацией, используемой в модели. Для усовершенствования модели были использованы данные разведки другого месторождения подземных вод. Участок, данные разведки которого использованы, расположен примерно в 20 км от водозабора и имеет такое же геологическое строение. Его разведка проводилась в 1976–1981 гг. Из разведочных скважин с интервалом от 1 до 5 м отобраны пробы пород для гранулометрического анализа и определения коэффициента фильтрации. Такие детальные исследования вблизи действующего водозабора больше не проводились.

Задать вертикальную неоднородность можно на основании как данных о гранулометрическом составе пород горизонта, так и прямых замеров коэффициента фильтрации. Для расчета значений коэффициента

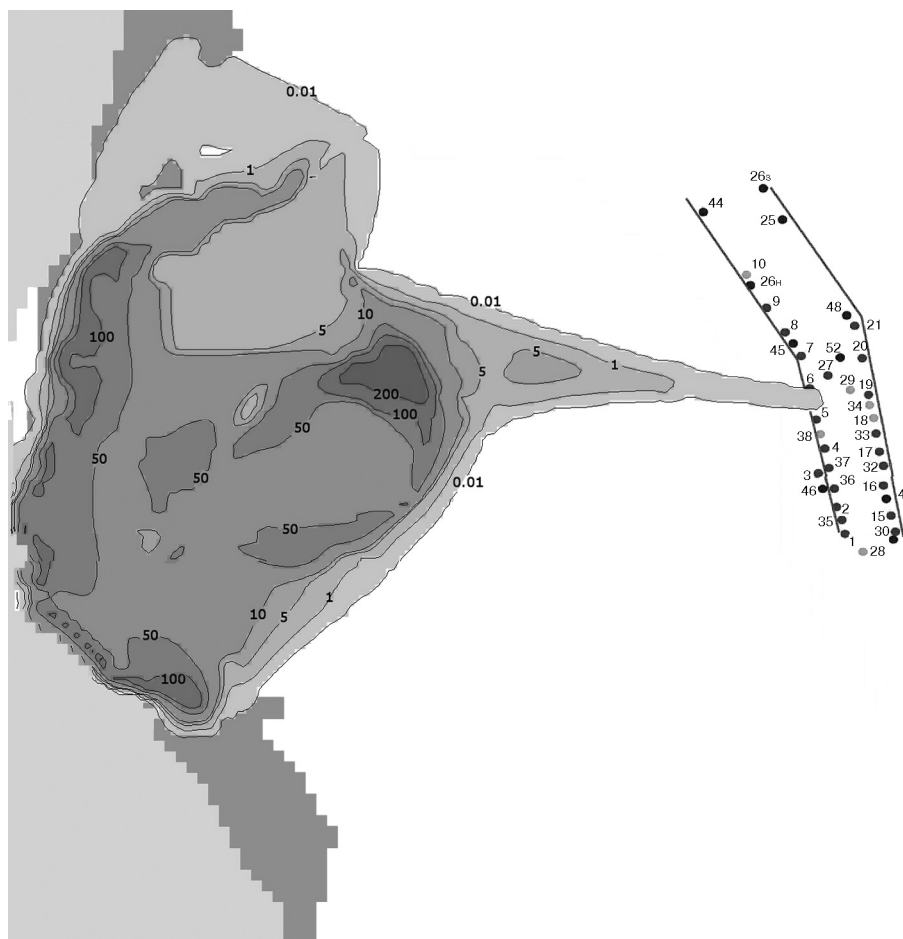


Рис. 1. Схема области загрязнения на настоящий момент и область детальной модели, использованная для оценки влияния неоднородности. Изолинии соответствуют равным концентрациям некаля в мг/л

фильтрации по данным гранулометрического состава использованы широко известные эмпирические зависимости. При сравнении значений коэффициента фильтрации, полученных непосредственным опробованием и рассчитанных по эмпирическим зависимостям, статистически значимую связь выявить не удалось. Значения коэффициента линейной корреляции составляют 0,32–0,46. Линейная зависимость коэффициента фильтрации от глубины отбора от кровли горизонта слабая. Оснований для поиска какой-либо более сложной зависимости нет. Следовательно, с разными исходными данными получатся разные схемы неоднородности. Расчетные значения коэффициента фильтрации не позволяют выявить какую-либо связь проницаемости с глубиной. В то же время результаты лабораторного определения коэффициента фильтрации показывают увеличение проницаемости с глубиной, что соответствует геологическим представлениям о формировании исследуемого горизонта.

Несмотря на то что на эквивалентных интервалах измеренные значения коэффициента фильтрации, полученные для разных скважин, могут различаться на порядок, все же выявлено увеличение с глубиной среднего значения коэффициента фильтрации. По-

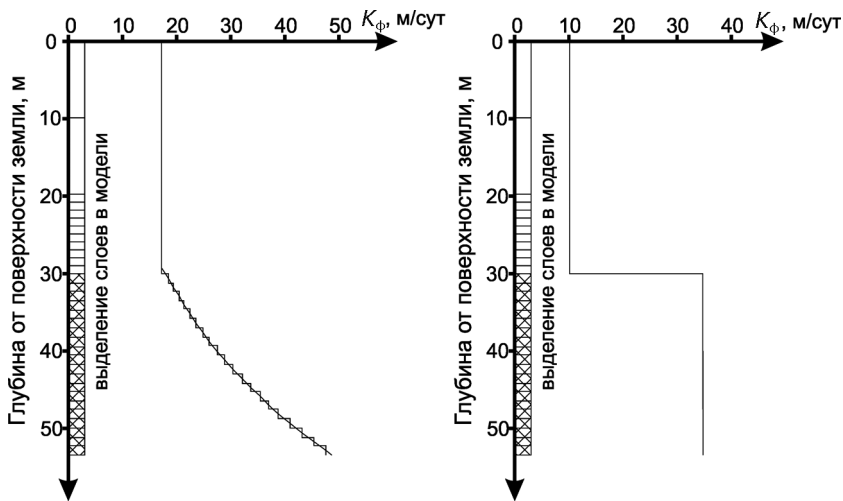


Рис. 2. Два варианта задания вертикальной неоднородности в модели. Штриховкой показаны слои модели, в которых задан фильтр скважины

этому для дальнейших исследований миграции фильтрационная неоднородность смоделирована путем плавного увеличения коэффициента фильтрации с глубиной. Величины коэффициента фильтрации для всего водоносного горизонта скорректированы таким образом, чтобы его проводимость составила 1200 м/сут, поскольку лабораторные испытания показывают заниженные значения коэффициента фильтрации. Указанная величина проводимости подтверждается данными одиночных откачек и геофильтрационным моделированием.

Зависимость коэффициента фильтрации от глубины заложена в существующую модель, для чего выбрана более детальная вертикальная разбивка. На исходной модели водоносный горизонт был разделен на два модельных слоя, соответствующих четвертичным и неогеновым отложениям, мощностью 20–35 м каждый. В детализированной модели водонасыщенная часть водоносного горизонта описывается 30 слоями. Разбивка выбрана так, чтобы мощность каждого расчетного слоя в области из-



Рис. 3. Изменение концентрации некаля в водозаборной скважине для разных вариантов модели: 1 — наблюдения в скважине; 2 — двухзонная неоднородность; 3 — с учетом вертикальной неоднородности; 4 — с учетом вертикальной неоднородности и с использованием MNW

менения коэффициента фильтрации составляла примерно 1 м. Таким образом, для детальной модели имеются два распределения коэффициента фильтрации по разрезу — исходное, представляющее собой два крупных однородных слоя с разной проницаемостью, и уточненное, с увеличением коэффициента фильтрации от 17 до 48 м/сут от верхней к нижней части разреза по 30 слоям (рис. 2). Для снижения вычислительной нагрузки влияние неоднородности рассматривалось на модели меньшей по площади, чем исходная (рис. 1). На границах детальной модели задано граничное условие I рода, переменное во времени. Значения уровней на границах перенесены из основной модели. В левой части модели задана начальная концентрация некаля, соответ-

ствующая состоянию вторичного очага загрязнения на 1995 г. На левой границе задана переменная во времени концентрация некаля, значения которой также перенесены из основной модели. Переход от основной модели к меньшей по площади позволил увеличить детальность модельной сетки как в разрезе, так и в плане без значительного увеличения времени, необходимого на запуск модели.

Моделирование скважин. Возможно, на результат повлияет учет влияния конструкции водозаборных скважин на деформацию траекторий движения некаля по вертикали. Фильтры водозаборных скважин расположены в нижней части водоносного горизонта, в которой выделена геофильтрационная неоднородность (рис. 2). В программе Modflow можно применять пакет Multi-Node Well (MNW-package) [Halford, Hanson, 2002] вместо стандартного пакета Wells. Пакет Wells позволяет напрямую задать расход водоотбора из каждого отдельно взятого блока модели, который вскрывает скважина. В данной модели водоотбор задан одинаковым для каждого

блока скважины, поскольку мощность слоев модели в интервале глубины фильтров примерно одинаковая. Пакет MNW позволяет задать цепочку блоков модели, в которых расположена скважина, указать параметры скважины (величина скин-эффекта, диаметр скважины, положение насоса и т.д.) и дебит скважины в целом. Отбор воды из каждого блока модели рассчитывается на основе решения уравнения баланса воды в стволе скважины. При этом рассчитывается распределение напора вдоль ствола и поток по стволу. Предположительно использование пакета MNW лучше отражает реальную ситуацию распределения скорости фильтрации по вертикали в районе скважины. Это может дать более точный прогноз массового от-

бора некая за счет повышенной точности учета пропорций смешения воды, поступающей в скважину на разных участках фильтра. Таким образом, добавляется третий вариант модели — с детальной вертикальной неоднородностью и использованием пакета MNW вместо пакета Wells.

Результаты исследований. Сравнение решений для всех трех вариантов модели приведено на рис. 3. Модель, в которую заложена детальная вертикальная фильтрационная неоднородность, дает концентрацию загрязнителя, более близкую к наблюдаемой, чем модель с двумя крупными зонами. Таким образом, лучшее воспроизведение геологического строения пласта

по вертикали на модели позволило получить значения концентрации, которые ближе к наблюдаемым.

Использование пакета MNW дает результаты, практически не отличающиеся от таковых при использовании стандартного пакета Wells при прочих равных условиях. По-видимому, в данном случае распределение водоотбора скважиной в разрезе не сказывается на конфигурации воронки депрессии и различие в значениях концентрации при смешении недостаточно значительно. Следовательно, не выявлены преимущества применения пакета MNW вместо Wells для решения подобных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 368 с.

Halford K.J., Hanson R.T. User guide for the drawdown-limited, multi-node well (MNW) package for the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000 // U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 02-293. 2002. 33 p.

Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model — User guide to modularization concepts and the ground-water flow process // U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 00-92. 2000. 121 p.

Odong J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis // J. of Amer. Sci. 2007. Vol. 3, N 3.

Zheng Chunmiao, Wang P. Patrick. MT3DMS, a modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide // U.S. Army Engineer Res. and Development Center Contract Rep. SERDP-99-1. Vicksburg, 1999. 202 p.

Поступила в редакцию
13.03.2012