

Мошин В.Е., Филимонова Е.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, г. Москва, moshin_v@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА БАЛАНСОВУЮ СТРУКТУРУ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА СИМФЕРОПОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. Исследуется пространственная геофильтрационная неоднородность готерив-барремского водоносного горизонта Симферопольского месторождения подземных вод и анализируется ее влияние на прогноз эксплуатации проектируемого водозаборного участка. С использованием метода последовательного условного индикаторного моделирования по трем категориям выделенных отложений: «хорошо»-, «средне»- и «плохо»-проницаемых, построены десять равновероятных моделей геологического пространства. Результаты каждой геостатистической модели использованы для создания серии геофильтрационных моделей, которые были откалиброваны по коэффициенту фильтрации. На каждой модели выполнен прогноз эксплуатации водозабора. Выявлено, что пространственная геофильтрационная неоднородность оказывает влияние на прогнозные понижения и балансовую структуру запасов подземных вод.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации; геофильтрационное моделирование; геостатистическое моделирование; геофильтрационная неоднородность.

Возникновение серии маловодных лет представляет собой критическую проблему для территорий, где основное питьевое и хозяйственно-бытовое водоснабжение населения происходит из поверхностных источников. В период 2019–2020 гг. на территории п-ова Крым наблюдалось существенное сокращение годовых величин осадков, которое составило 81 и 73% от среднемноголетних значений, соответственно. Это привело к резкому снижению уровня воды в водохранилищах, являющихся основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения крупных городов Республики Крым, а, следовательно, и к значительному снижению объемов подачи воды населению, что привело к необходимости поиска дополнительных альтернативных источников водоснабжения. Решением данной проблемы являлась переоценка запасов участка Симферопольского месторождения подземных вод, с последующим вводом в эксплуатацию водозаборного участка вблизи г. Симферополь. При этом, расчеты производительности водозаборных сооружений в зависимости от используемого метода расчета, особенностей гидрогеологических условий оцениваемого участка и степени их упрощения в расчетах не всегда учитывают балансовую структуру эксплуатационных запасов подземных вод, а достоверность положенных в основу гидрогеологических прогнозов исходных данных и самих прогнозов может быть проверена только по опыту эксплуатации [1]. Таким образом, в зависимости от принятой вычислительной и геофильтрационной схематизации, от степени их упрощенности, существенно меняется и прогноз работы водозаборного участка, что можно наблюдать по

истории оцененных ранее запасов подземных вод на исследуемом участке Симферопольского месторождения.

Степень упрощенности, в свою очередь, зависит от количества и качества полевых работ, их последующей интерпретации. В гидрогеологических исследованиях наиболее важными являются опытно-фильтрационные работы, при интерпретации которых в сложных гидрогеологических условиях используют допущение об однородности целевого водоносного горизонта. При обработке кустовых откачек по аналитическим зависимостям в наблюдательных скважинах получаются различные значения кажущейся проводимости, т.е. проводимости, полученной с использованием аналитической модели однородного изолированного пласта, при фактических условиях пространственной неоднородности фильтрационных параметров. При использовании моделирования для обработки данных таких откачек путем создания плановой геофильтрационной модели часто используется неоднородность проводимости, заданной зонами [3], при том, что фильтрационная неоднородность может быть трехмерной [2].

Исследуется участок Симферопольского месторождения подземных вод, целевой готерив-барремский водоносный горизонт которого характеризуется резко изменяющейся мощностью и фильтрационными свойствами:

- водоносный горизонт приурочен к сложно построенной, незакономерно переслаивающейся толще терригенных образований с весьма неоднородным литологическим составом и фациальной изменчивостью слагающих пород на близких расстояниях. Всего на территории Симферопольского месторождения подземных вод выделяется более 12 литологических разностей, а на исследуемом участке площадью порядка 2 км² вскрыты следующие породы целевого водоносного горизонта: аргиллиты, алевролиты, песчаники, пески глинистые, пески, глины, конгломераты;

- фильтрационные свойства водовмещающих пород меняются на близких расстояниях по разрезу и площади, в то же время резко уменьшаясь при удалении от участка водозабора.

Целью данной работы является анализ влияния пространственной геофильтрационной неоднородности целевого водоносного горизонта на балансовую структуру эксплуатационных запасов участка Симферопольского месторождения.

Для выполнения поставленной цели были поставлены следующие задачи (рис. 1):

- 1) подготовка данных: сбор и анализ фондовых данных, проведение литолого-фациального анализа, подготовка концептуальной модели;
- 2) описание методики геостатистического моделирования и геофильтрационного моделирования с учетом пространственной геофильтрационной неоднородности;
- 3) обработка результатов численных экспериментов.



Рис. 1. Блок-схема проведенного исследования

Геостатистические инструменты, такие как вариограммные модели и имитационное моделирование, позволяют количественно оценивать и моделировать геологическую неоднородность в среде [4]. Геостатистическое моделирование литологических фаций, например, для нефтяных месторождений является широко используемой практикой [4], однако в гидрогеологических работах оно используется значительно реже, в т.ч. в работах по оценке запасов подземных вод практически не применяется.

На первом этапе исследования основной задачей являлось проведение литолого-фациальный анализа отложений по данным буровых журналов, паспортов и геофизических исследований в скважинах [2].

Литологический разрез каждой скважины, вскрывающей готерив-барремский водоносный горизонт на территории Симферопольского месторождения, был разделен на блоки с вертикальной дискретизацией в 1 м с дальнейшим распределением на три основные фациальные группы. Отнесение того или иного типа отложений к одной из фациальных групп основано на экспертной оценке фильтрационных свойств, типичных для данной породы по справочным данным [1]. Так, в группу «хорошо»-проницаемых были включены следующие отложения: галька и гравий; песок крупнозернистый; песчаник; известняк. В «средне»-проницаемые: мелко-среднезернистый песок; тонкозернистый песок; глинистый песок; гравелит; конгломерат. В «плохо»-проницаемые: песчаник глинистый; аргиллит; алевролит; глина. Процентное распределение фациальных групп следующее: «хорошо»-проницаемых – 45%, «средне»-проницаемых – 32%, а «плохо»-проницаемых – 23%. Так, целевой водоносный горизонт характеризуется преимущественно «хорошо»-

проницаемыми отложениями, расположенными в основном на территории междуречья рек Бештерек и Зуя.

Для геостатистического моделирования используется программное обеспечение SGeMS и алгоритм последовательного условного индикаторного моделирования (SISIM) [5]. В рассматриваемом методе данные преобразуются в индикаторные переменные, на этапе вариограммного анализа подбираются индикаторные вариограммы, зависящие в общем случае от расстояния и от направления, а затем проводится условное индикаторное моделирование 3D-распределения выделенных фаций. Таким образом, можно получить заданное количество равновероятных реализаций геологического пространства, которые обусловлены имеющимися фактическими данными.

На первом этапе стохастического моделирования была подобрана экспериментальная вариограммная модель для каждой из трех фациальных групп. Вариограммы рассматривались в трех ортогональных направлениях. Всего было реализовано десять равновероятных моделей распределения категорий фаций в пространстве. Коэффициент фильтрации каждой категории фаций был задан константой, рассчитанной по фактическим опытным данным. Используя мощности каждой категории фаций, а также значение проводимости по трем эксплуатационным скважинам с наибольшим количеством опытно-фильтрационных работ, включающих кустовые и групповую откачки, были приняты следующие коэффициенты фильтрации: для «хорошо»-проницаемых – 1,4 м/сут, для «средне»-проницаемых – 0,1 м/сут, для «плохо»-проницаемых – 0,01 м/сут [2].

Для выполнения гидродинамических расчетов разработана численная геофильтрационная модель в программе Modflow 6 с использованием интерфейса ModelMuse 5 разработки Американской геологической службы (USGS). Полуавтоматическая калибровка проводилась с помощью пакета PEST.

Для прогнозного моделирования работы водозаборного участка были разработаны две серии геофильтрационных моделей: обобщенные и детальные. Детальные предназначены непосредственно для прогноза работы водозабора, а количество слоев, на которые разбит целевой водоносный горизонт, в них совпадает с геостатистическими моделями. Обобщенная геофильтрационная модель отличается от детальной лишь количеством слоев в готерив-барремском водоносном горизонте, сократившихся в пять раз. Введение в данную работу обобщенных моделей обусловлено необходимостью оптимизации процесса калибровки геофильтрационных моделей, параметры которых будут скорректированы для наилучшего соответствия наблюдаемым данным при сохранении физической реалистичности и минимизации ошибок, данный подход широко распространен в мировой практике [3].

На рис. 2 приведены результаты калибровки обобщенных геофильтрационных моделей по наблюдениям за уровнем подземных вод в ходе групповой опытно-эксплуатационной откачки, общей длительностью более

месяца. Показано сравнение фактических и модельных уровней целевого водоносного горизонта, которое проводится по данным групповой опытно-эксплуатационной откачки с временной дискретизацией в 26 стресс-периодов (см. рис. 2). В связи с тем, что в ходе опыта возникала частая остановка скважин по техническим причинам, сравнение проводится по двум рядам наиболее достоверных наблюдений: уровень в наблюдательной скважине, и уровень в эксплуатационной скважине, которая работала без остановок в течение всего опыта. Для каждой из десяти обобщенных геофильтрационных моделей были получены свои наборы коэффициентов фильтрации K , м/сут, для трех групп пород «хорошо»-проницаемых ($0,63 < K_1 < 12,6$), «средне»-проницаемых ($0,01 < K_2 < 2,42$) и «плохо»-проницаемых отложений ($0,00003 < K_3 < 0,0173$).

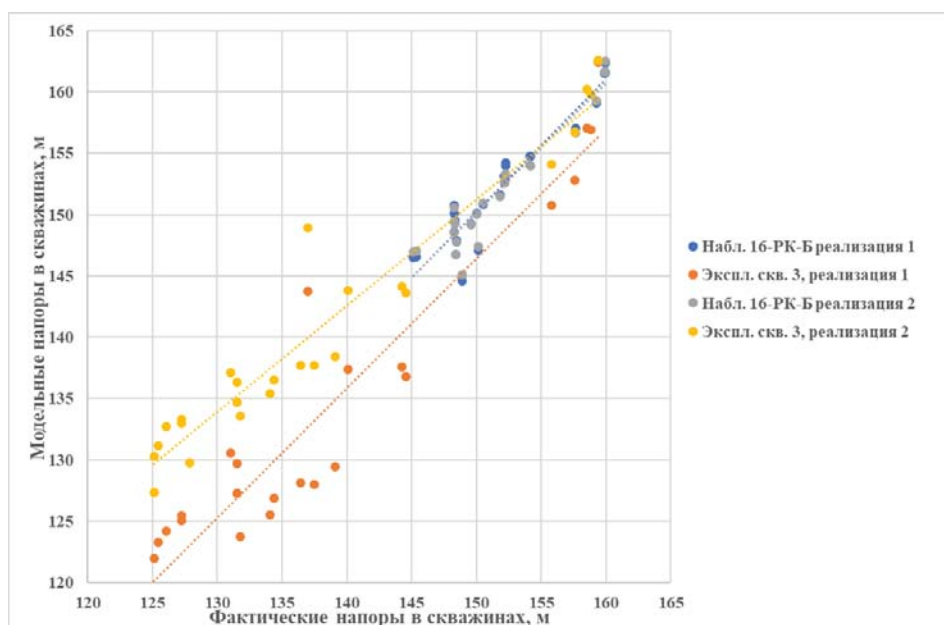


Рис. 2. Результаты калибровки обобщенных геофильтрационных моделей

Результат работы водозаборного участка на конец периода эксплуатации в 25 лет в виде осредненной по десяти реализациям карты прогнозных понижений представлен на рис. 3.

Как показало исследование [2], допущение об однородности целевого водоносного горизонта в условиях его существенной литологической неоднородности может привести к значительному разбросу прогнозного понижения. Помимо этого, нельзя утверждать и о единственном варианте распределения пород в пространстве, по имеющемуся набору данных по скважинам, а, следовательно, и о единственном значении коэффициента фильтрации для каждой группы отложений, при котором понижения соответствовали бы фактическим. Различия в параметрах, в свою очередь, влияют и на балансовую структуру эксплуатационных запасов рассматриваемого

участка месторождения: от проводимости слоя зависит характер распространения воронки депрессии, при котором может изменяться перетекание из выше- или нижележащих отложений, возникать дополнительный приток из рек в местах выхода целевого водоносного горизонта на поверхность и т.д., т.е. это напрямую влияет на характер взаимодействия с граничными условиями.

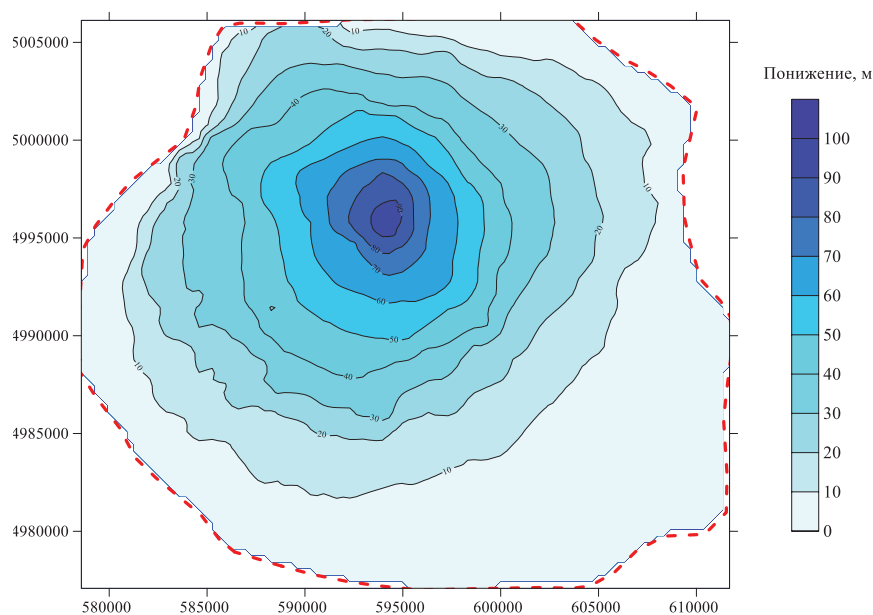


Рис. 3. Осредненная по десяти реализациям карта прогнозных понижений в целевом водоносном горизонте в ходе работы водозаборного участка на период эксплуатации – 25 лет

В ходе исследования применена методика геофильтрационного моделирования с использованием стохастических моделей, учитывающего пространственную неоднородность отложений. Десять равновероятностных моделей распределения «хорошо»-, «средне»- и «плохо»-проницаемых отложений были использованы для создания двух групп геофильтрационных моделей: обобщенных и детальных, которые отличались дискретизацией мощности целевого водоносного горизонта и были использованы на стадии калибровки и стадии прогнозного моделирования, соответственно. В результате калибровки были получены значения коэффициентов фильтрации для каждой группы: «хорошо»-, «средне»- и «плохо»-проницаемых отложений. В результате прогнозного моделирования работы проектного водозабора на конец периода эксплуатации длительностью 25 лет были получены различные варианты распространения депрессионных воронок, обоснованные геофильтрационной неоднородностью. Соответственно, для каждой реализации было получено свое распределение составляющих эксплуатационных запасов, где среднее значение естественных ресурсов составило 67%, изменяясь от 48 до 82%, среднее значение привлечения питания из рек в юго-восточной части месторождения составил 9%,

изменяясь от 4 до 13%, среднее значение естественных запасов и перетекание из вышележащих отложений составили суммарно 24%, изменяясь от 9 до 46%.

Список литературы

1. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод, 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща школа, 1989. 407 с.
2. Мошин В.Е., Филимонова Е.А., Поздняков С.П. Геостатистическое моделирование для оценки фильтрационной неоднородности // Материалы Восемнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2023. С. 213–219.
3. Hill M.C., Tiedeman C.R. Effective groundwater model calibration. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2007. 472 p.
4. Naranjo-Fernández N., Guardiola-Albert C., Montero-González E. Applying 3D geostatistical simulation to improve the groundwater management modelling of sedimentary aquifers: the case of Doñana (Southwest Spain) // Water. 2019. Vol. 11. No. 1. ID 36. <https://doi.org/10.3390/w11010039>.
5. Remy N., Boucher A., Wu J. Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 285 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139150019>.

V.E. Moshin, E.A. Filimonova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, moshin_v@mail.ru

INFLUENCE OF FILTRATION HETEROGENEITY ON THE BALANCE STRUCTURE OF GROUNDWATER RESERVES: A CASE OF THE SIMFEROPOL DEPOSIT SITE

Abstract. The spatial geofiltration heterogeneity of the Hauterivian-Barremian aquifer of the Simferopol groundwater deposit is investigated and its impact on the forecast of operation of the designed water intake site is analyzed. Using the method of sequential conditional indicator modeling for three categories of identified deposits: “good”, “medium”, and “poor” permeability, ten equally probable models of geological space are constructed. The results of each geostatistical model were used to create a series of geofiltration models that were calibrated by the hydraulic conductivity. Each model was used to forecast the operation of the water intake. It was found that spatial geofiltration heterogeneity affects the predicted depressions and the balance structure of groundwater reserves.

Key words: hydraulic conductivity; groundwater model; geostatistical simulation; heterogeneity of groundwater flow parameters.