

ОПЫТ КАЛИБРОВКИ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БЕРЕГОВОГО ВОДОЗАБОРА ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

A CALIBRATION EXPERIENCE OF A GROUNDWATER MODEL OF A SHORE WATER INTAKE BY THE JOINT USE OF PUMPING TEST DATA AND PRODUCTION MONITORING RESULTS



САМАРЦЕВ В.Н.

Ведущий инженер кафедры гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, vnsamartsev@gmail.com

SAMARTSEV V.N.

Leading engineer of the Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, vnsamartsev@gmail.com

ПОЗДНЯКОВ С.П.

Заведующий кафедрой гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, sppozd@gmail.com

POZDNIKOV S.P.

Head of the Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), professor, Moscow, sppozd@gmail.com

Ключевые слова:

подземные воды; геофильтрационное моделирование; неоднородность; автоматическая калибровка моделей.

Key words:

ground water; groundwater modeling; heterogeneity; automatic model calibration.

Аннотация

Калибровка геофильтрационной модели является важным этапом решения гидрогеологических задач с помощью моделирования. Она проводится как вручную, так и автоматически с использованием специального программного обеспечения. В статье на примере модели берегового водозабора демонстрируется методика калибровки, позволяющая совместно применять различные наборы данных наблюдений и опробований. Предлагается способ расчета весовых коэффициентов для используемых результатов наблюдений, который обеспечивает равное влияние разных наборов данных на итоги калибровки. Благодаря совместному использованию для калибровки модели результатов опытных откачек и данных режимных наблюдений удалось не только снизить расхождение модельных и натурных значений, но и оценить пространственную фильтрационную неоднородность эксплуатируемого водоносного горизонта.

Abstract

Calibration of a groundwater model is an important stage of solution of hydrogeological problems with the use of modeling. This calibration can be performed both manually and automatically applying specialized software. This paper demonstrates a calibration technique by the example of a shore water intake model. This technique makes it possible to use various observation and test data sets jointly. The authors propose a method of calculation of weighting coefficients for the used observation results. This method provides the equal influence of various data sets on the calibration results. Owing to the joint use of pumping and monitoring data for the calibration of a groundwater model, the authors managed not only to reduce the discrepancy between the model and field values but also to estimate the spatial seepage heterogeneity of an operated aquifer.

Введение

Переоценку запасов подземных вод действующих водозаборов при их расширении целесообразно проводить с помощью геофильтрационного моделирования. Для обоснования прогнозной расчетной модели в качестве исходной информации могут совместно использоваться как данные, накопленные в процессе эксплуатации водозабора, так и данные опытно-фильтрационных опробований, проведенных в связи с переоценкой запасов.

Целью настоящей статьи является анализ эффективности калибровки геофильтрационной модели при совместном использовании данных мониторинга уровней подземных вод при эксплуатации действующего водозабора и кустовых опытных откачек.

В качестве исходных использовались данные эксплуатации и разведки одного из береговых водозаборов г. Воронежа в связи с его реконструкцией и планируемым увеличением водоотбора. Геофильтрационная модель области влияния данного водозабора была разработана на основе результатов регионального моделирования геофильтрации в районе Воронежского водохранилища, проведенного на кафедре гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова ранее [2].

Исходные данные и постановка задачи калибровки

Водозаборы г. Воронежа расположены на берегах Воронежского водохранилища, имеющего общую площадь зеркала воды 70 км² при протяженности с севера на юг около 35 км. Средняя глубина водохранилища составляет 3 м, в районе плотины она достигает 7,8 м. Поддерживаемый плотиной постоянный уровень водохранилища имеет абсолютную отметку 93,0 м, а амплитуда его колебаний составляет 10–30 см [1]. Гидрографическая сеть представлена реками Дон, Воронеж, Усманка.

Основным эксплуатируемым водоносным комплексом в районе расположения Воронежских водозаборов является неоген-четвертичный (N-Q) комплекс водоносных горизонтов. Его основная часть сложена неогеновыми терригенными отложениями, представленными разнородными песками мощностью 26–40 м, более грубыми в основании. Они перекрываются аллювиальными четвертичными отложениями мощностью 8–20 м — песками, супесями и суглинками. В подошве комплекса залегают упорная терригенная толща глин с прослоями известняков (верхнесемилукская свита — D_3sm_2) и слабоводоносный локально-водоносный карбонатный комплекс трещиноватых известняков с прослоями глин (саргаевская и нижнесемилукская свиты — D_3sr-sm_2).

Рассматриваемый в статье водозабор работает уже более 20 лет и представляет собой береговой ряд скважин, расположенных на расстоянии 25–50 м от уреза воды в водохранилище с приблизительно такими же расстояниями между скважинами в ряду. На разрезе, построенном по данным для скважин рассматриваемого водозабора, в верхней части выделяется выдержанный прослой суглинков (рис. 1).

В целях увеличения производительности водозабора вдоль берега водохранилища параллельно существующему ряду скважин был намыт искусственный остров (рис. 2), на котором создается новый ряд водозаборных скважин. Для переоценки запасов реконструируемого водозабора на этом острове в разное время были проведены две опытные кустовые откачки. Первая из них выполня-

лась в течение 30 суток в октябре — ноябре 1998 года в центральной части острова (см. рис. 2). Во время этой откачки существенно (до 0,3 м) изменялся уровень водохранилища.

Вторая опытная кустовая откачка проводилась в марте — апреле 2011 года также в течение 30 суток. На момент ее начала поверхность земли находилась в промерзшем состоянии и снеготаяние еще не началось. Таким образом, на начальном этапе откачки инфильтрационное питание отсутствовало. Период восстановления уровней (с 14 апреля 2011 г.) пришелся на время активного снеготаяния. Можно предположить, что половодье повлияло на ход уровней в наблюдательных скважинах. Поскольку в период восстановления уровень водохранилища измерялся недостаточно регулярно, приоритетными являются замеры, произведенные в период снижения уровней подземных вод. В течение этого периода уровень водохранилища оставался постоянным при точности измерений 1 см.

Центральная скважина расположена в северной половине острова — на участке, предусмотренном для расширения водозабора (см. рис. 2). Вблизи нее находятся уже действующие водозаборные скважины.

На водозаборе ведутся режимные наблюдения (мониторинг) за уровнями эксплуатируемого водоносного горизонта. Для калибровки модели были использованы замеры за 2007–2011 годы по шести наблюдательным скважинам.

Для проведения прогнозного моделирования и оценки возможных понижений в эксплуатационных скважинах существующего и проектного рядов необходимо определить геофильтрационные параметры по имеющимся фактическим данным опытно-фильтрационных работ и мониторинга.

Анализ условий формирования притока к береговым водозаборам показывает, что самыми важными параметрами являются проводимость неоген-четвертичного водоносного горизонта и фильтрационное сопротивление между эксплуатируемым водоносным горизонтом и поверхностными водами. Фильтрационное сопротивление описывается параметром $A_0 = m_0 / K_0$, где m_0 — мощность слабопроницаемых отложений, K_0 — их коэффициент фильтрации. Взаимодействие подземных и поверхностных вод затруднено не только за счет донных отложений водохранилища, но и за счет прослоя суглинков внутри водоносного комплекса, вскрытого водозаборными скважинами (см. рис. 1). Для оценки понижений в рабочей части комплекса нет необходимости разделять общее фильтрационное сопротивление и отдельно оценивать сопротивление собственно донных отложений.

Таким образом, основной задачей калибровки является оценка проводимости и вертикального фильтрационного сопротивления в области влияния водозабора. При этом с учетом достаточной протяженности водозаборного ряда данная оценка должна быть выполнена с учетом возможной плановой неоднородности этих параметров.

Раздельная обработка результатов опытных откачек

В первую очередь для получения оценочных значений интересующих параметров результаты двух опытных кустовых откачек были интерпретированы графоаналитическими методами. При обработке данных откачки 1998 года по схеме для совершенной скважины у широкой реки (напорный пласт с перетеканием из водохранилища) были получены следующие значения параметров:



Рис. 1. Разрез вдоль линии водозаборных скважин береговой части водоноса



Рис. 2. Схема искусственного острова и расположение опытных скважин

проводимость эксплуатируемого водоносного горизонта $T = 1910 \text{ м}^2/\text{сут}$; параметр сопротивления ложа водоохранилища $A_0 = 46 \text{ сут}$. Для откачки 2011 года по такой же схеме были получены другие значения параметров: $T = 1630 \text{ м}^2/\text{сут}$; $A_0 = 146 \text{ сут}$.

Разницу между величинами параметра A_0 в три раза трудно объяснить, поскольку геологическое строение рассматриваемого участка достаточно простое, а разрез в целом выдержанный. В качестве возможного объяснения такой изменчивости можно привлечь тот факт, что грунт для намывки искусственного острова брался со дна водоохранилища непосредственно в районе намыва, но никаких точных данных об изменениях рельефа дна не было.

Поэтому в 2011 году сотрудники и студенты кафедры гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова провели полевое обследование акватории Воронежского водоохранилища, прилегающей к водозабору, в том числе батиметрическую съемку. Результатом стало обнаружение карьера на дне водохра-

нилища, являвшегося источником грунта для намывки острова. Определенные контуры карьера приведены на рис. 2. В пределах этого карьера слой суглинков полностью размывает и представляет собой фильтрационное окно, в пределах которого сопротивление слабопроницаемых отложений должно быть существенно меньше, чем в остальной области.

Поэтому для учета конфигурации береговой линии и подводного карьера дальнейшую обработку результатов опытных откачек производили на математических геофильтрационных моделях. Для создания модели и работы с ней использовалась программа Processing Modflow [4], а для моделирования прямых задач геофильтрации — программа MODFLOW 2005 [6]. Калибровка модели выполнялась с помощью программ PEST [5] и UCODE [9].

Автоматическая калибровка производится путем перебора различных значений модельных параметров с целью определения их оптимальных величин. Направление поиска определяется по формальным критериям, расхождение ре-

зультатов моделирования и натурных замеров оценивается с помощью так называемой целевой функции $F(b)$. Один из ее вариантов — функция минимальных квадратов — может быть представлен следующим образом [7]:

$$F(b) = \sum_{i=1}^{ND} \omega_i [y_i - y'_i(b)]^2 = \sum_{i=1}^{ND} \omega_i e_i^2, \quad (1)$$

где ND — количество наблюдений; y_i — i -е наблюдение; $y'_i(b)$ — соответствующая этому наблюдению модельная величина, являющаяся функцией параметров модели b ; ω_i — вес i -го слагаемого целевой функции; e_i — i -е отклонение, равное разнице между рассчитанным и фактическим значением.

В таком виде наименьшему расхождению модельных и натурных величин соответствует минимальное значение целевой функции. В данном случае в качестве наблюдений используются замеры напора подземных вод или величины понижения уровня в наблюдательных скважинах.

При использовании различных наборов наблюдений необходимо задавать наблюдениям разные веса. Весовые коэффициенты можно вычислить по следующей формуле, учитывающей разницу в дисперсиях наблюдений и количества замеров:

$$\omega_j = \alpha_j^2 \frac{\sum_{j=1}^N M_j}{M_j \sigma_j^2}, \quad (2)$$

где α_j^2 — доля j -го набора данных в суммарной дисперсии; M_j — количество наблюдений в j -м наборе данных; σ_j^2 — дисперсия наблюдений в j -м наборе данных.

Для обработки результатов опытных откачек была разработана упрощенная модель участка водозабора. На ней воспроизводились проведенные в 1998 и 2011 годах кустовые откачки подземных вод, а также работа водозабора в целом. Обработка данных откачек осуществлялась путем калибровки модели на основании замеров понижений уровней подземных вод. Эта модель использовалась только для уточнения геофильтрационных параметров, которые в дальнейшем были перенесены в прогнозную модель.

Размер модели составляет 4×4 км. Этого достаточно для охвата всей ширины водохранилища при расположении водозаборных скважин в центральной части модели. Размер модельных блоков выбран равным 25×25 м. В пределах искусственного острова модельная сетка сгущена и размер модельных блоков здесь составляет 5×5 м. Первый модельный слой соответствует первому от поверхности слою песков и водохранилищу. Его мощность на участке водохранилища составляет 1,5 м, в остальной части модели — 5,5 м.

Второй модельный слой соответствует слабопроницаемым отложениям (глинам и суглинкам). Для большей части модели его мощность равна 9 м. На участке, соответствующем старому руслу реки Воронеж, мощность этого слоя снижена и составляет 5 м. Глубина большого карьера, расположенного к востоку от острова, в среднем равна 12 м, и в его пределах слабопроницаемый слой можно считать полностью размытым. Тем не менее в пределах карьера существует некоторый слой ила, который сформировался непосредственно в процессе работ по намыву острова и после их окончания. Предположительно этот ил имеет низкий коэффициент фильтрации, и он включен во второй модельный слой. Мощность ила в пределах

карьера ввиду отсутствия достоверных данных задана равной 0,5 м. Также необходимо отметить, что слабопроницаемый слой неоднороден. Ряд водозаборных и наблюдательных скважин в толще суглинков вскрывает линзы песков, точная конфигурация и протяженность которых неизвестны. Несмотря на эти неопределенности, слабопроницаемый слой описывается в модели одним слоем.

Третий модельный слой соответствует основному водоносному горизонту, приуроченному к неоген-четвертичным пескам. В указанных отложениях выделяют две разности: в верхней части залегают более мелкозернистые пески, в нижней — более крупнозернистые. В модели им соответствует один слой, мощность которого составляет 26,5 м.

Залегающие глубже девонские отложения в модели не отражены, их кровля считается непроницаемой границей. Внешние плановые границы модели также заданы как непроницаемые, поскольку предполагается, что за время проведения опытных откачек их влияние не достигает границ модели. Внутренними границами модели являются опытная скважина с заданным расходом и Воронежское водохранилище, заданное границей III рода.

Для прогнозного моделирования эксплуатации водозабора необходимо уточнить значения самых важных параметров модели — коэффициента фильтрации песков K_n , вертикального коэффициента фильтрации слабопроницаемых отложений K_{ct} , коэффициента фильтрации донных отложений в пределах большого карьера K_o и упругой водоотдачи основного водоносного горизонта μ^* . Значение водоотдачи необходимо только на этапе обработки результатов откачек. На прогноз работы водозабора в стационарном режиме оно не оказывает влияния. Точных значений параметров K_n , K_{ct} и K_o достаточно для расчета понижений в водозаборных скважинах и оценки максимально возможного водоотбора. Для отражения фильтрационного сопротивления слабопроницаемых отложений достаточно определить обобщенный параметр A_0 . Нет необходимости определять по отдельности параметры каждого типа отложений. Мощность слабопроницаемых отложений в модели является фиксированной и не изменяется в плане. По этой причине модельный параметр K_{ct} может не быть равен истинному коэффициенту фильтрации отложений. Это некоторый обобщенный коэффициент фильтрации, который, однако, можно использовать при прогнозном моделировании.

Начальные значения геофильтрационных параметров были взяты по результатам обработки данных откачки графоаналитическими методами и приведены в табл. 1. Подобранные значения коэффициента фильтрации слабопроницаемых отложений совпадают для двух откачек. Это свидетельствует о том, что карьер на дне водохранилища задан правильно. Расхождение в величинах A_0 связано с различным положением центральных опытных скважин относительно карьера. Однако проводимость, оцененная по результатам двух опытов, различается в полтора раза. Таким образом, используемая схема однородного водоносного горизонта некорректно описывает существующую ситуацию. Однако имеющиеся разрезы скважин не позволяют обоснованно построить карту неоднородности его проводимости.

Совместная калибровка опытных откачек и данных мониторинга

На следующем этапе была предпринята попытка оценить плановую неоднородность проводимости целевого

Таблица 1

Значения модельных параметров до и после калибровки геофильтрационной модели				
Параметр*	Откачка 1998 г.		Откачка 2011 г.	
	до калибр.	после калибр.	до калибр.	после калибр.
K_n , м/сут	72	88	60	58
$K_{св}$, м/сут	0,200	0,075	0,060	0,075
K_o , м/сут	0,20	0,05	0,06	0,05

* K_n , $K_{св}$, K_o — коэффициенты фильтрации песков, слабопроницаемых отложений и ила соответственно.

Таблица 2

Общая характеристика используемых наборов данных		
Набор данных	Количество отдельных замеров	Вес каждого отдельного наблюдения
Замеры понижений для откачки 1998 г.	1 091	4 200
Замеры понижений для откачки 2011 г.	270	17 000
Осредненные режимные замеры уровней подземных вод	18	см. табл. 3

водоносного горизонта в районе водозабора. Использовался подход, который развивает Джон Доэрти (John Dougherty) — автор программы PEST [8]. Этот подход заключается в описании пространственного распределения геофильтрационных свойств множеством параметров и последующей калибровке этих параметров с целью формирования в модели пространственной неоднородности, подтвержденной фактическими наблюдениями. Одна геофильтрационная характеристика модельного слоя (например, коэффициент фильтрации) представляется в виде десятков и даже сотен отдельных значений, распределенных на модельной сетке отдельных параметров. Этот подход обобщает и классический метод зонирования неоднородности при калибровке, и метод пилотных точек [3]. То есть каждому значению параметра можно назначить конкретную пространственную область — зону, в пределах которой геофильтрационные свойства постоянны. Либо каждое значение характеризует только некоторую точку, а пространственное распределение свойств формируется за счет интерполяции между этими точками, то есть реализуется алгоритм метода пилотных точек.

Для эффективного использования имеющихся данных предлагается объединить три набора результатов наблюдений (замеров понижений при двух опытных откачках и режимных наблюдений на водозаборе) в единый процесс калибровки. В этом случае для каждого из наборов данных будет задан отдельный весовой коэффициент согласно формуле (2) и выражение для функции цели примет вид:

$$F(b) = \sum_{i=1}^{N_1} f_i(b) = \sum_{i=1}^{N_1} \omega_i [S_i - S'_i(b)]^2 + \sum_{j=1}^{N_2} \omega_j [S_j - S'_j(b)]^2 + \sum_{k=1}^{N_3} \omega_k [H_k - H'_k(b)]^2, \quad (3)$$

где S_i — i -й замер понижения, м, во время откачки для первого набора наблюдений; $S'_i(b)$ — соответствующая i -я величина понижения, м, рассчитанная на модели для

набора параметров b ; S_j — j -й замер понижения, м, во время откачки для второго набора наблюдений; $S'_j(b)$ — соответствующая j -я величина понижения, м, рассчитанная на модели для набора параметров b ; H_k — абсолютная k -я отметка уровня подземных вод, м, для третьего набора наблюдений; $H'_k(b)$ — соответствующая k -я расчетная величина уровня подземных вод, м; ω_i — весовой коэффициент для i -го замера первого ряда наблюдений; ω_j — весовой коэффициент для j -го замера второго ряда наблюдений; ω_k — весовой коэффициент для k -го замера третьего ряда наблюдений; N_1, N_2, N_3 — общее количество замеров в первом, втором и третьем наборах данных наблюдений соответственно.

Основной величиной, от которой зависит весовой коэффициент, является дисперсия значений. Весовые коэффициенты для понижений рассчитывают, исходя из инструментальной точности замеров. Согласно ГОСТ 23278-2014 ошибка измерения уровня при проведении опытной откачки не должна превышать 0,01 м. Если принять эту величину в качестве стандартной ошибки измерений, то дисперсия составит 10^{-4} м².

Для режимных наблюдений подход к определению дисперсии отличается. Работа водозабора моделируется при стационарном режиме потока для трех периодов межени. В качестве «наблюдений» при калибровке используются осредненные за весь период межени величины стационарных уровней подземных вод в шести наблюдательных скважинах. Поскольку задачами являлись переоценка запасов и прогнозное моделирование работы всего водозабора, данные режимных наблюдений следует признать не менее важными, чем более точные и полные результаты наблюдений за ходом уровней подземных вод при откачках. По этой причине коэффициент α^2 , входящий в формулу (2), выбран равным 1/3 для каждого набора данных.

Заданные при калибровке весовые коэффициенты приведены в табл. 2 и 3. Выбранные для моделирования работы водозабора межени периоды указаны в табл. 3.

Для проведения совместной калибровки по трем имеющимся наборам данных было сформировано три модели. Они имели одинаковые геофильтрационные схемы и различались только заданием откачивающих и наблюдательных скважин. Эти три модели рассматривались совместно, их выходные напоры зависели от одних и тех же параметров — K_n , определяющего проницаемость эксплуатируемого водоносного горизонта, $K_{св}$ и K_o , определяющих связь подземных и поверхностных вод. В процессе совместной калибровки моделей указанные три параметра подбирались по следующему алгоритму:

- 1) единый набор параметров задавался для всех трех моделей;
- 2) производился запуск этих моделей;
- 3) из выходных файлов моделей считывались результаты (понижения S или уровни H) в точках, для которых имелись фактические данные;
- 4) рассчитывалась единая целевая функция;
- 5) обновлялся набор параметров.

Шаги 1–5 повторялись необходимое число раз автоматически — с помощью программ Processing Modflow и UCODE. Критерием завершения калибровки являлось достижение минимального значения целевой функции, которое не уменьшалось при дальнейших изменениях значений параметров.

Расчет весов для режимных наблюдений							
Период	Характеристика	№ скважины					
		44	10	11	12	13	14
Декабрь 2003 г. — март 2004 г.	Количество замеров	5	5	5	5	5	5
	Средний уровень	86,09	86,24	87,81	86,94	87,56	87,47
	Дисперсия уровней	0,015	0,002	0,006	0,020	0,006	0,042
	Назначенный вес	1 722	12 642	3 947	1 294	4 618	603
Декабрь 2005 г. — апрель 2006 г.	Количество замеров	6	6	4	6	6	6
	Средний уровень	86,36	88,57	89,07	88,07	87,94	87,63
	Дисперсия уровней	0,011	0,017	0,003	0,013	0,033	0,083
	Назначенный вес	2 430	1 529	7 661	2 011	784	308
Ноябрь 2006 г. — март 2007 г.	Количество замеров	6	6	6	6	6	6
	Средний уровень	86,55	87,31	88,12	87,78	88,21	88,81
	Дисперсия уровней	0,119	0,076	0,109	0,256	0,025	0,380
	Назначенный вес	215	334	233	100	1 035	67

В первую очередь для отработки методики была проведена калибровка моделей по схеме однородного пласта. В результате получились следующие значения параметров: $K_n = 76$ м/сут; $K_{ст} = 0,05$ м/сут; $K_o = 0,03$ м/сут. Хотя по формальным критериям этот набор параметров является оптимальным, он не позволяет на модели воспроизвести ход откачек с достаточной точностью (рис. 3).

Следующим шагом было построение карты неоднородности.

Применительно к участку водозабора наибольший интерес представляет пространственная неоднородность проводимости эксплуатируемого водоносного горизонта. Учитывая, что наблюдательные скважины расположены в сравнительно небольшой области в центре рассматриваемого участка, нецелесообразно задавать неоднородность на всей площади модели. Анализ чувствительности модельных напоров к изменениям коэффициента фильтрации, проведенный при помощи программы PEST, показал, что чувствительность модели на удалении от участка водозабора 1–2 км незначительна. Поэтому для построения карты неоднородности была выбрана только центральная часть модели. Выбранная область показана на рис. 4. Она имеет размер 1 100×2 000 м. Длительность проведения калибровки напрямую зависит от числа подбираемых параметров, поэтому количество параметров в проведенных расчетах было сравнительно невелико.

Показанная на рис. 4 область разделена на 20 прямоугольных участков размером 275×400 м. Каждому из этих участков соответствует свой коэффициент фильтрации, который должен быть определен в процессе калибровки. Начальные значения коэффициентов фильтрации как в выделенной области для анализа неоднородности, так и за ее пределами приняты равными 76 м/сут. Эту величину можно принять как эффективный коэффициент фильтрации, характеризующий свойства неогенового водоносного горизонта в районе водозабора в целом. Вне пределов области анализа неоднородности чувствительность коэффициента фильтрации к наблюдениям слишком низка, и нет оснований изменять это значение. Полученная в результате калибровки карта неоднородности представлена на рис. 4.

Сравнить достоверность значений параметров, полученных для двух вариантов схематизации водоносного горизонта, можно по формальным критериям. В руковод-

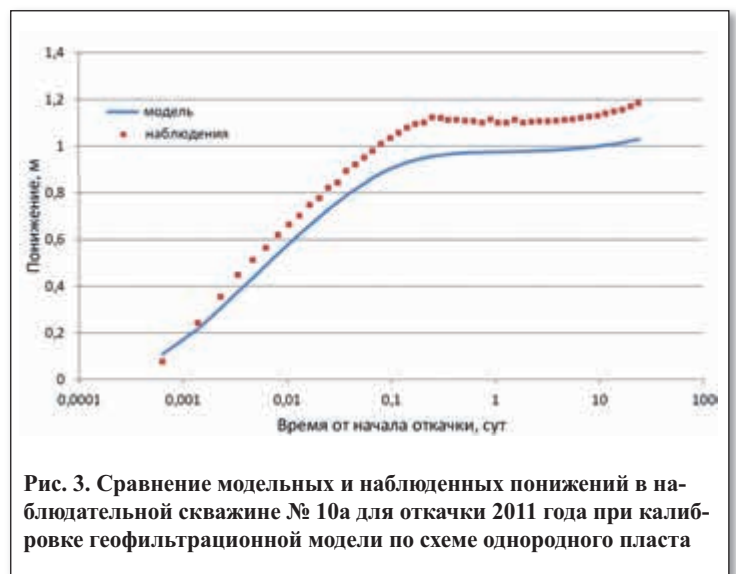


Рис. 3. Сравнение модельных и наблюдаемых понижений в наблюдательной скважине № 10а для откачки 2011 года при калибровке геофильтрационной модели по схеме однородного пласта

ствах по калибровке моделей [5, 7, 9] указано, что в модели ошибка вычислений не должна зависеть от абсолютного значения модельных величин и должна носить случайный характер. Ошибку модельных вычислений можно оценить по величине отклонения модельных величин от замеров уровней/понижений. При этом для объединения трех используемых наборов данных величина каждого отклонения умножается на вес соответствующего наблюдения. Сравнение на примере откачки 2011 года приведено на рис. 5. Первым вариантом схематизации был однородный пласт. Второй вариант — построение пространственной неоднородности. Для построения этой диаграммы использовались результаты моделирования с оптимальными значениями параметров, полученными для каждой схемы.

Рисунок 5 наглядно показывает, что результаты моделирования при использовании схемы неоднородного водоносного горизонта ближе к наблюдаемым данным. Ошибка модели однородного пласта носит систематический характер — она возрастает с ростом понижений. Подобные систематические отклонения, в отличие от случайных, свидетельствуют о наличии каких-то ошибок схематизации. В модели с неоднородным водоносным горизонтом ошибка носит случайный характер. Кроме того, величина целевой функции составляет $8,8 \times 10^4$ для модели однородного

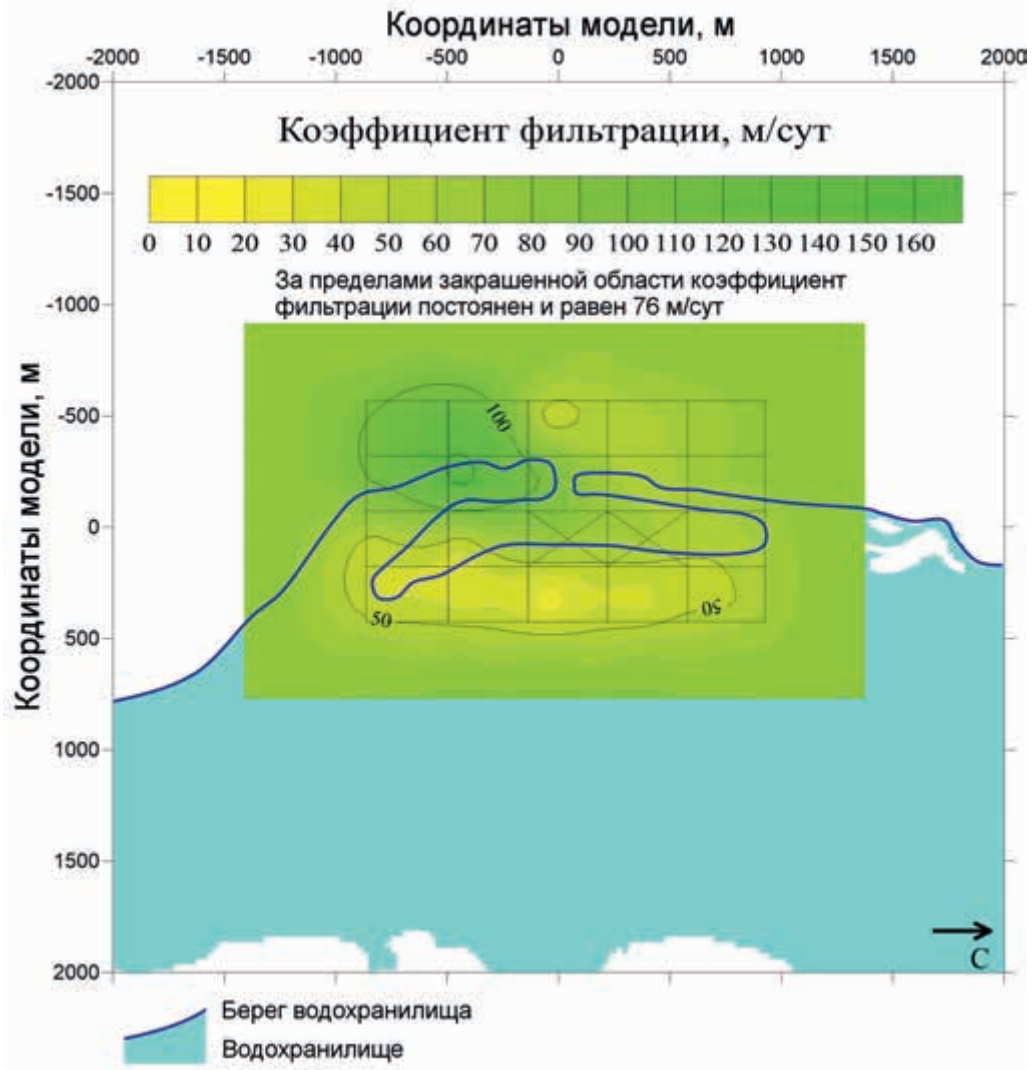


Рис. 4. Карта неоднородности коэффициента фильтрации третьего модельного слоя

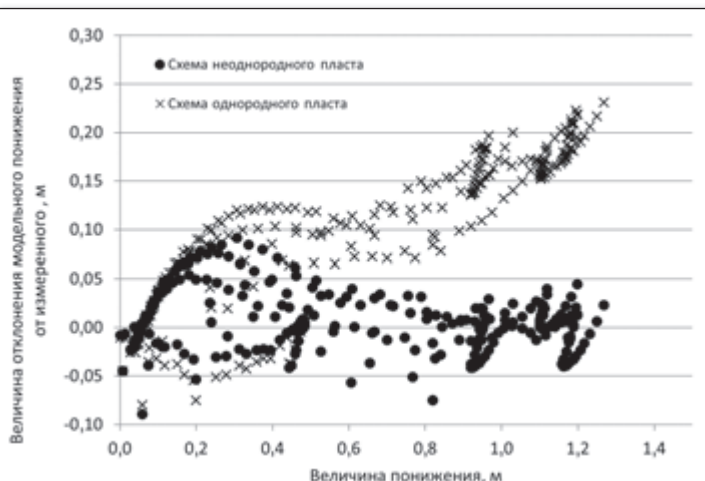


Рис. 5. Зависимость отклонений от величины понижения для откачки 2011 года

пласта и $2,3 \times 10^4$ — для модели неоднородного пласта. Таким образом, можно заключить, что схема неоднородного пласта позволяет подобрать более достоверные значения параметров. Полученные величины параметров можно использовать для прогнозного моделирования.

Кроме целевой функции, которая показывает общую сумму отклонений модельных величин от результатов натурных замеров, точность откалиброванной модели можно проиллюстрировать через среднеквадратичные отклонения для каждого из наборов данных. Из таблицы 4 видно, что в модели неоднородного пласта модельные значения существенно меньше отклоняются от измеренных. Как и ожидалось, отклонения для режимных наблюдений выше, поскольку моделируются усредненные стационарные уровни подземных вод. В качестве данных наблюдений использовались осредненные уровни с высокой дисперсией (см. табл. 3). Эта разница была учтена при задании весовых коэффициентов.

Для проверки рассчитанных весовых коэффициентов можно сравнить величины взвешенных отклонений. Последние более близки между собой, чем их абсолютные величины, что свидетельствует о правильности весовых коэффициентов, рассчитанных по формуле (2).

Выводы

Примененная методика автоматической калибровки при совместном использовании нескольких наборов данных позволила получить более хорошие результаты, чем обычная калибровка каждой из моделей по отдельности.

Таблица 4

Среднеквадратичные и взвешенные среднеквадратичные отклонения модельных величин от измеренных				
Набор данных	Модель однородного пласта		Модель неоднородного пласта	
	Среднее отклонение, м	Среднее взвешенное отклонение	Среднее отклонение, м	Среднее взвешенное отклонение
Замеры понижений для откачки 1998 г.	0,07	4,5	0,05	3,3
Замеры понижений для откачки 2011 г.	0,09	11,7	0,02	3,2
Осредненные режимные замеры уровней	0,83	12,16	0,45	6,1

Результаты исследований показали, что даже при поиске достаточно большого количества калибруемых параметров возможна оценка плановой геофильтрационной неоднородности в автоматическом режиме.

Благодаря применению методики совместной калибровки модели возможно более надежное выявление возможных ошибок расчетной схемы, обоснованной в процессе геофильтрационной схематизации. В частности,

для изучаемого объекта показано, что плановое осреднение коэффициентов фильтрации, полученных по данным разных откачек, нежелательно. Выбор схемы неоднородного водоносного пласта обеспечивает более хорошие результаты, чем исходно выбранная схема планово-однородного водоносного пласта. ☺

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 16-17-10187.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пархоменко В.Н., Бростовская В.К. Отчет о геологическом и гидрогеологическом доизучении, инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 с эколого-геологическими исследованиями на площади листа М-37-IV (Воронеж). Воронеж: ООО «Воронежгеология», 2000.
2. Шестаков В.М., Ван Пун. Гидрогеологический мониторинг на участках водозаборов на берегах Воронежского водохранилища // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2004. № 1. С. 60–64.
3. Certes C., de Marsily G. Application of the pilot point method to the identification of aquifer transmissivities // Advances in Water Resources. 1991. Т. 14. № 5. P. 284–300.
4. Chiang W.H. 3D groundwater modeling with PMWIN. New York: Springer, 2001. 346 p.
5. Doherty J. PEST groundwater data utilities // Watermark Numerical Computing. Australia, 2001.
6. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.
7. Hill M.C., Tiedeman C.R. Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. John Wiley & Sons, 2006.
8. Hunt R.J., Doherty J., Tonkin M.J. Are models too simple? Arguments for increased parameterization // Groundwater. 2007. Т. 45. № 3. P. 254–262.
9. Poeter E.P., Hill M.C., Banta E.R., Mehl S., Christensen S. UCODE_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2005. 283 p.



www.geomark.ru