

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Самарцев Всеволод Николаевич

**Обоснование геофильтрационных и геомиграционных моделей
участков загрязнения и эксплуатации подземных вод с
использованием метода совместной калибровки**

Специальность 1.6.6 – Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Поздняков Сергей Павлович**
*доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник*
- Официальные оппоненты** – **Куваев Андрей Алексеевич**,
*доктор геолого-минералогических наук,
доцент, ФГБУ «Гидроспецгеология», центр
объектного мониторинга состояния недр
(ОМСН), начальник отдела ГИС-
технологий и математического
моделирования*
- Язвин Александр Леонидович**,
*доктор геолого-минералогических наук,
АО "Гидрогеологическая и геоэкологическая
компания "ГИДЭК", руководитель
геологической службы, главный научный
сотрудник*
- Рыбников Петр Андреевич**
*кандидат геолого-минералогических наук,
ФГБУН «Институт горного дела
Уральского отделения РАН», заведующий
лабораторией геоинформационных и
цифровых технологий в недропользовании*

Защита диссертации состоится 18 ноября 2022 г. в 14 часов 30 мин на заседании диссертационного совета МГУ.016.1(МГУ.04.01) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/499035316/>

Автореферат разослан 14 октября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент



Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время численное моделирование природных процессов, описываемых уравнениями математической физики, широко используются для решения прикладных задач в самых разных областях наук о Земле. В гидрогеологии для количественного анализа гидрогеологических процессов в основном используются геофильтрационные (например, для оценки запасов подземных вод) и геомиграционные (например, для прогноза миграции химического и теплового загрязнения) модели.

Калибровка модели является важным этапом ее разработки [Anderson et al., 2015]. Этот этап представляет собой решение так называемой обратной задачи – определение значений параметров, входящих в теоретические уравнения, по известным выходным данным – наблюдениям за моделируемым процессом, описываемым этими уравнениями. В геологии, в связи с неоднородностью строения литосферы, обычно модельные параметры известны только приблизительно, и требуется уточнение их значений в ходе разработки модели. Поэтому модели без калибровки, как правило, плохо воспроизводят природные условия и не могут быть использованы для решения прогнозных задач.

На начальном этапе развития методов численного моделирования калибровка производилась вручную. Уже в конце 1970-х появились методы автоматической калибровки, в которых часть рутинных операций выполнял компьютер в автоматическом режиме. Однако до сих пор ежегодно публикуются сотни статей, посвященных калибровке моделей при решении задач, связанных с подземными водами. В них демонстрируются результаты применения известных методик, предлагаются новые методы и подходы, описывается разработка новых программных кодов, что подтверждает актуальность проблемы разработки практической методики калибровки моделей гидрогеологических процессов.

Цель данной работы - разработка методики совместной калибровки моделей гидрогеологических процессов с использованием существующих инструментов автоматизации решения обратных задач. Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

1. Типизация условий применимости совместной калибровки и верификация процесса автоматической калибровки геофильтрационных моделей на синтетических примерах.
2. Обоснование методов совместной калибровки разномасштабных геофильтрационных моделей на участках переоценки запасов подземных вод.
3. Анализ эффективности метода совместной калибровки при обосновании моделей геофильтрационных процессов в бассейнах малых рек.
4. Анализ преимуществ и ограничений метода совместной калибровки моделей по сравнению с традиционными методами.

Объектом исследований являются локальные потоки подземных вод в условиях техногенного воздействия на них за счет водоотбора или загрязнения.

Предмет исследований – неопределенность численных моделей гидрогеологических процессов в этих потоках, связанная с ограниченной исходной информацией о параметрах. Разрабатываемая методика направлена на снижение этой неопределённости.

Научная новизна работы заключается в разработке методики полуавтоматической совместной калибровки численных моделей гидрогеологических процессов. Предлагаемая методика позволяет более эффективно использовать данные наблюдений и оптимизировать процесс обоснования прогнозных моделей.

Для случая совместной калибровки предложена новая зависимость для расчета весового коэффициента, необходимого для корректного учета и сравнения наблюдений различных типов. Обоснован метод совместного использования данных разведочных работ (опытные откачки) и объектного мониторинга за режимом эксплуатации при переоценке запасов действующих водозаборов подземных вод. На синтетическом примере и на модели участка водозабора ВПС-4 показана принципиальная возможность в полуавтоматическом режиме оценивать пространственную изменчивость параметров по имеющимся наблюдениям.

Теоретическая значимость работы состоит в выявлении и типизации условий эффективного применения совместной калибровки моделей гидрогеологических процессов и разработке метода корректного совместного использования наблюдений различных типов в процессе полуавтоматической калибровки с применением предложенных автором весовых коэффициентов.

Практическая значимость. Разработанная методика калибровки моделей была применена для решения следующих прикладных задач: составление прогноза поступления загрязнения к водозабору ВПС-9 г. Воронежа; переоценка эксплуатационных запасов подземных вод на участке водозабора ВПС-4 г. Воронежа; оценка эксплуатационных запасов на участке «Водозаборный узел I» Южно-Воронежского месторождения пресных подземных вод; разработка геофильтрационных моделей территории месторождения медно-никелевых руд Новохоперского района Воронежской области, участки «Еланское» и «Елкинский»; обоснование геогидрологической модели Судогодского месторождения подземных вод; обоснование геофильтрационной модели Хиагдинского рудного поля.

Разработанная методика используется в курсе “Калибровка геофильтрационных моделей”, разработанным и читаемом автором магистрантам геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, и при выполнении выпускных работ магистрантами кафедры гидрогеологии.

Методология диссертационного исследования. Исследование проводилось на основе модельно-ориентированного подхода к анализу гидрогеологических процессов. В рамках этого подхода разрабатывались как тестовые модели, так и модели реальных объектов для оценки и снижения неопределенности выполняемых с помощью моделирования прогнозов геофильтрации и геомиграции в условиях ограниченного объема исходных данных. Методика разрабатывалась на основе ряда примеров:

1. Синтетический одномерный геофильтрационный и геомиграционный поток.
2. Поток подземных вод в районе шламохранилища Сибирского химического комбината (СХК).
3. Водозабор ВПС-4 г. Воронежа, приречного типа, на котором выполнялась переоценка запасов подземных вод.
4. Южно-Воронежское месторождение пресных подземных вод, на котором выполнялась оценка запасов и необходимо было спрогнозировать влияние водозаборов на сток р. Хворостань.
5. Судогодское месторождение подземных вод, для которого оценивались составляющие баланса и оценка влияния изменения климата на сток р. Судогда.

Использование тестовых моделей с искусственно заданным набором параметров позволило оценить точность подбора параметров при калибрации. Калибрация тестовых моделей выполнялась по схеме слепого эксперимента. Эффективность калибрации моделей реальных объектов оценивалась по формальным показателям качества. Все рассматриваемые модели разрабатывались с помощью общедоступных программ Modflow [Harbaugh, 2005] и MT3DMS [Zheng, Wang, 1999]. Для решения обратных задач (калибрации моделей) использовались программы PEST [Doherty, 2001] и UCODE [Poeter et al., 2005].

Защищаемые положения

1. На основе анализа теоретических моделей гидрогеологических процессов и типов данных наблюдений проведена типизация условий, в которых следует применять совместную калибровку для обоснования численных моделей локальных потоков подземных вод и разработана общая методика ее использования.
2. При совместной калибровке необходимо уравнивать вклад различных типов наблюдений, имеющих разную физическую размерность и разное количество измерений, в минимизируемую функцию невязки модельных результатов и данных наблюдений. Для этого предложена новая зависимость для расчета весовых коэффициентов индивидуальных наблюдений.
3. На синтетических моделях и на моделях реальных объектов показано, что совместная калибровка позволяет получить более достоверные значения искомых параметров, чем последовательная.

4. Эффективно объединение в общий процесс калибровки как моделей различных процессов, так и различных моделей одного процесса и различных типов наблюдений в рамках одной модели.

Обоснованность и достоверность результатов исследования и выводов основывается на: 1) изучении и применении современного опыта работы с численными моделями гидрогеологических процессов по многочисленным публикациям; 2) применении современного программного обеспечения, пользующегося высокой репутацией в гидрогеологической среде, для разработки численных моделей и их калибровки; 3) использовании данных мониторинга и опробования для обоснования результатов, полученных на конкретных объектах; 4) апробации основных научных положений в виде докладов на профессиональных конференциях и публикацией в рецензируемых журналах.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы, полученные в ходе работы над диссертацией, докладывались на: Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной памяти В.А. Мироненко «Дерзость Надежд» (СПб, 2010); Научно-технической конференции «Гидрогеоэкология: вчера, сегодня, завтра» (Москва, ОАО «НИИ ВОДГЕО», 2011); Международной конференции «ModelCare» (Германия, Лейпциг, 2011); Международной научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика» (Москва, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии» (Московская область, 2013); Конференции «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии», (Томск, 2015); Конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (СПб, 2016); 44th Annual Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH) (Дубровник, 2017); На XXII (2017) и XXIII (2021) Совещаниях по подземным водам Сибири и Дальнего Востока; На XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2018).

Личный вклад автора. Автор участвовал в постановке основных задач диссертации и самостоятельно занимался их решением. Автором проведена основная часть работ по разработке описанных в работе моделей реальных объектов и самостоятельно в полном объеме выполнена их калибровка.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Положением МГУ о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и получен один патент.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 216 страниц, в том числе 81 рисунок, 25 таблиц и два приложения на 18 страницах. Список литературных источников состоит из 161 наименования.

Финансовая поддержка. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №№ 16-17-10187, 21-47-00008 и госбюджетной темы АААА-А16-116033010122-4.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю – д.г.-м.н. Позднякову Сергею Павловичу за неоценимую помощь при выполнении исследования, моральную поддержку, и безграничное терпение, проявленное при подготовке научной работы.

Огромная признательность выражается всем сотрудникам кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за помощь в работе и дружескую поддержку, особенно к.г.-м.н. Лехову Владимиру Алексеевичу, д.г.-м.н. Гриневскому Сергею Олеговичу и Муромец Наталии Николаевне.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

1. Принципы калибровки моделей гидрогеологических процессов

Численное моделирование в гидрогеологии развивается с 1970-х годов [Saleem, 1973.] В настоящее время уже сложилась общая методика разработки численных геофильтрационных и геомиграционных моделей [Шестаков, 1995]. Калибровка является одним из этапов работы с численной моделью, зачастую она необходима для дальнейшего использования модели [Anderson et al., 2015].

Калибровка основана на предположении, что геофильтрационная схема модели верна, и расхождение наблюдаемых и моделируемых величин определяется лишь недостаточными знаниями о параметрах. Суть калибровки состоит в решении обратной задачи путем подбора значений параметров, признанных недостаточно обоснованными. Она может выполняться как вручную, так и с помощью специальных программ, реализующих какой-либо метод оптимизации. Обзоры методов оптимизации представлены, например, в работах [Franssen, 2009] и [Zhou, 2014].

Для калибровки моделей могут использоваться данные различных типов:

- Уровни или напоры подземных вод, замеренные как при проведении опытно-фильтрационных работ (ОФР), так и в рамках режимных наблюдений. Рассмотрению использования замеров уровней посвящено множество работ, например [Веригин, 1962; Мироненко, Шестаков, 1978; Ferris, 1962].
- Расход поверхностных водотоков [Гриневский, 2012; Goderniaux, 2013; Palma, 2007; Winter, 1999].
- Концентрации растворенных веществ [Веригин, 1962; Мироненко, Румынин, 1999].

- Температура подземных вод [Мироненко, Румынин, 1999; Anderson, 2005].
- Возраст подземных вод [Sanford, 2011], который определяется по содержанию изотопов, например пара тритий-гелий [Murphy, 2011], углерод-14 [Kalin, 2000].

В большей части публикаций рассматривается использование одного типа данных. Работ, оценивающих эффективность совместного использования наблюдений различных типов, гораздо меньше. Авторы современных работ [Lagocque, 2009; Li L, 2012] обращают внимание, что нормой все еще является раздельное использование данных различных типов. Совместное использование различных типов наблюдений, на настоящий момент, остается перспективным, но слабо разработанным приемом при решении обратных задач в гидрогеологии.

2. Методика калибровки моделей гидрогеологических объектов

В методах оптимизации, для оценки качества модели, используются так называемые целевые функции. Программы PEST [Doherty, 2001] и UCODE [Poeter et al., 2005] используют целевую функцию суммы квадратов отклонений. В общем виде для наблюдений нескольких типов она может быть записана как:

$$S(b) = \sum_{j=1}^{NG} \sum_{i=1}^{ND_j} \omega_{ij} [y_{ij} - y'_{ij}(b)]^2 = \sum_{j=1}^{NG} \sum_{i=1}^{ND_j} \omega_{ij} e_{ij}^2 \quad (1)$$

где NG – количество групп наблюдений; ND_j – количество наблюдений в j -той группе; y_{ij} – i -тое наблюдение в j -той группе; $y'_{ij}(b)$ – соответствующая модельная величина при наборе параметров b ; ω_{ij} – вес i -того слагаемого целевой функции; e_{ij} – i -тое отклонение (невязка), равное разнице между рассчитанным и фактическим значением. Чем лучше модель воспроизводит наблюдения, тем меньше эта целевая функция.

Весовой коэффициент должен выполнять две функции [Hill, Tiedeman, 2006]. Во-первых, весовые коэффициенты должны обеспечить приведение всех невязок к единой размерности. Во-вторых, весовые коэффициенты должны компенсировать различную точность наблюдений. Отсюда очевидным представляется использование коэффициентов, обратно пропорциональных дисперсии замеров. Использование таких весовых коэффициентов предлагается во всех работах, посвященных решению обратных задач безотносительно сферы применения, например [Beck, Arnold, 1977].

Дисперсия зависит не только от инструментальной точности измерений. Общая дисперсия замера σ^2 складывается из дисперсий нескольких факторов:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{и}}^2 + \sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{г}}^2 + \sigma_{\text{мг}}^2 \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{и}}$ – инструментальная ошибка замера; $\sigma_{\text{п}}$ – ошибка высотной привязки; $\sigma_{\text{г}}$ – стандартное отклонение уровня за счет внутригодовых колебаний; $\sigma_{\text{мг}}$ – стандартное отклонение уровня за счет многолетних колебаний.

При использовании наблюдений различных типов предполагается, что наблюдения разных типов характеризуют разные свойства системы, и потому

являются одинаково важными для описания системы в целом. С точки зрения формальной оценки это означает требование равенства вкладов групп наблюдений в общую целевую функцию, то есть $\sum_{i=1}^{ND_1} \omega_{i1} e_{i1}^2 = \dots = \sum_{i=1}^{ND_n} \omega_{in} e_{in}^2$.

Предпосылка о равенстве групп наблюдений требует введения поправки на количество замеров, которое в разных группах может существенно различаться. Например, при работе с ВПС-4 г. Воронежа выделено три группы наблюдений. Количество замеров по группам составило 1091, 270 и 18. Предпосылка равенства долей означает, что при калибровке модели 18 значений стационарных уровней имеют такую же «важность» для оценки правильности модели как и 1091 значение понижений в наблюдательных скважинах при опытной откачке. Для обеспечения равенства долей групп наблюдений в целевой функции предлагается поправка на количество замеров вида $\sum_{j=1}^{NG} M_j / M_j$, где M_j – количество замеров в j -той группе. Таким образом, чем меньше замеров в некоторой группе, тем больше будет вес каждого отдельного замера в ней.

В некоторых случаях может потребоваться скорректировать относительные веса для различных групп. Для учета этой поправки введем набор безразмерных коэффициентов α_j такой, что $\sum_{j=1}^{NG} \alpha_j = 1$. Поскольку базовым вариантом является равенство всех групп наблюдений, по умолчанию предлагается использовать $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = 1/n$ д.е. С учетом предлагаемых поправок формула для вычисления весовых коэффициентов принимает следующий вид:

$$\omega_{i,j} = \alpha_j \frac{\sum_{j=1}^N M_j}{M_j \sigma_j^2} \quad (3)$$

где α_j – доля j -того набора данных в суммарной дисперсии; M_j – количество наблюдений в j -том наборе данных; σ_j^2 – дисперсия наблюдений в j -том наборе. Необходимо отметить, что формула (3) необходима для корректного расчета весов при использовании нескольких групп наблюдений. Для одной группы наблюдений вполне допускается отсутствие весовых коэффициентов, а точнее, приравнение всех коэффициентов ω_{ij} в формуле (1) единице [Doherty, 2001].

Использование регуляризации. В ряде случаев для определения оптимального сочетания параметров необходимо использовать регуляризацию. John Doherty в своей монографии, посвященной калибровке [Doherty, 2015], определяет регуляризацию в широком смысле как набор методов устранения проблемы неединственности решения. Часто применяемым методом регуляризации является регуляризация по Тихонову [Тихонов, Арсенин, 1979]. Суть регуляризации по Тихонову заключается в добавлении к наблюдениям какой-либо информации о самих параметрах. Одной из основных ее проблем является выбор весовых коэффициентов дополнительных составляющих целевой функции. В отличие от наблюдений, веса априорных величин не могут быть

определены по формуле (3). В руководствах по калибровке моделей обычно предлагаются только общие рекомендации по их выбору [Hill, Tiedeman, 2006; Doherty, 2015]. Вклад регуляризующей составляющей в целевую функцию должен быть снижен относительно наблюдений, и находиться в пределах 0.01-0.1.

Выполнение полуавтоматической калибровки. Введем понятие совместной калибровки, в которой совместно анализируются данные разных типов наблюдений, разные модели одного процесса и/или модели разных процессов. Возможные типы совместной калибровки приведены в таблице 1. Общий алгоритм проведения полуавтоматической калибровки проиллюстрирован блок-схемой на рисунке 1. Это циклический процесс, подбор осуществляется за некоторое количество итераций. Результатом калибровки является набор значений параметров, при котором значение целевой функции было минимальным из всех проверенных. При этом необходимо иметь в виду, что «успешное» завершение калибровки не гарантирует определение оптимальных значений параметров. Может быть найден локальный минимум целевой функции, тогда как желательно найти ее глобальный минимум. По этой причине калибровка и является полуавтоматической, поскольку результаты автоматизированного подбора параметров контролируются и корректируются специалистом.

Таблица 1. Типы совместной калибровки.

Процесс		Наблюдения	
		Один тип	Несколько типов
Один	Одна модель	<i>Обычная калибровка.</i> Пример – калибровка по напорам.	<i>Одномодельная калибровка.</i> Пример – калибровка по напорам и расходам рек.
	Две и более моделей	<i>Многомодельная калибровка.</i> Пример – совместная калибровка пересекающихся геофильтрационных моделей стационарного потока и опытно-фильтрационных работ.	<i>Многомодельная калибровка.</i> Пример – совместная калибровка модели стационарного потока по уровням и разгрузкам в реки и моделей-врезок ОФР по данным понижений.
Два и более		–	<i>Многомодельная мультипроцессная калибровка.</i> Пример – калибровка геофильтрационной и геомиграционной моделей по уровням и концентрациям.

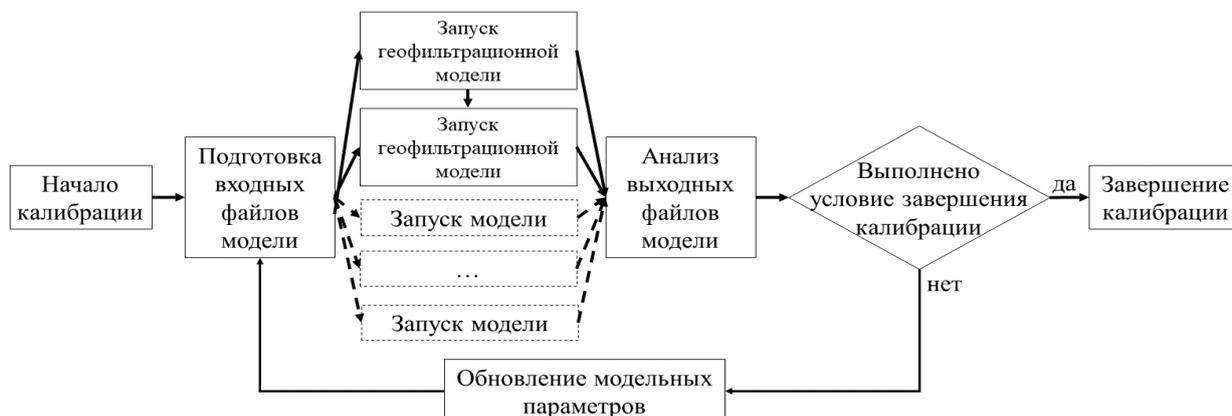


Рисунок 1. Блок-схема процесса калибровки нескольких моделей.

3. Совместная калибровка геофильтрационной и геомиграционной моделей

Преимущества методики совместной калибровки геофильтрационной и геомиграционной моделей анализируются на двух тестовых моделях. Для них заранее известно распределение калибруемых параметров. Калибруя такие модели по синтетическим «наблюдениям», полученным решением прямых задач, можно точно оценить, насколько полученные при калибровке параметры соответствуют их «истинным» значениям. Исследование проводилось по схеме слепого эксперимента, разработка исходной модели проводилась независимо от автора.

Миграция загрязнения из хранилища. Эта модель построена по реальным данным квазитрехмерного потока подземных вод в районе хранилищ отходов СХК. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и утечек из расположенных на участке хранилищ. В качестве загрязнения моделируется нейтральный мигрант, концентрация в источнике принята за условную безразмерную единицу. В модели выделено 5 расчетных слоев, каждый слой принят однородным. Для калибровки были выбраны: четыре коэффициента фильтрации, инфильтрационное питание по трем зонам и эффективная пористость. Зоны питания следующие: западная часть моделируемого участка, W_3 ; восточная часть, W_6 ; повышенное питание, соответствующее утечкам из хранилищ, $W_{нов}$.

В качестве наблюдений использованы две группы данных: расчетные стационарные уровни в 26 точках, и концентрации, рассчитанные с шагом в 1 год на период 55 лет, всего 754 величины. Весовые коэффициенты выбраны согласно формуле (3). Доли групп в суммарной дисперсии принимались одинаковыми ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1/2$). Веса замеров в пределах одной группы одинаковы. Дисперсия замеров уровней выбрана исходя из представления, что при замерах ручными уровнемерами ошибка не превышает 1 см, соответственно, дисперсия равна $1 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. Общее количество замеров равно 754, из них уровней – 26. При этих условиях вес уровней ω_H будет равен $\omega_H = 0.5 \frac{754}{26 \times 10^{-4} \text{ м}^2} = 1.45 \times 10^5 \text{ м}^{-2}$.

Поскольку использована условная концентрация, дисперсию этого типа наблюдений априори оценить невозможно. Возможным показателем для оценки дисперсии является диапазон изменения величин. Уровни изменяются в диапазоне от 89.4 до ~130 м, концентрации изменяются от 0 до 1 д.е. Диапазон изменения различается в 40 раз. В качестве первого приближения ошибка для концентраций задана на порядок меньше, то есть 1×10^{-3} д.е., дисперсия равна 10^{-6} д.е. С учетом количества наблюдений весовой коэффициент для концентраций равен $\omega_C = 0.5 \frac{754}{728 \times 10^{-6}} = 5.2 \times 10^5$ д.е. Весовой коэффициент для синтетических наблюдений задан произвольно, и может быть скорректирован при нарушении предпосылки равенства долей двух групп в целевой функции.

При последовательной калибровке процесс разделялся на два этапа. На первом этапе подбирались значения инфильтрации и коэффициентов фильтрации. На втором этапе (геомиграционная модель) подбиралось значение активной пористости. При совместной калибровке разделения на этапы нет.

Показано, что последовательная калибровка дала неверные результаты. При удовлетворительном совпадении уровней на откалиброванной модели, невозможно добиться воспроизведения сохраненных выходных кривых по концентрациям. Результаты совместной калибровки показывают значительно меньшие расхождения. Кроме того, значения параметров, откалиброванные методом совместной калибровки ближе к исходным. В таблице 2 обозначение K соответствует коэффициентам фильтрации, индексы показывают слой и направление. W соответствует инфильтрационному питанию и n_e – эффективной пористости.

Таблица 2. Сравнение откалиброванных значений параметров с «истинными».

Названия параметров	Последовательная калибровка	Совместная калибровка	Исходные значения
$K^1_{г}$ (м/сут)	0.09	0.07	0.10
$K^{34}_{г}$ (м/сут)	2.35	3.02	3.00
$K^2_{в}$ (м/сут)	4.0×10^{-3}	6.3×10^{-3}	5.0×10^{-3}
$K^{34}_{в}$ (м/сут)	0.14	0.09	0.1
W_3 (мм/год)	87	110	110
W_B (мм/год)	130	150	145
$W_{пов}$ (мм/год)	2400	3650	3650
n_e , д.е.	0.15	0.25	0.25

Калибровка профиля проводимости в одномерном потоке. Вторая тестовая задача – изолированный напорный стационарный поток в пласте с переменной проводимостью, на границах которого заданы постоянные напоры. Задан перенос загрязнителя от границы с большим напором и заданной единичной концентрацией. В пяти точках расположены наблюдательные скважины, в которых известны напоры, а также скважина для замеров концентрации мигранта.

Калибровка выполнялась в несколько этапов. На первом этапе оценили эффективное значение проводимости, характеризующее пласт в целом. На втором этапе сравнивалось два подхода к построению геофильтрационной неоднородности – заранее выделенные зоны и вариант метода пилотных точек. На третьем этапе к калибровке методом пилотных точек добавили регуляризацию для оценки ее влияния на итоговое распределение проводимости.

Откалиброванное значение проводимости составило 3.2×10^{-2} м²/сут. Для сравнения, было рассчитано значение эффективной проводимости как

среднегармоническое [Gelhar, 1993] и составило 3.24×10^{-2} м²/сут. При этом модельная выходная кривая прохождения мигранта очень близка к эталонной. Однако, без учета неоднородности невозможно воспроизвести известные уровни.

На втором этапе весь поток разделен на 6 зон. В описанной постановке можно определить только соотношение проводимостей на участках между наблюдательными скважинами [Шестаков, 1995]. Поэтому, при выделении зон их границы выбраны по положению скважин. В результате калибровки получилось хорошее совпадение, как уровней, так и концентраций. Подобранные распределение проводимости на качественном уровне повторяет исходное (см. рис. 2).

На третьем этапе была предпринята попытка откалибровать модель без априорного выделения зон неоднородности с помощью метода пилотных точек, в результате которой значения проводимости по модельным блокам объединились в 6 зон, границы которых соответствуют априорному зонированию.

Далее была выполнена проверка возможности заменить замеры концентраций прямыми определениями проводимости, которые соответствовали бы результатам опытно-фильтрационных работ. Для всех пяти наблюдательных скважин были в качестве априорных установлены «истинные» значения проводимости в их модельных блоках вместо подобранного среднего.

Результаты калибровки с добавлением «истинных» значений проводимости также показаны на рисунке 2. Этот вариант калибровки позволил воспроизвести поле проводимости близко к исходному. В то же время миграционный расчет показывает запаздывание фронта вытеснения. Таким образом, на тестовой модели показано, что качественно более похожее на «истинное» поле проводимости не обеспечивает более правильный результат миграционного расчета. Кроме того, можно заключить, что для построения корректной модели, наблюдения за концентрациями оказываются важнее, чем прямые измерения параметров.

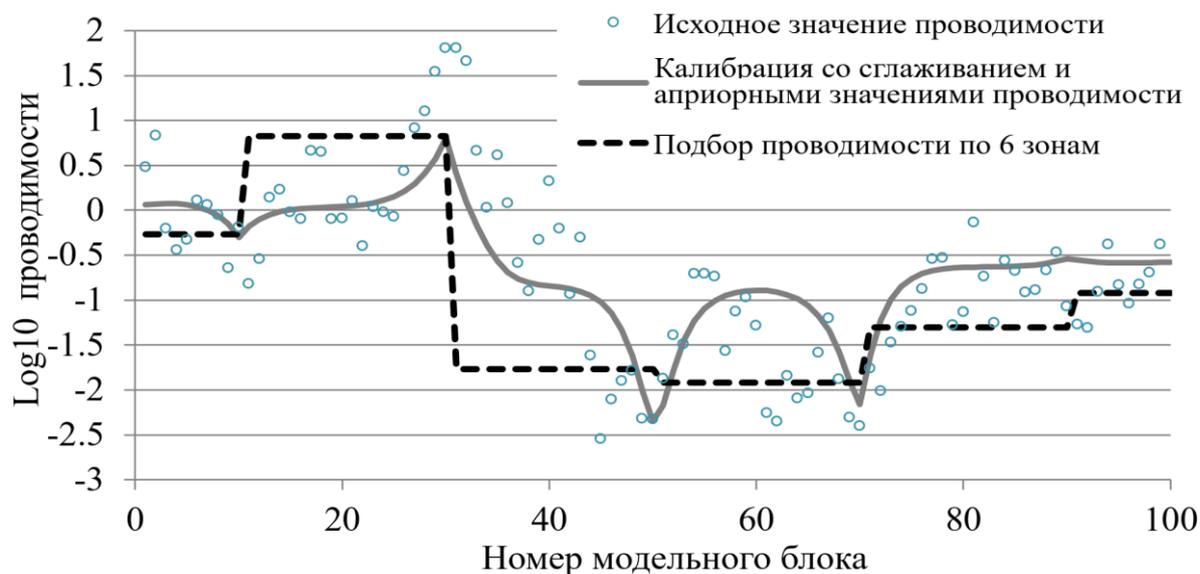


Рисунок 2. Результаты калибровки модели одномерного потока [Самарцев, 2013].

4. Применение многомодельной совместной калибровки для переоценки запасов подземных вод на участке водозабора ВПС-4 (г. Воронеж)

На примере ВПС-4 рассмотрены особенности совместной калибровки разномасштабных моделей, описывающих один процесс. Объект выбран как типовой, на котором стояла задача переоценки запасов подземных вод. Водозабор ВПС-4 расположен к северу от г. Воронежа, на западном берегу Воронежского водохранилища. Он эксплуатируется с середины XX в. В 1996-1998 г. была создана новая площадка, грунт для намывки искусственного острова брали из дна водохранилища. Эксплуатируемый водоносный комплекс – безнапорный неоген-четвертичный, сложенный песками. Они перекрываются четвертичными песками и суглинками. В подошве комплекса залегает толща глин.

В 1998 г. на намывной площадке была проведена кустовая откачка [Ван Пин, Шестаков, 2008]. Для обоснования расширения водозабора в 2011 г. была проведена еще одна кустовая откачка. Учитывая сложность береговой линии, для обработки откачек использовалось математическое моделирование. Всего было разработано три модели – две для кустовых откачек и одна эпигнозная.

Разработка моделей. Все три модели имеют общую геофильтрационную схему. Моделируется *нестационарный* поток подземных вод для воспроизведения хода откачек. Эпигноз моделируется в *стационарном* режиме. Геологический разрез *схематизирован 3 модельными слоями*. Первый модельный слой соответствует первому от поверхности слою песков. Второй слой соответствует слабопроницаемым отложениям. В месте отбора грунта для намывки острова слой суглинков размыт на полную мощность, существует слой донных отложений, сформировавшийся позднее. Третий модельный слой соответствует основному водоносному комплексу.

Внешние плановые *границы* модели также заданы непроницаемыми. Внутренними границами модели являются водозаборные скважины и водохранилище. На эпигнозной модели учитывается инфильтрационное питание.

Параметры. Начальные параметры заданы по результатам графо-аналитической обработки откачек. Для калибровки выбраны коэффициенты фильтрации: песков K_n ; суглинков K_{cl} ; донных отложений в зоне размыва K_o .

Для калибровки использованы: 1091 замер понижений для откачки 1998 г.; 270 замеров понижений для откачки 2011 г.; данные режимных наблюдений за 2007-2011 гг. по шести наблюдательным скважинам. Из всех доступных режимных наблюдений выбраны периоды, в течение которых режим работы водозабора можно считать стационарным. Всего выбрано три периода, для каждого периода имеющиеся замеры уровней усреднялись по каждой скважине.

Результаты отдельной калибровки моделей откачек приведены в таблице 3. Значения K_n , и следовательно, проводимости, различаются в полтора раза.

Независимая обработка опытов не позволяет составить единую модель всего участка водозабора ВПС-4. Для уточнения геофильтрационных параметров реализована совместная калибровка всех трех моделей.

Таблица 3. Результаты раздельной калибровки.

Параметр	По данным 1998 г.	По данным 2011 г.	Совместная калибровка
$K_{пв}$, м/сут	88	58	76
$K_{сл}$, м/сут	0.075	0.075	0.05
K_o , м/сут	0.05	0.05	0.03

При совмещении нескольких групп наблюдений необходимо назначить правильные весовые коэффициенты. Дисперсию замеров понижений при откачках можно принять равной 10^{-4} м^2 .

Наблюдения, используемые для эвристической модели, являются усредненными. Для каждого рассчитана дисперсия по усредняемым замерам, веса индивидуальны для каждого наблюдения. С учетом разницы в количестве замеров весовые коэффициенты составили $\omega_{1998} = 4200 \text{ м}^2$, $\omega_{2011} = 17000 \text{ м}^2$, $\omega_{\text{эпг}}$ от 67 до 7661 м^2 .

С указанными весами три модели калибровались совместно. Их выходные данные зависели от одних и тех же параметров, упомянутых выше: $K_{пв}$, $K_{сл}$ и K_o . Значения, полученные в результате совместной калибровки моделей, также приведены в таблице 3. Хотя по сумме квадратов невязок этот набор параметров является оптимальным, он не позволяет на модели воспроизвести ход откачек с достаточной точностью.

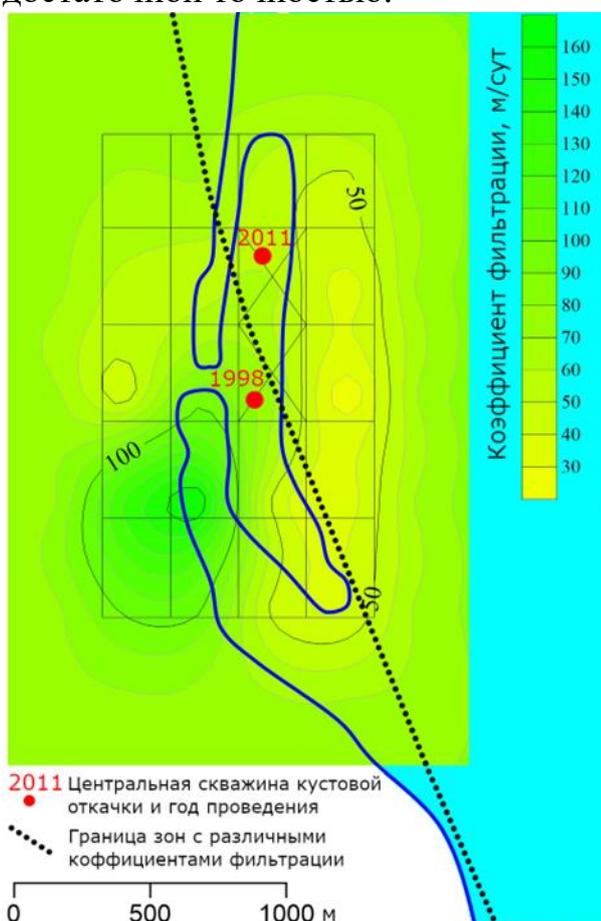


Рисунок 3. Схема участка водозабора ВПС-4 и результаты калибровки методом пилотных точек.

Это может свидетельствовать об ошибке в геофильтрационной схеме. В качестве первого изменения модели предлагается деление эксплуатируемого водоносного комплекса на две зоны (рис.3). Таким образом, требуется откалибровать два коэффициента фильтрации песков $K_{пв}$ и $K_{пз}$. После нового этапа калибровки получены следующие значения параметров: $K_{пв} = 58 \text{ м/сут}$; $K_{пз} = 97 \text{ м/сут}$; $K_{сл} = 0.07 \text{ м/сут}$; $K_o = 0.007 \text{ м/сут}$. При этих значениях параметров все три модели показывают лучшее соответствие фактическим данным. Таким образом, даже небольшое усложнение модели позволило получить меньшие невязки между расчетными и фактическими понижениями.

Другим рассмотренным методом является метод пилотных точек. Вначале вся расчетная область была покрыта

равномерной квадратной сеткой, всего 400 точек, для которых была рассчитана чувствительность. По чувствительности более 0.1% от максимальной была выбрана меньшая область размером 1100×2000 м и разделена на 20 участков, каждому назначен свой коэффициент фильтрации. За пределами выделенной области он не калибровался. Начальные значения коэффициентов фильтрации приняты равными эффективному значению однородной схемы, а именно, 76 м/сут [Самарцев, Поздняков, 2017]. Сетка выделенных для участков и результаты калибровки показаны на рисунке 3.

Результаты моделирования при использовании схемы неоднородного водоносного горизонта ближе к натурным наблюдениям. Ошибка модели однородного пласта носит систематический характер – она возрастает с ростом понижений. В модели с неоднородным водоносным горизонтом ошибка носит случайный характер. Кроме того, целевая функция уменьшается более чем в четыре раза для модели неоднородного пласта в сравнении с моделью однородного пласта.

Таким образом, можно заключить, что схема неоднородного пласта лучше отражает природные условия. Применение метода совместной калибровки позволило добиться меньших невязок между расчетными и модельными уровнями, чем раздельное рассмотрение каждого из опытов. При этом, по формальным критериям, две разные схемы неоднородности примерно одинаково воспроизводят наблюдения. Имеющиеся наблюдения не позволяют однозначно выбрать более вероятную схему, поэтому для проведения прогнозных расчетов выбрана более простая схема неоднородности. Откалиброванная таким образом модель водозабора и ВПС-4 использовалась при переоценке запасов для подбора оптимального распределения нагрузки на водозаборные скважины.

5. Применение метода совместной калибровки при разработке геофильтрационных моделей речных бассейнов

Оценка запасов для водозаборов в долинах малых рек является одной из типовых задач, для решения которых применяется геофильтрационное моделирование с учетом взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Эффективность одномодельной совместной калибровки по данным о напорах и расходах разгрузки подземных вод была проанализирована применительно к двум моделям бассейнов малых рек. Первый объект – Южно-Воронежское месторождение подземных вод (ЮВМППВ). Интерес представляет р. Хворостань, сток которой может сократиться после организации водозаборов. Второй объект – Судогодский водозабор (Владимирская обл.), расположенный в бассейне р. Судогда.

Бассейн р. Хворостань расположен к ЮВ от г. Воронежа, на левобережье р. Дон, и частично пересекается с территорией ЮВМППВ. В 2014–2016 годах производилась оценка запасов подземных вод на участке «Водозаборный узел I», в рамках которой была построена геофильтрационная модель района р. Хворостань.

Структура модели. На модели воспроизводится стационарный режим, соответствующий минимальной водности. Эксплуатируется неоген-четвертичный водоносный комплекс. Первый модельный слой включает водоносные горизонты четвертичного возраста. Второй модельный слой – плиоценовый водоносный горизонт. Третий модельный слой соответствует толще глин, четвертый – водоносному комплексу девонских известняков.

Граничные условия. При выделении границ два участка совпадают с естественными границами потока подземных вод: на западе – реки Воронеж (и Воронежское водохранилище) и Дон, на юго-востоке – р. Икорец. На остальных участках граница проведена по предполагаемым линиям тока в неоген-четвертичном комплексе. Внутренними границами являются реки и водозаборные скважины. Питание подземных вод осуществляется за счет атмосферных осадков.

Значения модельных *параметров* и конфигурация зон неоднородности основываются на материалах разведки ЮВМПВ. Для описания неоднородности выделено 26 различных коэффициентов фильтрации, 5 параметров питания, 10 параметров донных отложений и 4 параметра водоотдачи, итого 45 параметров.

Используются две группы наблюдений – уровни подземных вод и расходы реки Хворостань. Всего 67 наблюдательных скважин и 6 гидрометрических постов, итого 73 замера. Предполагалось, что доли обеих групп наблюдений в уравнении (3) одинаковы ($\alpha_H = \alpha_Q = 1/2$). При расчете весов учтено, что замеры уровней выполнены в разные годы. В этом случае определяющими являются внутригодовые и многолетние колебания уровней, инструментальной ошибкой можно пренебречь. Суммарная дисперсия замеров уровней, рассчитанная по формуле (2), составляет $\sigma_H^2 = \sigma_r^2 + \sigma_{mg}^2 = 0.28 \text{ м}^2$. Весовой коэффициент уровней равен $\omega_H = \alpha_H \frac{M_Q}{M_H \sigma_H^2} = 0.5 \frac{73}{67 \times 0.28} = 1.95 \text{ м}^{-2}$. Для расхода рек считается, что величина ошибки зависит от его величины. Поэтому вес рассчитан отдельно для каждого замера расхода р. Хворостань. В результате весовые коэффициенты расходов изменяются от 2.79×10^{-3} до $1.01 \times 10^{-6} \text{ сут}^2/\text{м}^6$.

Для выделенных параметров выполнен анализ чувствительности. Максимальную чувствительность имеют параметры питания. При этом коэффициент фильтрации основного водоносного горизонта изучен при помощи 15 кустовых откачек, следовательно можно предположить, что он обоснован лучше, чем значения прочих модельных параметров. Соответственно, для калибровки выбраны параметры инфильтрации и донных отложений. В результате анализа чувствительности количество калибруемых параметров было сокращено до девяти.

В результате калибровки были существенно снижены невязки как по уровням, так и по расходам. Хорошим критерием является отношение стандартного отклонения невязок (1.67 м) к наблюдаемому максимальному перепаду напоров

(26 м). Это отношение равно приблизительно 0.06, то есть стандартная ошибка моделирования составляет 6%. При непосредственном участии автора после завершения калибровки с использованием разработанной модели была выполнена оценка запасов подземных вод.

Описываемые результаты были получены с учетом неоднородности донных отложений р. Хворостань. Для их изучения проводились детальные исследования ее русла [Квон и др., 2016]. Дополнительно был оценен вклад детальных исследований разгрузки подземных вод в процесс калибровки региональной геофильтрационной модели и выполнения с ее помощью прогноза ущерба поверхностному стоку. Более подробно это рассмотрено в статье [Муромец и др., 2018].

Если предположить, что известен только расход на замыкающем створе, а не его изменчивость по длине, то результаты калибровки в терминах сходимости модельных и измеренных напоров получились весьма близкими к случаю, когда в совместной калибровке использованы данные всех 6 измерений расхода. Следовательно, при калибровке по замерам только уровней неоднородность параметров взаимосвязи по длине реки не может быть выявлена. Прогнозное моделирование водоотбора показало, что ожидаемый ущерб поверхностному стоку оказался на 25% больше для случая с детальным восстановлением руслового сопротивления донных отложений по длине реки. Таким образом, использование метода совместной калибровки по замерам уровней и расходов позволило выявить неоднородность параметров взаимосвязи по длине реки. Учет этой неоднородности существенно влияет на прогнозный ущерб речному стоку при эксплуатации водозабора подземных вод в бассейне р. Хворостань.

Бассейн р. Судогда. Река Судогда является правым притоком р. Клязьма, расположена во Владимирской области. Судогодское месторождение подземных вод эксплуатируется с 1995 г. для водоснабжения г. Владимира. Это месторождение представляет интерес как пример речного бассейна, в котором необходимо дать прогноз эксплуатации водозабора подземных вод, оценить балансовые составляющие водоотбора и ущерб речному стоку.

Судогодский водозабор эксплуатирует водоносный комплекс C_3g-P_1a , представленный трещиноватыми известняками. Снизу комплекс ограничен толщей глин верхнего карбона. Эксплуатируемый водоносный комплекс повсеместно, за исключением долины Судогды, перекрыт толщей глин. В самой долине они размыты, и аллювиальные отложения залегают непосредственно на известняках.

Анализ опыта эксплуатации показал, что гидродинамические условия можно принять стационарными, как до начала эксплуатации водозабора, так и после 2000 года. При этом сокращение речного стока меньше дебита водозабора. Среднее сокращение меженного расхода составляет ~ 37000 м³/сут при среднем дебите водозабора ~ 53400 м³/сут [Гриневский, Спорышев, 2019]. Вероятнее всего, часть

водоотбора обеспечивается за счет увеличения питания и сокращения эвапотранспирации. Эти составляющие баланса обеспечивают приблизительно 30% всего водоотбора (~16400 м³/сут). Изменение баланса связано со снижением уровня грунтовых вод. Для уточнения условий формирования эксплуатационных запасов Судогодского месторождения было выполнено эпигнозное моделирование.

Разработка модели. Моделируется два характерных состояния подземных вод: естественные и нарушенные условия, режим потока принят стационарным.

Структура. Разрез схематизирован двумя модельными слоями. Первый слой соответствует четвертичным отложениям. Второй модельный слой соответствует гжельско-ассельскому комплексу. Разделяющий слой не выделен в самостоятельный модельный слой и учитывается в параметре перетекания.

Границы. Внешние плановые границы модели совпадают с границами бассейна р. Судогда. На севере модель ограничена р. Клязьма, остальные границы заданы непроницаемыми. Внутренними граничными условиями являются реки и водозаборные скважины. На верхней границе задано инфильтрационное питание и эвапотранспирация, в семи разных ландшафтных зонах. Моделирование формирования инфильтрации и эвапотранспирационной разгрузки описано в [Grinevsky et al., 2018; Гриневский, Спорышев, 2019].

Параметры. В качестве геофильтрационных параметров используются коэффициенты фильтрации (для первого слоя) и проводимость (для второго слоя). Слабопроницаемые отложения характеризуются величиной параметра перетекания. Неоднородность задана методом зонирования, всего выделено 8 зон для первого слоя, 9 зон для второго и 15 зон для перетекания, итого 32 параметра.

Для калибрации использованы материалы режимных наблюдений за уровнями подземных вод и трех гидрометрических съемок. Поскольку моделируется стационарный режим, все известные наблюдения уровней были усреднены. Таким образом, используемые при калибрации «наблюдения» не являются прямыми замерами расходов или уровней. На каждый из двух периодов сформировано 16 значений уровней подземных вод и 13 значений расходов. Таким образом, имеется два набора наблюдений – уровни подземных вод и расходы рек, для естественного и нарушенного состояния, всего 58 наблюдений.

Поскольку используемые наблюдения являются результатом осреднения и/или пересчета ряда замеров, то при расчете весов необходимо учесть все составляющие дисперсии. Для уровней дисперсия, обусловленная ошибкой измерения, намного меньше дисперсии, обусловленной многолетними колебаниями. Для расчета весов используется дисперсия, рассчитанная по всем замерам за период осреднения. Весовые коэффициенты уровней находятся в диапазоне от 1.2 до 90.6 м⁻². Весовые коэффициенты расходов находятся в диапазоне от 3.21×10^{-4} до 1.79×10^{-2} сут²/м⁶.

При начальных значениях параметров было рассчитано значение целевой функции. При рассчитанных весовых коэффициентах целевая функция оказалась равной 1.97×10^6 д.е., при этом сумма взвешенных невязок по уровням составила только 2×10^4 д.е. или 1% от всей целевой функции. То есть при этих значениях весов уровни фактически исключены из калибрации. По этой причине значения весов расходов были скорректированы, а именно – снижены на два порядка за счет поправочного коэффициента. Новое значение α_Q , используемого в уравнении (3), составило 0.005 вместо 0.5 д.е.

После корректировки весов был выполнен анализ чувствительности, по результатам которого на подбор оставлено 17 параметров из 32: 3 горизонтальных K_ϕ первого слоя; 8 зон проводимости; 6 зон перетекания. Далее была выполнена первая итерация калибрации. После ее завершения общее значение целевой функции равно 3020 д.е. При этом сумма невязок по уровням составляет 1056 д.е. или 35%. При таком соотношении доли двух групп наблюдений имеют один порядок и дальнейшая корректировка весов не требуется. Откалиброванная таким образом модель была использована для оценки влияния многолетнего изменения климата на баланс водоотбора. [Grinevskiy et al., 2018].

Однако, на откалиброванной модели не удастся правильно воспроизвести баланс водоотбора. Сокращение эвапотранспирационной разгрузки составляет только $\sim 9\,000$ м³/сут или 17% от дебита водозабора. В то же время, при калибрации был достигнут минимум целевой функции. Для попытки добиться точного воспроизведения на модели балансовых составляющих дополнен набор наблюдений. К замерам уровней и расходов в явном виде добавлена величина сокращения эвапотранспирации в $16\,400$ м³/сут, как априорная информация. Для нее невозможно заранее оценить оптимальную величину весового коэффициента. Приняв величину желаемой невязки баланса в 1% от общей величины водоотбора или 534 м³/сут, можно рассчитать весовой коэффициент априорной информации ω_{PR} по формуле (3). Учитывая, что априорное значение только одно, получаем $\omega_{PR} = 0.5 \frac{59}{1 \times 534^2} = 1 \times 10^{-4}$ сут²/м⁶. Для поиска оптимального значения ω_{PR} используется подбор. Модель была несколько раз откалибрована с одинаковыми настройками, изменялся только вес априорной информации. Кроме первичного значения ω_{PR} , были проверены варианты, отличающиеся на порядок, а именно: 1×10^{-3} ; 3.3×10^{-4} ; 1×10^{-4} ; 3.3×10^{-5} ; 1×10^{-5} сут²/м⁶.

После проверки всех вариантов оптимальным признано значение ω_{PR} , равное 3.3×10^{-4} сут²/м⁶. В этом варианте на откалиброванной модели получены следующие показатели:

- величина сокращения эвапотранспирационной разгрузки составила $13\,924$ м³/сут или 26% от дебита водозабора;

- невязка расхода Судогды на замыкающем створе составляет 6%;
- средняя невязка по уровням составила -0.3 м, стандартное отклонение 2.7 м.

Таким образом, за счет выполнения нескольких попыток калибровки и корректировки весовых коэффициентов в ходе работы над моделью, удалось объединить три типа данных – расходы рек, уровни подземных вод и изменение эвапотранспирационной разгрузки. Откалиброванная таким образом модель наиболее точно воспроизводит балансовую структуру водоотбора и имеющиеся наблюдения по сравнению с ранее разработанными вариантами.

Заключение

Калибровка является важным этапом работы над моделью и выполняется вручную или с помощью специализированных компьютерных программ. Ручная калибровка чаще применяется для простых геофильтрационных схем с небольшим количеством параметров, автоматическая применяется в более сложных случаях. При этом автоматическая калибровка не является самодостаточной. В практике используется промежуточный вариант, который можно назвать полуавтоматической калибровкой, когда результаты автоматизированного подбора параметров контролируются и корректируются специалистом. Именно этот вариант калибровки является перспективным рабочим инструментом, и он развивается в настоящей работе с использованием существующих общедоступных средств автоматической калибровки.

Для калибровки моделей гидрогеологических процессов могут быть использованы различные типы данных, такие как замеры уровней (напоров), температуры подземных вод, концентраций растворенных веществ, расходов поверхностных вод. Использование этих данных совместно в рамках единой целевой функции, определяющей качество воспроизведения моделью (моделями) реальных условий, позволяет ввести понятие совместной калибровки. В работе проведена типизация условий применимости совместной калибровки и разработана методика ее применения для решения с помощью моделирования практических задач охраны и использования подземных вод. На тестовых примерах показано, что совместная калибровка моделей при одновременном использовании данных различных типов и моделей различных процессов может быть эффективнее последовательной калибровки.

Для верификации разработанной методики совместной калибровки рассмотрены следующие типовые ситуации:

1. Совместное использование замеров уровней подземных вод и концентраций загрязнителей в них для калибровки моделей геофильтрации и геомиграции при решении задач охраны подземных вод от загрязнения.

2. Совмещение разномасштабных данных режимных наблюдений за уровнями и краткосрочных замеров понижений для калибровки геофильтрационных моделей, разрабатываемых для переоценки запасов подземных вод эксплуатируемых участков месторождений.
3. Совместное использование замеров расходов рек и уровней подземных вод для калибровки геофильтрационных моделей, разрабатываемых для оценки естественных и эксплуатационных ресурсов подземных вод в бассейнах малых рек.

Каждая из проанализированных ситуаций – обобщение результатов гидрогеологических исследований на реальных объектах.

Для первого случая на тестовой модели реального объекта показано, что последовательная калибровка с отдельным рассмотрением моделей геофильтрации и геомиграции в многопластовом потоке подземных вод не позволяет подобрать удовлетворительный набор значений параметров и воспроизвести наблюдения за концентрациями мигрирующего от локального источника загрязнения. Совместная калибровка этих двух моделей позволила воспроизвести оба типа наблюдений, при этом подобранные значения геофильтрационных параметров и активной пористости пород оказались очень близки к «истинным».

Для второго случая, на примере одного из водозаборов г. Воронежа, определены особенности совместной калибровки разномасштабных геофильтрационных моделей. Использование большего количества наблюдений при едином для всех моделей наборе параметров позволило увеличить количество калибруемых параметров и оценить их пространственную неоднородность. Применение совместной калибровки позволило согласовать и учесть разномасштабные по времени замеры, а именно наблюдения в процессе кустовых опытных откачек и многолетний мониторинг подземных вод при эксплуатации водозабора и обосновать прогнозную геофильтрационную модель для выполнения переоценки запасов, чего не удавалось достичь при использовании стандартного подхода к калибровке.

Для третьего случая, на примерах потоков подземных вод в долинах малых рек Хворостань и Судогда, совместная калибровка позволила одновременно откалибровать параметры питания подземных вод и проводимости донных отложений. Это позволило использовать разработанные модели при прогнозировании взаимосвязи подземных и поверхностных вод и изменения речного стока в связи с водоотбором (для бассейна Хворостани) и с учетом ожидаемых изменений климата (для бассейна Судогды). Полученные для рассмотренных объектов результаты свидетельствуют, что применение метода

совместной одномодельной калибровки разных типов наблюдений является перспективным приемом при обосновании моделей взаимосвязи поверхностных и подземных вод в бассейнах малых рек.

Таким образом, как на результатах тестовых примеров, так и на результатах работ, выполненных для реальных объектов в различных гидрогеологических условиях показана эффективность применения разработанной методики для различных типовых ситуаций применения методов совместной калибровки и принципиальная возможность ее применения для широкого круга прикладных модельно-ориентированных задач гидрогеологических исследований охраны и использования подземных вод.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова

1. **Самарцев В.Н.** Влияние вертикальной геофильтрационной неоднородности на результаты моделирования миграции загрязнения в латеральном потоке подземных вод // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2012. – № 6. – с. 56–59. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.648. Объем публикации 0.25 п.л., объем вклада соискателя 0.25 п.л.
2. **Самарцев В.Н.** Оценка геофильтрационной неоднородности водоносного горизонта методом автоматической калибровки модели // Инженерные изыскания. – 2013. – № 12. – с. 32–38. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.239. Объем публикации 0.4 п.л., объем вклада соискателя 0.4 п.л.
3. **Самарцев В. Н., Поздняков С. П.** Опыт калибровки геофильтрационной модели берегового водозабора путем совместного использования данных опытно-фильтрационных работ и результатов мониторинга в период эксплуатации // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – с. 36–43. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.436. Объем публикации 0.5 п.л., объем вклада соискателя 0.3 п.л.
4. **Муромец Н.Н., Самарцев В.Н., Хакимова А.А., Василевский П.Ю.** Влияние геофильтрационной неоднородности донных отложений на разгрузку подземных вод в бассейне малой реки в естественных и нарушенных условиях // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2018. – № 1. – с. 90–99. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.648. Объем публикации 0.6 п.л., объем вклада соискателя 0.2 п.л.
5. **Grinevskiy S, Filimonova E, Sporyshev V, Samartsev V, Pozdniakov S.** Evapotranspiration capture and stream depletion due to groundwater pumping under variable boreal climate conditions: Sudogda River Basin, Russia // Hydrogeology Journal. – 2018 – 26(8) – p. 2753-2767. Импакт-фактор в WoS (2020): 2.641. Объем публикации 1 п.л., объем вклада соискателя 0.2 п.л.
6. **Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А., Самарцев В.Н.** Модельный анализ наблюдаемых и прогнозных климатических изменений инфильтрационного питания подземных вод в бассейне малой реки // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2019. – № 3. – с. 78–86. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.648. Объем публикации 0.6 п.л., объем вклада соискателя 0.1 п.л.

7. Гриневский С.О., Спорышев В.С., Самарцев В.Н. Модельный анализ влияния климатических изменений на балансовую структуру эксплуатационных запасов приречного месторождения подземных вод // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. –2019. – №4. –с.45-54. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0.648. Объем публикации 0.6 п.л., объем вклада соискателя 0.2 п.л.

Иные публикации

8. Самарцев, В.Н., Муромец Н.Н. Опыт эпигнозного моделирования и калибрации модели для оценки запасов подземных вод берегового водозабора // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: Материалы Всероссийской конференции с международным участием с элементами научной школы, Томск, 23–27 ноября 2015 года. – Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – с. 283–286. Объем публикации 0.25 п.л., объем вклада соискателя 0,15 п.л
9. Самарцев В.Н. Калибрация пространственной геофильтрационной неоднородности с использованием метода пилотных точек // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы XII общероссийской конференции изыскательских организаций. – Москва, ООО «Геомаркетинг». – 2016. – с. 442–447. Объем публикации 0.4 п.л., объем вклада соискателя 0,4 п.л
10. Самарцев В.Н. Курбаниязова И.И. Построение карты проводимости по данным одиночных откачек (на примере Бельцевского месторождения подземных вод) // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы XIV общероссийской научно-практической конференции. – Москва, ООО «Геомаркетинг». – 2018. – с. 455–458. Объем публикации 0.25 п.л., объем вклада соискателя 0.15 п.л
11. Пат. 2765417 Российская Федерация, МПК E21B 43/28. Способ управления ресурсами подземных вод для добычи урана подземным выщелачиванием из слабообводненных рудных залежей / Волкова М.К., Худаярова А.Б., Василевский П.Ю., Каргин Т.Р., Самарцев В.Н.; Патентообладатель Акционерное общество "Хиагда" (АО "Хиагда"). – №2021118723; заявл. 2021.06.28; опубл. 2022.01.31.