

УДК 556.34

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-101-107

ОЦЕНКА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ОДНОВРЕМЕННОЙ КАЛИБРОВКИ СЕРИИ ПРОФИЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Дмитрий Дмитриевич Луканов¹✉, Иван Александрович Расторгуев²,
Сергей Владимирович Юрьев³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dmitrii_lukanov@mail.ru ✉

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия; stiar@mail.ru

³ АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия; s.yurev@hydroproject.ru

Аннотация. В статье дается описание алгоритма для одновременной калибровки нескольких геофильтрационных профильных моделей. В качестве параметров калибровки рассматриваются свойства проницаемости и граничные условия. Была разработана специальная процедура, выполняющая последовательный запуск каждой модели. В результате получены расчетные уровни по пьезометрам для каждой модели, которые передаются модулю PEST. С помощью него модуль PEST оценивает чувствительность модели (моделей) к значениям параметров и затем итерационно подбирает параметры так, чтобы они удовлетворяли критерию сходимости.

Ключевые слова: определение параметров, численное моделирование, PEST, Python, Feflow, геофильтрация, проницаемость, профильная модель

Для цитирования: Луканов Д.Д., Расторгуев И.А., Юрьев С.В. Оценка геофильтрационных параметров на основе одновременной калибровки серии профильных моделей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 101–107.

ESTIMATION OF GROUNDWATER FLOW PARAMETERS BASED ON SIMULTANEOUS CALIBRATION FOR A SERIES OF VERTICAL PLANAR MODELS

Dmitriy D. Lukanov¹✉, Ivan A. Rastorguev², Sergey V. Yurev³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dmitrii_lukanov@mail.ru ✉

² NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; stiar@mail.ru

³ JSC «Hydroproject Institute», Moscow, Russia; s.yurev@hydroproject.ru

Abstract. The article describes an algorithm for simultaneous calibration of several groundwater flow vertical planar models. Permeability properties and boundary conditions are considered as calibration parameters. A special procedure that runs each model sequentially was developed. The calculated levels for each model are the result of procedure work. These calculated levels of observation wells are transferred to the PEST module. The PEST module uses it to evaluate the sensitivity of the model(s) to parameter values and then iteratively selects parameters so that they could satisfy the convergence criterion.

Keywords: parameter estimation, numerical simulation, PEST, Python, Feflow, groundwater flow, permeability, profile model

For citation: Lukanov D.D., Rastorguev I.A., Yurev S.V. Estimation of groundwater flow parameters based on simultaneous calibration for a series of vertical planar models. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 101–107. (In Russ.).

Введение. Существенным этапом геофильтрационного моделирования является калибровка модели. Процесс калибровки состоит в проверке соответствия модельных данных реальным (натурным) гидрогеологическим условиям. Одним из вариантов калибровки является проведение серии прямых расчетов, на основе которых определяется соответствие расчетных уровней с измеренными уровнями, полученными по данным режимных наблюдений. Основной сложностью калибровки является направленный поиск оптимальных параметров, при которых расчетные и фактические данные различаются меньше всего. Направленный поиск может быть выполнен автоматически, с использованием программных

модулей, подключаемых извне к модели. Описание применения кодов для автоматической калибровки дано в работах [Свительман, 2017; Трофимова, 2017]. Примером таких модулей, упоминаемых в этих работах, может быть пакет Ostrich [Matott, 2017] или Pest [Doherty, 2015]. Последний пакет будет задействован в этой работе для осуществления калибровки в автоматическом режиме.

Ввиду различных причин не всегда удается построить трехмерную модель на участок строительства так, чтобы модель позволяла практически полностью учесть геологическое строение и граничные условия территории, поэтому одна трехмерная модель может быть заменена несколькими про-

фильными моделями. Отдельно калибровка каждой модели невозможна, так как в каждой из них есть сквозные параметры, принимающие участие во всех моделях. Единые параметры для всех моделей требуют одновременной калибровки. Однако, известные программные комплексы для моделирования не дают возможности проведения одновременной калибровки нескольких моделей и требуется разработка своего собственного средства, позволяющего осуществлять единовременную калибровку. Кроме того, доступный интерфейс вызова оптимизации в средах типа DHI Feflow или Modflow не всегда позволяет калибровать граничные условия. Но это можно сделать, используя внешние коды. Далее приводится описание применения внешних кодов, позволяющих калибровать одновременно параметры проницаемости и граничные условия для нескольких моделей. Модели разработаны в среде DHI Feflow в конечно-элементной постановке.

Целью данной работы являлось создание алгоритма одновременной калибровки нескольких моделей на примере трех профилей. Одной из сложностей являлось непостоянство граничных условий, связанных с быстрым изменением уровня акватории, обусловленных приливо-отливными явлениями. В результате была разработана процедура в коде на Python v2.7, с использованием API интерфейса Feflow IFM и оптимизационного модуля PEST, позволяющая калибровать не только фильтрационные параметры, но и граничные условия моделей.

Описание задачи. Постановка задачи основывается на расчете фильтрации из акватории через перемычку в котлован по трем профилям и определении водопроиточности по каждому из них. Для определения величины суммарного притока воды в строительный котлован, отделенный от акватории перемычкой со шпунтовыми стенками, и определения положения депрессионной кривой на период строительства одного строящегося Объекта были разработаны три профильные геофильтрационные модели. Эти модели обладают единым набором свойств проницаемости в соответствии с выбранными для расчетов геологическими разрезами (рис. 1). На разрезе 3-3 находится пьезометр 4, на разрезе 4-4 — пьезометры 8, 9 и 8-1, на разрезе 5-5 — пьезометры 12 и 12-1.

Фильтрационные параметры и граничные условия. В геологическом строении участка работ принимают участие современные песчаные и суглинистые отложения, техногенные отложения, а также магматические породы архейского фундамента.

Калибровка созданных геофильтрационных моделей состояла в проверке соответствия модельных данных реальным (натурным) гидрогеологическим условиям для заданной схематизации. Калибровка по единому для всех моделей набору параметров заключалась в проведении серии одновременных расчетов по профилям 3-3, 4-4, 5-5, на основе которых определялось соответствие расчетных уровней

с измеренными уровнями, полученными по данным режимных наблюдений.

Модели калибровались при стационарных расчетах для уровней, которые были не единовременно замерены в пьезометрах 4, 8, 8-1, 9, 12 и 12-1 (табл. 1).

В качестве набора параметров для калибровки моделей выступали фильтрационные свойства и граничные условия (уровень акватории).

В качестве фактических данных используются 4 скважины. При этом количество искомым параметров составило 17 штук, что существенно превосходит количество исходных данных. Четыре известных и 17 неизвестных — такая задача решается в рамках определенных априори диапазонов значений. В табл. 2 приведены калибруемые параметры и вариации значений.

Таблица 1
Уровни подземных вод, используемые при калибровке

№ пьезометра	Абс. отм. уровня в пьезометре, м	Разрез
04	−9,26	3-3
08	−4,96	4-4
8-1	−5,56	4-4
09	−3,32	4-4
12	−4,46	5-5
12-1	−8,02	5-5

Таблица 2
Калибруемые параметры и интервалы их значений

Элемент	Значения коэффициентов фильтрации, м/сут		
	Начальное значение	Min	Max
ИГЭ-501 выветрелая зона	2,8	0,01	3
ИГЭ-222	0,9	0,1	1
ИГЭ-422	0,2	0,1	5
ИГЭ-452	50	10	100
Стена в грунте* 3-3	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	0,5
Стена в грунте* 4-4	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	0,5
Стена в грунте* 5-5	0,05	10^{-6}	0,5
ИГЭ-501 сохранный зона	0,001	10^{-5}	0,01
ИГЭ-214	5	1	6,8
ИГЭ-215	0,7	0,3	4
ИГЭ-451	70	10	100
Валунно-галечниковый грунт	20	10,36	1590
ИГЭ-113	7	2,75	28,79
Шпунтовые стенки	0,005	10^{-6}	0,05
ИГЭ-211	22	20	100
ИГЭ-213	7	5	20
ИГЭ-236	0,05	0,01	0,5
Уровень, м			
Акватория	−0,1	−1,61	1,7

Примечание. *Стена в грунте представляет собой буронабивные сваи.

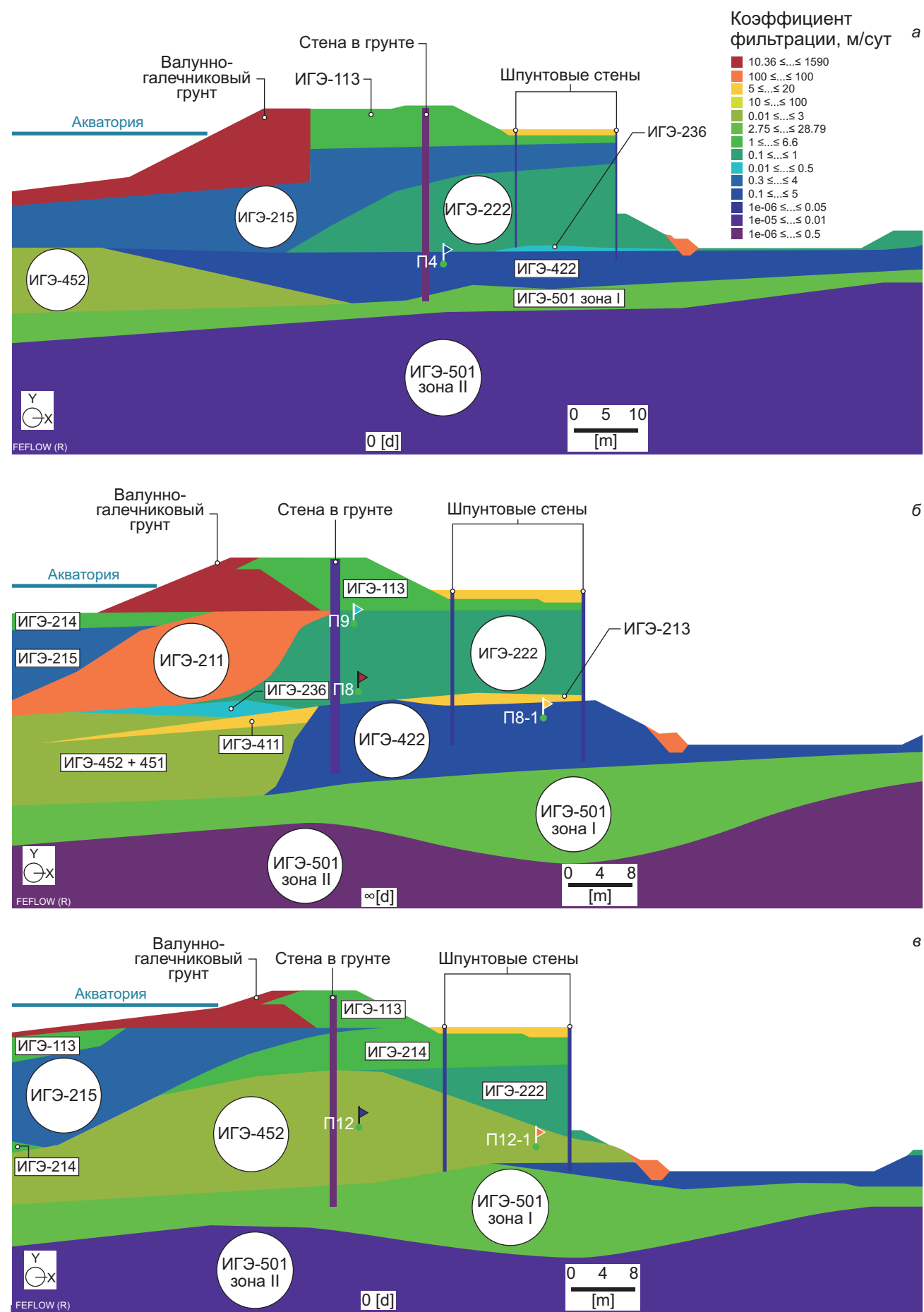


Рис. 1. Схематизация гидрогеологических условий на разрезе 3-3 (а), 4-4 (б), 5-5 (в)

Схема работы калибровочного алгоритма. Для единовременной калибровки 3-х профильных моделей для данного объекта была разработана специальная процедура. Процедура реализована в коде на Python v2.7 с использованием API интерфейса Feflow IFM и оптимизационного модуля PEST [Doherty, 2015]. Последний является открытым кодом и применяется для решения обратных задач, в том числе и геофильтрационных. Данный код позволил автоматизировать процесс калибровки.

Для первоначального запуска оптимизационного модуля PEST подготавливается контрольный файл настроек, который содержит в себе оптимизационные критерии, диапазоны изменения параметров, начальные значения параметров (табл. 2) и прочее.

Процедура выполняет три последовательных вызова моделей (1-й вызов для профиля 3-3, 2-й вызов для профиля 4-4 и 3-й для профиля 5-5). Перед вызовом моделей процедура считывает из файла исходные данные и начальные условия — значения параметров ИГЭ и уровня акватории. Результат работы процедуры — расчетные уровни по пьезометрам для трех разрезов, которые сохраняются в выходной файл. Этот выходной файл используется для вызова модуля PEST. С помощью него модуль оценивает чувствительность модели (моделей) к значениям параметров и затем итерационно подбирает параметры так, чтобы они удовлетворяли критерию сходимости.

Основным критерием сходимости, заложенным в процедуру выполнения оптимизации PEST, является среднеквадратичное отклонение, которое вычисляется следующим образом:

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (calc_i - obs_i)^2 \right]^{1/2},$$

где *calc* и *obs* — расчетные и фактические переменные (уровни воды), *N* — общее количество наблюдений.

Кроме критерия сходимости по среднеквадратичному отклонению задается количество вызовов (итераций) оптимизационной процедуры (35 рекомендуется по умолчанию). Третьим критерием остановки оптимизационных расчетов является разница между среднеквадратичными отклонениями на итерациях (текущей и предыдущей). При достижении одного из трех вышеописанных критериев оптимизация останавливается.

Блок-схема работы алгоритма показана на рис. 2. Зависимость функции качества калибровки (среднеквадратичного отклонения) от числа итераций показана на рис. 3.

Результаты калибровки и их обсуждение. Полученные по результатам калибровки параметры и модельные уровни приведены в табл. 3 и 4. Таким образом, среднеквадратичное отклонение между расчетными и наблюдаемыми уровнями составило

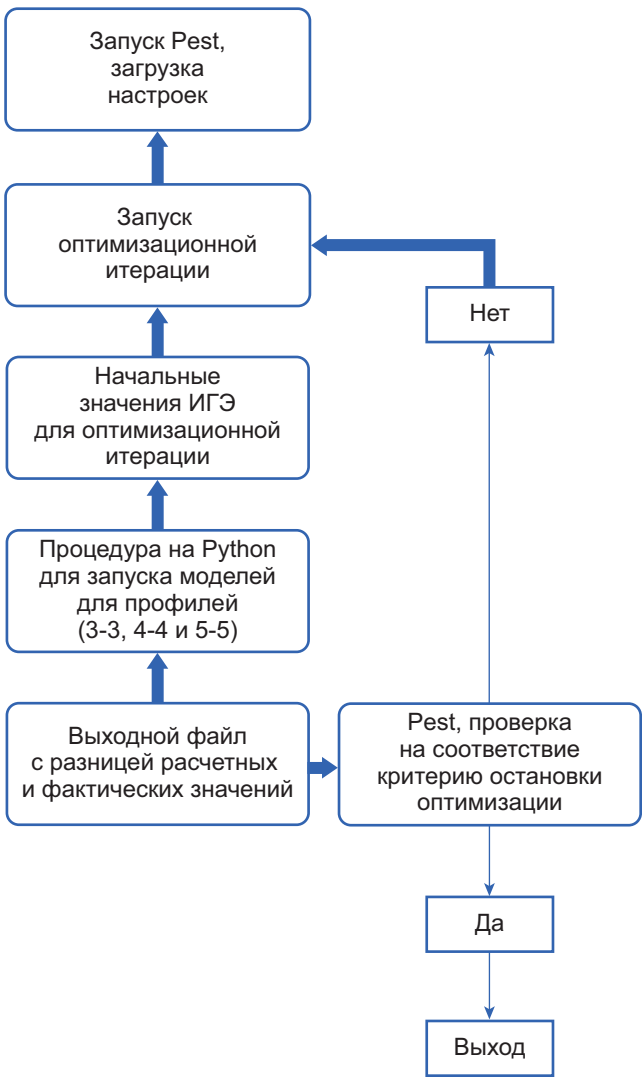


Рис. 2. Блок-схема работы калибровочного алгоритма

Таблица 3

Уровни на 13.03.2022			
Пьезометр	Измеренный уровень, м	Уровень на модели, м	Разница, м
12	−4,46	−5,09	0,63
12-1	−8,02	−7,52	−0,5
9	−3,32	−3,54	0,22
8	−4,96	−3,77	−1,19
8-1	−5,56	−7,52	1,96
4	−9,26	−7,59	−1,67
		ср. кв. откл	1,21

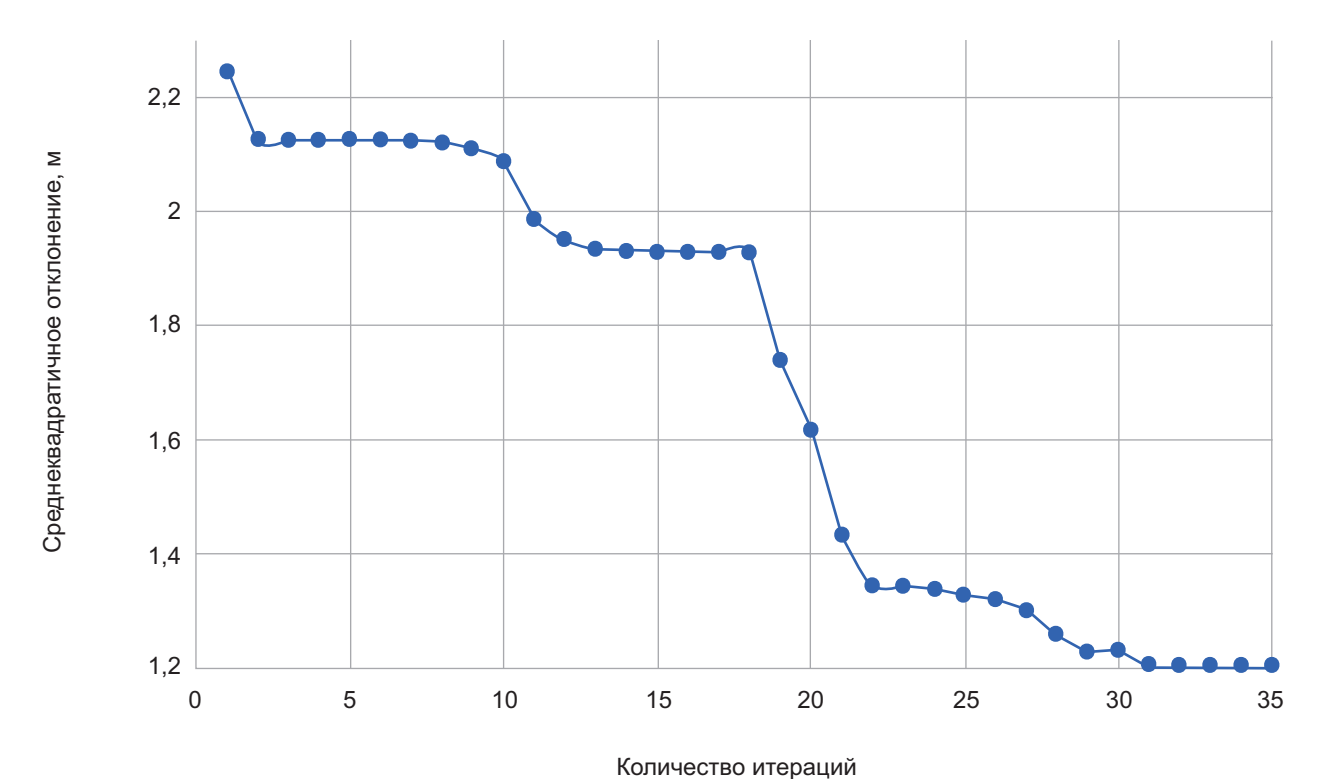


Рис. 3. Ход оптимизации при увеличении числа итераций

Таблица 4
Значения фильтрационных параметров,
полученных по результатам калибровки уровней

Параметр	Значение, м/сут
ИГЭ-501 зона I	3
ИГЭ-222	1
ИГЭ-422	0,1
ИГЭ-452	10
Стена в грунте 3-3	10 ⁻⁶
Стена в грунте 4-4	0,07
Стена в грунте 5-5	0,5
ИГЭ-501 зона II	0,001
ИГЭ-214	1,88
ИГЭ-215	0,3
ИГЭ-451	10
Валунно-галечниковый грунт	1000
ИГЭ-113	2,75
Шпунтовые стенки	0,01
ИГЭ-211	100
ИГЭ-213	20
ИГЭ-236	0,5
Параметр	Значение, м
Акватория	-1,61

1,21 м при данных калибруемых параметрах и вариациях их значений.

Различие проницаемостей стен в грунте для разрезов 3-3, 4-4 и 5-5 объясняется отсутствием сплошности их установки в коренные породы для разреза 4-4 и 5-5. Полученный в ходе калибровки уровень на акватории соответствует средним значениям колебания уровня на период замеров.

На основе полученных значений параметров были определены положения депрессионных кривых на всех трех разрезах при различных уровнях моря (рис. 4), а также оценены величины притока в строительный котлован через перемычку и выполненные дальнейшие прогнозные расчеты для обоснования проектных решений.

Выводы. Заложенный в коде на интерпретаторе Python 2.7 алгоритм позволил автоматизировать все вызовы, обращаясь последовательно то к вызовам моделей в среде Feflow, то к оптимизационному модулю PEST.

Кроме калибровки параметров проницаемости также было откалибровано граничное условие — уровень на акватории.

Данный подход с одновременной калибровкой сразу трех моделей может быть применен к любым моделям, разработанным как в среде DHI FEFLOW, так и в любой другой среде, например, Modflow. Количество моделей для единовременной калибровки при этом не ограничено. Но в любом случае, для лучшего качества калибровки необходимы единовременные замеры по уровневому режиму и по уровням на акватории.

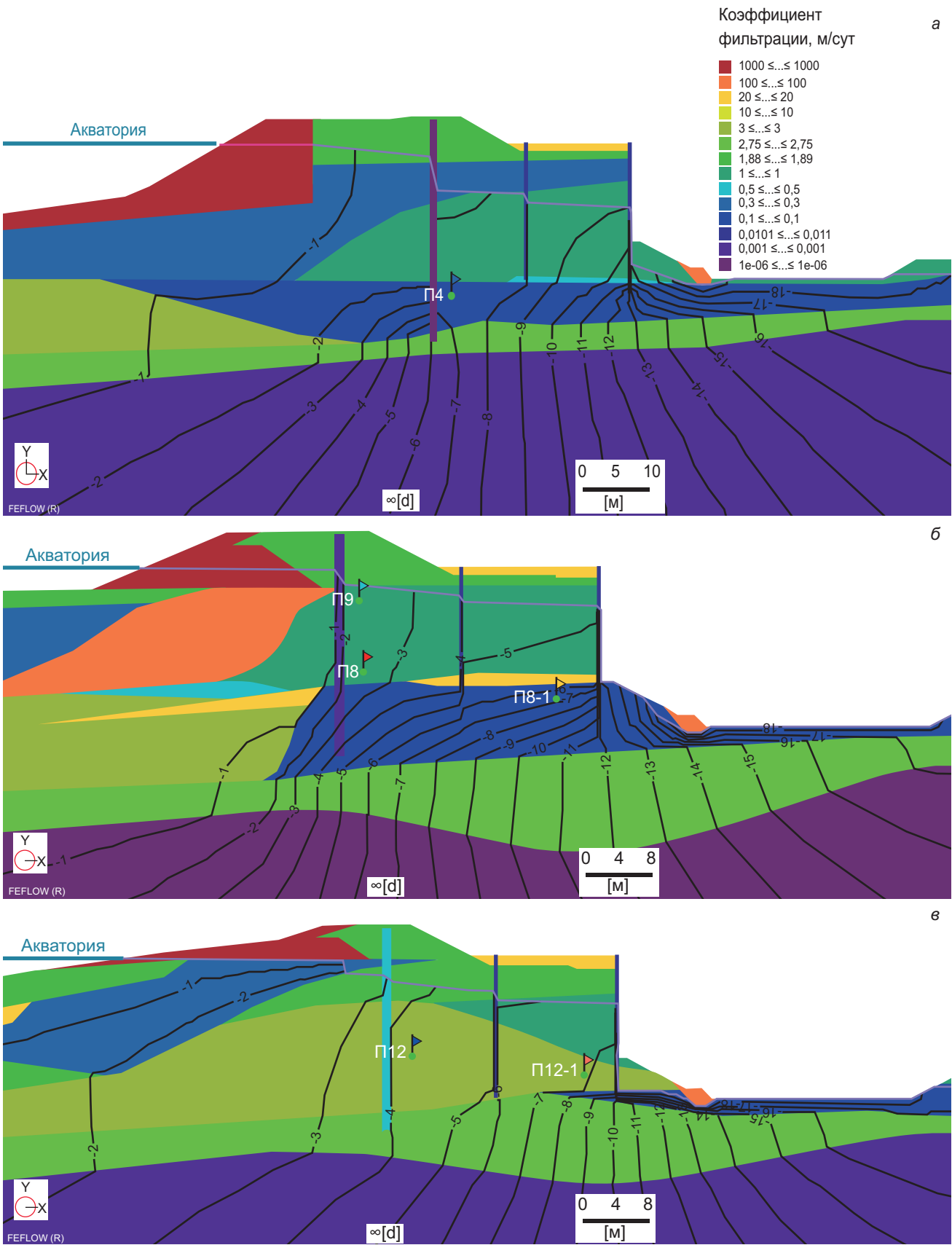


Рис. 4. Положение депрессионной кривой на разрезе 3-3 (а), 4-4 (б), 5-5 (в)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Свительман В.С., Савельева Е.А. Обзор программных средств анализа неопределенности / Препринт № IBRAE-2017-05. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 8 с.

Трофимова Ю.В., Свительман В.С., Расторгуев А.В. Определение положения источников загрязнения подземных вод по данным мониторинга // Инженерные изыскания в строительстве: Материалы Тринадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО Геомаркетинг, 2017.

Diersch H.-J.G. FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System—Reference Manual. Berlin: WASY GmbH, 2005.

Doherty J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Watermark Numerical Computing. Brisbane, Australia, 2017.

Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.

Matott L.S. OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User's Guide, Version 17.12.19. University at Buffalo Center for Computational Research. 2017. URL: <http://www.civil.uwaterloo.ca/envmodelling/Ostrich.html>

Статья поступила в редакцию 29.12.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 13.05.2024