

ISSN 0869-7809

Номер 6

Ноябрь - Декабрь 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2023

Колонка главного редактора 3

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

Оценка точности и достоверности инженерно-геологических моделей на основе принципов машинного обучения

*Р. Ю. Жидков, Н. В. Абакумова, Н. Н. Ракитина, Г. А. Лесников,
В. С. Рекун, А. К. Петров* 4

Анализ развития экзогенных геологических процессов на основе моделей математической морфологии ландшафта

А. С. Викторов, В. Н. Капралова, Т. В. Орлов 16

Вероятностный подход при моделировании устойчивости склонов: реализация и особенности

О. В. Зеркаль, И. К. Фоменко, Е. Н. Самарин 26

Моделирование порового давления воды в промерзающих дисперсных грунтах при миграции влаги

Чжоу Бичэн, А. В. Брушков, Ху ЦзяБо 39

Экспериментальные и модельные исследования фильтрационных потоков в районе строительства АЭС Пакш-2 (Венгрия)

*А. М. Никуленков, О. И. Новицкая, В. Г. Румынин, М. В. Вилькина,
А. А. Швари, Л. Н. Синдаловский* 47

Использование нейросети для выделения территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера

О. А. Вадачкория 62

Особенности гидрогеологического моделирования цифровых двойников эксплуатируемых коренных месторождений алмазов и сопряженных участков закачки

А. М. Янников, А. С. Стручкова 71

Метод прогноза сезонных изменений водопритока к подземным горным выработкам на основе модели водосбора с сосредоточенными параметрами

Л. И. Лесничий, К. И. Гриценко 79

Прогнозная численная геофильтрационная модель притока подземных вод в карьер Горевского ГОКа

Е. В. Леонтьева, Р. Ю. Сапачёв, А. А. Гришин 84

Contents

Number 6, 2023

Editor-in-chief column 3

MODELS IN ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

Accuracy and reliability assessment of engineering geological models based on machine learning

*R. Yu. Zhidkov, N. V. Abakumova, N. N. Rakitina, G. A. Lesnikov,
V. S. Rekun, A. K. Petrov* 4

Analysis of the exogenous geological process development based on the models of the mathematical morphology of landscapes

A. S. Viktorov, V. N. Kapralova, T. V. Orlov 16

Probabilistic approach in modeling slope stability – implementation and features

O. V. Zerkal, I. K. Fomenko, E. N. Samarin 26

Modeling of pore water pressure in freezing dispersed soils during moisture migration

Zhou Bicheng, A. V. Brushkov, Hu Jia Bo 39

Field and model research of the groundwater flows in the area of the PAKS-2 NPP construction, Hungary

*A. M. Nikulenkov, O. I. Novitskaya, V. G. Rumynin, M. V. Vil'kina,
A. A. Shvarts, L. N. Sindalovskii* 47

Using a neural network to identify territories at risk of natural emergencies

O. A. Vadachkoria 62

Geofiltration modeling of water flows to produced primary diamond deposits and injection in associated areas

A. M. Yannikov, A. S. Struchkova 71

Method of predicting seasonal variations in water inflow to underground mine workings using the water catchment model with concentrated parameters

L. I. Lecnichii, K. I. Gritsenko 79

Predictive numerical geofiltration model of groundwater inflow into the Gorevsky GOK quarry

E. V. Leont'eva, R. Yu. Sapachev, A. A. Grishin 84

ГЛУБОКОУВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ И АВТОРЫ ЖУРНАЛА!

DOI: 10.31857/S0869780923060036, EDN: BRFNVK

В соответствии с решением редакционной коллегии о периодическом выпуске тематических номеров журнала по наиболее актуальным, интересным или дискуссионным вопросам исследований в нашей области науки заключительный выпуск 2023 г. посвящен общей теме “Модели в инженерной геологии и гидрогеологии”.

Мы получили много рукописей на эту весьма, конечно, обширную тему, и неудивительно, что все они не поместились под обложку одного номера. Статьи, успешно прошедшие рецензирование, но не попавшие в этот номер, будут опубликованы в следующем выпуске – № 1 за 2024 год.

Журнал готов предоставить место для научных дискуссий, в том числе по совокупности статей в тематическом выпуске. Желающие вынести дис-

куссионные вопросы на обсуждение в нашем журнале приглашаются присылать короткие заметки, объемом до 2 стандартных страниц вместе с рисунками и таблицами (если уместны), оформленные по правилам журнала. Право отбора материалов для публикации остается за редколлегией.

Напоминаю, что следующий тематический выпуск будет посвящен дистанционным методам зондирования Земли при решении геоэкологических и инженерно-геологических задач, и мы пока еще принимаем статьи для этого номера.

Всех с наступающим Новым годом! Счастья и творческих успехов!

Главный редактор
Е.А. Вознесенский

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ
И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 624.131

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2023 г. Р. Ю. Жидков^{1,*}, Н. В. Абакумова^{2,**}, Н. Н. Ракитина¹, Г. А. Лесников¹,
В. С. Рекун¹, А. К. Петров¹

¹Московский городской трест геолого-геофизических и картографических работ,
Ленинградский пр. 11, Москва, 123040 Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119234 Россия

*E-mail: rzhidkov@mgt.ru

**E-mail: abakumova.nv@mail.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 29.10.2023 г.

Принята к публикации 20.11.2023 г.

Вопрос оценки достоверности инженерно-геологических моделей до сих пор недостаточно проработан в российской практике. Существенно большее внимание уделено методологии оценки достоверности и качества моделей в области геологии нефти и газа. Сопоставление этих методик с методологией оценки качества моделей машинного обучения показало сходство принципов и подходов, а следовательно, калибровка алгоритмов инженерно-геологического моделирования может выполняться с использованием инструментов оценки качества моделей машинного обучения. В статье описан опыт построения стратиграфо-генетической модели с использованием различных алгоритмических подходов с проведением количественной оценки достоверности моделирования на основе метрик машинного обучения. Показано, что задача построения трехмерной геологической модели может быть рассмотрена и как задача мультиклассовой классификации, и как задача регрессии, а предложенный подход сводит задачу разработки и калибровки алгоритмов к минимизации функции ошибок и позволяет отойти от субъективной оценки качества. Предложен показатель погрешности стратиграфо-генетической модели на основе расчета средних абсолютных ошибок и сопоставления с данными контрольной выборки. Отмечено, что предложенные подходы применимы при тестировании методологий инженерно-геологического моделирования в широком смысле, при этом наиболее сложна проверка прогнозных моделей любого вида. Сделан вывод о необходимости интенсификации разработки и наполнения баз инженерно-геологических данных, что позволит осуществить переход от субъективной экспертной оценки к применению современных подходов к моделированию сложно формализуемых сущностей и явлений.

Ключевые слова: машинное обучение, инженерно-геологическая модель, оценка качества моделей, кросс-валидация, трехмерное инженерно-геологическое моделирование

DOI: 10.31857/S0869780923060115, EDN: CURLAY

ВВЕДЕНИЕ

В 1979 г. британский статистик Дж. Бокс сформулировал ставший афористичным тезис “*все модели ошибочны, но некоторые из них полезны*” [13]. Изначально употребленный в отношении статистических моделей, к настоящему времени он стал общеупотребимым. Признавая его верность в отношении геологических моделей в широком смысле этого понятия, сделаем вывод о том, что качество модели должно определяться полнотой и достоверностью ее содержания. Для того, чтобы приносить пользу, модель должна, как минимум, не вводить своего потребителя в заблуждение.

Трехмерное инженерно-геологическое моделирование в современной постановке – относительно новое направление исследований и изысканий. При этом можно констатировать, что в российской практике не разработана адекватная система оценки точности и достоверности моделей и не выработаны методические обоснования для ее проведения, как, впрочем, не раскрыт вопрос содержания инженерно-геологических моделей.

Методы машинного обучения, в противовес большинству традиционных эмпирических и статистических методов, основываются на “обучении” по выборкам данных для выявления функ-

циональных закономерностей, в том числе в случаях, когда фундаментальные отношения между объектами неизвестны или их физический смысл труднообъясним. В отличие от явных алгоритмов, большинство методов машинного обучения не позволяют проследить ход “принятия решения” в процессе своей работы. Калибровка моделей машинного обучения происходит путем автоматизированного перебора параметров и минимизации функции ошибки, а проверка выполняется на контрольной выборке. Поэтому вопросы оценки качества моделей и работы алгоритмов можно признать основополагающими, а их проработка должна быть выполнена детальным образом.

В рамках этой статьи планируется решение следующих задач:

- определить понятие “инженерно-геологическая модель”;
- рассмотреть подходы к оценке инженерно-геологических моделей в зарубежной практике;
- рассмотреть подходы к качественной и количественной оценке достоверности и адекватности геологических моделей, применяемых в смежных геологических специальностях, и оценить их применимость в практике инженерно-геологического моделирования;
- оценить применимость при создании инженерно-геологических моделей подходов к оценке адекватности моделей, метрик и критериев, используемых в области машинного обучения;
- выполнить оценку достоверности стратиграфо-генетической модели на репрезентативном примере.

Понятия “инженерно-геологическая модель” и “оценка качества” в российской и зарубежной практике

Прежде чем говорить о качестве и достоверности, определимся с понятием “инженерно-геологическая модель”. В СП 47.13330.2012 “Инженерные изыскания для строительства. Основные положения”¹ инженерно-геологическая модель определяется как *совокупность информации о пространственном положении инженерно-геологических элементов в сфере взаимодействия объекта и геологической среды*. Однако в действующем в настоящее время СП 47.13330.2016² данное определение отсутствует.

В соответствии с СП 23.13330.2018 “Основания гидротехнических сооружений”³ *инженерно-геологическая модель – схематизированное отображение размещения в области влияния сооружения инженерно-геологических элементов, наделенных*

постоянными нормативными и расчетными значениями характеристик.

СП 333.1325800.2020 “Информационное моделирование в строительстве”⁴ содержит термин “Цифровая модель местности”, которая должна, в числе прочего, включать результаты инженерно-геологических изысканий. Вопросы о том, должна ли эта модель содержать результаты пространственной интерпретации данных в межскважинном пространстве, в каких цифровых форматах она должна быть предоставлена, какими должны быть иерархия и структура элементов модели, остаются дискуссионными. При этом в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 331 от 5 марта 2021 г. (с изменениями от 1 сентября 2023 г.), с 1.07.2024 г. такие модели должны стать обязательным объектом государственной экспертизы для объектов, финансируемых с привлечением средств бюджетов бюджетной системы РФ.

Г.Г. Болдырев определяет процесс трехмерного инженерно-геологического моделирования как *представление данных топологии (связности), геометрии и свойств геологической среды*. При этом автор отмечает, что процесс инженерно-геологического моделирования не требует восстановления геологической истории района изысканий, а скорее представляет собой интерполяцию между данными из горных выработок при соблюдении основных правил и принципов [1].

В 2022 г. Международной ассоциацией по инженерной геологии и окружающей среде (IAEG) опубликован обзор, содержащий теоретические и практические вопросы создания и применения инженерно-геологических моделей. В этом обзоре инженерно-геологическая модель определена как *комплексный набор данных, позволяющий логически оценивать и интерпретировать геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия, которые могут повлиять на проекты сооружений и их инженерные характеристики*. Она может включать в себя как концептуальные компоненты, так и результаты фактических наблюдений и испытаний, и может состоять из ряда взаимосвязанных моделей [14]. В нашей работе мы будем придерживаться этого определения как более полного и широкого.

В [14] приведен раздел по оценке качества инженерно-геологических моделей, где отмечается, что геологическая модель должна обеспечиваться достаточной точностью и надежностью, разумно приближаясь к фактическим условиям и характеристикам геологической среды. Повышение точности модели происходит за счет накопления инженерно-геологической информации на различных этапах исследований, которые проводятся по мере реализации проекта, в рамках которого про-

¹ <https://docs.cntd.ru/document/1200096789>

² <https://minstroyrf.gov.ru/docs/13629/>

³ <https://docs.cntd.ru/document/553863425>

⁴ <https://docs.cntd.ru/document/573514520>

изводится моделирование. Достоверность трехмерной геологической модели при этом определяется качеством и объемом данных, используемых при ее создании, методикой моделирования, а также квалификацией специалистов, осуществляющих ее построение.

Оценка качества построения модели зависит от уровня разработки трехмерной геологической модели:

- 1 уровень – упрощенная геологическая модель. Оценка качества осуществляется внутри подразделения организации, в котором построена модель (внутренний контроль);
- 2 уровень – базовая инженерно-геологическая модель. Оценка качества осуществляется специалистом из другого подразделения той же организации (внешний контроль);
- 3 уровень – детально проработанная инженерно-геологическая модель. Оценка качества осуществляется группой сторонних экспертов (независимая экспертиза).

Все результаты качественных и количественных оценок должны быть задокументированы. **Качественная оценка** модели осуществляется оценкой исходных данных моделирования, проверкой согласованности геологических границ, а также методом визуальной экспертной оценки построенной модели. **Полуколичественный метод** заключается в оценке компонентов модели с начислением баллов за качество построения каждого компонента. **Количественная оценка** включает в себя ряд методов, в том числе моделирование случайных полей и метод Монте-Карло, геостатистические методы, например, методы кригинга, стохастическое моделирование [14].

Принципы оценки качества геологических моделей, применяемые в области геологии нефти и газа

Исторически и технологически сложилось так, что сфера трехмерного геологического моделирования наиболее широкое развитие имеет в области нефтяной и газовой разведки. Начиная с конца 1980-х гг. в этой сфере разрабатываются и используются программные пакеты, предназначенные для трехмерного моделирования геологических структур [6]. В области инженерной геологии трехмерные модели на тот момент представляли собой концептуальные иллюстрации [14]. Современные программы, применяемые в нефтегазовой отрасли, обрабатывают результаты бурения скважин, сейсмической, гравитационной, магнитной, электрической разведки и радиометрии. Существующие методы и технологии работ позволяют в ходе геофизических исследований создавать трехмерные модели, которые отражают геологическую структуру и свойства подземных формаций и могут использоваться для проведе-

ния различных оценок и прогнозов. Разработаны основные методологические подходы к построению моделей, определены этапы их построения. Кроме того, выработан ряд критериев, как количественных, так и качественных, позволяющих судить о достоверности и адекватности моделей [5].

Качественные критерии основаны на субъективной экспертной оценке при рассмотрении трехмерной визуализации моделей, горизонтальных срезов и вертикальных сечений, вариограмм, гистограмм распределения показателей и т.д., а количественные – на вычислении параметров, численно отражающих степень сходства построенной модели и результатов расчета по фактическим данным. Построенная модель может быть оценена как адекватная в случае, если результаты оценки попадают в установленный интервал расхождения. В частности, для сейсморазведочных работ приняты следующие количественные характеристики ошибок структурных построений [8]:

– способ вычисления стандартного отклонения глубин, определенных по сейсмической карте, в точках скважины от скважинных отметок глубин горизонта (фактически – метод сравнения с эталонной поверхностью) [8];

– метод “выколов” или эталонной скважины. Оценка погрешности прогноза, основанная на вычислении ошибки при последовательном исключении одной скважины [8];

– метод скользящего экзамена, предусматривающий разделение всего набора данных на обучающую (70–90%) и контрольную (10–30%) выборки. Проводятся построение глубинно-скоростной модели среды с использованием только обучающей выборки и последующая оценка погрешности построений в точках контрольной выборки. Далее все повторяется на следующих контрольных выборках, так что, в конечном счете, охватываются все скважины [8];

– метод сопоставления распределения мощностей пород “куба литологии” со статистикой по данным буровых скважин [5].

Принципы оценки качества моделей машинного обучения

Машинное обучение находит широкое применение при решении задач классификации и регрессии. Классификация – это разбиение множества наблюдений на группы по двум (бинарная классификация) или более признакам (мультиклассовая классификация). Регрессия, в свою очередь, представляет собой зависимость математического ожидания случайной величины от одной или нескольких других случайных величин и может быть описана как линейной функцией, так и нелинейной.

Оценка сходимости прогнозируемых и фактических результатов выполняется с применением

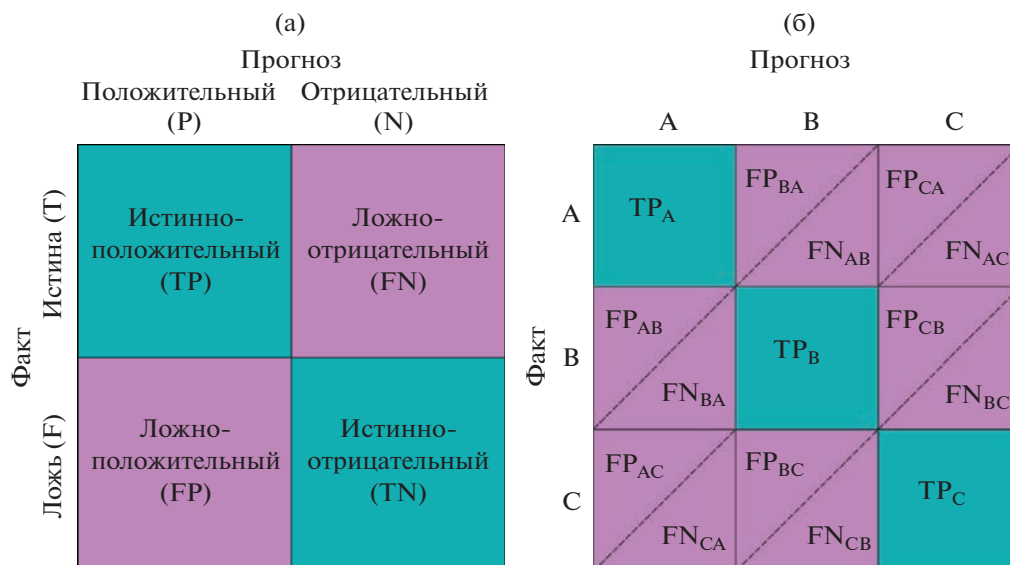


Рис. 1. Матрица ошибок для бинарной (а) и мультиклассовой (б) классификации.

критериев качества работы – метрик, которые отличаются в зависимости от типа решаемой задачи. Метрики для оценки решения задачи классификации основываются на матрицах ошибок (рис. 1). Прогнозируемые значения описываются в случае бинарной классификации как положительные (positive) и отрицательные (negative), а фактические – как истинные (true) и ложные (false). В таком случае получается четыре комбинации проверки прогнозируемых результатов:

- истинно-положительные (TP) – фактически положительные значения были распознаны как положительные;
- истинно-отрицательные (TN) – фактически отрицательные значения были распознаны как отрицательные;
- ложно-положительные (FP) – отрицательные значения были ошибочно распознаны как положительные;
- ложно-отрицательные (FN) – положительные значения были ошибочно распознаны как отрицательные.

Для мультиклассификации результат может быть расценен как положительный, когда спрогнозированный класс совпал с фактическим (TP_A, TP_B, TP_C), либо как отрицательный с указанием ошибочно присвоенного класса (рис. 1б). Например, результат FP_{CB} означает, что при работе алгоритма машинного обучения объекту выборки был ошибочно присвоен класс С при фактическом В.

Выбор метрик определяется задачами, которые должна решать разработанная модель машинного обучения и характером данных. Многие метрики дают некорректный результат в случае, если набор данных характеризуется неравномер-

ным распределением, т.е. имеет место дисбаланс классов. В табл. 1 приведены наиболее часто используемые метрики для бинарной классификации и их аналоги для мультиклассовой

Метрика *точность* (accuracy) хорошо работает при равномерном распределении классов и сообщает долю корректно классифицированных примеров. *Положительная прогностическая значимость*, *ППЗ* (precision), представляет собой вероятность того, что результат действительно положительный при предсказании положительного класса. *Полнота* (recall) – это доля примеров положительного класса, которые были корректно распознаны. *F-мера* (f-score) рассчитывается как среднее гармоническое ППЗ и полноты и позволяет сглаживать расчеты за счет исключения экстремальных значений. Остальные метрики, такие как индекс Юдена (Youden's index), сбалансированная точность (Balanced accuracy), коэффициент Коэна (Cohen's Kappa) и др., используются существенно реже при решении специфических задач [9, 15].

Для мультиклассификации аналогичные метрики вычисляются различными методами [12] (см. табл. 1).

Макро-усредненное (macro-averaged) определяется как среднее рассчитанных индивидуально для каждого класса метрик. И малые, и большие по количеству событий классы входят в расчет метрики с одинаковым весом. То есть одно событие в малом классе более значимо, чем одно событие в большом.

Микро-усредненное (micro-averaged) – рассчитывается метрика для всех событий, безотносительно классов. При таком подходе самый большой класс

Таблица 1. Основные метрики оценки качества классификаций

Бинарная классификация	Мультиклассификация	
<p>Точность (accuracy)</p> $AC = \frac{TP + TN}{FP + FN + TP + TN}$	<p>Микро-усредненная точность (micro-averaged accuracy)</p> $AC_{\text{micro}} = \frac{\sum_{i=1}^C TP_i}{\sum_{i=1}^C TP_i + \sum_{i=1}^C FN_i + \sum_{i=1}^C FP_i}$	<p>Макро-усредненная точность (macro-averaged accuracy)</p> $AC_{\text{macro}} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C AC_i,$ <p>где $AC_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i + FP_i}$</p>
<p>ППЗ (precision)</p> $PR = \frac{TP}{TP + FP}$	<p>Микро-усредненная ППЗ (micro-averaged precision)</p> $PR_{\text{micro}} = \frac{\sum_{i=1}^C TP_i}{\sum_{i=1}^C TP_i + \sum_{i=1}^C FP_i}$	<p>Макро-усредненная ППЗ (macro-averaged precision)</p> $PR_{\text{macro}} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C PR_i, \text{ где } PR_i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i}$
<p>Полнота (recall)</p> $R = \frac{TP}{TP + FN}$	<p>Микро-усредненная полнота (micro-averaged recall)</p> $R_{\text{micro}} = \frac{\sum_{i=1}^C TP_i}{\sum_{i=1}^C TP_i + \sum_{i=1}^C FN_i}$	<p>Макро-усредненная полнота (macro-averaged recall)</p> $R_{\text{macro}} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C R_i, \text{ где } R_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i}$
<p>F-мера (f-score)</p> $F_1 = 2 \cdot \frac{PR \cdot R}{PR + R}$	<p>Микро-усредненная f-мера (micro-averaged f-score)</p> $F_{\text{micro}} = 2 \cdot \frac{Pr_{\text{micro}} \cdot R_{\text{micro}}}{Pr_{\text{micro}} + R_{\text{micro}}}$	<p>Макро-усредненная f-мера (macro-averaged f-score)</p> $F_{\text{macro}} = 2 \cdot \frac{Pr_{\text{macro}} \cdot R_{\text{macro}}}{Pr_{\text{macro}} + R_{\text{macro}}}$

Примечание: C – количество классов.

Таблица 2. Основные метрики оценки качества регрессионных моделей

Название метрики	Формула	Описание/особенности	Единицы измерения
Среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE)	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	Применяются в случаях, когда важно избежать частных ошибок. Метрики “штрафуют” за большие в абсолютном выражении ошибки и, наоборот, снижают влияние малых ошибок. В метрике MSE за счет квадратичной зависимости аномальные значения непропорционально влияют на подсчет ошибки, поэтому метрика более чувствительна к ним	x^2
Корень из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error, RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$		x
Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $	Рассчитывается как среднее абсолютных разностей между фактическим и предсказанным значением, поэтому является линейной оценкой. Это значит, что все ошибки в среднем взвешены одинаково	x
Коэффициент детерминации (Coefficient of determination, R^2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}$	Показывает долю дисперсии зависимой переменной, объясненной с помощью регрессионной модели	ед.

Примечание: x – единицы измерения значений выборки.

оказывает наибольшее влияние на расчет метрики. Метрики малых классов могут затеряться.

При определении *средневзвешенного* (*weighted-averaged*) малые и большие классы входят в расчет метрики с весом пропорционально вкладу в выборку. Влияние каждого события зависит от размера выборки и соотношения классов.

Допускается использовать произвольный подход к осреднению метрик в зависимости от решаемых задач, если классовый состав выборки сбалансирован [3].

В задачах регрессии самыми популярными метриками являются среднеквадратичная MSE, корень из среднеквадратичной ошибки RMSE, средняя абсолютная ошибка MAE и коэффициент детерминации R^2 (табл. 2).

Коэффициент детерминации R^2 изменяется в диапазоне от $-\infty$ до 1. Если он равен 1, это означает, что сумма квадратов их отклонений равна 0. Такая ситуация соответствует идеальной модели, когда все точки наблюдений лежат точно на линии регрессии. Если коэффициент детерминации равен 0, то связь между переменными регрессионной модели отсутствует. При отрицательном значении коэффициента детерминации ошибка модели простого среднего становится меньше ошибки регрессионной модели. Таким образом, добавление в модель с константой некоторой переменной только ухудшает ее.

Кросс-валидация, или скользящий контроль – метод, предназначенный для оценки качества работы алгоритмов, широко применяемый в машинном обучении. Он помогает сравнить между собой различные алгоритмы построения модели (в самом широком смысле понятия) и выбрать наилучший для конкретной задачи. При создании инженерно-геологических моделей этот подход позволяет статистически обосновать методологию моделирования.

Метод заключается в последовательном многократном разбиении выборки исходных данных на две группы (обучающую и контрольную) и вычисления средней оценки качества моделей, построенных на разных обучающих выборках. В зависимости от способа разбиения могут быть следующие варианты кросс-валидации (список не исчерпывающий):

– *полный скользящий контроль*, когда выборка разбивается всеми возможными способами на две части $T' = T \setminus T^{l-t}$, где t и l – количество элементов в тестовой и обучающей выборках соответственно;

– *контроль по k -блокам*, когда обучающая выборка случайным образом разбивается на k непересекающихся блоков одинакового размера, затем обучает и оценивает модель дерева решений k раз, каждый раз выбирая новый блок для оценки и тренируясь на остальных $k-1$ блоках (как

правило, $k = 10$ или 5 в случае малого размера выборки);

– *кросс-валидация по отдельным объектам*, когда выборка разбивается на $n-1$ и 1 объект n раз;

– *случайные разбиения*, когда выборка разбивается в случайной пропорции [15].

Выбор метода кросс-валидации зависит от типа поставленной задачи, количества и соотношения классов, размера выборки, вычислительных мощностей.

При решении задач машинного обучения оценка качества работы алгоритмов выполняется не только и не столько при оценке результатов работы алгоритмов, но и в процессе обучения – при автоматизированном подборе параметров модели. При этом происходит минимизация функции ошибки, которая вычисляется на обучающей выборке с использованием выбранной метрики. Пользователь может управлять процессом, задавая *гиперпараметры*, которые не изменяются в процессе обучения. В широком смысле в качестве гиперпараметров можно рассматривать алгоритмы и их комбинации, выбор метрики для оценки ошибки, заданные диапазоны изменения параметров. В статье, опубликованной в 2021 г. [16], отмечается, что в обозримом будущем при анализе больших массивов данных процесс калибровки моделей в сфере наук о Земле должен уступить место технологиям глубокого обучения. Отметим, что этот подход не может быть реализован на локальном уровне, а требует разработки региональных баз данных и существенных вычислительных мощностей. Также признаем, что определенным ограничением для реализации этого подхода в настоящее время можно считать дефицит специалистов, компетентных как в области инженерной геологии, так и анализа данных и программирования, что должно учитываться при подготовке новых и обновлении существующих учебных планов в профильных высших учебных заведениях [7].

Оценка качества стратиграфо-генетической модели на примере участка в Москве

В соответствии с методологией, приведенной в руководстве [14], процесс создания инженерно-геологической модели участка должен начинаться с разработки концептуальной геологической (стратиграфо-генетической) модели. Эта методология хорошо согласуется с принципами генетического подхода к изучению грунтов, ставшего методологической основой современного грунтоведения [11]. С практической точки зрения при создании инженерно-геологической модели стратиграфо-генетическая модель представляет собой структурный каркас для оценки распределения инженерно-геологических характеристик в пространстве, которая в зависимости от задачи



Рис. 2. Геоморфологическая схема участка исследования (автор А.К. Петров).

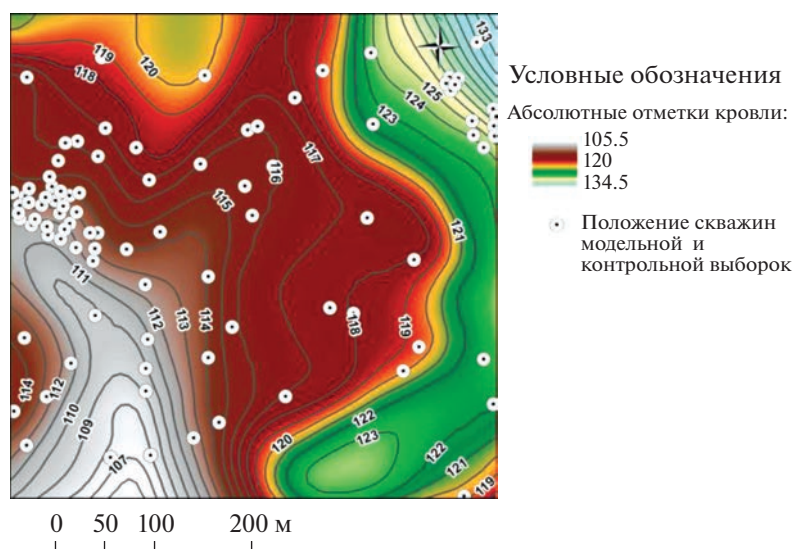


Рис. 3. Карта рельефа кровли дочетвертичных отложений (по материалам геологического атласа [2]).

может быть выполнена в детерминированном или стохастическом варианте. Кроме того, стратиграфо-генетическая модель служит основой для выполнения геофильтрационного моделирования. Таким образом, конфигурация стратиграфо-генетической модели может существенным образом повлиять на результаты дальнейших инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, и оценка ее качества — основополагающий этап в процессе инженерно-геологического моделирования.

Рассмотрим процедуру оценки качества с применением метода кросс-валидации на примере участка в центральной части Москвы. Участок ре-

презентативен для оценки, потому что характеризуется высокой степенью инженерно-геологической изученности и изменчивостью инженерно-геологических условий. На участке выделяется 7 геоморфологических элементов, включая пойму р. Москвы и ее погребенного притока (рис. 2), а рельеф дочетвертичных отложений характеризуется высокой расчлененностью, так как участок приурочен к борту доледниковой долины (рис. 3).

Моделирование и оценка качества моделей выполнялись на основе 95 буровых скважин глубиной от 5 до 140 м (в среднем 21 м). Средняя обеспеченность скважинами составила 4 выработки на гектар участка, однако, как видно на

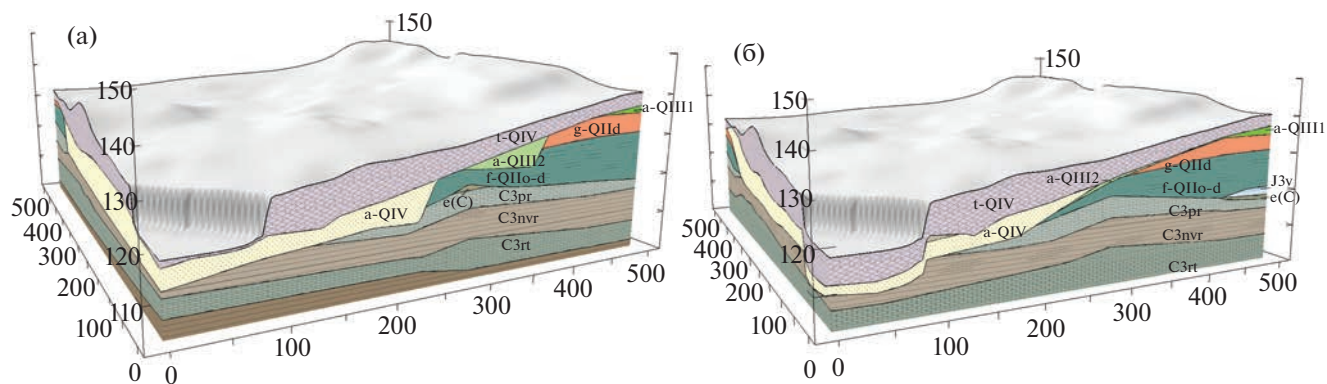


Рис. 4. Внешний вид трехмерной стратиграфо-генетической модели (вариант с соотношением модельной и контрольной выборки 1:1), построенной на основе идентичной выборки скважин: а – по авторской методике, б – полойно с применением триангуляционных построений.

рис. 2, 3, распределение скважин по площади неравномерно. Данные были получены в процессе проведения инженерно-геологических изысканий разных лет, обобщены и сведены между собой в рамках работы над проектами крупномасштабного геологического картирования г. Москвы и разработки региональной трехмерной геологической модели [2, 10].

Моделирование выполнялось в трех альтернативных алгоритмических реализациях:

- последовательное моделирование напластования с применением триангуляционного построения поверхностей;

- последовательное моделирование напластования с применением ординарного кригинга с авторподбором вариограммы;

- по комплексной авторской методике, разработанной для построения региональной трехмерной геологической модели г. Москвы, учитывающей историю техногенной трансформации и условия осадконакопления в московском регионе [4, 10]. Методология разрабатывалась в 2017–2019 гг., а калибровка модельных параметров осуществлялась в основном путем визуальной экспертной оценки корректности модельных разрезов в программе “Геонавигатор”.

Во всех трех случаях построение модели осуществлялось в автоматизированном режиме: в качестве программной среды для моделирования использовался пакет Safe Software FME с интеграцией модуля RBF (радиальная базисная функция) в составе свободно распространяемой версии библиотеки Alglib и пакета geoR для языка программирования R.

Оценка качества выполнялась с использованием метода кросс-валидации с пятикратным разбиением выборки на модельную и контрольную. Для оценки влияния плотности входных данных на точность моделирования разделение

на выборки выполнялось в трех соотношениях: 1:1, 7:3, 9:1. Таким образом, суммарно было построено 45 вариантов модели геологического строения участка с применением различных алгоритмов и на разных наборах данных.

Визуальная оценка результатов моделирования показывает общее структурное сходство построенных моделей, хотя и с локальными расхождениями. Например, на моделях, представленных на рис. 4, расхождения могут быть выявлены в части пространственной характеристики толщи техногенных отложений, смыкания речных террас, выявленных выветрелых зон в кровле каменноугольных отложений и конфигурации толщи верхнеюрских отложений. Отметим, что все результаты прошли проверку на соответствие входным данным, и расхождения проявляются в не обеспеченных входными данными блоках пространства моделей.

Построение геологической модели может быть рассмотрено и как задача классификации (определение принадлежности каждого элементарного блока модели к тому или иному стратиграфо-генетическому комплексу), и как задача регрессии (предсказание отметок и мощностей залегания пластов в каждой точке пространства).

Выполним оценку точности моделирования с применением классификационных и регрессионных метрик. Для анализа данных используем пакет Scikit-learn для языка программирования Python, содержащий инструменты для работы с методами машинного обучения.

Для оценки качества классификации выполним сопоставление классов (меток стратиграфо-генетических комплексов) в геологических скважинах контрольной выборки с классами в “виртуальных” скважинах, полученных на основе модели. Для этого проведем дискретизацию описа-

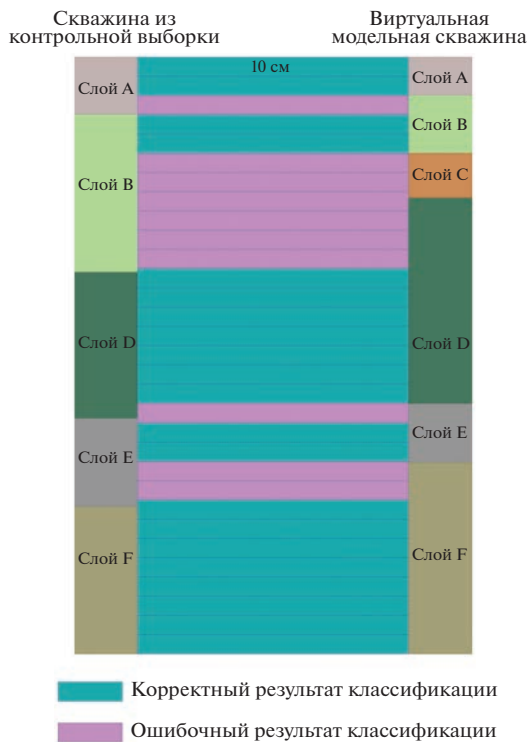


Рис. 5. Пример дискретизации контрольных и модельных скважин для оценки качества классификации.

ния как контрольных, так и виртуальных скважин с шагом 0.1 м (рис. 5).

В результате получим массив данных, содержащий координатную привязку и метки предсказанного и фактического класса. Отметим, что в выборке присутствует существенный дисбаланс классов (рис. 6). В данной задаче будем использовать микросредненную f -меру, поскольку для общей оценки работы алгоритма моделирования

важна каждая ошибка, независимо от размера класса (табл. 3).

Для оценки качества моделирования с применением регрессионных метрик выполним сопоставление модельных и фактических значений абсолютных отметок кровли (z) и мощности каждого геологического слоя (H). Вычислим среднюю абсолютную погрешность MAE для этих значений и возьмем их среднее арифметическое значение. В результате получим абсолютное значение показателя погрешности стратиграфо-генетической модели в метрах (табл. 4):

$$MAE_{mdl} = (MAE_z + MAE_H)/2,$$

где MAE_z – средняя абсолютная ошибка значений кровли геологических слоев в скважинах; MAE_H – средняя абсолютная ошибка значений мощности геологических слоев в скважинах.

ВЫВОДЫ

Предложенная методология оценки достоверности инженерно-геологических моделей основана на применении технологии кросс-валидации и метрик, регрессии и/или классификации. На наш взгляд, при оценке достоверности стратиграфо-генетических моделей, абсолютный показатель погрешности моделирования удобнее, так как не зависит от выбранной дискретизации и выражается в метрических единицах. В качестве преимуществ рассмотрения процесса моделирования, как задачи классификации, можно назвать возможность построения матриц ошибок, которые могут использоваться для тонкой отладки алгоритмов и в процессе инженерно-геологической схематизации.

Отметим, что оценка погрешности по вышеизложенной методике может быть выполнена как в отношении работы алгоритмов при автоматизи-

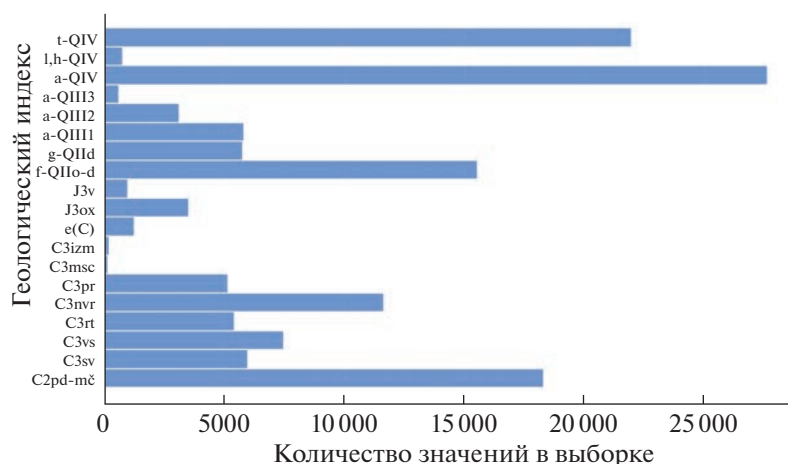


Рис. 6. Распределение значений классов в выборке.

Таблица 3. Результаты расчета микроусредненной f -меры для стратиграфо-генетических моделей

Алгоритм моделирования	Соотношение модельной и тестовой выборок		
	1:1	7:3	9:1
Последовательное моделирование напластования (триангуляция)	0.72	0.76	0.77
Последовательное моделирование напластования (кригинг)	0.74	0.76	0.79
Авторский алгоритм, учитывающий последовательность осадконакопления	0.75	0.78	0.81

Таблица 4. Результаты расчета показателя погрешности стратиграфо-генетической модели в метрах

Алгоритм моделирования	Соотношение модельной и тестовой выборок		
	1:1	7:3	9:1
Последовательное моделирование напластования (триангуляция)	1.53	1.46	1.45
Последовательное моделирование напластования (кригинг)	1.50	1.42	1.36
Авторский алгоритм, учитывающий последовательность осадконакопления	1.39	1.34	1.23

рованном построении моделей, так и при моделировании в специализированных программных пакетах в ручном режиме, при условии соблюдения разделения выборки на рабочую и контрольную. Однако такой подход применим либо в научных целях, либо при оценке квалификации специалистов, поскольку в практике изыскательской работы построение модели на неполном наборе данных вряд ли имеет смысл.

Рассмотренный в статье пример не претендует на обоснование методологии стратиграфо-генетического моделирования даже в условиях геологии Москвы, поскольку охарактеризован конкретный участок с определенным геологическим строением. Рассмотрение результатов, полученных в разных геологических условиях, — одно из направлений дальнейших исследований в этой области. Более того, мы рассчитываем, что выработанная методология оценки качества алгоритмов позволит усовершенствовать технологию моделирования, используемую при построении региональной трехмерной геологической модели Москвы с тем, чтобы повысить качество моделирования и оптимизировать работу алгоритмов. Предложенный подход сводит задачу разработки и калибровки алгоритмов к минимизации функции ошибок и позволяет отойти от субъективной оценки корректности геологического строения, хотя и не отменяет необходимость визуального контроля результатов моделирования.

В рамках данного исследования никак не рассматривался вопрос качества входных данных для модели. Использовалась выверенная и сведенная выборка данных, что позволило получить близкие характеристики точности вне зависимости от алгоритма моделирования. Мы предполагаем,

что качество и характер данных определяют результат в гораздо большей степени, чем алгоритмы интерполяции и моделирования, как бы откалиброваны они ни были, и планируем изучить этот вопрос в дальнейших исследованиях.

Предложенные подходы применимы при тестировании методологии инженерно-геологического моделирования в самом широком смысле. Граница применимости методологии проходит там, где исключается возможность проверяемости результатов моделирования — сопоставления модельного предположения с реальностью. В этом отношении наиболее сложна проверка прогнозных моделей любого характера. Поэтому крайне важно сейчас, когда для этого есть все технические возможности, организовывать сбор баз данных разнообразных инженерно-геологических данных, включая полевые и лабораторные испытания, результаты их обработки, выполненные на их основе прогнозные оценки и выводы, мониторинговые измерения разного рода, данные дистанционного зондирования Земли и т.д. Только при наличии больших данных в инженерной геологии будет возможен переход от субъективной экспертной оценки к применению современных подходов к моделированию сложно формализуемых сущностей и явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болдырев Г.Г.* Трехмерное моделирование и визуализация данных инженерно-геологических изысканий. Состояние вопроса и практическая реализация // *Инженерные изыскания*. 2022. Т. XVI. № 1. С. 8–26.
2. Геологический атлас Москвы (в 10 томах с пояснительной запиской). Масштаб 1:10 000 / Под ред.

- А.В. Антипова. М: Изд-во ГУП “Мосгоргеотрест”, 2012.
3. Гулин В.В. Методы снижения размерности признакового описания документов в задаче классификации текстов // Вестник Московского энергетического института. 2013. № 2. С. 115–121.
 4. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Рекун В.С. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы // Инженерная геология. 2023. Т. XVIII. № 1. С. 18–34.
 5. Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей. М.: ООО “ИПЦ “Маска”, 2008. 272 с.
 6. Закревский К.Е., Попов В.Л. История развития трехмерного геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 5. С. 89–100.
 7. Королев В.А. О задачах цифровизации и искусственного интеллекта в инженерной геологии // Инженерная геология. 2021. Т. XVI. № 1. С. 10–23.
 8. Левянт В.Б., Амшилов Ю.П., Глоговский В.М. и др. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки (2D, 3D) для подсчета запасов нефти и газа. М.: Министерство природных ресурсов. ОАО “Центральная геофизическая экспедиция”, 2006. 39 с.
 9. Михайличенко А.А. Аналитический обзор методов оценки качества алгоритмов классификации в задачах машинного обучения // Вестник Адигейского государственного университета. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. № 4 (311). С. 52–59.
 10. Технология трехмерного моделирования геологической среды и ее апробация на объектах жилищного фонда города Москвы по программе реновации // 75 лет инженерных изысканий в Москве / Под ред. А.Ю. Серова и др. Тверь: Талан Групп, 2019. С. 185–189.
 11. Трофимов В.Т., Королев В.А. О фундаментальных аспектах генетического подхода к изучению грунтов // Инженерная геология. 2019. Т. XIV. № 1. С. 8–19.
 12. Шенета Д.А., Головин Е.Н., Иванова М.С. Метрики качества алгоритмов машинного обучения в задачах мультиклассификации // Научная сессия ГУАП: сб. докладов научной сессии, посв. Всемирному дню авиации и космонавтики. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 08–12 апреля 2019 г. Часть II. СПб: ГУАП, 2019. С. 278–281.
 13. Box G.E.P. Robustness in the Strategy of Scientific Model Building / R.L. Launer, G.N. Wilkinson (ed.) // Robustness in Statistics – Academic Press. 1979. P. 201–236.
 14. Baynes F.J., Parry S. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication № 1. 2022. 129 pp.
 15. Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow, Sebastopol: OREILLY. 2019. 548 pp.
 16. Tsai W.P., Feng D., Pan M., et al. From calibration to parameter learning: Harnessing the scaling effects of big data in geoscientific modeling // Nature Communications. 2021. V. 12 (1). P. 1–13.

ACCURACY AND RELIABILITY ASSESSMENT OF ENGINEERING GEOLOGICAL MODELS BASED ON MACHINE LEARNING

R. Yu. Zhidkov^{a,#}, N. V. Abakumova^{b,##}, N. N. Rakitina^a, G. A. Lesnikov^a, V. S. Rekun^a, and A. K. Petrov^a

^a*State Budgetary Institution “Mosgorgeotrest”,
Leningradskii pr. 11, Moscow, 123040 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, Moscow, 119234 Russia*

[#]*E-mail: rzhidkov@mggt.ru*

^{##}*E-mail: abakumova.nv@mail.ru*

Assessing reliability of engineering geological models still requires further studies. Much more attention is paid to the methodology for assessing the reliability and quality of models in oil and gas geology. A comparison of the methods used in this field with the methodology for assessing the quality of machine learning models showed the similarity of principles and approaches. Therefore, the algorithms for engineering geological modeling can be justified and calibrated using tools for evaluating the quality of machine learning models. The article systematizes and analyzes the metrics used in solving problems and classification, and describes the methodology of using cross-validation techniques to assess the quality of algorithms. The practical experience of constructing a computer stratigraphic-genetic model using various algorithmic approaches is described: on the basis of triangulation constructions, using ordinary kriging with automated variogram composition and using the custom heuristic algorithm that considers the history of sedimentation and technogenic transformation of the territory. It is shown that the problem of three-dimensional geological modeling can be considered both as a classification and regression problem. The error index of the stratigraphic-genetic

model is proposed based on the calculation of the average absolute errors in determining the spatial position of geological layers. The proposed approaches are applicable to testing methodologies of engineering geological modeling in a broad sense, the verification of predictive models of any kind being the most difficult issue. It is emphasized that the development and filling of databases of various engineering and geological data should be intensified, including field and laboratory data, the results of their processing, forecast estimates and conclusions based on them, monitoring measurements of various kinds, remote sensing data, etc. The possibilities of processing and analyzing big data in engineering geology will allow us to move from subjective expert estimations to the application of modern approaches to modeling complexly formalized objects and phenomena using the capabilities of machine learning and artificial intelligence.

Keywords: *machine learning, engineering geological model, model precision measurement, cross-validation, three-dimensional engineering geological modeling*

REFERENCES

1. Boldyrev, G.G. [Three-dimensional modeling and visualization of engineering geological survey data. State-of-the-art and practical implementation]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2022, vol. XVI, no. 1, pp. 8–26. (in Russian)
2. [Geological atlas of Moscow (in 10 volumes with an explanatory note). Scale 1:10 000]. A.V. Antipov, Ed. Moscow, GUP “Mosgorgeotrest” Publ, 2012. (in Russian)
3. Gulin, V.V. [Methods of reducing the dimension of the characteristic description of documents in the problem of text classification]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2013, no. 2, pp. 115–121. (in Russian)
4. Zhidkov, R.Yu., Abakumova, N.V., Rekun, V.S. [Application of complex retrospective analysis in determining the configuration of man-made soil massifs on the example of Moscow]. *Inzhenernaya geologiya*, 2023, vol. XVIII, no. 1, pp. 18–34. (in Russian)
5. Zakrevskii, K.E., Maisyuk, D.M., Syrtlanov, V.R. [Evaluation of the quality of 3D models]. Moscow, ООО “ИPTS “Maska” Publ., 2008, 272 p. (in Russian)
6. Zakrevskii, K.E., Popov, V.L. [The history of the development of three-dimensional geological modeling as a method of studying oil and gas deposits]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, no. 5, pp. 89–100. (in Russian)
7. Korolev, V.A. [On the problems of digitalization and artificial intelligence in engineering geology]. *Inzhenernaya geologiya*, 2021, vol. XVI, no. 1, pp. 10–23. (in Russian)
8. Levyant, V.B., Ampilov, Yu.P., Glogovskii, V.M. et al. [Methodological recommendations on the use of seismic data (2D, 3D) for calculating oil and gas reserves]. Moscow, Ministry of Natural Resources. Central Geophysical Expedition, 2006, 39 p. (in Russian)
9. Mikhaichenko, A.A. [Analytical review of methods for assessing the quality of classification algorithms]. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 4 (311), pp. 52–59. (in Russian)
10. [Technology of three-dimensional modeling of the geological environment and its approbation at the objects of the Moscow housing stock under the renovation program]. In: [75 years of engineering surveys in Moscow]. A.Yu. Serov et al, Eds. Tver, Talan Group, 2019, pp. 185–189. (in Russian)
11. Trofimov, V.T., Korolev, V.A. [About the fundamental aspects of the genetic approach to the study of soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 2019, vol. XIV, no. 1, pp. 8–19. (in Russian)
12. Shepeta, D.A., Golovin, E.N., Ivanova, M.S. [Quality metrics of machine learning algorithms in multiclassification tasks]. In: [Proc. of the GUAP scientific session on World Aviation and Cosmonautics Day]. St. Petersburg, 2019, Part II, pp. 278–281. (in Russian)
13. Box, G.E.P. Robustness in the strategy of scientific model building. In: Robustness in statistics, R.L. Launer, G.N. Wilkinson, Eds. Academic Press, 1979, pp. 201–236.
14. Baynes, F.J., Parry, S. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. IAEG Commission 25 Publication, 2022, no. 1, 129 p.
15. Geron, A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Sebastopol, OREILLY, 2019, 548 p.
16. Tsai, W.P., Feng, D., Pan, M. et al. From calibration to parameter learning: harnessing the scaling effects of big data in geoscientific modeling. *Nature Communications*, 2021, vol. 12 (1), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26107-z>

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 551.4.012

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ ЛАНДШАФТА

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, В. Н. Капралова¹, Т. В. Орлов¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН)
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 01.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Цель статьи – показать целесообразность использования подходов математической морфологии ландшафта при анализе развития экзогенных геологических процессов (ЭГП). На примере эрозионно-термокарстовых равнин показано, что использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в условиях взаимодействия нескольких ЭГП. Эрозионно-термокарстовые равнины отличаются сложным взаимодействием двух процессов – термокарста и термоэрозии, характеризующимися постоянной генерацией новых очагов термокарстовых процессов и уменьшением числа термокарстовых очагов при спуске озер термоэрозией, непрерывным изменением условий развития новых очагов термокарстовых процессов за счет трансформации основной поверхности в поверхность хасыреев. На основе математической модели морфологической структуры показано, что на каждом из двух типов поверхности в пределах эрозионно-термокарстовых равнин устанавливается динамическое равновесие в процессах возникновения, роста и спуска термокарстовых озер. На примере абразионных берегов в криолитозоне показано, что использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ комплекса процессов развития термоцирков в условиях сложного взаимодействия их очагов. Показано, что в условиях относительного однородного по геологическим и геоэкологическим условиям абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся стабилизацией двух параметров: средней плотности расположения термоцирков и вероятностного распределения размеров термоцирков по простиранию склона. Получены: аналитическая зависимость между вероятностными распределениями размеров хорд образующихся молодых оползней и хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, и зависимость между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней. Закономерности были проверены на ряде участков на основе данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, термокарст, эрозионно-термокарстовые равнины, термоцирки, криолитозона

DOI: 10.31857/S0869780923060085, EDN: ZGOMEN

ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество исследований посвящено развитию экзогенных геологических процессов (ЭГП) на основе анализа, как современного состояния, так и ретроспективного анализа, а также прогностических построений.

Так, в большом количестве исследований затрагивается изучение термокарстовых процессов, при этом одним из возможных вариантов является моделирование термокарстовых процессов [8, 10, 12, 17–19]. Однако полноценное моделирование термодинамических процессов с учетом фазовых переходов отличается значительной сложностью.

Многие исследования посвящены исследованию оползневых процессов, при этом обширная группа работ из них – в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [9, 13–15]. В большом числе работ излагаются результаты изучения карстовых процессов (например, [1]), в том числе на основе вероятностных подходов [11]. Значительное количество исследований посвящено и другим видам экзогенных процессов (эоловым, эрозионным, просадочно-суффозионным и др.).

Однако выполненные исследования в значительной части характеризуются следующими особенностями:

- изучение влияния отдельных характеристик геологических условий на особенности процесса при значительно меньшем внимании, уделяемом общим особенностям протекания процесса в самых разных условиях;

- ограниченность использования количественных приемов при анализе развития ЭГП;

- преимущественно детерминированный подход при постановке и решении задач анализа процессов;

- относительно слабый учет взаимодействия различных процессов и разных очагов одного и того же процесса.

Представляется возможным, что продвижение в решении перечисленных проблем может быть частично осуществлено при использовании подходов математической морфологии ландшафта. Математической морфологией ландшафта называют направление ландшафтоведения, исследующее количественные закономерности построения мозаик (ландшафтных рисунков), образованных на земной поверхности природно-территориальными комплексами, и методы их математического анализа. Рассматриваемое направление возникло в российской науке о ландшафте в 1990-е годы [2–5, 7] и развивалось до настоящего времени, расширяя спектр охватываемых задач. В зарубежной географии направление с аналогичным названием стало развиваться только 2010-е годы, но оно по содержанию резко отличается от российского направления и относится не к науке о ландшафте, а к геоморфологии, не имея ничего общего по подходам к решению задач [16].

Ядром математической морфологии ландшафта являются математические модели ландшафтных рисунков, с которым связано ее обособление, и которое придает целостность рассматриваемому направлению, именно оно является общей основой решения многих разнообразных задач [2, 3]. Наиболее перспективный подход для развития математической морфологии ландшафта, как показали исследования, – использование теории случайных процессов. В настоящее время создан некоторый комплекс канонических математических моделей морфологических структур – математические модели морфологических структур территорий с широким развитием карстовых и просадочно-суффозионных процессов, аллювиальных равнин, эрозионных равнин, озерно-термокарстовых равнин, заболоченных и солончаковых равнин, ландшафтов с широким развитием оползневых процессов и ряда других.

Целью настоящей работы является показать целесообразность использования подходов математической морфологии ландшафта при анализе развития экзогенных геологических процессов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Базой для использования математической морфологии ландшафта при анализе развития ЭГП является то, что очаги ряда процессов одновременно представляют собой природно-территориальные комплексы и соответственно являются частью соответствующего ландшафтного рисунка рассматриваемой территории. Таким образом, данные закономерности и другая информация о ландшафтном рисунке одновременно могут быть интерпретированы при анализе расположения, размеров, времени возникновения и развития очагов, соответствующих ЭГП.

Подходы математической морфологии ландшафта позволяют вести анализ сложных ситуаций и учитывать многофакторность на основе вероятностного анализа, нередко делая акцент на выделении общих закономерностей развития ЭГП. Так, использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в сложных условиях взаимодействия нескольких процессов или их комплексов. Покажем это на примере анализа развития процессов на эрозионно-термокарстовых равнинах и процессов формирования и развития термоцирков в криолитозоне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эрозионно-термокарстовые равнины представляют собой волнистые или слабохолмистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью с вкраплением термокарстовых озер и хасыреев и развитием эрозионных форм. Озера и хасыреи имеют, как правило, округлые очертания и в беспорядке расположены в пределах равнины. Типичное изображение эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космической съемки приведено на рис. 1.

Развитие эрозионно-термокарстовых равнин происходит под воздействием комплекса разнонаправленных процессов:

- возникновение первичных термокарстовых понижений с водой (очаг термокарстового процесса),

- рост понижений (озер) под действием термоабразионных процессов,

- спуск озер эрозионными процессами с остановкой их роста,

- появление хасыреев за счет спуска озер.

Анализ материалов космических съемок показал, что в пределах эрозионно-термокарстовых равнин можно выделить два главных элемента:

- волнистые или слабохолмистые водораздельные поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью (“основная поверхность”),

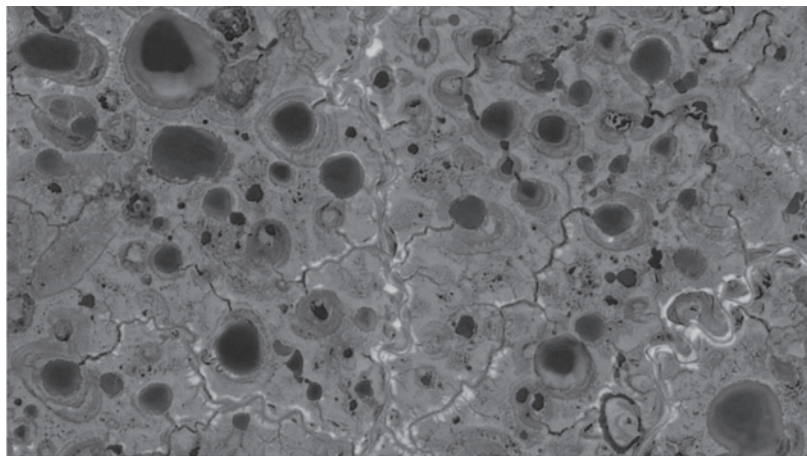


Рис. 1. Типичное изображение участка эрозионно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

– пониженные поверхности, занятые хасыреями, которые нередко сливаются друг с другом, образуя массивы.

Появление и рост термокарстовых озер происходит как в пределах основной поверхности, так и, как показал анализ материалов космических съемок, в пределах площади хасыреев и их массивов (вторичные озера). Вторичные озера отличаются несовпадением центра озера и центра хасырея, четкими очертаниями и тоже часто округлой формой. Кроме того, в хасыреях встречаются остаточные озера, сформировавшиеся в результате незавершенного спуска водной массы озера в процессе превращения в хасырей (рис. 2), они характеризуются расплывчатыми неправильными очертаниями и нерезкими границами.

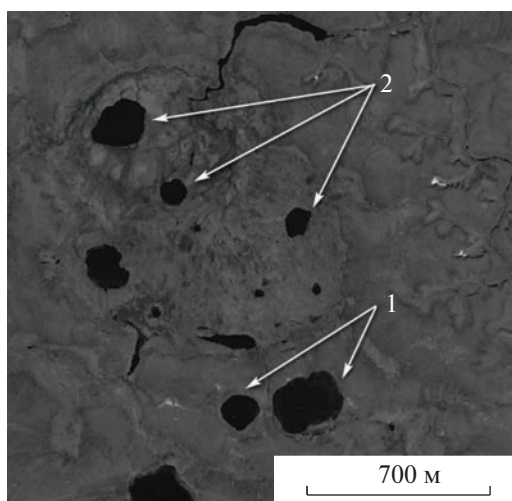


Рис. 2. Изображения различных типов термокарстовых озер на материалах космической съемки: озер на основной поверхности (1) и вторичных озер на поверхности хасыреев (2).

Таким образом, для территории характерно сложное взаимодействие двух процессов – термокарста и термоэрозии, характеризующееся следующими элементами:

- постоянная генерация новых очагов термокарстовых процессов,
- постоянное уменьшение числа термокарстовых очагов при спуске озер термоэрозией,
- постоянное изменение условий развития новых очагов термокарстовых процессов за счет трансформации основной поверхности в поверхность хасыреев.

Дополнительную сложность придает то, что новые термокарстовые понижения не возникают в пределах площади существующих озер, поэтому, чем больше заозеренность, тем меньше в этот момент генерируется новых первичных термокарстовых понижений.

Анализ развития территории может быть выполнен на основе математической модели морфологической структуры, базирующейся на следующих допущениях [6]:

1) возникновения первичных термокарстовых понижений (озер) на основной поверхности и на поверхности хасыреев за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка и площадки¹.

$$p_1 = \lambda_i \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t), \quad i = 0, 1,$$

$$p_k = o(\Delta s \Delta t), \quad k = 2, 3, \dots,$$

¹ Для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.



Рис. 3. Схема расположения ключевых участков.

где λ_0 и λ_1 – значения плотности генерации новых первичных термокарстовых понижений для свободной поверхности и поверхности хасыреев соответственно;

2) возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер;

3) радиус возникшего термокарстового понижения, как функция времени, представляет собой случайный процесс; изменение радиуса происходит независимо от других озер, и его скорость пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины;

4) в процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается;

5) возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями со средней плотностью расположения истоков γ_0 и γ_1 для свободной поверхности и хасыреев соответственно; вероятность наличия истока для пробной площадки зависит только от ее величины².

Проведенный математический анализ модели [6] позволяет получить следующие выводы об особенностях развития комплекса ЭГП на рассматриваемом типе территории.

Разработанный вариант модели показывает существование динамического равновесия в развитии ЭГП, прежде всего, в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер. Оно характеризуется стабилизацией при значительном времени развития таких параметров, как плотность

² Для малых площадок много больше, чем вероятность наличия более чем одного истока.

расположения термокарстовых очагов и распределения площади термокарстового очага; последние в условиях динамического равновесия отвечают интегрально-экспоненциальным распределениям отдельно на основной поверхности и поверхности хасыреев с функцией плотности распределения

$$f_i(x, \infty) = -\frac{1}{x \text{Ei}(-\gamma_i \epsilon_i)} e^{-\gamma_i x},$$

$$x \geq \epsilon_i, \quad i = 0, 1,$$

где ϵ_0, ϵ_1 – начальный размер озера соответственно для основной поверхности и поверхности хасыреев, γ_0, γ_1 – средняя плотность расположения истоков эрозионных форм соответственно для свободной поверхности и поверхности хасыреев, $\text{Ei}(-x)$ – интегрально-экспоненциальная функция.

При этом интегрально-экспоненциальные распределения, относящиеся к озерам основной поверхности, и к озерам, относящимся к хасыреям, для одного и того же участка в общем случае различаются по значениям основного параметра гамма. Эту разницу можно объяснить разной плотностью эрозионной сети на рассматриваемых двух типах поверхностей. Выводы подтверждаются статистическим анализом на 8 участках, расположенных в различных физико-географических условиях [6] (рис. 3); примеры распределений приведены на рис. 4.

Использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в сложных условиях взаимодействия очагов комплексов различных процессов. Покажем это на примере анализа развития процессов формирования и развития термоцирков в криолитозоне.

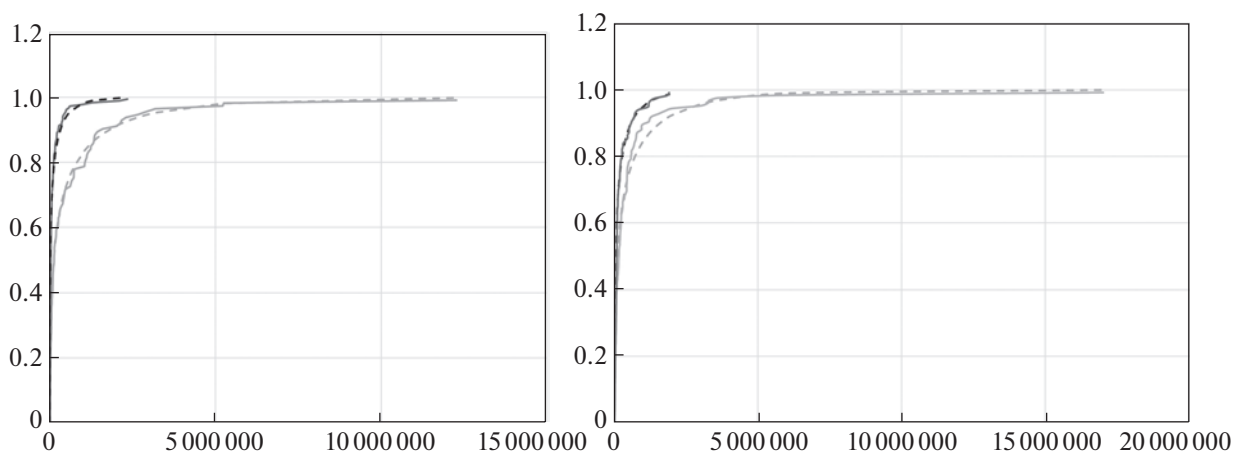


Рис. 4. Примеры графиков распределения площадей термокарстовых озер на участках 22 (слева) и 28 (справа); по оси x даны площади озер (m^2), по оси y – вероятность; черные линии – графики озер, возникших на поверхности массивов хасыреев, серые – на основной поверхности; сплошные линии – эмпирические распределения площадей, штриховые – теоретические интегрально-экспоненциальные.



Рис. 5. Типичное изображение абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне на материалах космической съемки.

Рассматриваемые участки представляют собой сочетание циркуобразных фрагментов (термоцирков) с развитием оползней разного возраста, как правило, с наличием обрывистого участка в нижней части склона, с развитием интенсивных термоабразионных и термоденудационных процессов. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Нередко на склоне развита эрозия. Таким образом, наблюдается сложный комплекс

процессов (особенно значимым из которых является оползневой), которые формируют термоцирк, представляющий собой своеобразный комплексный очаг ЭГП. Типичный вид участка абразионного берега представлен на рис. 5.

Характерная особенность верхней части оползней на границе с прилегающей водораздельной поверхностью – наличие дуг, ограничивающих оползневое тело и являющихся одновременно его границей с водораздельной поверхностью. Не-

сколько схематизируя, главнейшие морфологические особенности оползневого тела в рассматриваемой области описываются, прежде всего, длиной хорды, которая соединяет концы дуги и длиной дуги, которая в значительной мере коррелирует с длиной хорды.

При развитии на склоне происходят следующие основные процессы:

- формирование нового оползневого тела (термоцирка) и соответствующих дуг и хорд,

- стирание части старых (уже существующих) термоцирков и оползневых тел с коррекцией соответствующих дуг и хорд,

- исчезновение термоцирка и оползневого тела и, соответственно, его дуги и хорды в случае полного стирания новым оползневым телом.

Таким образом, наблюдается сложная стохастическая картина взаимодействия комплексных очагов процессов (термоцирков) с частичным или полным стиранием уже существующих очагов с появлением новых, которые в свою очередь становятся объектом дальнейшего стирания.

Анализ развития ЭГП на подобной территории может быть выполнен на основе математической модели морфологической структуры берега, основным элементом которой являются термоцирки [4]. Модель базируется на следующих допущениях:

1) вероятность появления новых дуг (в количестве $k = 1, 2, \dots$) $p_k(\Delta l, \Delta t)$ за время Δt с центральной точкой на отрезке береговой линии Δl определяется только величинами временного интервала и отрезка³

$$p_1(\Delta\lambda, \Delta t) = \lambda\Delta\lambda\Delta t + o(\Delta\lambda\Delta t),$$

$$p_k(\Delta\lambda, \Delta t) = o(\Delta\lambda\Delta t), \quad k > 1;$$

2) хорды дуг возникающих оползней имеют постоянное распределение $F_0(x)$.

Математический анализ модели позволил получить следующие выводы [4].

В условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, которое характеризуется стабилизацией двух характеристик:

- средней плотности расположения термоцирков,

- вероятностного распределения размеров термоцирков по простиранию склона.

³ При этом вероятность появления более одного оползня (дуги) с центральной точкой на этом отрезке за этот же временной интервал много меньше, чем вероятность появления одного.

В процессе анализа модели получены:

- аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями:

$$f_t(x) = \frac{f_0(y) + \frac{4M\xi_0}{M^2\xi_0} [1 - F_0(y)]}{1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0}},$$

где $M\xi_0, M^2\xi_0$ – математическое ожидание и момент второго порядка размеров хорды образовавшегося молодого оползня соответственно,

- зависимость между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней:

$$\gamma^{(\infty)} = \frac{2}{M\xi_0} \left[1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0} \right].$$

Кроме математического анализа были выполнены эмпирические исследования длин хорд оползней на конкретных участках, включающие получение выборок длин хорд для оползней каждого участка и их сопоставление с теоретическими распределениями для выявления характерных особенностей распределений⁴.

Выбор ключевых участков выполнен на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего геолого-геоморфологических условий. В итоге было выбрано 12 участков протяженностью 2.5–10.1 км, имеющих в целом прямолинейное простирание (рис. 6) и расположенных в пределах береговой линии полуостровов Канин нос и Ямал, острова Колгуев, Хайпудырской губы.

Результаты статистической обработки по всем участкам приведены в табл. 1.

Анализ сходства эмпирических распределений длин хорд, стрелок, радиусов кривизны с различными видами теоретических распределений (нормальное, логнормальное, гамма-распределение и экспоненциальное) дает интересные результаты. На всех участках на уровне значимости 0.99 наблюдается один и тот же тип распределения – логнормальное. Это выполняется при значительной разнице значений параметров распределения. Гамма распределение также соот-

⁴ Выполнено совместно с М.В. Архиповой, В.В. Бондарь, Т.В. Гониковым.

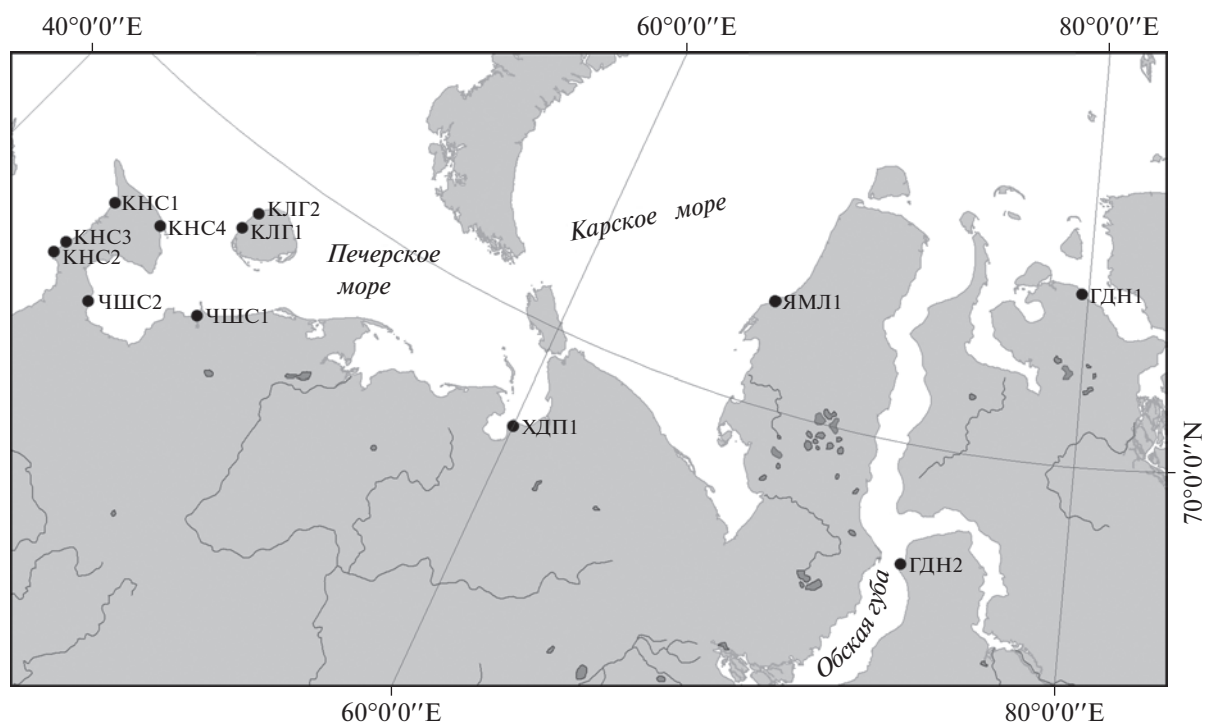


Рис. 6. Схема расположения ключевых участков.

ветствует эмпирическим данным, но несколько хуже. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке.

На рис. 7 показаны примеры соответствия эмпирических распределений и теоретических логнормальных распределений.

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных по выборкам длин хорд оползней на ключевых участках

Участок	Объем выборки	Нормальное распределение			Логнормальное распределение			Гамма-распределение		
		среднее	стандарт	p	среднее логарифма	стандарт логарифма	p	λ	α	p
КНС1	183	50.3	43.2	0.000	3.675	0.666	0.288	22.66	2.22	0.015
КНС2	181	59.6	43.0	0.000	3.881	0.639	0.241	23.18	2.57	0.010
КНС3	181	22.8	15.1	0.000	2.951	0.586	0.782	7.63	2.99	0.131
КНС4	159	45.6	27.1	0.000	3.678	0.529	0.339	12.40	3.68	0.153
ЯМЛ1	108	18.0	11.3	0.000	2.751	0.504	0.574	4.71	3.81	0.314
КЛГ1	113	24.12	89.12	0.057	3.108	0.156	0.254	3.51	6.87	0.331
КЛГ2	108	25.49	104.96	0.02	3.16	0.151	0.923	3.74	6.80	0.64
ХПД1	111	30.77	118.3	0.309	3.36	0.14	0.694	3.93	7.82	0.842
ЧШС1	290	22.58	114.93	0	3.004	0.235	0.015	4.91	4.60	0.037
ЧШС2	278	14.83	99.96	0	2.532	0.312	0.545	4.622	3.21	0.113
ГДН1	190	14.29	40.116	0	2.564	0.195	0.658	2.637	5.42	0.305
ГДН2	319	21.55	343.64	0	2.832	0.449	0.235	9.56	2.25	0.006

Примечание. λ – масштабный параметр, α – параметр формы, p – параметр согласия распределений (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$).

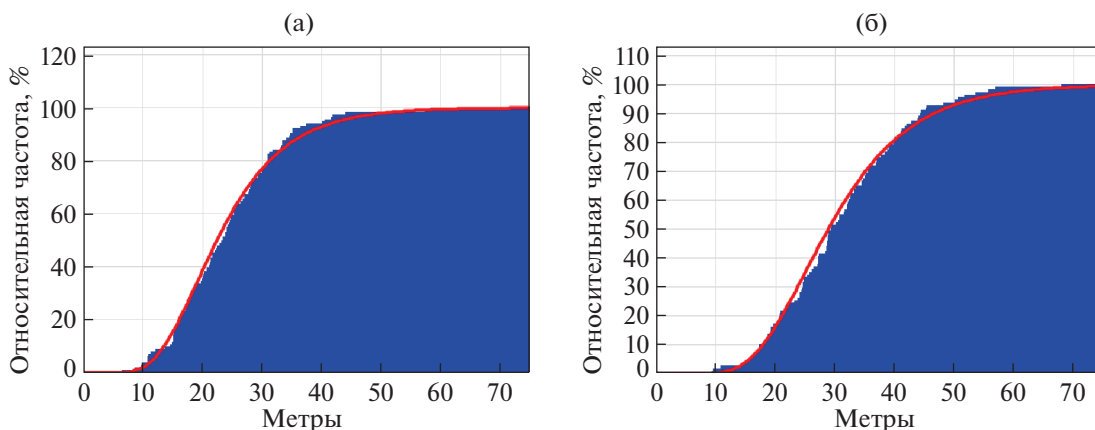


Рис. 7. Пример соответствия эмпирических распределений (синий контур) и теоретических (красная линия) логнормальных распределений по ключевым участкам (а – КНС1, б – КНС2).

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет получить следующие выводы.

Применение подходов математической морфологии ландшафта основывается на анализе ландшафтных рисунков, элементами которых являются природно-территориальные комплексы, отвечающие очагам экзогенных геологических процессов.

Использование подходов математической морфологии ландшафта базируется на количественном анализе ситуаций на основе вероятностных моделей, прежде всего теории случайных процессов.

Применение подходов математической морфологии ландшафта позволяет проводить анализ сложных ситуаций в развитии экзогенных геологических процессов; в частности, к ним относятся случаи сложного взаимодействия процессов с формированием противоположных тенденций, случаи возникновения динамического равновесия в развитии процессов, случаи сложного взаимодействия различных возникающих очагов процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М: Тратек, 1998. 220 с.
3. Викторов А.С. Математические модели ландшафтных рисунков // Изв. ВГО. Т. 124. Вып. 1. 1992. С. 75–83.
4. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне // Геоэкология. 2022. № 6. С. 28–36.
5. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
6. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Развитие модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе использования материалов космической съемки // Исследование Земли из Космоса. 2023. № 3. С. 58–69.
7. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. 2016. М.: РУДН, 232 с.
8. Мельников В.П., Хименков А.Н., Брушков А.В. и др. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования. Новосибирск Академ. Изд-во ГЕО, 2010 390 с.
9. Новиков В.Н., Федорова Е.В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1989. № 1. С. 64–68.
10. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Левашов А.В., Сергеев Д.О. Нетемпературные факторы теплообмена деятельного слоя с атмосферой // Матер. третьей конференции геокриологов России, Москва, 1–3 июня 2005 г. Т. 1. М.: МГУ, 2005. С. 86–91.
11. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
12. Шур Ю.Л. Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
13. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. № 012003.
14. Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A., Katalov A.M. et al. Erosion of permafrost coasts of Kara sea near kharasavey cape, Western Yamal // Earth's Cryosphere. 2017. Т. 21. № 6. С. 73–83.
15. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on re-

- motely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
16. *Daya Sagar B. S.* Mathematical Morphology in Geomorphology and GISci. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013. 546 p.
17. *Ling F., Zhang T.* Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // J. of Geophysical Research. 2003. 108. 4511. <https://doi.org/10.1029/2002JD003014>
18. *Ling F., Wu Q., Zhang T., Niu F.* Modelling Open-Talik Formation and Permafrost Lateral Thaw under a Thermokarst Lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau // Permafrost and Periglac. Process., 2012. V. 23. № 4. P. 312–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1754>
19. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W.* Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea Region // Permafrost and Periglac. Process., 2001. V. 12. № 2. P. 191–202. <https://doi.org/10.1002/ppp.387>

ANALYSIS OF THE EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT BASED ON THE MODELS OF THE MATHEMATICAL MORPHOLOGY OF LANDSCAPES

A. S. Viktorov^{a, #}, V. N. Kapralova^a, and T. V. Orlov^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: vic_as@mail.ru*

The paper aims to show the efficiency of applying the approaches used in the mathematical morphology of landscapes to the analysis of exogenous geological process development. Taking thermokarst plains with fluvial erosion as an example, it is shown that the approaches of the mathematical morphology of landscapes permit analyzing the terrain development under complex conditions of several interacting exogenous geological processes. Thermokarst areas develop under the impact of two interacting processes, i.e., thermokarst and fluvial thermoerosion. They include the following stages: constant generation of new thermokarst foci, constant decrease in the number of the thermokarst foci, when lakes are drained by thermoerosion, constant change in the conditions for the development of new thermokarst foci due to the transformation of the main surface into the khasyrei surface. The approaches of the mathematical morphology of landscapes revealed that each of the two types of surface within the thermokarst plains with fluvial erosion reached a dynamic balance upon the emergence, growth, and drainage of thermokarst lakes. Taking the formation and development of thermal cirques on abrasion shores within the permafrost zone as an example, it is shown that the approaches of the mathematical morphology of landscapes make it possible to analyze a set of processes for thermal cirques development under complex interaction of their foci. Based on the analysis of the mathematical model of the formation and development of thermal cirques, it is shown that in conditions of an abrasion slope that is relatively homogeneous in terms of geological and geocryological conditions, a dynamic balance is reached. It is characterized by stabilizing two parameters: the average density of thermal cirques and the probabilistic distribution of the thermal cirque size along the slope strike. An analytical relationship was obtained between the probabilistic distributions of chord sizes of the forming young landslides and all presented landslides, including partly erased ones by the later landslides; and the relationship between the average statistical forms of landslides along the coastline and the distribution parameters of the chord sizes of the forming young landslides. The obtained regularities were tested at several sites based on remote sensing data.

Keywords: *mathematical morphology of landscape, thermokarst, erosional and thermokarst plains, thermal cirques, permafrost zone*

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. [Collapses and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, prediction and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
2. Viktorov, A.S. [Mathematical morphology of landscape]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 220 p. (in Russian)
3. Viktorov, A.S. [Mathematical models of landscape patterns]. *Izvestiya VGO*, vol. 124, no. 1, 1992, pp. 75–83. (in Russian)
4. Viktorov, A.S. [Modeling of morphological features of abrasive shores with the development of landslide processes in the cryolithozone]. *Geoekologiya*, 2022, no. 6, pp. 28–36. (in Russian)
5. Viktorov, A.S. [General problems of the mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
6. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. [Development of a model of the morphological structure of erosion-thermokarst plains based on the use of space survey materials]. *Issledovanie Zemli is kosmosa*, 2023, no. 3, pp. 58–69. (in Russian)
7. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N. et al. [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. *Permafrost and Periglac. Process.*, 2023, no. 3, pp. 1–12. (in Russian)

- mafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
8. Melnikov, V.P., Khimenkov, A.N., Brushkov, A.V. et al. [Cryogenic geosystems: problems of research and modeling]. Novosibirsk, GEO Academic Publ., 2010, 390 p. (in Russian)
 9. Novikov, V.N., Fedorova, E.V. [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
 10. Perlshtein, G.Z., Pavlov, A.V., Levashov, A.V., Sergeev, D.O. [Non-temperature factors of heat exchange between the active layer and the atmosphere]. Proc. the Third Conference of Geocryologists of Russia, Moscow, June 1-3, 2005, Moscow, MGU Publ., 2005, vol. 1, pp. 86–91. (in Russian)
 11. Tolmachev, V.V. [Probabilistic approach in assessing stability of karst territories and designing anti-karst measures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 3, pp. 98–107. (in Russian)
 12. Shur, Yu.L. [Thermokarst (thermophysical foundations of the process development laws)]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 80 p. (in Russian)
 13. Alekseyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Vergun, A.P., et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, iss. 193, no. 012003.
 14. Belova, N.G., Novikova, A.V. Günther, F., Shabanova, N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data. *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, pp. 367–371.
 15. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et al. Erosion of permafrost coasts of Kara Sea near Kharasavey Cape, Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2017, vol. 21, no. 6, pp. 73–83.
 16. Daya Sagar, B.S. Mathematical morphology in geomorphology and GISci. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013, 546 p.
 17. Ling, F., Zhang, T. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *J. Geophys. Res.*, 2003, no. 108, p. 4511. <https://doi.org/10.1029/2002JD003014>
 18. Ling, F., Wu, Q., Zhang, T., Niu, F. Modelling open-talik formation and permafrost lateral thaw under a thermokarst lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglac. Processes*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 312–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1754>
 19. Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea region. *Permafrost and Periglac. Processes*, 2001, vol. 12, no. 2, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1002/ppp.387>

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 624.131.537

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ: РЕАЛИЗАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ

© 2023 г. О. В. Зеркаль^{1,*}, И. К. Фоменко^{2,**}, Е. Н. Самарин^{1,***}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

²Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
ул. Миклухо-Маклая 23, Москва, 117997 Россия

*E-mail: igzov@mail.ru

**E-mail: ifolga@gmail.com

***E-mail: samarinen@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2023 г.

После доработки 15.11.2023 г.

Принята к публикации 16.11.2023 г.

Проанализированы ограничения существующих детерминированных подходов к количественной оценке устойчивости склонов. Рассмотрены основные принципы вероятностного анализа при тематическом моделировании устойчивости склонов. Показана возможность получения вероятностных оценок развития оползневых деформаций, что в дальнейшем может быть использовано при анализе геологического риска. Проведена оценка объективности вероятностного моделирования устойчивости склонов.

Ключевые слова: моделирование, вероятностный анализ, оползни, оценка устойчивости, оползневая опасность

DOI: 10.31857/S0869780923060103, **EDN:** CSXLVU

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при хозяйственном освоении территорий прослеживается тенденция все более широкого вовлечения в оборот областей с активным развитием опасных геологических процессов, в том числе оползневых и оползнеопасных участков, что предопределяется ростом ценности земельных ресурсов в интенсивно техногенно освоенных регионах. В рамках реализации такого рода проектов при инженерно-геологических работах (как при изысканиях, так и в рамках специальных исследований, в том числе при научно-техническом сопровождении изысканий) особое внимание уделяется обеспечению безопасности планируемой хозяйственной деятельности. При этом обоснование мероприятий по инженерной защите зданий и сооружений в пределах оползневых и оползнеопасных участков традиционно осуществляется на основе оценки устойчивости склонов (фактической и/или прогнозной), базирующейся на моделировании поведения массивов грунтов, формирующих склоны, в условиях, как влияния разнообразных природных факторов, так и с учетом ожидаемого техногенного воздействия, а также при их различном сочетании.

Важной составляющей обеспечения безопасности зданий и сооружений является оценка геологических рисков, анализ которых ориентирован на обеспечение надежности объектов. Значимой характеристикой при проведении такого анализа выступает оценка вероятности реализации прогнозного сценария изменения инженерно-геологической ситуации. Следует отметить, что оценка вероятности развития опасных геологических процессов (в том числе оползневых) является одной из ключевых составляющих при количественной оценке геологического риска.

Применение описанного подхода при оценке рисков от оползневых процессов, бесспорно, весьма перспективно. Вместе с тем к настоящему времени опыт его реализации незначителен, что вызывает необходимость рассмотрения различных аспектов проведения *вероятностного моделирования при количественной оценке устойчивости склонов*. Рассматриваемая проблема также приобретает особую актуальность в связи с тем, что в отечественной практике моделирования оценки устойчивости склонов на текущий момент отсутствуют общепринятые методики и рекомендации, рассматривающие вопросы вероятностной количественной оценки устойчивости склонов.

ТРАДИЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

История расчетов устойчивости склонов, представляющих, по существу, математическое моделирование поведения склонов, насчитывает порядка 250 лет [6, 9, 10]. Ее начало было положено Ш. Кулоном, сформулировавшим в 1773 г. условие прочности грунта. На протяжении XX в. происходило активное развитие методов количественной оценки состояния склонов, осуществлявшегося в двух направлениях. Первое из них опиралось на применение теории предельного напряженного состояния (в настоящее время реализовано при моделировании устойчивости склонов численными методами), а второе основывалось на использовании теории предельного равновесия, базирующейся на предположении, что условие предельного равновесия удовлетворяется по внутренней границе (поверхности скольжения) склона/откоса той или иной геометрической формы. При этом делалось предположение, что деформация склона/откоса происходит в результате одновременного преодоления сопротивления сдвигу пород в пределах всей потенциальной поверхности скольжения.

В общем случае решение задачи на основе теории предельного равновесия является статически неопределенным. Именно этот факт послужил причиной разработки множества методов расчетов устойчивости склонов (методы Феллениуса, Н.Н. Маслова, Р.Р. Чугаева, Г.М. Шахунянца, Н. Джамбу, А. Бишопа, Э. Спенсера, Н. Моргенштерна и В. Прайса, и многие-многие другие), базирующихся на модели предельного равновесия.

В основе методов модельной оценки устойчивости оползневых и оползнеопасных склонов может лежать одна из двух схем, описывающих предельное состояние склона:

- схема, учитывающая фактические (выявленные при изучении) прочностные характеристики грунтов, слагающих склоновый массив;
- схема, основанная на нахождении критических значений прочностных характеристик грунта, при которых склон переходит в состояние предельного равновесия.

При этом смысл предельной схемы удерживающих и сдвигающих усилий заключается в изучении соотношения сдвигающих и удерживающих усилий, действующих в склоновом массиве. Коэффициент устойчивости ($K_{уст}$) в этом случае может быть определен как отношение удерживающих моментов к сдвигающим или как собственно отношение удерживающих и сдвигающих сил. Получаемая величина $K_{уст}$ (или коэффициента

запаса) рассматривается в качестве показателя возможности развития оползневых деформаций.

В настоящее время при выполнении математического моделирования устойчивости склонов традиционно используется детерминированный подход к учету принимаемых в модель характеристик грунтов, слагающих склоновый массив. В качестве принимаемых в модель исходных параметров, в соответствии с действующими нормативными требованиями, выбираются усредненные показатели, приписываемые всему объему грунтов, формирующему тот или иной инженерно-геологический элемент в составе массива [11]. При этом предполагается, что прочностные характеристики грунтов точно известны (изучены) и являются неизменными. В данном случае особенностью получаемой величины коэффициента устойчивости (или коэффициента запаса) является его одномоментность, одновременность, т.е. отражение состояния склона только на период обладания склоновым массивом заданными показателями.

Вместе с тем очевидно, что и в природных условиях, и в пределах техногенно измененных территорий состояние грунтов, слагающих склоновый массив, может как существенно изменяться во времени, так и значительно варьировать в пространстве. Физические, прочностные характеристики могут изменяться под воздействием различных внешних факторов, например, при обводнении склона или при динамическом воздействии. Однако в основе традиционного детерминированного подхода к математическому моделированию устойчивости склонов (концептуально) лежит постулат “статичности”, неизменности во времени показателей, характеризующих грунты склонового массива. Помимо этого, на точность и достоверность выводов, делающихся на основе итогового показателя устойчивости склона, получаемого при детерминированном подходе, выраженного в единственном значении $K_{уст}$ (или коэффициента запаса), оказывают влияние различного рода неопределенности, усложняющие собственно построение моделей. К неопределенностям такого рода можно отнести, в частности, геологические неопределенности, обусловленные сложностью строения реального массива, отсутствием достаточных данных (что нередко при недостаточном финансировании изысканий), а также возможные неточности или ошибки при определении характеристик грунтов. Обычно используемые детерминированные методы не в состоянии учесть влияние этих неопределенностей на общий коэффициент устойчивости (или коэффициент запаса).

Несомненно, перечисленные особенности и ограничения, присущие традиционно применяемому при выполнении математического моделирования устойчивости склонов консервативному

детерминированному подходу, являются существенным ограничивающим фактором при прогнозировании (во времени) возможного развития оползневых процессов, не позволяя в действительности определить фактический уровень оползневой опасности, снижая полноту и достоверность получаемых оценок. Это может приводить либо к чрезмерным, либо к недостаточным мероприятиям, направленным на обеспечение устойчивости склонов, что, в конечном итоге, влияет на безопасность зданий и сооружений.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ. ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Современный этап развития инженерной геологии, начиная со второй половины 1970-х гг., характеризуется постепенной сменой основной научной парадигмы. На смену представлений о необходимости обеспечения “абсолютной безопасности” техногенных объектов декларируется концепция “приемлемого риска” [1, 7, 8, 15, 16]. В отличие от концепции о необходимости обеспечения “абсолютной безопасности” (в рамках которой территории с активным развитием геологических процессов рассматривались как непригодные к освоению), в основу концепции “приемлемого риска” положены воззрения о приоритетности выявления (при инженерно-геологической характеристике участков проектируемого строительства) и оценки природных, в первую очередь, геологических опасностей, осложняющих, но не сдерживающих (!) освоение территорий. В рамках концепции “приемлемого риска” геологические опасности рассматриваются лишь только как один из факторов, влияющий на экономические затраты при сооружении и последующей эксплуатации объектов, требующий проведения инженерной защиты зданий и сооружений, снижающих риски до приемлемого уровня. Существенными составляющими риск-анализа в инженерной геологии являются получение, рассмотрение и представление (в количественном виде) информации о геологических опасностях, в том числе опасности развития оползней, выражаемой как оценка вероятности развития/активизации геологических процессов.

Как было отмечено выше, традиционно применяемый при выполнении математического моделирования устойчивости склонов детерминированный подход не обеспечивает получение такого рода оценок. Также очевидно, что получение “полных”, “абсолютно точных” детерминированных данных, “полностью” характеризующих оцениваемый склоновый массив, практически недостижимо.

Одним из направлений преодоления существующих ограничений в математическом моделировании устойчивости склонов является применение вероятностного анализа при количественной оценке поведения склонов, позволяющего характеризовать опасность (в терминах вероятности) активизации оползневых процессов.

Начало разработки методов вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов относится к середине 1970-х гг. [14, 17, 23]. В последующие десятилетия их дальнейшее развитие при математическом моделировании устойчивости склонов в своих работах проводили Т.Ф. Wolff, Н. El-Ramly, D.V. Griffiths, J. Huang, M.Y. Wang, О.В. Зеркаль, И.К. Фоменко, Е.Н. Самарин, К. Кан и др. [2–5, 12, 13, 17–21, 24, 25].

Сущность вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов заключается в получении *вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон, а также иных факторов, влияющих на развитие оползневых процессов* [2]. Таким образом, основная идея количественной вероятностной оценки устойчивости склонов заключается в учете фактически наблюдаемой изменчивости факторов оползнеобразования (их количественных показателей), учитываемых при расчете [12]. В современной практике, как правило, для каждого фактора оползнеобразования (прочностные характеристики грунтов, положение уровня подземных вод, величина сейсмического воздействия и др.) можно получить статистическое распределение.

Результатом моделирования при реализации вероятностного подхода к оценке устойчивости склонов также является вероятностная функция распределения $K_{уст}$, на основе которой можно проводить определение вероятности развития оползневой процесса (p_f). Вероятность отказа – потеря устойчивости склоном (p_f), может быть получена путем прямого интегрирования функции плотности вероятности $K_{уст}$ (коэффициента запаса) при его значении < 1.0 [20]:

$$p_f = \int_0^1 f_{K_{уст}}(K_{уст}) dK_{уст}. \quad (1)$$

Вместе с тем этот метод требует, чтобы функция плотности вероятности $f_{K_{уст}}(K_{уст})$ была известна заранее, что бывает редко. Поэтому зачастую для получения вероятности развития оползневой процесса (p_f) используется метод Монте-Карло, при применении которого искомое значение получается путем деления количества модельных расчетов с $K_{уст} < 1.0$ на общее количество модельных расчетов [20]:

$$p_f = \frac{\text{Количество результатов расчетов с } K_{уст} < 1}{\text{Общее количество расчетов}} \quad (2)$$

При этом в качестве основы (частные модельные расчеты) для вероятностного анализа поведения склона используются детерминированные методы анализа устойчивости склона – методы предельного равновесия или метод конечных элементов. Одна из сложностей при получении вероятностной функции распределения $K_{уст}$ – значительный объем моделирования при низкой вероятности развития оползневого процесса.

Результатом моделирования является функция плотности вероятности коэффициента устойчивости, по которой можно оценить среднее значение $K_{уст}$ и стандартное отклонение. Вероятностная мера устойчивости склона – вероятность развития оползневых деформаций при $K_{уст} < 1.0$.

Рассматривая изменчивость расчетной вероятности потери устойчивости склоном, следует отметить несколько важных моментов. Во-первых, расчетная вероятность потери устойчивости склоном при реализации описанного подхода не учитывает возможных временных изменений входных параметров (свойств грунтов, динамику УПВ и т.д.). Для учета в расчетной вероятности потери устойчивости склоном временной изменчивости параметров необходимо включение в модель данных о повторяемости действия факторов оползнеобразования (например, повторяемость интенсивных осадков, влияющих на увлажненность грунтов и изменчивость их прочностных характеристик). Если ни одна из входных переменных не зависит от времени, расчетная вероятность потери устойчивости склоном может быть привязана к периоду эксплуатации объекта.

Во-вторых, на расчетную вероятность потери устойчивости склоном, несмотря на усилия по учету всех источников неопределенностей, оказывает влияние вероятность существования не обнаруженных неопределенностей, например, таких как не выявленные ошибки определения характеристик грунтов, формирующих склоновый массив. Вклад этих неизвестных неопределенностей в вероятность потери устойчивости склоном при моделировании не учитывается, поэтому *расчетная вероятность может быть нижней границей фактической вероятности развития оползневых деформаций*.

Важным показателем при вероятностном анализе является индекс надежности β , который служит мерой нормализации коэффициента устойчивости ($K_{уст}$) на стандартное отклонение [2, 22]:

$$\beta = (K_{уст} - 1.0) / \sigma K_{уст} \quad (3)$$

где $\sigma K_{уст}$ – среднеквадратическое отклонение $K_{уст}$.

Этот показатель позволяет подойти к оценке устойчивости склонов с позиций теории надежности.

Накопление данных об изменчивости факторов оползнеобразования, понимание широты спектра их колебаний, в том числе роли вариативности характеристик грунтов в формировании устойчивости склонов, делают внедрение вероятностных подходов в математическом моделировании склонов все более актуальным и перспективным, позволяя взглянуть на прогноз оползневой опасности склонов более универсально, под новым углом зрения. Вероятностный подход к математическому моделированию устойчивости склонов позволяет получить данные, которые не могут быть получены при детерминированном подходе. Получаемая при вероятностном моделировании поведения склона изменчивость коэффициента устойчивости, оцениваемая количественно через дисперсию $K_{уст}$, и вероятность потери устойчивости склоном могут оказать существенное влияние на принятие решений о проведении мероприятий инженерной защиты.

Наряду с рассмотрением количественных показателей изменчивости факторов при вероятностном моделировании устойчивости склонов, возможен и *другой подход к получению вероятностной количественной оценки устойчивости склона, основанный на рассмотрении параметров грунтов (например, прочностных характеристик) как независимых переменных, влияющих на состояние склона в момент потери им устойчивости*. Проведем сравнительный анализ результатов вероятностной количественной оценки устойчивости склона, выполненной различными методами на примере модельного склона. Примем в качестве модельного склон высотой 20 м, имеющий переменный уклон (25°, 30°, 35° и 40°) и сложенный грунтами, близкими по своим свойствам к моренным суглинками московского горизонта. Показатели свойств грунтов, принятые при расчетах в качестве исходных данных, и результаты статистической обработки выборки приведены в табл. 1. Примеры итоговых расчетных геомеханических схем по линии модельного профиля с результатами оценки устойчивости склона, полученных методом Янбу [22], приведены на рис. 1.

В табл. 2 показаны полученные количественные оценки устойчивости модельного склона в детерминированном и вероятностном варианте расчетов.

Очевидно, что при традиционном подходе к анализу устойчивости склона детерминированные величины $K_{уст}$ (см. табл. 2, столбец 2) стали

Таблица 1. Характеристики свойств грунтов, принятые при модельных расчетах

Значения	Плотность, г/см ³	Сцепление, кПа	Угол вн. трения, град.
Среднее	2.114	36.0	17.917
Минимальное	2.01	28.0	12.0
Максимальное	2.2	45.0	23.0
Коэффициент вариации	0.00195	27.13	7.384
Стандартное отклонение	0.04412	5.209	2.717

бы основой для вывода о том, что склон в целом является устойчивым. И только при уклонах в 40° склон переходит в состояние, близкое к предель-

ному равновесию. При этом сделать какие-либо дополнительные выводы, кроме того, что увеличение уклона склона приводит к снижению его

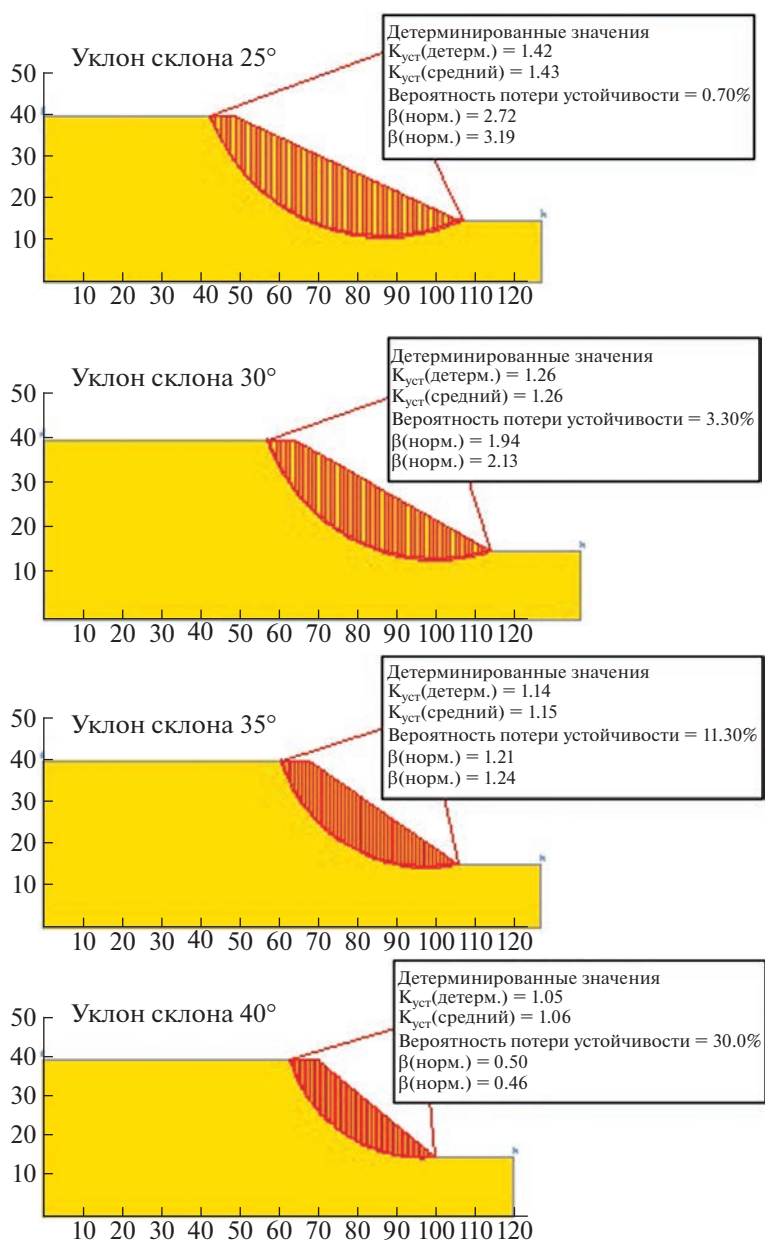


Рис. 1. Примеры итоговых геомеханических схем с результатами оценки устойчивости модельного склона, полученных методом Янбу.

Таблица 2. Результаты оценки устойчивости модельного склона

Уклон склона, град	Детерминированный $K_{уст}$	Среднестатистический $K_{уст}$	Вероятность потери устойчивости, %
25	1.42	1.43	0.7
30	1.26	1.26	3.3
35	1.14	1.15	11.3
40	1.05	1.06	30.0

устойчивости, без дополнительных расчетов было бы невозможно. Близкие выводы также можно сделать и по результатам рассмотрения усредненных величин $K_{уст}$, полученных с учетом изменчивости параметров грунтов, подтверждающих общую сходимость результатов, полученных при детерминированном и вероятностном варианте расчетов.

Сравнение же вероятностей потери склоном устойчивости (начало склоновых деформаций) (см. табл. 2, столбец 4) позволяет оценить опасность развития оползневых процессов в показателях, пригодных для проведения анализа геологического риска. Из рис. 2 видно, что, несмотря на то что “формально” склон при всех проанализированных уклонах остается устойчивым ($K_{уст} > 1.0$), оползневая опасность (как вероятность события, являющегося источником риска) возрастает с увеличением уклона склона. При этом величина вероятности реализации негативного сценария оценена количественно, а это, в свою очередь, обеспечивает возможность количественной оценки геологического риска.

Рассмотрим второй подход к вероятностной оценке устойчивости склона, основанный на рассмотрении параметров грунтов (например, прочностных характеристик) как независимых переменных. В условиях расчета имеем: склон с уклоном 40° , сложенный изотропными грунтами.

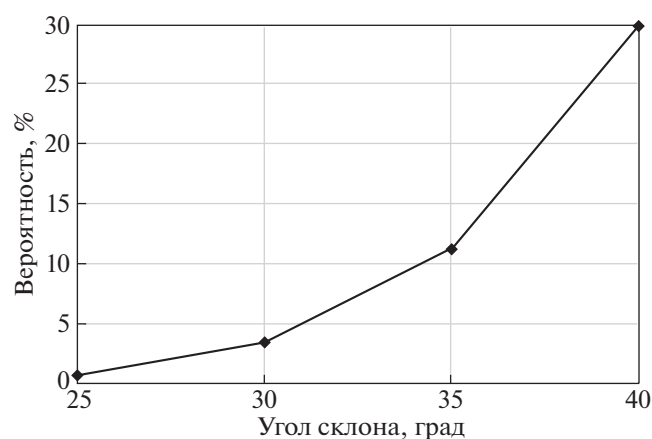


Рис. 2. Зависимость вероятности потери устойчивости склоном от его уклона.

В детерминированном решении задачи по расчету $K_{уст}$ склона задействованы сцепление и угол внутреннего трения (см. табл. 1). Выборочные статистики рассеяния для параметров прочности получены по результатам лабораторных определений. Для оценки вероятности обрушения склона воспользуемся формулой полной вероятности. Рассмотрим параметры прочности как независимые переменные, влияющие на устойчивость склона, причем потеря устойчивости склона равновероятно может быть обусловлена как изменением сцепления, так и изменением угла внутреннего трения, т.е.:

$$P(H_1) = P(H_2) = \frac{1}{2}, \tag{4}$$

где $P(H_1)$ и $P(H_2)$ – вероятность оползня вследствие изменения сцепления или угла внутреннего трения соответственно.

Зададим условную вероятность проявления оползневой подвижки за счет каждой из причин. Для этого в каждой из 48 сопряженных пар показателей прочности (найлены обратным расчетом при условии корреляционной зависимости между собой) оценим вероятность быть меньше критического значения при помощи интеграла вероятности:

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \tag{5}$$

Вероятность проявления оползневой деформации склона для каждой пары рассчитывалась по формуле полной вероятности:

$$P(A) = \sum_{i=1}^2 P(H_i A). \tag{6}$$

Полученные результаты расчета представлены на рис. 3. Распределение значений вероятности подчиняется нормальному закону распределения со средним значением вероятности 0.278 ± 0.015 , что сопоставимо с полученной выше вероятностью (0.3) потери склоном (с уклоном 40°) устойчивости (с использованием для оценки вероятностного распределения коэффициента устойчивости склона методом Монте-Карло).

Подводя итог проведенных исследований, можно отметить, что рассмотренные подходы к количественной вероятностной оценке устойчи-

ности склонов, основанные на: 1) оценке вероятностного распределения коэффициента устойчивости склона методом Монте-Карло, и 2) на рассмотрении параметров грунтов как независимых переменных, обеспечивают определение вероятности развития оползневых процессов, что необходимо для оценки оползневой опасности в рамках риск-анализа. При этом оба из рассмотренных подходов проведения вероятностной оценки устойчивости склона обеспечивают получение близких значений вероятности проявления оползневой деформации с высокой сходимостью.

Оценка объективности при вероятностном моделировании устойчивости склонов

Проведем оценку объективности предложенного подхода, принимая во внимание, что при многочисленных вариантах аналитических решений при количественной оценке устойчивости склонов исследователи оперируют преимущественно тремя характеристиками грунтов: плотностью, сцеплением и углом внутреннего трения. Для этого воспользуемся исходными данными, полученными при инженерно-геологических исследованиях, приведенными в табл. 3.

Совершенно очевидно, что использование любого варианта детерминированных значений приведенных показателей уже само по себе создает неопределенность конечного результата расчета, поскольку выборочное среднее, тем более полученное по выборочной совокупности весьма ограниченного объема, является лишь вероятностной оценкой генерального математического ожидания. Тем не менее представляется целесообразным использовать результаты инженерно-геологических исследований, так как они позволяют ввести в последующий анализ условные вероятности для каждого из указанных показателей.

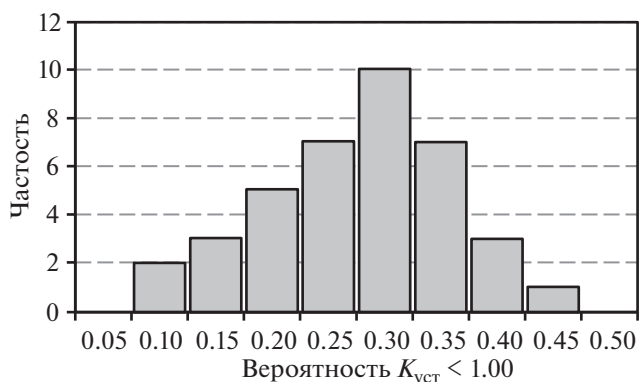


Рис. 3. Распределение вероятностей проявления оползневых деформаций, рассчитанных по формуле полной вероятности.

Как было указано выше, в результате детерминированных расчетов коэффициента устойчивости склона были получены сопряженные значения показателей свойств грунта (см. табл. 3), при которых значения $K_{уст}$ оказываются меньше единицы. Характеристики рассеяния для каждого из сопряженных показателей по выборочным данным приведены в табл. 4.

Распределение значений плотности можно рассматривать как нормальное с уровнем значимости $\alpha = 0.05$ (рис. 4а). Распределение значений параметров прочности с уровнем значимости $\alpha = 0.02$ допустимо рассматривать как нормальное (рис. 4б).

Проверка однородности оценок дисперсий для выборок значений указанных показателей, полученных при инженерно-геологических исследованиях (см. табл. 3) и для выборок значений, при которых установлено значение $K_{уст} < 1.0$, показала, что нет оснований считать указанные дисперсии различными для всех трех показателей при уровне значимости $\alpha = 0.01$. Таким образом, полу-

Таблица 3. Выборочные статистические характеристики показателей свойств грунтов

Характеристики рассеяния	Плотность, г/см ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.
Объем выборки	37	24	24
Среднее	2.114	36.0	17.9
85%	2.124	37.2	18.7
95%	2.129	38.2	19.1
Min значение	2.01	28.0	12.0
Max значение	2.2	45.0	23.0
Коэффициент вариации	0.0208	0.1447	0.1516
Стандартное отклонение	0.044	5.209	2.717
+3 σ	2.246	51.627	26.068
-3 σ	1.982	20.373	9.766

Таблица 4. Выборочные статистические характеристики показателей свойств грунтов (объем выборки для каждого показателя 55 значений)

Характеристики рассеяния	Плотность, г/см ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.
Среднее	2.017	34.595	17.045
85%	2.173	40.498	19.883
95%	2.231	42.701	20.942
Min значение	1.719	23.523	12.343
Max значение	2.222	44.734	21.568
Коэффициент вариации	0.053	0.117	0.114
Стандартное отклонение	0.107	4.044	1.944
+3 σ	2.338	46.725	22.877
-3 σ	1.697	22.464	11.213

ченные обратным расчетом значения сопряженных показателей статистически оправданы.

Оценим вероятность $K_{уст}$ быть меньше 1.0 при расчете устойчивости склона. В условиях расчета имеем: склон с заложением 40°, сложенный изотропными грунтами (один инженерно-геологический элемент). Как было показано выше, при детерминированном решении задачи по расчету $K_{уст}$ склона задействованы: плотность грунта – 2.11 ± 0.04 г/см³, сцепление – 36.0 ± 5.21 кПа, угол внутреннего трения – 17.917 ± 2.717 град., для которых выборочные статистики рассеяния получены по результатам лабораторных определений.

Для оценки вероятности обрушения склона воспользуемся формулой полной вероятности. Рассмотрим указанные параметры как независимые переменные, влияющие на устойчивость склона, причем получить при расчете значение $K_{уст} < 1.0$ может быть равновероятно, что обусловлено как изменением плотности грунта, так и изменением сцепления или угла внутреннего трения, т.е.:

$$P(H_1) = P(H_2) = P(H_3) = \frac{1}{3},$$

где $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$ – вероятность получить при расчете значение $K_{уст} < 1.0$ вследствие изменения плотности грунта, сцепления угла внутреннего трения соответственно.

Зададим условную вероятность проявления оползневой подвижки за счет каждой из причин. Для этого в каждом из 55 наборов показателей (найлены обратным расчетом и приняты в качестве критических, т.е. каждый их таких наборов

отвечает условию $K_{уст} < 1.0$), рассчитаем вероятность быть меньше критического значения при помощи интеграла вероятности:

$$P(A) = F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Тогда вероятность получить при расчете значение $K_{уст} < 1.0$ для каждого набора использованных показателей можно рассчитать по формуле полной вероятности:

$$P(A) = \sum_{i=1}^3 P(H_i A_i).$$

Результаты расчета представлены на рис. 5. Как видно из полученных данных, распределение вероятностей, полученное при расчете значение $K_{уст} < 1.0$, можно рассматривать как нормальное (согласно критерию χ^2 с уровнем значимости $\alpha = 0.01$) с выборочным средним значением 0.338 ± 0.017 . Тем не менее совершенно очевидно, что данное распределение характеризуется правосторонней асимметрией, обусловленной, главным образом, высокими значениями плотности грунта, выходящими за интервал 2σ . Если исключить указанные значения, то выборочное среднее значение вероятности при расчете значение $K_{уст} < 1.0$ составит 0.299 ± 0.011 .

Наличие тесной корреляционной связи между параметрами прочности (рис. 6) несколько видоизменяет схему расчета.

Как известно, величина коэффициента детерминации $R^2 = 0.7091$ определяет, какая часть регрессии обусловлена корреляцией между признаками. Следовательно, вероятность получить при

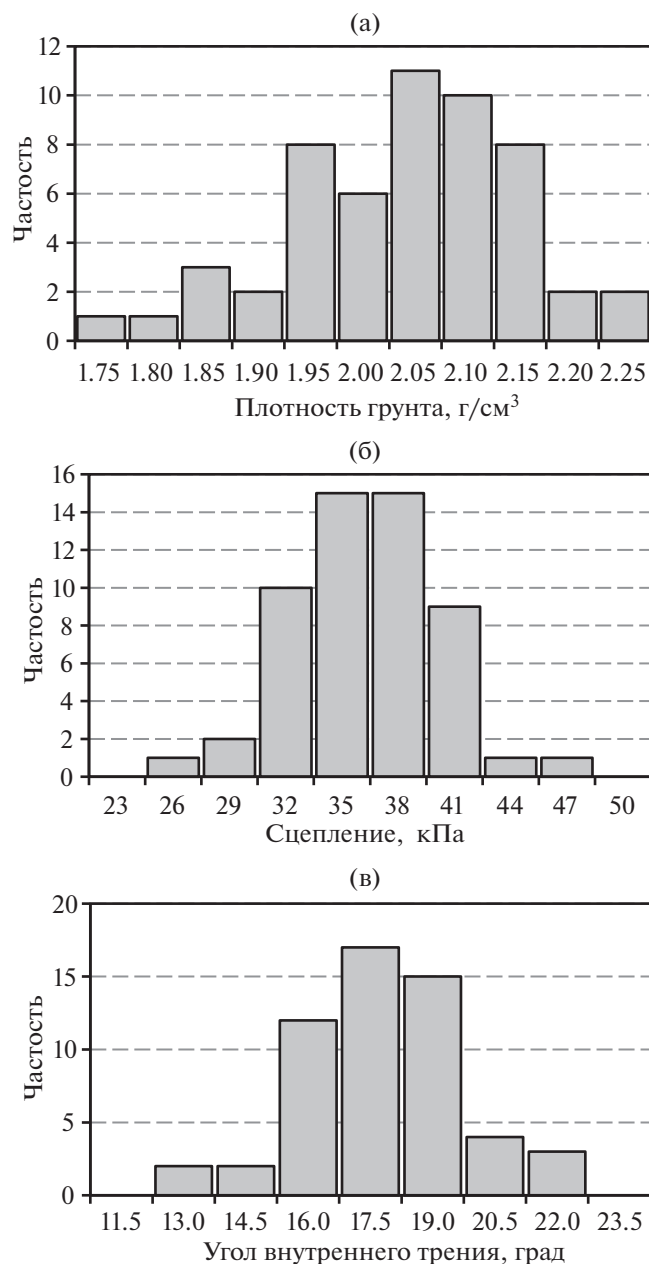


Рис. 4. Гистограмма распределения значений: а – плотности, б – сцепления, в – угла внутреннего трения, грунта по выборке сопряженных значений (см. табл. 2), при которых значение $K_{уст} < 1.0$.

расчете значение $K_{уст} < 1.0$ одинакова при изменении плотности и при изменении пары параметров прочности. Тогда:

$$P(H_1) = \frac{1}{2},$$

$$P(H_2) = 0.15 \cdot \frac{1}{2},$$

$$P(H_3) = 0.35 \cdot \frac{1}{2}.$$

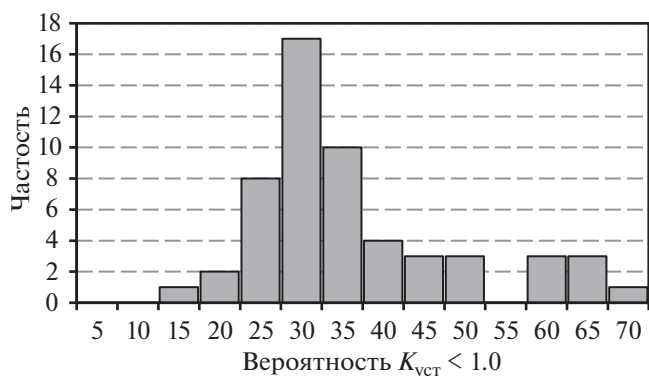


Рис. 5. Распределение вероятностей получения при расчете устойчивости склона значения $K_{уст} < 1.0$, рассчитанных по формуле полной вероятности (без учета корреляции между показателями прочности).

Условные вероятности анализируемых параметров составят: $P(H_1A) = \frac{1}{2} \cdot A_1$ – для плотности; $P(H_2A) = 0.15 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_2$ – для сцепления (так как при установлении параметров прочности, прежде всего, подбирают наклон предельной огибающей); $P(H_3A) = 0.35 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_3$.

Условные вероятности задаются также, как и в первом случае, на основе вероятности конкретного значения быть ниже критического для каждого показателя.

Результаты расчета представлены на рис. 7. Распределение вероятностей при расчете значения $K_{уст} < 1.0$ можно рассматривать как нормальное (согласно критерию χ^2 с уровнем значимости $\alpha = 0.05$) с выборочным средним значением 0.301 ± 0.025 . При исключении значений вероятностей, полученных при высоких значениях плотности грунта, выборочное среднее уменьшается до 0.259 ± 0.017 .

Таким образом, значения вероятности получения при расчете устойчивости склона $K_{уст} < 1.0$, полученные двумя рассмотренными способами, вполне сопоставимы, если рассматривать параметры как независимые, и ощутимо различаются при учете корреляционной связи между параметрами прочности.

Однако возможен еще один вариант задания вероятностей: по-прежнему считать, что все три параметра независимы друг от друга, однако, для вероятности параметров прочности ввести соответствующие поправки с учетом коэффициента детерминации. Тогда:

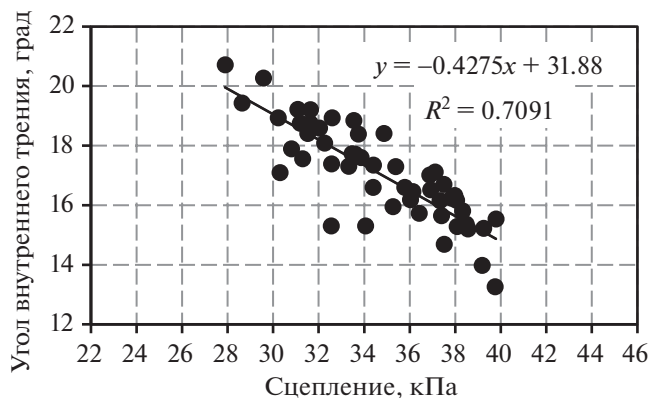


Рис. 6. Зависимость между углом внутреннего трения и сцеплением.

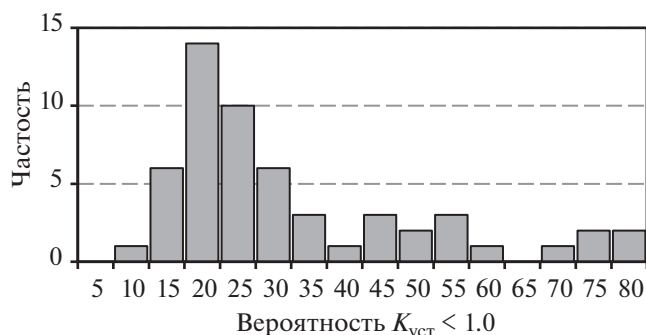


Рис. 7. Распределение вероятностей получения при расчете устойчивости склона значения $K_{уст} < 1.0$, рассчитанных по формуле полной вероятности (с учетом корреляции между показателями прочности).

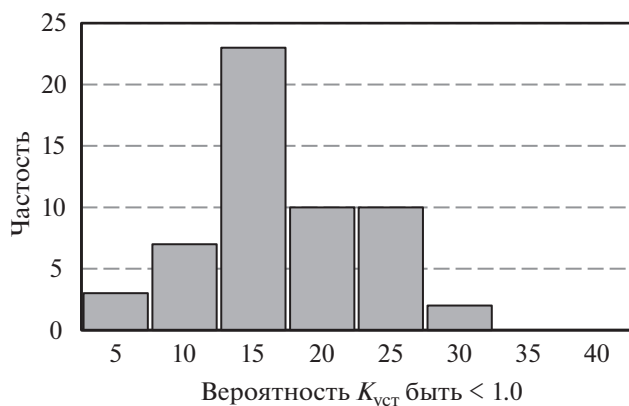


Рис. 8. Распределение вероятностей получения при расчете устойчивости склона значения $K_{уст} < 1.0$, рассчитанных по формуле полной вероятности (с учетом корреляции между показателями прочности и при условии равной вероятности каждого из параметров влиять на результаты расчета).

$$P(H_1) = \frac{1}{3};$$

$$P(H_2) = (1 - 0.7091) \cdot \frac{1}{3};$$

$$P(H_3) = 0.7091 \cdot \frac{1}{3}.$$

То есть из анализа удаляются все случаи парной корреляции. Условные вероятности параметров по-прежнему вводятся через интеграл вероятности для каждого набора критических значений рассматриваемых параметров. Распределение вероятностей получения значений $K_{уст} < 1.0$, рассчитанных по формуле полной вероятности, показано на рис. 8. Представленные результаты расчета показывают, что распределение вероятностей получения при расчете значение $K_{уст} < 1.0$ можно рассматривать как нормальное (согласно критерию χ^2 с уровнем значимости $\alpha = 0.01$) с выборочным средним значением 0.146 ± 0.008 . Этот результат, безусловно, гораздо лучше согласуется с вариантом расчета, когда вероятность получения при расчете устойчивости склона значения $K_{уст} < 1.0$ оценивается по отношению количества критических случаев к их общему значению (по формуле (2)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в мире существует два основных подхода к математическому моделированию устойчивости склонов — детерминированный и вероятностный.

Первый подход основан на детерминированном анализе с использованием коэффициентов устойчивости. Именно на этом подходе базируется принятие проектных решений в нашей стране и, как следствие, именно его использование прописано во всех нормативных документах. При использовании рассматриваемого подхода полностью игнорируется факт изменчивости свойств грунтов и связанных с этим неопределенностей, закладываемых в расчет показателей, что закономерно приводит (для снятия влияния неопределенностей) к использованию принципа избыточного проектирования для достижения безопасности зданий и сооружений.

Для повышения эффективности таких работ в практику внедряются все более сложные модели грунтов. При этом полностью игнорируется тот факт, что усложнение модели приводит и к возрастанию неопределенностей. Так, для модели Мора–Кулона необходимо 5 входных параметров, а для модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) уже 10. Безусловно, для описания процесса деформирования образца при трехосных испытаниях вторая модель предпочтительнее. Однако при переходе от образца к грунтовому массиву масштабный эффект проявляется, в том числе и в росте неоднород-

ности, которая при увеличении числа входных параметров модели приведет к тому, что полученные результаты могут быть далеки от истины.

Второй подход основан на вероятностном подходе к моделированию устойчивости склонов и количественной оценке надежности. В последние десятилетия этот подход все более активно внедряется в мировую практику. В сравнении с детерминированным подходом, вероятностный обладает большей объективностью и гибкостью, так как позволяет учитывать большое количество случайных и закономерных факторов без усложнения расчетных детерминированных моделей и проводить расчет устойчивости склонов в разнообразных грунтовых условиях.

Применение вероятностного анализа, сущность которого заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения характеристик слагающих его грунтов, позволяет более обоснованно охарактеризовать опасность активизации оползневых процессов. Результаты вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов представляются более реалистичными и могут быть использованы при последующей оценке оползневой опасности и соответствующего геологического риска.

Приведенный пример оценки устойчивости склона показывает возможность получения при моделировании с использованием вероятностного подхода дополнительных показателей, характеризующих поведение склона, – вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости ($K_{уст}$), на основе которой можно проводить определение вероятности развития оползневого процесса (p_f).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зеркаль О.В.* Оценка геологических рисков в практике инженерных изысканий // Инженерные изыскания. 2009. № 4. С. 40–43.
2. *Зеркаль О.В., Фоменко И.К.* Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 16–21.
3. *Кан К., Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Павленко О.В.* Вероятный анализ устойчивости склонов при сейсмическом воздействии с использованием акселерограмм // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 2–8.
4. *Кан К., Зеркаль О.В.* Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона // Инженерная геология. 2017. № 4. С. 18–26. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2017-4-18-26>
5. *Кан К., Зеркаль О.В., Пономарев А.А., Фоменко И.К.* Вероятностный анализ устойчивости склонов на основе обобщенного критерия Хоека-Брауна при сейсмическом воздействии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 3. С. 11–16.
6. *Пендин В.В., Фоменко И.К.* Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
7. *Природные опасности России. Т. 6. Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина.* М.: Изд-во “Крук”, 2003. 320 с.
8. *Рагозин А.Л.* Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов // Проект. 1993. № 5–6. С. 20–26.
9. *Склоновые геологические процессы / Под ред. В.Т. Трофимова, О.В. Зеркаля.* М.: Изд-во “Перо”, 2022. 724 с.
10. *Фоменко И.К.* Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53.
11. *Фоменко И.К., Зеркаль О.В.* Оценка устойчивости склонов при инженерных изысканиях: нормативные требования и проблемы их выполнения // Инженерные изыскания. 2016. № 10–11. С. 64–70.
12. *Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н.* Вероятностный анализ количественной оценки устойчивости склона. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики // Сергеевские чтения. Вып. 24: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии. инженерной геологии и гидрогеологии (Казань, 30–31.03.2023 г.). М.: Изд-во “Геоинфо”, 2023. С. 123–127.
13. *Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Сироткина О.Н.* Вероятностный анализ устойчивости скальных оползней // Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи: матер. III регион. научно-практ. конф. (Краснодар, 24–25.11.2016). Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-т, 2016. С. 268–272.
14. *Alonso E.E.* Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays // Géotechnique. 1976. V. 26. P. 453–472.
15. *Ang A.H-S., Tang W.H.* Probability concepts in engineering planning and design. V. I. Basic principles. New York: John Wiley, 1975.
16. *Ang A.H-S., Tang W.H.* Probability concepts in engineering planning and design. V. II. Decision, risk and reliability. New York: John Wiley, 1984.
17. *El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M.* Probabilistic slope stability analysis for practice. // Canadian Geotechnical Journal. 2002. V. 39. P. 665–683. <https://doi.org/10.1139/T02-034>
18. *Fomenko I.K., Zerkal O.V.* The application of anisotropy of soil properties in the probabilistic analysis of landslides activity // Proc. Engineering. 2017. V. 189. № C. P. 885–891. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.138>
19. *Griffiths D.V., Fenton G.A.* Probabilistic slope stability analysis by finite elements // J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2004. V. 130. № 5. P. 507–518.

20. Griffiths D.V., Huang J., Fenton G.A. Comparison of Slope Reliability Methods of Analysis // *Geo Florida: Advances in Analysis, Modeling & Design*. New York: ASCE. 2010. P. 1952–1961.
21. Griffiths D.V., Huang J., Fenton G.A. Probabilistic infinite slope analysis // *Comput. Geotech.*, 2011. V. 38. № 4. P. 577–584.
22. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An engineering methodology. 1st edition. GEO-SLOPE International. Ltd., Calgary. 2004.
23. Tang W.H., Yucemen M.S., Ang A.H.S. Probability based short-term design of slopes // *Canadian Geotechnical Journal*. 1976. V. 13. P. 201–215.
24. Wang M.Y., Liu Y., Ding Y.N., Yi B.-L. Probabilistic stability analyses of multi-stage soil slopes by bivariate random fields and finite element methods // *Comput. Geotech.* 2020. V. 122. P. 103529.
25. Wolff T.F. Probabilistic slope stability in theory and practice // *Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice*. C.D. Shackelford et al. (Eds.). New York: ASCE. 1996. P. 419–433. *Geotechnical Special Publication* № 58.

PROBABILISTIC APPROACH IN MODELING SLOPE STABILITY – IMPLEMENTATION AND FEATURES

O. V. Zerkal^{a,*}, I. K. Fomenko^{b,***}, and E. N. Samarin^{a,###}

^a*Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

^b*S.Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
ul. Miklukho-Maklaya 23, Moscow, 117997 Russia*

^{*}*E-mail: igzov@mail.ru*

^{**}*E-mail: ifolga@gmail.com*

^{###}*E-mail: samarinen@mail.ru*

The limitations of the existing deterministic approaches to the quantitative assessment of slope stability are analyzed. The basic principles of probabilistic analysis in mathematical simulation of slope stability are considered. The possibility of obtaining probabilistic assessment of the development of landslide deformations is shown, which can later be used in the analysis of geological risk. An assessment of the objectivity of probabilistic modeling of slope stability is carried out.

Keywords: *simulation, probabilistic slope stability analysis, landslides, slope stability assessment, landslide hazard*

REFERENCES

1. Zerkal, O.V. [Assessment of geological risks in the practice of engineering surveys]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2009, no. 4, pp. 40–43. (in Russian)
2. Zerkal, O.V., Fomenko, I.K. [Influence of various factors on the results of probabilistic analysis of landslide activation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2016, no. 1, pp. 16–21. (in Russian)
3. Kang, K., Zerkal, O.V., Fomenko, I.K., Pavlenko, O.V. The accelerometer-based probabilistic analysis of slope stability. *Soil mechanics and foundation engineering*, 2019, vol. 56, no. 2, pp. 71–76. (in Russian)
4. Kang, K., Zerkal, O.V. [Application of the probabilistic slope stability analysis]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no. 4, pp. 18–26. (in Russian)
5. Kang, K., Zerkal, O.V., Ponomarev, A.A., Fomenko, I.K. [Probabilistic slope stability assessment under seismic conditions based on the generalized Hoek–Brown criterion]. *Soil mechanics and foundation engineering*, 2021, vol. 58, no. 3, pp. 223–229. (in Russian)
6. Pendin, V.V., Fomenko, I.K. [The methodology of evaluation and prediction of landslide hazard]. Moscow, LENAND Publ., 2015, 230 p. (in Russian)
7. [Natural hazards of Russia. Vol. 6. Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, Kruk Press, 2003, 320 p. (in Russian)
8. Ragozin, A.L. [The concept of acceptable risk and construction development of territories subjected to hazardous natural and technological processes]. *Proekt*, 1993, no. 5–6, pp. 20–26 (in Russian)
9. [Slope geological processes]. Trofimov, V.T., Zerkal, O.V., Eds. Moscow, Pero Publ., 2002, 724 p. (in Russian)
10. Fomenko, I.K. [Current trends in slope stability calculations]. *Inzhenernaya geologiya*, 2012, no. 6, pp. 44–53 (in Russian)
11. Fomenko, I.K., Zerkal, O.V. [Assessing slope stability for engineering surveys: regulatory requirements and problems of their implementation]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2016, nos. 10–11, pp. 64–70 (in Russian)
12. Fomenko, I.K., Zerkal, O.V., Samarin, E.N. [Probabilistic analysis of quantitative assessment of slope stability]. In: Proc. 24th Conference Sergeevskie chteniya. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics. Moscow, GeoInfo Press, 2023, pp. 123–127 (in Russian)
13. Fomenko, I.K., Zerkal, O.V., Samarin, E.N., Sirotkina, O.N. [Probabilistic analysis of the stability of rock

- landslides]. Proc. III Regional Sci. and Pract. Conference on engineering geology of the northwest Caucasus and CisCaucasus: current state and main tasks. Krasnodar. Kuban State University Press, 2016, pp. 268–272 (in Russian)
14. Alonso, E.E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Géotechnique*, 1976, vol. 26, pp. 453–472.
 15. Ang, A.H-S., Tang, W.H. Probability concepts in engineering planning and design. Vol. I. Basic principles. New York, John Wiley Publ., 1975.
 16. Ang, A.H-S., Tang, W.H. Probability concepts in engineering planning and design. Vol. II. Decision, risk and reliability. New York, John Wiley Publ., 1984.
 17. El-Ramly, H., Morgenstern, N.R., Cruden, D.M. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002. V. 39. P. 665–683. <https://doi.org/10.1139/T02-034>
 18. Fomenko, I.K., Zerkal, O.V. The application of anisotropy of soil properties in the probabilistic analysis of landslides activity. In: Proc. Engineering. 2017. V. 189. № C. P. 885–891. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.138>
 19. Griffiths, D.V., Fenton, G.A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, vol. 130, no. 5, pp. 507–518.
 20. Griffiths, D.V., Huang, J., Fenton, G.A. Comparison of slope reliability methods of analysis. In: Geo Florida: Advances in analysis, modeling & design. New York, ASCE Publ., 2010, pp. 1952–1961.
 21. Griffiths, D.V., Huang, J., Fenton, G.A. Probabilistic infinite slope analysis. *Comput. Geotech.*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 577–584.
 22. Krahn, J. Stability modeling with SLOPE/W. An engineering methodology, 1st edition. Calgary, GEO-SLOPE International, Ltd., 2004.
 23. Tang, W.H., Yucemen, M.S., Ang, A.H.S. Probability based short-term design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 1976, vol. 13, pp. 201–215.
 24. Wang, M.Y., Liu, Y., Ding, Y.N., Yi, B.-L. Probabilistic stability analyses of multi-stage soil slopes by bivariate random fields and finite element methods. *Comput. Geotech.*, 2020, vol. 122, p. 103529.
 25. Wolff, T.F. Probabilistic slope stability in theory and practice. In: Uncertainty in the geologic environment: from theory to practice. C.D. Shackelford et al., Eds. Geotechnical Special Publication no. 58. New York, ASCE Publ., 1996, pp. 419–433.

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 551.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ ПРИ МИГРАЦИИ ВЛАГИ

© 2023 г. Чжоу Бичэн^{1,*}, А. В. Брушков^{1,**}, Ху ЦзяБо^{2,***}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

²Китайский университет наук о Земле,
Лумо проспект, Ухань, Хубэй, 430074 Китай

*E-mail: zhoubicheng@mail.ru

**E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

***E-mail: jiabo96@163.com

Поступила в редакцию 23.09.2023 г.

После доработки 06.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Морозное пучение глинистых грунтов — одна из основных причин инженерных аварий в холодных регионах, но экспериментальные и численные исследования в своем большинстве были сосредоточены на деформации грунтов, в то время как исследований основного фактора, вызывающего деформацию при морозном пучении, — давления поровой воды — выполнено немного. Для моделирования процесса миграции воды при замерзании глинистого грунта в данном исследовании решается уравнение для частного дифференциала с целью создания модели водно-тепловой связи в промерзающем грунте. Экспериментально изучалось изменение влажности грунта, и выполнялись расчеты с помощью методов моделирования. Данные эксперимента согласуются с результатами математической модели, демонстрируя эффективность предлагаемого метода моделирования. На основе решения уравнения свободной энергии Гиббса получены новые расчетные формулы давления поровой воды для насыщенного мерзлого грунта для изучения давления поровой воды и потока воды. В целом результаты показали, что: 1) давление воды в порах промерзающего грунта с ледяным шпиром примерно в 10 раз больше, чем без шпир, что согласуется с ранее известными экспериментальными результатами; 2) температура верхней поверхности определяет предел значения порового давления воды в промерзающем глинистом грунте; 3) в зоне промерзания поровое давление воды уменьшается с глубиной быстрее, чем скорость снижения температуры.

Ключевые слова: мерзлый грунт, поровое давление воды, ледяной шпир, миграция влаги, моделирование промерзания

DOI: 10.31857/S0869780923060024, EDN: CUCUPA

ВВЕДЕНИЕ

Промерзание и набухание грунтов давно исследуются экспериментально. Большое количество работ сосредоточено на изучении деформаций, изменений температуры и влажности грунта при его замерзании. Исследования показали, что не вся поровая вода в грунтах при охлаждении замерзает, даже если температура грунта ниже 0°C. В грунте остается значительное количество незамерзшей воды, существующей в виде тонких пленок, обволакивающих поверхность частиц грунта; эта часть незамерзшей воды и температура грунтов поддерживают динамическое равновесие. В то же время под действием температурных градиентов происходит миграция влаги из незамерзающих в замерзающие области [9, 19].

Для моделирования процесса промерзания грунта в 1973 г. Harlan [6] предложил первую гидротермическую модель для объяснения морозного пучения, исследовал влажность и температуру в водонасыщенных мерзлых грунтах. Thomas [20] разработал замкнутую систему уравнений для определения деформаций, температуры и напряжений в мерзлом грунте, используя уравнения равновесия и принцип разделения напряжения в минеральных частицах и во льду. В дальнейшем появилось значительное количество исследований с использованием математических моделей мерзлых грунтов, которые были призваны не только лучше понять математические и физические проблемы замерзания грунтов, но и могли дополнить и усовершенствовать эксперимен-

тальные исследования и одновременно выполнять инженерный прогноз [15, 5].

При этом исследований давления поровой воды в мерзлых грунтах сравнительно мало. Поровое давление воды мерзлого грунта связано с образованием ледяных шпиров, поэтому его определение интересно как с научной, так и практической точек зрения.

Согласно Miller и др., существует зона, известная как “замерзающая кайма” (зона промерзания), которая разделяет мерзлые и незамерзшие области. Из-за температурного градиента незамерзшая вода может мигрировать из незамерзшей области в замерзающую зону и образовывать поровый лед, а поровый лед может продолжать наращиваться и образовывать ледяную линзу, или шпир [13, 4]. Первое экспериментальное подтверждение существования “каймы” (зоны) промерзания было получено Beskow, Hoekstra, Loch и др. Они обнаружили, что температура образования ледяных линз значительно ниже температуры образования порового льда, а самая нижняя линза находится на расстоянии 0.2–0.4 см от границы промерзания [3, 7, 13]. Miller отмечал, что ледяная линза образуется при достаточно высоком давлении поровой воды [16, 17], Konrad и Morgenstern отметили, что коэффициент проницаемости для водного потока границы замерзания контролирует развитие новых ледяных линз [11]. Zhou et al. ввели понятие коэффициента разделительных пор, как способа определения условий формирования ледяных линз [23]. Затем Akagawa [1] провел экспериментальные измерения полного напряжения и давления поровой воды в пределах мерзлой “каймы” и обнаружил значительное снижение давления поровой воды в ней. Чжан Ляньхай и др. [22] провели экспериментальные наблюдения за образцами мерзлого грунта с образованием линз и без них. Согласно полученным результатам, давление поровой воды в мерзлом грунте с образованием линз оказалось примерно в 10 раз выше, чем в грунте без образования линз.

Тем не менее данные экспериментальных и модельных исследований промерзания грунтов противоречивы, сегодня их недостаточно для надежного прогноза давления поровой воды. Проведение экспериментальных исследований порового давления воды, создаваемого естественным промерзанием грунта, особенно при отсутствии внешних нагрузок, не просто. Поэтому использование методов моделирования для расчетов не только экономично, но и может дополнить экспериментальные исследования.

Цель настоящего исследования — расчет давления поровой воды и водного потока в промерзающих грунтах с использованием методов моделирования.

Для достижения заявленной цели решались следующие задачи:

- математическая формулировка задачи промерзания водонасыщенного глинистого грунта,
- выполнение расчетов давления поровой воды и потока воды,
- экспериментальное моделирование промерзания,
- сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Основной методологией данной работы являлось экспериментальное и математическое моделирование. Для получения результатов по распределению влажности были проведены эксперименты по замораживанию глинистого грунта. Затем для моделирования процесса миграции влаги при его промерзании с помощью дифференциальных уравнений в частных производных разработана связанная гидротермическая модель промерзающего грунта с параметрами, полученными на основе экспериментальных данных. Наконец, на основе этой модели рассчитывалась величина порового давления воды на границе промерзания в зависимости от времени.

Уравнение для давления поровой воды при миграции влаги

Для того чтобы получить формулу для давления поровой воды, необходимо определиться, в каком напряженном состоянии находится мерзлый грунт. Известно, что напряженное состояние в мерзлом грунте с линзами льда и без них различно. Как показано на рис. 1, если на границе замерзания не образуется ледяная линза, поровый лед оказывается в воде, и частицы грунта не вступают с ним в непосредственный контакт. Если же образуется ледяная линза, она вступает в непосредственный контакт с частицами грунта, и таким образом, напряженное состояние мерзлого грунта, упрощая, можно разделить на два случая:

- без ледяной линзы $p_i = p_w$,
- при образовании ледяной линзы $p_i = \delta_s$,

где p_w — давление поровой воды, p_i — давление льда, δ_s — эффективное напряжение.

На основании приведенных выше выражений, используя уравнение Клапейрона-Клаузиуса, можно получить два варианта формул для расчета порового давления воды в мерзлом грунте:

1) формула для порового давления воды без ледяной линзы:

$$p_{w1} = -L \cdot T / (V_w T_0);$$

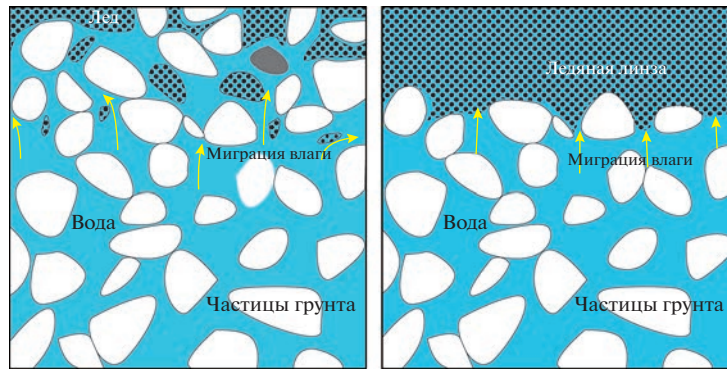


Рис. 1. Схема микростроения грунта на границе промерзания.

2) формула для порового давления воды, образованной ледяной линзой:

$$p_{w_2} = -L \cdot T / ((V_i - V_w) \cdot T_0),$$

где T – температура в градусах Цельсия; T_0 – температура точки замерзания воды в градусах Кельвина; L – скрытая теплота плавления воды (333.6 Дж/г); V_w – удельный объем воды; V_i – удельный объем льда [18, 10].

Другое выражение для порового давления воды без ледяной линзы может быть получено путем преобразования формулы для свободной энергии Гиббса:

$$p = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_w} + \frac{\theta_w}{\theta_i} \frac{1}{\rho_i}\right)} L_f \ln \frac{T}{T_0},$$

где ρ_w, ρ_i – плотности воды и льда, θ_w – объемная влажность, θ_i – объемная льдистость, L_f – скрытая теплота плавления, p – давление поровой воды, T_0 – температура начала замерзания грунта в градусах Кельвина, T – температура грунта в градусах Кельвина.

Расчет теплопроводности и фазовых переходов

На основе дифференциальных уравнений в частных производных нами предлагается следующая математическая модель, моделирующая процесс миграции влаги в грунте при промерзании [2]. Она включает в себя два основных уравнения [2, 12]:

1) уравнение теплопередачи с учетом скрытой теплоты фазового перехода

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \lambda_s(\theta) \nabla^2 T,$$

где ∇ – дифференциальный оператор; T – переходная температура грунта; t – время (ч); θ – объемная влажность, θ_i – объемная льдистость; ρ – плотность грунта; C – объемная теплоемкость

(Вт/(м·°C)); λ_s – теплопроводность (Дж/(кг·°C)); L_f – скрытая теплота плавления.

2) уравнение фазового перехода лед–вода

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_l}{\rho_w} \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla [D(\theta_u) \nabla \theta_u + k(\theta_u)],$$

где $k(\theta_u)$ – коэффициент проницаемости почвы для незамерзшей воды; θ_u – содержание незамерзшей воды; θ_l – объемная льдистость; $c(\theta_u)$ – удельная водоемкость, определяемая по модели гистерезиса; I – коэффициент импеданса.

Экспериментальные параметры и моделирование

Для эксперимента в качестве образца грунта использовалась элювиальная палеогеновая каолинитовая глина (eP1) из г. Глуховцы (Украина).

Основные свойства и физические параметры грунта следующие: размер частиц: 1–0.05, 0.05–0.002, < 0.002 мм: 0.5, 44.7, 54.8% соответственно; плотность частиц – 2.64 г/см³; плотность грунта – 1.2 г/см³; содержание незамерзшей воды при –1°C и –4°C: 8 и 3% соответственно; весовая влажность – 0.46 г/см³; удельная теплоемкость грунта C_s – 1.25 Дж/(кг·°K); теплопроводность грунта λ_s – 1.555 Вт/(м·C); температура начала замерзания грунта T_f – –0.207°C.

Выше приведены параметры экспериментальных образцов, испытанных в результате экспериментов. Остальные необходимые для расчета основные параметры модели могут быть получены из соответствующей литературы [2, 13]: θ_s – объемное содержание влаги при полном водонасыщении; θ_r – остаточное содержание влаги; k_s – коэффициент влагопроницаемости насыщенных грунтов; a, m, l – параметры модели.

Вводятся также известные параметры независимых переменных (удельная теплоемкость различных фаз, плотность, температура замерзания грунта, проницаемость грунта, насыщенность и т.д.)

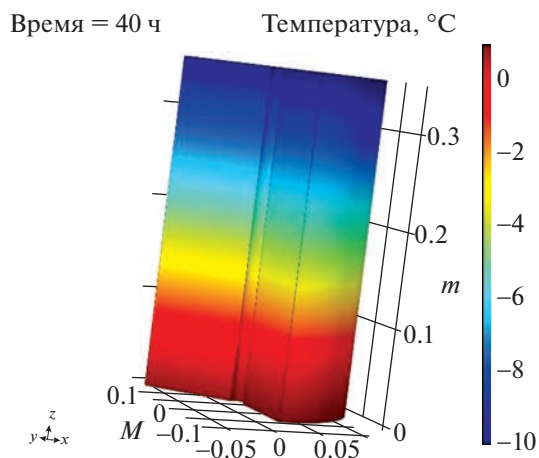


Рис. 2. 3D-модель мерзлого глинистого грунта.

и определяются зависимые переменные (объемное содержание воды, объемное содержание льда и т.д.). Геометрические параметры модели задаются радиусом 0.1 м и высотой 0.35 м. В соответствии с уравнениями, описанными в предыдущем разделе, выбираются дифференциальные уравнения, определяющие температурное поле и поле влажности соответственно, и поочередно вводятся соответствующие члены. Наконец, задаются граничные условия и запускается расчет (рис. 2). Для получения большего количества данных для исследования были заданы различные граничные условия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение температуры и содержания воды в процессе ее миграции

Как показано на рис. 3, при температуре верхней поверхности образца грунта -5°C фронт замерзания с течением времени перемещается вниз, посте-

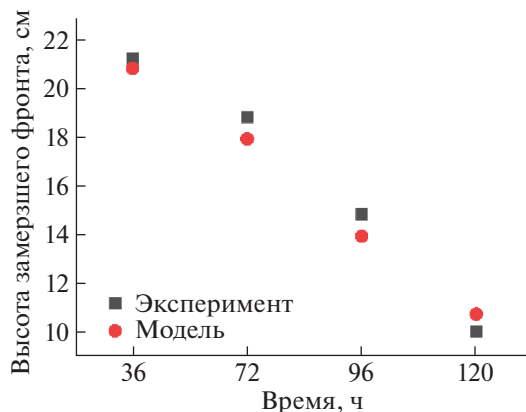


Рис. 3. Экспериментальное и модельное изменение глубины морозного фронта с течением времени.

пенно замедляясь. При этом экспериментальные результаты совпадают с результатами численного моделирования, что подтверждает целесообразность применения метода моделирования.

Согласно численному моделированию и экспериментальным результатам, содержание незамерзшей воды в мерзлой зоне со временем уменьшится. Когда поровая вода замерзает и расширяется, давление в поровом пространстве увеличивается, создавая положительное давление. Кроме того, поровый лед в зоне замерзания блокирует поступление незамерзшей воды в поровое пространство, в результате чего содержание незамерзшей воды в зоне замерзания достигает максимума вблизи границы замерзания. В то же время экспериментальные результаты влажности хорошо совпадают с результатами моделирования, что подтверждает правомерность примененного метода моделирования (рис. 4).

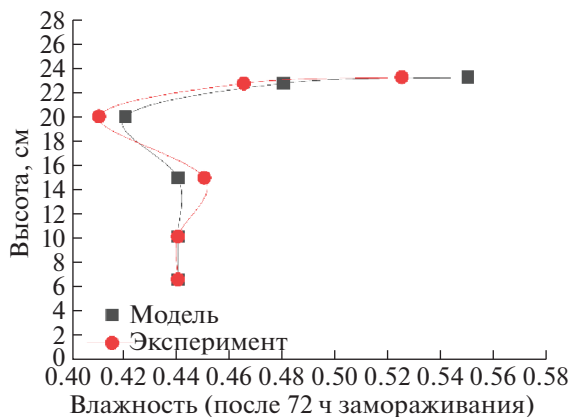
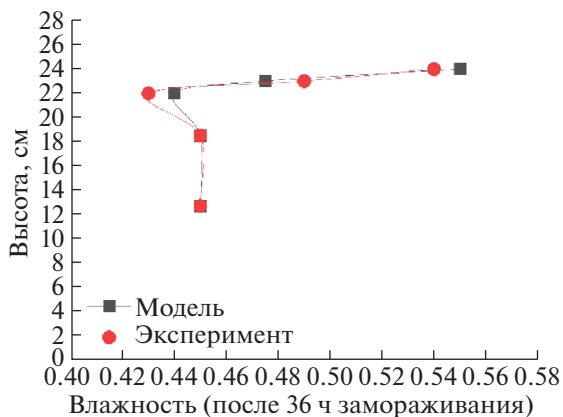


Рис. 4. Экспериментальное и модельное изменение содержания воды с течением времени на разных глубинах.

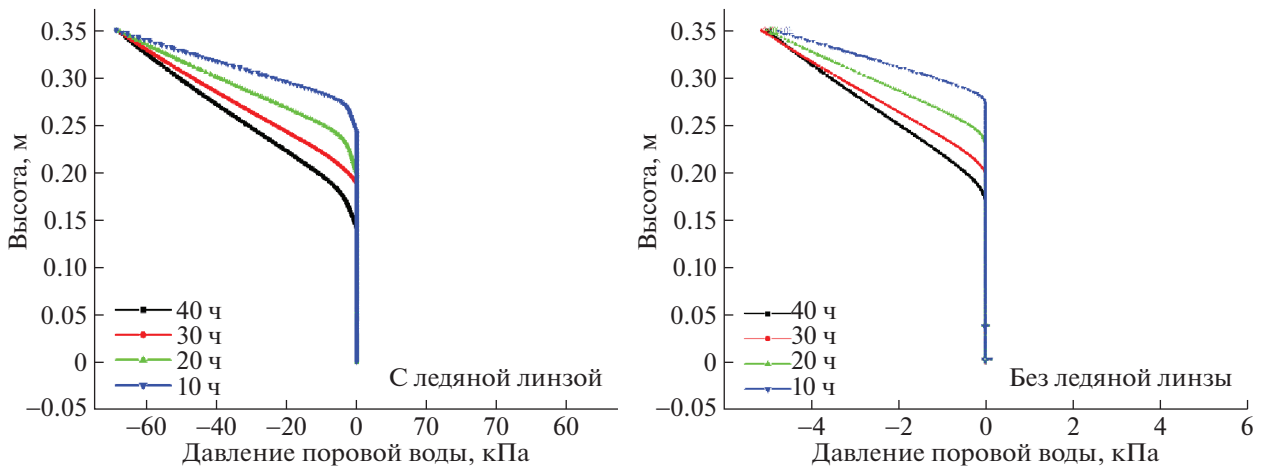


Рис. 5. Изменение давления поровой воды с течением времени на разных глубинах (температура верхней поверхности модели -5°C).

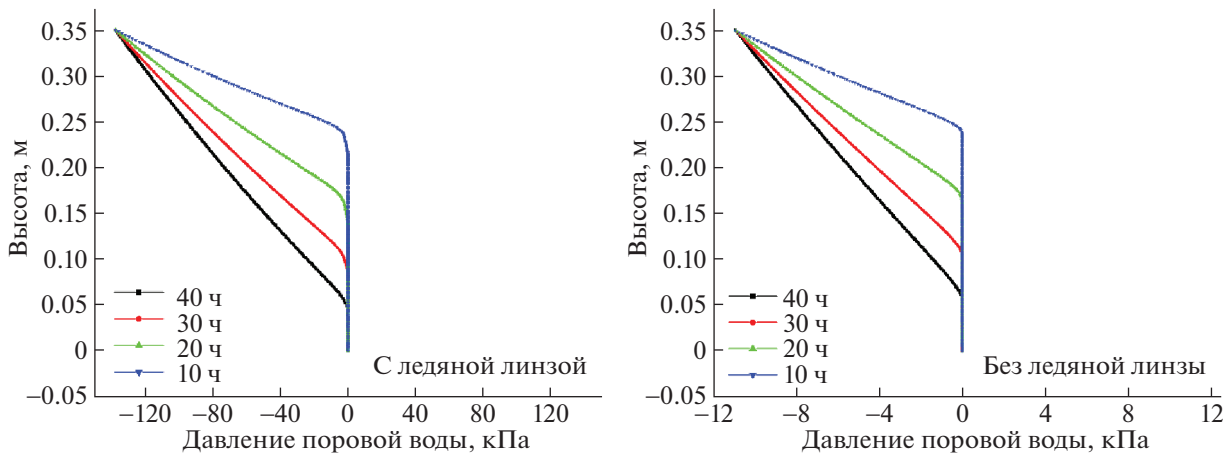


Рис. 6. Изменение давления поровой воды с течением времени на разных глубинах (температура верхней поверхности модели -10°C).

Изменение порового давления воды при миграции влаги

При промерзании образца грунта поровая вода в мерзлой зоне постепенно переходит в лед с объемным расширением, вызывая морозное пучение. В то же время часть незамерзшей воды будет отжиматься, создавая определенное давление поровой воды. По мере увеличения глубины промерзания величина давления поровой воды постепенно уменьшается, снижаясь до нуля у фронта промерзания.

Наиболее важный вывод – давление воды в порах промерзающего грунта с ледяной линзой едва ли не в 10 раз больше, чем без ледяной линзы, а расчетные результаты согласуются с ранее известными экспериментальными результатами (рис. 5).

После 10 ч заморозания пиковое давление поровой воды на верхней поверхности образца при температуре -5°C достигало -5.011 кПа , а после 40 ч заморозания -50.16 кПа , обнаружена слабая тенден-

ция к повышению величины давления. В то же время в незамерзшей зоне значение давления поровой воды равно 0, что создает постоянную разность давлений поровой воды между незамерзшей и мерзлой зоной, что заставляет незамерзшую воду непрерывно двигаться из незамерзающей зоны в мерзлую.

При температуре верхней границы -10°C и времени заморозания 10 ч пиковое давление поровой воды в образце достигает -10.93 кПа , что в 2 раза больше, чем при температуре на верхней границе образца -5°C . Таким образом, можно утверждать, что температура заморозания определяет максимальное значение давления поровой воды.

При температуре верхней поверхности модели -10°C после 40 ч промерзания максимальное значение давления трудно измерить. Это связано с тем, что температура верхней поверхности слишком низкая, и незамерзшая вода на поверхности образца мерзлого образца быстро замерзает (рис. 6).

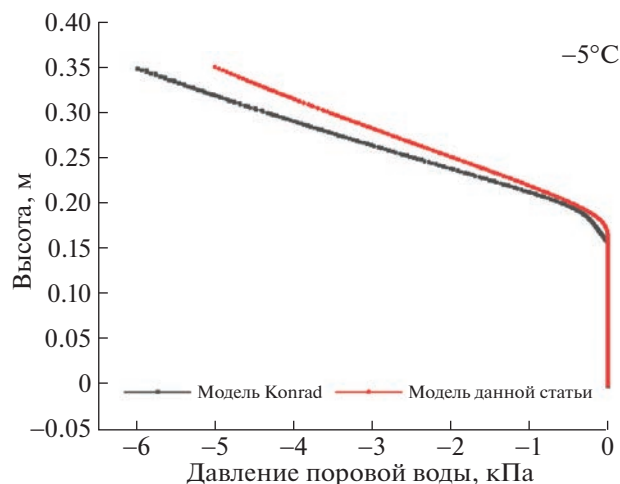


Рис. 7. Сравнение результатов модели данной работы с моделью Konrad.

Уравнение Клаузиуса-Клапейрона, которое описывает равновесие фазового перехода, является основой, на которой основана модель Konrad [9]. Уравнение Клаузиуса-Клапейрона применимо при температуре от 0 до нескольких градусов Цельсия ниже точки замерзания, но не дает возможности описывать условия при более низких температурах, согласно текущим экспериментальным результатам [21].

Результаты численного моделирования в этом исследовании хорошо согласуются с таким выводом. В модели Konrad предполагается, что описывающие состояния равновесия величины давления поровой воды мерзлого грунта и давления льда равны. Однако, если вывести уравнение для напряжений льдонасыщенного мерзлого грунта, используя уравнение для эффективного напряжения ненасыщенного незамерзшего грунта, можно ввести весовой коэффициент χ , но его значение до сих пор неизвестно. Это исследование показало, что относительные количества поровой воды и порового льда связаны между собой: чем выше температура, тем в большем количестве присутствует поровая вода. Результаты расчетов по модели, представленной в этой статье, и модели Konrad близки на границе замерзания, как видно на рис. 7. Однако температура мерзлого грунта ниже, а количество порового льда выше в мерзлой зоне.

В твердом состоянии поровый лед демонстрирует способность к адсорбции поровой воды, что приводит, вероятно, к деформированию и разрушению пор. Значение давления воды ниже, чем результаты расчетов по модели Konrad [9]. Можно предположить, что модель, используемая в настоящей статье, более соответствует фактическим условиям промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен численный метод определения давления поровой воды мерзлого грунта, а также новая формула давления поровой воды, результаты расчетов по которой согласуются с результатами экспериментальных исследований. Это может обеспечить прогноз свойств промерзающих и мерзлых грунтов.

Численное моделирование выявило некоторые особенности динамики порового давления воды в мерзлых грунтах. Результаты наших расчетов в целом близки к ранее полученным данным, однако уравнение, предложенное в этой статье, может иметь большее значение при описании давления поровой воды, особенно при более низких температурах. При этом результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, давление воды в порах промерзающего грунта с ледяной линзой примерно в 10 раз больше, чем без ледяной линзы. Температура на охлаждаемой верхней поверхности образца прямо определяет верхний предел значения порового давления воды в промерзающем грунте. В зоне промерзания поровое давление воды уменьшается с глубиной быстрее, чем скорость снижения температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akagawa S., Hiasa S., Kanie S. et al. Pore water and effective pressure in the frozen fringe during soil freezing // Proc. of the Ninth Int. Conf. on Permafrost. 2008. P. 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102899>
2. Bai Qing-Bo, Li Xu, Tian Ya-Hu, Fang Jian-Hong. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2015. V. 37 (2). P. 131–136.
3. Beskow G. Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads: With Special Supplement for the English Translation of Progress from 1935 to 1946 // Technological Institute, Northwestern University. 1947. <https://doi.org/10.1097/00010694-194804000-00015>
4. Fowler A. Secondary frost heaving in freezing soils // SLAM Journal on Applied Mathematics, 1989. V. 49. P. 991–1008. <https://doi.org/10.1137/0149060>
5. Geng L., Tang S.Y., Cong X.Z., Ling J.Lu. Three-dimensional analysis of geosynthetic-encased granular columns for liquefaction mitigation // Geosynthetics International. 2016. V. 24 (1). P. 45–59. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00014>
6. Harlan R.L. Analysis of Coupled Heat-Fluid Transport in Partially Frozen Soil // Water Resources Research. 1973. V. 9 (5). P. 1314–1323. <https://doi.org/10.1029/wr009i005p01314>
7. Hoekstra P. Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing // Water Resources Research. 1996. V. 2

- (2). P. 241–250.
<https://doi.org/10.1029/wr002i002p00241>
8. *Huang X., Rudolph D.L.* Coupled model for water, vapour, heat, stress and strain fields in variably saturated freezing soils // *Advanced in Water Resources*. 2021. V. 154. P. 39–45.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103945>
 9. *Konrad J.M.* Unfrozen water as a function of void ratio in a clayey silt // *Cold Region Science and Technology*. 1990. V. 18 (1). P. 49–55.
[https://doi.org/10.1016/0165-232x\(90\)90037-w](https://doi.org/10.1016/0165-232x(90)90037-w)
 10. *Konrad J.M., Duquenois C.* A model for water transport and ice lensing in freezing soils // *Water Resources Research*. 1993. V. 29 (9). P. 3109–3124.
<https://doi.org/10.1029/93wr00773>
 11. *Konrad J.M., Morgenstern N.R.* A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils // *Canadian Geotechnical Journal*. 1980. V. 17. P. 473–486.
<https://doi.org/10.1139/t80-056>
 12. *Lai L., Zhang M. et al.* Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. V. 78. P. 805–819.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
 13. *Loch J.P.G., Kay B.D.* Water Redistribution in Partially Frozen, Saturated silt Under Several Temperature Gradients and Overburden Loads // *Soil Science Society of America Journal*. 1978. V. 42 (30). P. 400–406.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030005x>
 14. *Lu Ning, Likos William J.* Unsaturated soil mechanics. Beijing: Higher Education Press. 2012. P. 269–287.
 15. *Miller R.D.* Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils // *Highway Research Record*. 1972. V. 393. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1029/2011wr010512>
 16. *Miller R.D.* Frost heaving in non-colloidal soils // In: *Proc. third international permafrost conference*, Edmonton, Canada. 1978. P. 708–713.
 17. *Miller R.D.* Lens initiation in secondary heaving // *Highway research record*. 1972. V. 393. P. 1–11.
 18. *O'Neill K.* The physics of mathematical frost heave models: a review // *Cold Regions Science and Technology*. 1983. V. 6 (3). P. 275–291.
[https://doi.org/10.1016/0165-232x\(83\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0165-232x(83)90048-4)
 19. *Taber S.* Frost heaving // *The Journal of Geology*. 1929. V. 37 (5). P. 428–461.
<https://doi.org/10.1086/623637>
 20. *Thomas H.R., Cleall P. et al.* Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils // *Geotechnique*. 2009. V. 29 (3). P. 173–184.
<https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.173>
 21. *Zeng Guijun, Zhang Mingyi, Li Zhenping et al.* Review of mechanical criterion for formation of ice lens in freezing soil // *J. of Glaciology and Geocryology*. 2015. V. 37 (1). P. 192–201.
 22. *Zhang Lian-Hai, Ma Wei, Shi Ya-Jun et al.* The modes and its implications of water accumulation near the freezing front during soil freezing with considering ice segregation // *J. of Glaciology and Geocryology*. 2022. V. 44 (6). P. 1–11.
 23. *Zhou J.Z., Li D.* Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil // *Cold Regions Science & Technology*. 2012. V. 72. P. 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.006>

MODELING OF PORE WATER PRESSURE IN FREEZING DISPERSED SOILS DURING MOISTURE MIGRATION

Zhou Bicheng^{a, #}, A. V. Brushkov^{a, ##}, and Hu JiaBo^{b, ***}

^a*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

^b*China University of Geosciences, Lumo Av., Wuhan, Hubei, 430074 China*

[#]*E-mail: zhoubicheng@mail.ru*

^{##}*E-mail: brouchkov@geol.msu.ru*

^{***}*E-mail: jiabo96@163.com*

Frost heaving of soils is the main cause of engineering accidents in cold regions, but the current experimental as well as numerical studies focus on frost heaving deformation of soils, while there are fewer numerical studies on the main factors causing frost heaving deformation: pore water pressure. In this study, new calculation formulas of pore water pressure for saturated frozen soil are obtained by solving Gibbs free energy equation, and a thermo-hydraulic coupling model under different boundary conditions is constructed to calculate the pore water pressure values and water flow during water migration process. The results showed: (1) the pore water pressure of freezing soil with the ice lens is about ten times that without the ice lens, and the calculated results agree with the previous known experimental results; (2) The temperature of the cold end directly determines the upper limit of the pore water pressure value of freezing soil; (3) Pore water pressure decreases with depth much faster than the rate of temperature decrease.

Keywords: *saturated frozen soil, pore water pressure, ice lens, moisture migration, modeling method*

REFERENCES

1. Akagawa, S., Hiasa, S., Kanie, S. et al. Pore water and effective pressure in the frozen fringe during soil freezing. In: Proc. the 9th Int. Conf. on Permafrost, 2008, pp. 13–18.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102899>
2. Bai Qing-Bo, Li Xu, Tian Ya-Hu, Fang Jian-Hong. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, vol. 37 (2), pp. 131–136.
3. Beskow, G. Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads: with special supplement for the English translation of progress from 1935 to 1946. Technological Institute, Northwestern University. 1947.
<https://doi.org/10.1097/00010694-194804000-00015>
4. Fowler, A. Secondary frost heaving in freezing soils. *SLAM Journal on Applied Mathematics*, 1989, vol. 49, pp. 991–1008. <https://doi.org/10.1137/0149060>
5. Geng, L., Tang, S.Y., Cong, X.Z. Ling, J.Lu. Three-dimensional analysis of geosynthetic-encased granular columns for liquefaction mitigation. *Geosynthetics International*, 2016, vol. 24 (1), pp. 45–59.
<https://doi.org/10.1680/jgein.16.00014>
6. Harlan, R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*, 1973, vol. 9 (5), pp. 1314–1323.
<https://doi.org/10.1029/wr009i005p01314>
7. Hoekstra, P. Moisture movement in soils under temperature gradients with the cold-side temperature below freezing. *Water Resources Research*, 1996, vol. 2 (2), pp. 241–250.
<https://doi.org/10.1029/wr002i002p00241>
8. Huang, X., Rudolph, D.L. Coupled model for water, vapour, heat, stress and strain fields in variably saturated freezing soils. *Advances in Water Resources*, 2021, vol. 154, pp. 39–45.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103945>
9. Konrad, J.M. Unfrozen water as a function of void ratio in a clayey silt. *Cold Region Science and Technology*, 1990, vol. 18 (1), pp. 49–55.
[https://doi.org/10.1016/0165-232x\(90\)90037-w](https://doi.org/10.1016/0165-232x(90)90037-w)
10. Konrad, J.M., Duquenois, C. A model for water transport and ice lensing in freezing soils. *Water Resources Research*, 1993, vol. 29 (9), pp. 3109–3124.
<https://doi.org/10.1029/93wr00773>
11. Konrad, J.M., Morgenstern, N.R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, vol.17, pp. 473–486.
<https://doi.org/10.1139/t80-056>
12. Lai, L., Zhang, M. et al. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 78, pp. 805–819.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035>
13. Loch, J.P.G., Kay, B.D. Water Redistribution in Partially Frozen, Saturated Silt Under Several Temperature Gradients and Overburden Loads. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, vol. 42 (30), pp. 400–406.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030005x>
14. Lu Ning, Likos William J. Unsaturated soil mechanics. Beijing: Higher Education Press, 2012, pp. 269–287.
15. Miller, R.D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. *Highway Research Record*, 1972, vol. 393, pp. 1–11.
<https://doi.org/10.1029/2011wr010512>
16. Miller, R.D. Frost heaving in non-colloidal soils. In: Proc. 3rd Intern. Permafrost Conf., Edmonton, Canada, 1978, pp. 708–713.
17. Miller, R.D. Lens initiation in secondary heaving. *Highway research record*, 1972, vol. 393, pp. 1–11.
18. O'Neill, K. The physics of mathematical frost heave models: a review. *Cold Regions Science and Technology*, 1983, vol. 6 (3), pp. 275–291.
[https://doi.org/10.1016/0165-232x\(83\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0165-232x(83)90048-4)
19. Taber, S. Frost heaving. *The Journal of Geology*, 1929, vol. 37 (5), pp. 428–461.
<https://doi.org/10.1086/623637>
20. Thomas, H.R., Cleall, P. et al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Geotechnique*, 2009, vol. 29 (3), pp. 173–184.
<https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.173>
21. Zeng Guijun, Zhang Mingyi, Li Zhenping et al. Review of mechanical criterion for formation of ice lens in freezing soil. *J. of Glaciology and Geocryology*, 2015, vol. 37 (1), pp. 192–201.
22. Zhang Lian-Hai, Ma Wei, Shi Ya-Jun et al. The modes and its implications of water accumulation near the freezing front during soil freezing with considering ice segregation. *J. of Glaciology and Geocryology*, 2022, vol. 44 (6), pp. 1–11.
23. Zhou, J.Z., Li, D. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil. *Cold Regions Science & Technology*, 2012, vol. 72, pp. 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.006>

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 624.131.3, 624.131.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПАКШ-2 (ВЕНГРИЯ)

© 2023 г. А. М. Никуленков^{1,2,*}, О. И. Новицкая³, В. Г. Румынин^{1,2}, М. В. Вилькина^{1,2},
А. А. Шварц^{1,2}, Л. Н. Синдаловский^{1,2}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Средний пр. 41, оф. 519, В.О., Санкт-Петербург, 199004 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб. 13, В.О., Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Санкт-Петербургский отдел изысканий АО «Атомэнергопроект»,
ул. Савушкина 82, Санкт-Петербург, 197183 Россия

*E-mail: annik@hgepro.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Возведение котлована глубокого заложения на участке строительства АЭС Пакш-2 в сильнообводненных аллювиальных грунтах потребовало строительства замкнутой противofильтрационной завесы (ПФЗ). Однако литологическая неоднородность и наличие зон дислокаций не позволяли однозначно идентифицировать оптимальную глубину заложения ПФЗ. Для схематизации гидрогеологических условий привлечены результаты мониторинга уровней подземных вод в скважинах различной глубины и проведены масштабные кустовые откачки. Интерпретация данных геологического строения с выделением границ водоносных горизонтов проводилась итерационным путем с использованием численной гидрогеологической модели. На модели воспроизводилось распределение уровней воды, реакция неоднородной толщи на колебания в р. Дунай и откачки из скважин различной глубины. По результатам гидрогеологического моделирования было показано, что первый водоупорный слой является выдержанным, но глубина его залегания варьирует от 30 до 90 м в пределах строительной площадки. Сложная морфология водоупорного слоя контролируется пликативной зоной дислокации (борт глубокого грабена), секущей площадку строительства пополам. Корректная гидрогеологическая стратификация позволила обосновать на модели водозащитные мероприятия (ПФЗ) для строительства глубокого котлована АЭС Пакш-2, а также не допустить значимого гидродинамического воздействия на расположенную по соседству действующую АЭС Пакш-1.

Ключевые слова: гидрогеологическое исследование, гидродинамическая томография, моделирование, строительство АЭС

DOI: 10.31857/S0869780923060061, EDN: CTVEDE

ВВЕДЕНИЕ

Объектом настоящего исследования является площадка строительства атомной электростанции (АЭС) Пакш-2, расположенная в центральной части Венгрии, в 100 км к югу от г. Будапешт на правом берегу р. Дунай. На ее территории планируется возведение 5 и 6 энергоблоков.

Территория площадки строительства располагается в пойме р. Дунай. Основанием для фундаментов АЭС служат высоко водопроводящие аллювиальные отложения мощностью до 30 м, представленные песками разной крупности и гравием, причем доля крупной фракции в разрезе увеличивается с глубиной. Суммарная проводи-

мость толщи аллювиальных отложений достигает 2000 м²/сут. Аллювиальные отложения подстилает терригенная толща, представленная чередованием паннонских песков и глин суммарной мощностью до нескольких километров. В отличие от аллювиальных отложений, паннонские отложения характеризуются значительно большей литологической неоднородностью, как в плане, так и в разрезе. Прослеживание литологических границ внутри паннонской толщи между двумя соседними скважинами является не тривиальной задачей.

Южная часть площадки строительства располагается в зоне развития региональной линейной дислокации Дунаентдёрдь-Харта, которая ока-

зала непосредственное влияние на геометрию слоев паннонской осадочной толщи [7].

Дополнительные трудности при строительстве АЭС создает режим р. Дунай. Так, согласно данным наблюдений на гидростоях, за 1–2 дня уровень воды в реке может подниматься на 3–5 м, а годовая амплитуда может достигать 10 м. Резко нестационарный режим реки неминуемо находит свое отражение в флуктуациях уровней подземных вод (УПВ) на прибрежной территории, где расположена площадка строительства АЭС. Годовые амплитуды УПВ в некоторых мониторинговых скважинах могут достигать 5–8 м.

Современные требования безопасности АЭС предписывают заглублять опасные здания и сооружения АЭС в грунтовый массив. Поэтому, в отличие от “советских” АЭС, строительство новых АЭС с реакторами поколения III+ сопровождается разработкой котлована глубиной до 20–25 м. Высокая водопроницаемость аллювиальных отложений, сильная фильтрационная и литологическая неоднородность, резко нестационарный режим подземных вод, неопределенность границ распространения водоупорных и проницаемых слоев, близость р. Дунай – все эти факторы значительно усложняют задачу строительства заглубленных котлованов под АЭС Пакш-2.

В первую очередь это связано с тем, что открытый водоотлив из строительного котлована будет формировать обширную депрессионную воронку подземных вод. Это может привести к интенсификации просадок земной поверхности за счет консолидации глинистых прослоев при увеличении эффективных напряжений в грунтовом массиве [3, 6]. Неравномерная просадка грунтов вблизи пло-

щадки строительства неприемлема, поскольку в непосредственной близости от котлована располагаются действующие энергоблоки АЭС Пакш-1, имеющие строгие допуски по кренам. Кроме того, значительный водоприток в строительный котлован, помимо эксплуатационных затрат по водопонижению, будет приводить к постоянному оплыванию бортов котлована, и также остро поднимает вопрос очистки и утилизации большого количества дренажных вод.

С учетом сложных природных условий на площадке АЭС Пакш-2 был проведен дополнительный комплекс полевых работ и выполнено гидрогеологическое моделирование. Это дало возможность идентифицировать структуру фильтрационного потока подземных вод, провести схематизацию гидрогеологических условий, а затем обосновать оптимальную конструкцию (размер и глубину заложения) противофильтрационной завесы. Предложенный по результатам работ замкнутый контур ПФЗ позволит значительно сократить притоки в котлован и сведет до минимума гидродинамическое воздействие от строительного водоотлива на действующую АЭС Пакш-1.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований на площадке строительства АЭС Пакш-2 были выполнены стандартные и специальные методы инженерно-геологических исследований (табл. 1). В частности, выполнено бурение инженерно-геологических скважин; статическое зондирование; площадная и скважинная геофизика; лабораторные испытания грунтов; организована сеть монито-

Таблица 1. Перечень методов опробования гидрогеологической среды на участке строительства АЭС Пакш-2

Методы опробования	Количество определений	Определяемые характеристики	Примечание
Инженерно-геологические скважины	Свыше 1000 скважин	Литологический состав	Отбор образцов керна в скважинах глубиной до 150 м
Одиночные откачки	81 откачка	k_x, k_z	Откачки с тремя ступенями расхода
Кустовые откачки	12 откачек	k_x, k_z, S_s, S_y	Откачки из кластеров скважин, оборудованных на разную глубину
Откачка вблизи р. Дунай	2 откачки	ΔL	Откачка с линейным рядом из 15 скважин
Гидродинамическая томография	4 серии	k_x, k_z, S_s , сплошность водоупора	Поинтервальное прослеживание гидродинамического импульса
Гидрогеологический мониторинг	Свыше 80 скважин	Режим УПВ	Непрерывный ряд наблюдений на протяжении 8 лет

k_x, k_z – горизонтальный и вертикальный коэффициент фильтрации соответственно; S_s – удельная водоотдача; S_y – гравитационная водоотдача; ΔL – сопротивление русла реки.

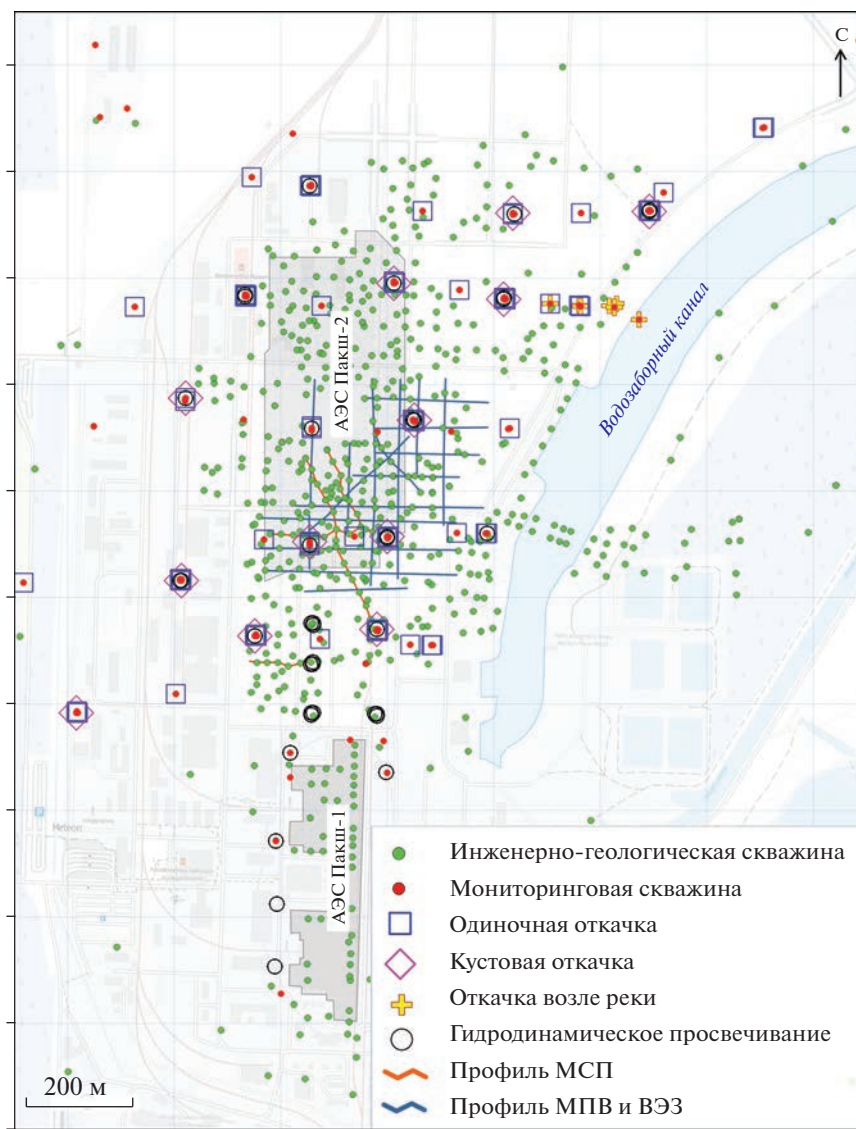


Рис. 1. Методы исследования на площадке строительства АЭС Пакш-2.

ринговых гидрогеологических скважин различной глубины; выполнены опытно-фильтрационные работы и гидродинамическая томография; создана гидрогеологическая модель.

Бурение инженерно-геологических скважин

Для изучения инженерно-геологических условий площадки АЭС Пакш-2 было выполнено бурение более 1000 скважин с отбором керна (рис. 1) и полной документацией.

Скважины расположены на расстоянии 20–50 м, их глубина варьирует от 15 до 150 м. В процессе бурения было установлено, что толща аллювиальных отложений залегает субгоризонтально и имеет довольно выдержанные границы.

Напротив, нижележащая толща паннонских отложений обладает значительной литологической неоднородностью (рис. 2). Порой даже в соседних скважинах, расположенных на расстоянии 20 м друг от друга, наблюдается различный набор глинистых и песчаных слоев. Поэтому для интерпретации полученных данных был проведен комплекс геофизических исследований в скважинах, а также выполнено статическое зондирование в более чем 500 точках. Кроме того, была разработана система индикаторных признаков и маркирующих горизонтов, которые позволяли объективно выделять в разрезе обособленные интервалы. К таким признакам относились: цвет грунтов, наличие прослоя лигнита, диаграммы гамма-каротажа, соотношение лобового и бокового сопротивлений и др.

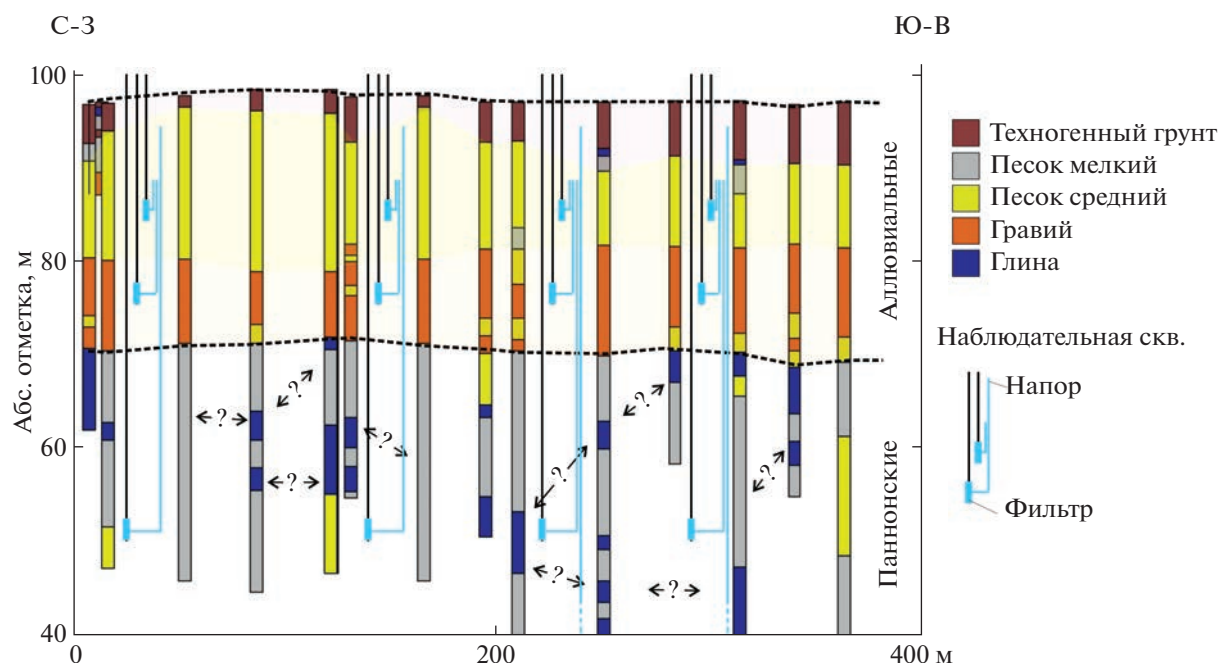


Рис. 2. Сопоставление геологических колонок скважин на территории АЭС Пакш-2.

Геофизические методы

На участке исследования был проведен комплекс геофизических исследований (см. рис. 1). По профилям выполнены сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ), а также электроразведочные работы методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). В месте проектируемого 5-го энергоблока выполнено межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП) на продольных и поперечных волнах по четырем сечениям. К сожалению, помехи от работы АЭС и коммуникаций на техногенно-освоенной территории площадки строительства не позволили раскрыть весь потенциал площадных и точечных сейсморазведочных методов.

Мониторинг за УПВ

Положение УПВ на площадке строительства АЭС Пакш-2 и ее ближайших окрестностей является одним из критериев безопасности действующей АЭС Пакш-1. Поэтому для осуществления непрерывного контроля за УПВ на территории строительства была организована сеть из более чем 80 ярусных наблюдательных (мониторинговых) скважин несовершенными по степени вскрытия. Длина фильтра, как правило, не превышала 5 м. Фильтры оборудованы на 4 яруса. Типовые глубины установки фильтров: 9–14, 10–24, 44–49 и 94–99 м. Первые два уровня глубин отвечали интервалам залегания аллювиальных отложений, а нижние два интервала приурочены к паннонским отложениям. Регистрация УПВ в

скважинах проводилась автоматическими датчиками с частотой 1 раз в час и дополнялась ручными контрольными замерами 1 раз в 2 нед.

Опытно-фильтрационные работы

Для изучения фильтрационной неоднородности в плане и по глубине на исследуемом участке был выполнен обширный набор опытно-фильтрационных работ, опробующих как верхние, так и нижние интервалы методами одиночной и кустовой откачки. В частности, была выполнена 81 одиночная и 12 кустовых откачек. Длительность опробований варьировала от 4 ч до нескольких недель. Для большинства скважин во время откачки создавались 3–4 степени расхода.

Для изучения гидравлической связи р. Дунай и отводящего канала с подземными водами, в прибрежной зоне проведено 2 кустовых откачки. Каждая откачка включала линейный ряд из 15 наблюдательных скважин, оборудованных на различные горизонты. На протяжении месяца в каждом кусте проводилась откачка с тремя степенями расхода: 1000, 2000 и 3000 л/мин. Интерпретация результатов опробований проводилась графоаналитическим методом и подбором параметров в программе АНСДИМАТ [2]. Обработка длительных откачек вдоль реки велась с учетом изменения уровня в ней.

Гидродинамическая томография

Плотная сеть наблюдательных скважин, как в плане, так и по глубине дает возможность проследить реакцию в различных интервалах разреза и на

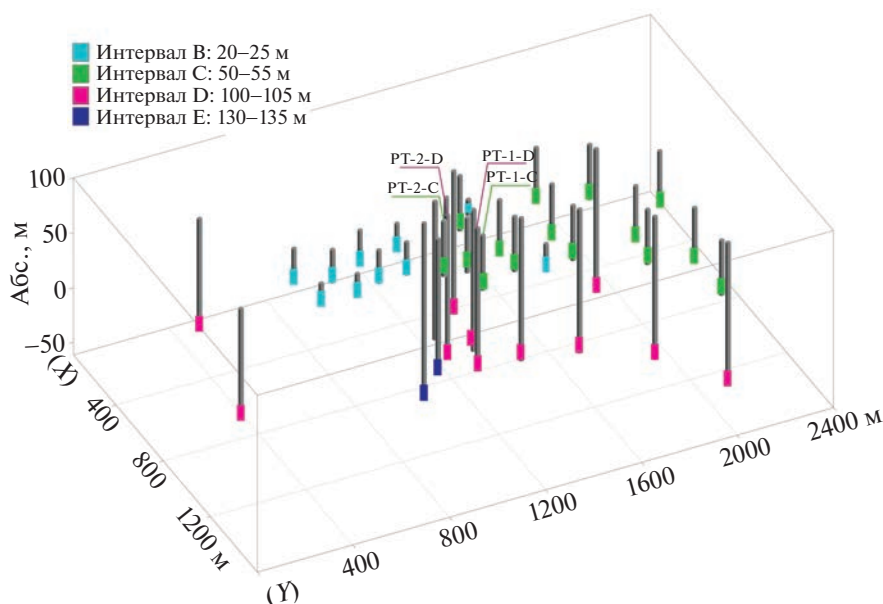


Рис. 3. Трехмерная диаграмма со скважинами, задействованными во время проведения гидродинамической томографии.

разном удалении от откачивающих скважин. Анализ такого рода информации позволяет сделать выводы не только о фильтрационной неоднородности массива, но и о структуре потока подземных вод. Метод пространственного поинтервального прослеживания гидродинамического возмущения получил название гидродинамической томографии.

Значительный вклад в развитие гидродинамической томографии внесли исследования на участке North Campus Research Site, Канада [5, 12–14]. Обширное практическое применение метод получил для интерпретации данных, полученных при эксплуатации муниципального водозабора Mannheim East [9]. Возможности гидродинамического просвечивания в трещиновато-пористой среде были исследованы подземной исследовательской лабораторией Мицунами, Япония [8].

Для гидродинамической томографии на площадке строительства АЭС Пакш-2 было задействовано 45 наблюдательных скважин, оборудованных на интервалы разреза от 14 до 129 м (рис. 3). Гидродинамическое возмущение длительностью 7 сут очередно создавалось в четырех скважинах, оборудованных на разные интервалы паннонской терригенной толщи (глубины 45, 99, 129 м).

Интерпретация результатов гидродинамического прослеживания проводилась на численной гидрогеологической модели.

Гидрогеологическая модель

Весь объем геологической и гидрогеологической информации, полученный полевыми методами,

был учтен при создании трехмерной гидродинамической модели. Для создания модели использовался открытый программный код MODFLOW [10].

Поскольку выделение в паннонских отложениях границ проницаемых и непроницаемых слоев допускает многовариантность, на гидродинамической модели проигрывались различные концепции геологического строения. Они увязывались с данными по геологии в отдельных точках (в скважинах), с распределением УПВ, а также с реакцией наблюдательных скважин на откачки. В процессе моделирования подбиралась такая реализация геологических условий, которая могла одновременно хорошо описать все привлеченные фактические данные.

Каркас модели состоял из 22 расчетных слоев, размер – 7840 × 4800 м с нерегулярным размером блоков: от 250 × 100 м на периферии до 5 × 5 м непосредственно на площадке строительства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ

Оценка гидравлической связи подземных и поверхностных вод по данным режимных наблюдений

Анализ реакции УПВ в гидрогеологических скважинах на изменение уровней в р. Дунай позволил оценить гидравлическую связь подземных и поверхностных вод, а также рассчитать емкостные параметры водоносного пласта. Для этого было использовано уравнение подпора с учетом сопротивления русла реки и перетекания в смеж-

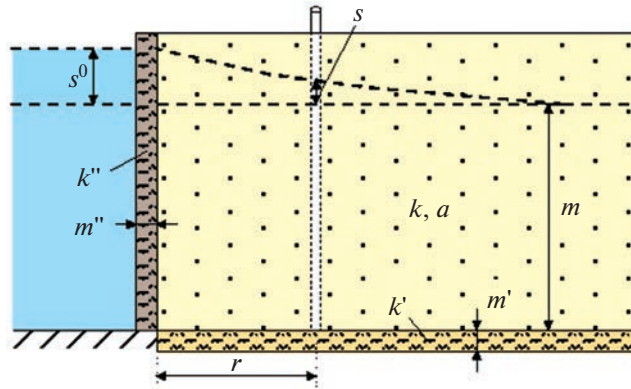


Рис. 4. Схема для обработки данных режимных наблюдений за уровнями подземных вод вблизи реки.

ные горизонты (1) [2, 11]. Схематизация гидрогеологических условий приведена на рис. 4. Ин-

терпретация данных мониторинга проводилась с помощью программы АНСДИМАТ [2].

$$s = s^0 \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\exp(-r/B) \operatorname{erfc} \frac{r-2at/B}{2\sqrt{at}} + \frac{\exp(r/B) \operatorname{erfc} \frac{r+2at/B}{2\sqrt{at}}}{1 - \Delta L^2/B^2} \right] - \frac{\exp[r/\Delta L + (1 - \Delta L^2/B^2)at/\Delta L^2] \operatorname{erfc} \frac{r+2at/\Delta L}{2\sqrt{at}}}{1 - \Delta L^2/B^2} \right\}, \quad (1)$$

где s – изменение уровня воды в наблюдательной скважине, м; s^0 – мгновенное изменение уровня воды в реке, м; r – расстояние от наблюдательной скважины до реки, м; t – время от начала возмущения в реке, сут; $\Delta L = m''k/k''$ – сопротивление русла реки, м; a – удельная пористость водоносного горизонта, м²/сут; $B = \sqrt{(kmm'/k')}$ – параметр перетекания, м; k, m, k', m', k'', m'' – коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность (м) водоносного горизонта, слабопроницаемого слоя и подрусловых отложений соответственно.

Колебания уровней воды в р. Дунай были учтены путем разбиения гидрографа реки на ступени и последующим применением к уравнению (1) принципа суперпозиции:

$$s = \sum_{j=1}^{n_j} \{(s_j^0 - s_{j-1}^0) f[r, (t - t_j)]\}, \quad (2)$$

где $f(r, t)$ – функция, описывающая изменение УПВ в наблюдательной скважине; n_j – количество ступеней изменения уровня в реке на момент времени t_j ; s_j^0 – величина j -й ступени изменения уровня в реке ($s_0^0 = 0$), м; t_j – время начала j -й ступени ($t_j = 0$), сут.

Для интерпретации были выбраны ряды данных мониторинга продолжительностью 4 года (с 2009 по 2012 г). Уровень воды в р. Дунай измерялся ежедневно, а уровни воды в скважинах, оборудованных фильтрами на слой гравия, изме-

рялись с частотой 1 раз в 2 нед. Используя уравнение (1) и (2), при заданной функции колебаний уровней воды в реке рассчитывались флуктуации уровня (реакция) воды в гидрогеологических скважинах, расположенных на разном удалении от нее. В аналитическом решении варьировали параметрами сопротивления русла реки, перетекания и пьезопроводности до тех пор, пока расчетные уровни воды в скважинах не совпадали с фактическими измеренными (рис. 5). По результатам интерпретации было установлено, что величина сопротивления русла реки (ΔL) лежит в диапазоне от 100 до 200 м. Это свидетельствует об относительно хорошей гидравлической связи между подземными и поверхностными водами на территории строительной площадки, расположенной в долине р. Дунай.

Гидрогеологическая схематизация сильно неоднородного разреза по характеру распределения напоров с глубиной

В обустроенных на площадке ярусных гидрогеологических скважинах было проанализировано распределение напоров подземных вод с глубиной. Удалось установить, что в большинстве случаев на глубинах 14 и 24 м подземные воды имеют единую пьезометрическую поверхность, т.е. уровни воды в скважинах устанавливаются на одной и той же глубине (см. рис. 2, рис. 6). При вскрытии скважинами более глубоких ин-

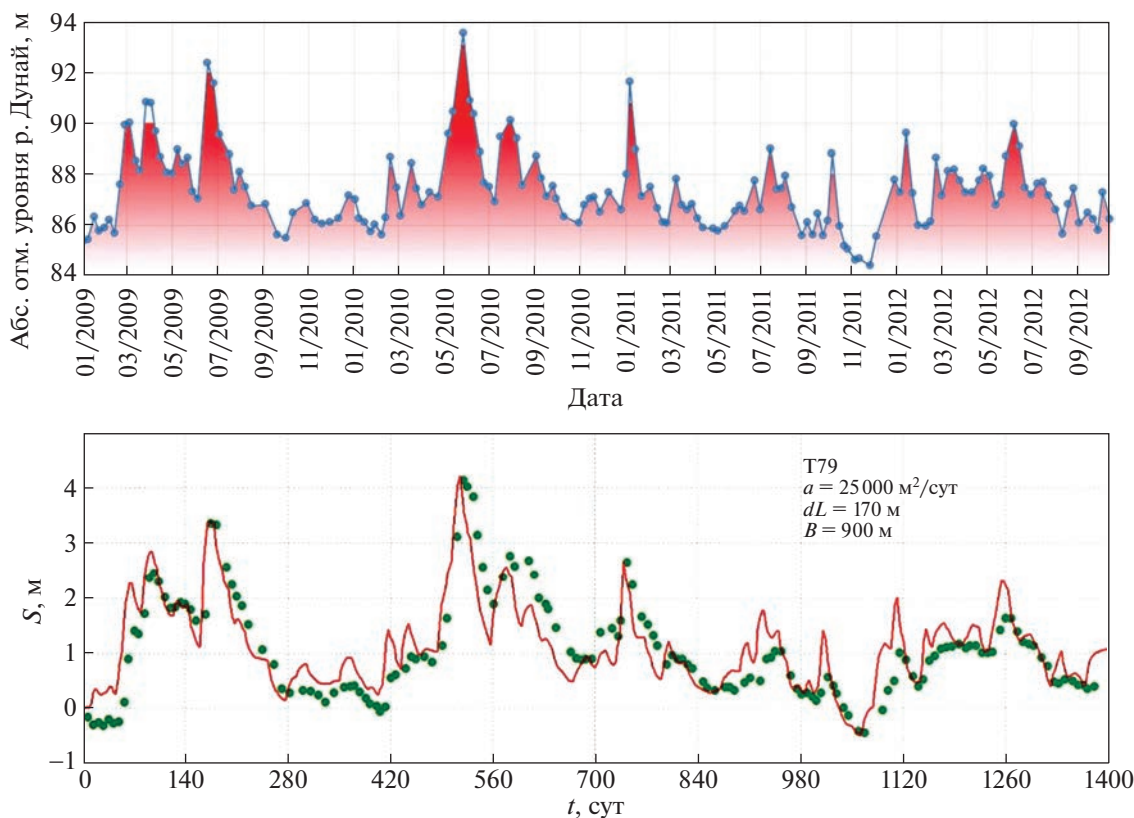


Рис. 5. Оценка гидравлической связи подземных и поверхностных вод по данным режимных наблюдений.

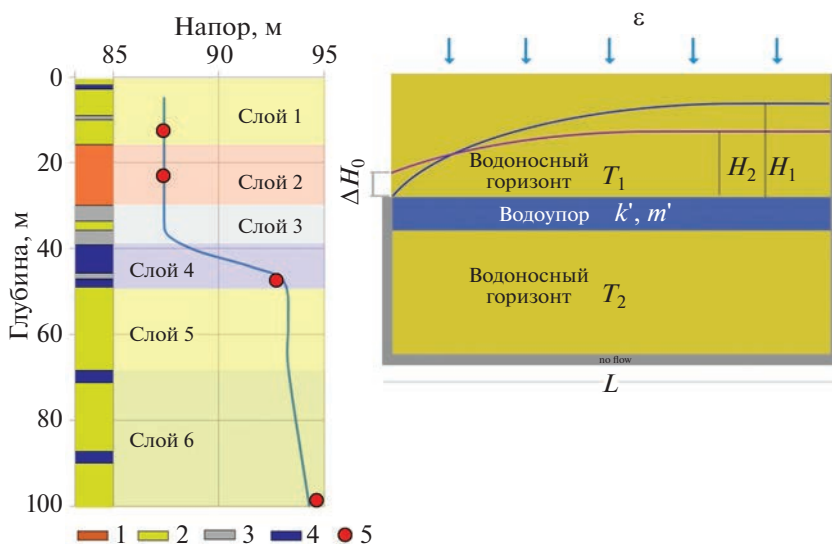


Рис. 6. Особенности распределения напоров подземных вод в слоистой толще: а – распределение фактических напоров по глубине в кусте скважин III-б; б – схема формирования разницы напоров. Условные обозначения: 1 – гравий, 2 – пески средние, 3 – пески мелкие, 4 – глина, 5 – наблюдаемый напор подземных вод.

тервалов (паннонских слоев) происходит подъем уровней воды в стволе, т.е. проявляется напорность. В среднем, пьезометрическая поверхность

воды в глубоких скважинах (49 м и глубже) устанавливается на 4–6 м выше, чем в неглубоких скважинах (см. рис. 6). Такое различное поведение

ние уровней свидетельствует о наличии водоупорного слоя в разрезе на территории площадки в интервале глубин от 24 до 49 м.

Разница напоров в слоистой толще в зоне разгрузки определяется целым комплексом параметров: величиной инфильтрационного питания, соотношением проводимостей водоносных горизонтов и коэффициентом фильтрации разделяющего слоя. Разница напоров может быть описана уравнением (3) [1].

$$\Delta H_0 \approx \varepsilon L \sqrt{\frac{m' T_2}{k' T_1 (T_1 + T_2)}}, \quad (3)$$

где ΔH_0 – разница напоров, м; ε – инфильтрационное питание, м/сут; L – длина от водораздела до зоны разгрузки, м; k' – коэффициент фильтрации и мощность (m') разделяющего слоя, м; T_1, T_2 – проводимость верхнего и нижнего водоносных горизонтов, м²/сут.

Согласно рис. 6 и уравнению (3), при прочих равных условиях, различия в напорах между двумя водоносными горизонтами будут определяться коэффициентом фильтрации разделяющего слоя: чем он больше, тем меньше разница напоров. В соответствии с (3) был оценен эффективный вертикальный коэффициент фильтрации водоупорного слоя, который составил 1.9×10^{-4} м/сут (при $\Delta H_0 = 5$ м, $L = 30$ км, $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-4}$ м/сут, $m' = 15$ м, $T_1 = 2000$ м²/сут, $T_2 = 150$ м²/сут).

При более детальном рассмотрении распределения уровней воды в ярусных скважинах оказалось, что часть скважин не подчиняется ранее установленной закономерности. Так, в группе скважин, приуроченных к южной части площадки, избыточные напоры появляются не с 49 м, а только с глубин 99 м и ниже (см. рис. 2). Это свидетельствует о хорошей гидравлической связи аллювиальных отложений с подстилающими частями паннонского разреза в южной части площадки.

Таким образом, по характеру распределения уровней воды с глубиной в ярусных скважинах удалось установить, что в разрезе исследуемой площадки до глубин 100 м можно выделить как минимум две зоны, которые гидравлически слабо связаны между собой. Верхняя зона – зона грунтовых (безнапорных) вод. Она приурочена преимущественно к аллювиальным отложениям. В северной части строительной площадки безнапорные воды распространяются до глубин 30–40 м, а в южной части до глубин 90 м и более. Напорные воды отделены от грунтового горизонта водоупорным слоем, сложным чередованием глинистых, супесчаных и песчаных разностей с эффективным коэффициентом фильтрации 2×10^{-4} м/сут.

Гидродинамическая томография водоносных пластов

Чтобы убедиться, что обнаруженный водоупорный интервал является выдержанным в плане, и в нем отсутствуют гидрогеологические окна, была проведена серия поинтервальных откачек из паннонской части разреза. Каждая откачка выполнялась из несовершенной по степени вскрытия скважины (длина фильтра 5 м). Во время откачки во всех наблюдательных скважинах мониторинговой сети площадки фиксировались уровни воды. В ходе эксперимента прослеживалась реакция от возмущающей скважины в наблюдательных на различном удалении, а также в разных интервалах глубин. Радиус гидродинамического влияния от откачивающей скважины превышал 1 км. Пример результатов гидродинамического прослеживания в плане и в разрезе приведен на рис. 7 и 8 соответственно.

По результатам гидродинамической томографии удалось установить следующее.

1. Опробуемый напорный водоносный горизонт можно схематизировать как неограниченный в плане. Это подтверждается симметричной формой депрессионной воронки и квазистационарным режимом откачки.

2. Субгоризонтальная кровля водоупора, залегающая на глубинах 30–35 м, резко погружается в южной части площадки строительства АЭС. Область погружения коррелирует с зоной распространения региональной линейной дислокации Дунастдёрдь-Харта. Таким образом, зона перегиба глинистого слоя ассоциируется с северо-западным бортом грабена.

3. Несмотря на сильную неоднородность водоупорного слоя (чередование линз глин, супесей, песков) и его значительную тектоническую деформацию в области перегиба, он проявляет признаки выдержанного в плане изолирующего (водоупорного) слоя. Это подтверждается отсутствием признаков перетекания на графиках временного прослеживания $s:lg(t)$ и отсутствием реакции в наблюдательных скважинах, оборудованных на верхние интервалы разреза. Таким образом, откачки подтвердили, что деформация глинистого слоя носит пликативный (без нарушения сплошности) характер.

4. Откачки показали, что в южной части площадки над основным водоупором в паннонской толще также выделяется серия более тонких выдержанных водоупорных глинистых слоев (см. рис. 8). Из-за особенностей тектонической структуры эти глинистые слои срезаются (выклиниваются) аллювиальными отложениями в районе южной границы площадки АЭС Пакш-2. Ввиду близости к зоне выклинивания, паннонская толща над основным водоупором имеет единую пьезометрическую поверхность с безнапорным водоносным горизонтом.

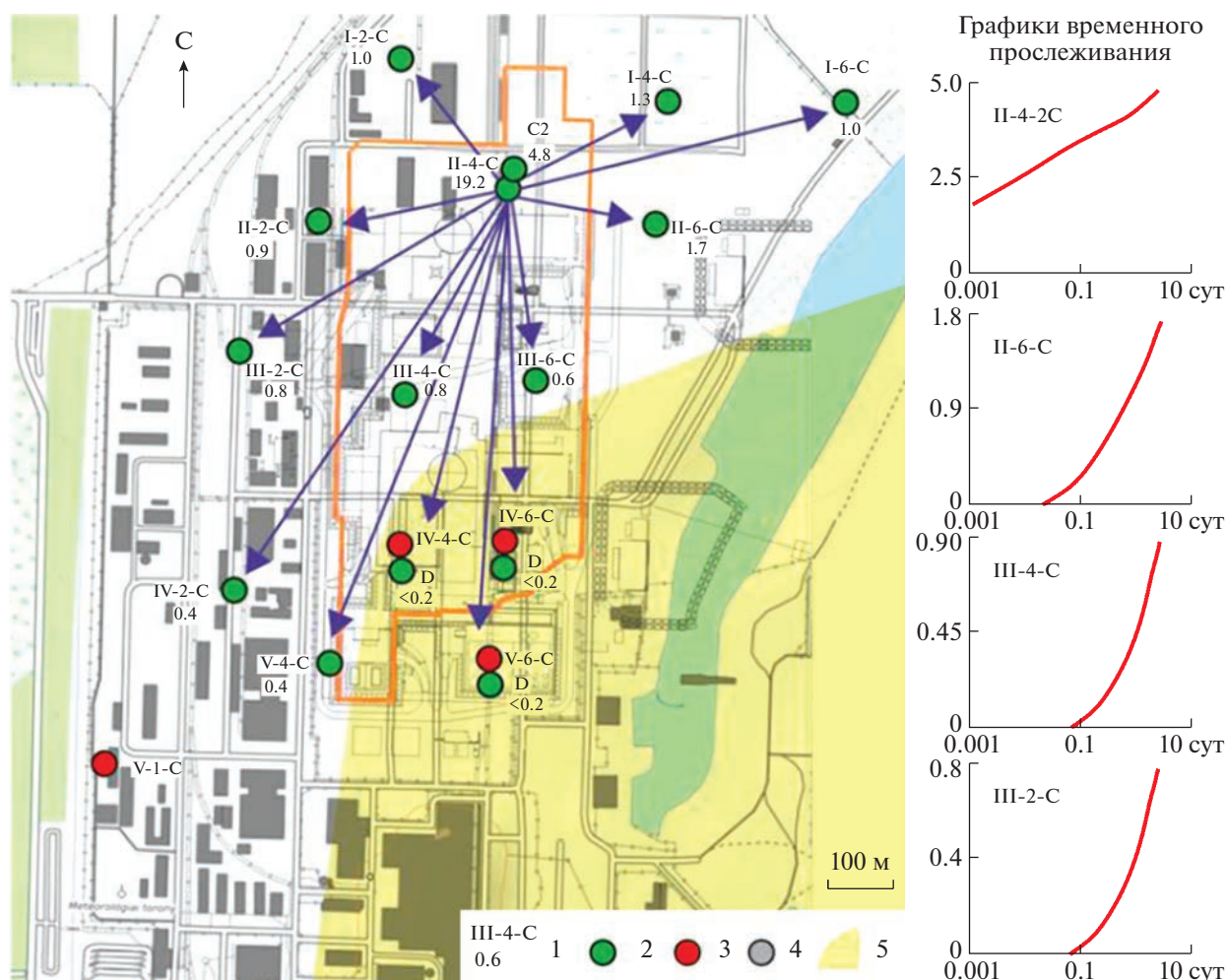


Рис. 7. Реакция мониторинговой сети скважин на гидродинамическое возмущение. Вид в плане. Условные обозначения: 1 – номер скважины и максимальное понижение (м), глубина установки фильтра для скважин с индексом: С – 49 м, D – 99 м.; реакция скважины на откачку: 2 – отреагировала, 3 – не отреагировала; 4 – нет данных; 5 – область погружения водоупора.

5. Длительные кустовые откачки позволили уточнить фильтрационные параметры основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев.

Обобщая результаты бурения инженерно-геологических скважин, а также интерпретации данных по распределению уровней воды и гидродинамической томографии, в разрезе строительной площадки были выделены границы основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев, построена геологическая модель (рис. 9). Полученные границы в дальнейшем заверялись на гидродинамической модели.

Гидрогеологическое моделирование

В гидродинамической модели были заданы границы основных водоносных горизонтов и во-

доупоров. Дополнительно внутри каждого из выделенных слоев имитировалась литологическая неоднородность методом последовательного гауссовского моделирования (SISIM [4]) в соответствии с фактическими данными геологического бурения скважин (рис. 10). Внутри восстановленного поля фильтрационной неоднородности воспроизводились длительные откачки. Было показано, что расчетные понижения в наблюдательных скважинах соответствовали наблюдаемым. Также на модели был воспроизведен естественный режим подземных вод с учетом влияния колебаний уровней воды в р. Дунай и особенностей распределения напоров с глубиной.

Таким образом, результаты интерпретации данных по УПВ и гидродинамической томографии позволили “расшифровать” гидрогеологиче-

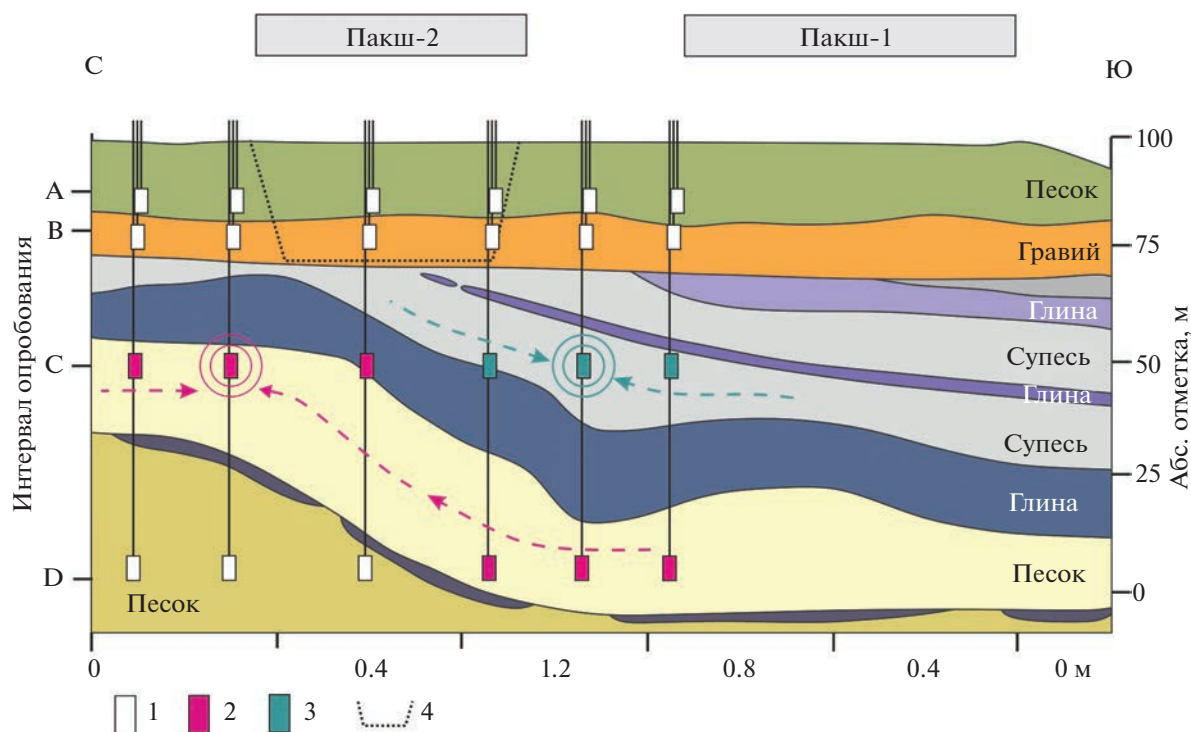


Рис. 8. Схематический разрез, характеризующий реакцию отдельных интервалов на откачку на территории АЭС Пакш-1 и АЭС Пакш-2. Условные обозначения. Интервал: 1 – не отреагировавший на откачку; 2–3 – отреагировавшие на откачку из: 2 – верхнего горизонта, 3 – нижнего горизонта; 4 – контур котлована.

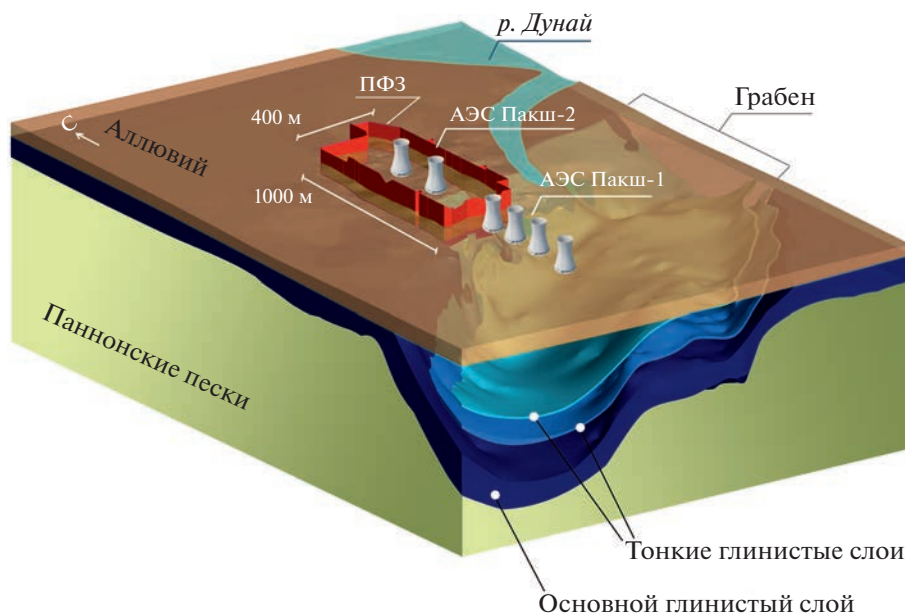


Рис. 9. Трехмерная геологическая модель с выделением основных водоносных горизонтов и водоупорных слоев.

скую структуру на площадке строительства АЭС Пакш-2. А воспроизведение наблюдаемых эффектов на модели дало возможность верифици-

ровать структуру первоначально выделенных водоносных слоев и водоупоров в условиях сильной литологической неоднородности разреза.

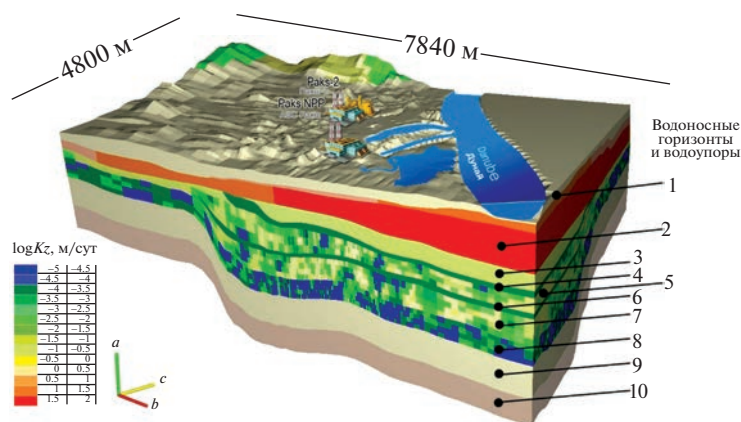


Рис. 10. Распределение фильтрационной неоднородности в гидрогеологической модели. 1–10 – порядковый номер водоносного горизонта либо водоупорного слоя.

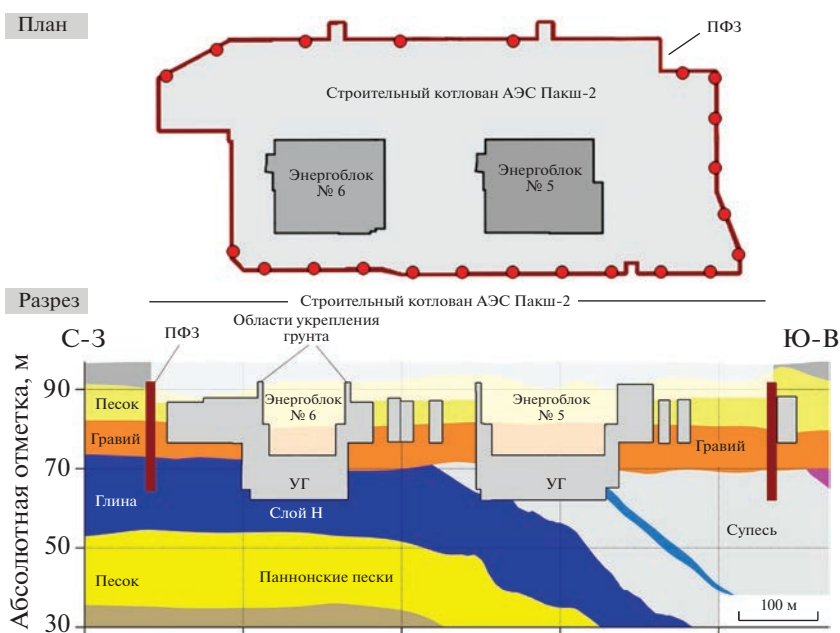


Рис. 11. Конфигурация ПФЗ на площадке АЭС Пакш-2 в плане и разрезе.

В дальнейшем на верифицированной гидрогеологической модели проводились расчеты эффективности водозащитных мероприятий. Рассматривалась возможность организации ПФЗ по контуру строительного котлована в двух вариантах:

1) заглубление ПФЗ на 1 м в основной глинистый слой, а глубина стены ПФЗ должна была составлять 32 м в северной части площадки и более 80 м в южной части площадки АЭС Пакш-2;

2) строительство несовершенной по степени вскрытия ПФЗ глубиной 32 м по всему периметру (рис. 11).

Результаты гидродинамических расчетов показали, что строительство протяженной ПФЗ, ориентированной поперек потока подземных вод, приведет к эффекту подпора. Несмотря на строительный водоотлив, уровни воды с внешней стороны на западной границе ПФЗ поднимутся на несколько метров. Незначительный подъем уровней воды будет также наблюдаться в север-

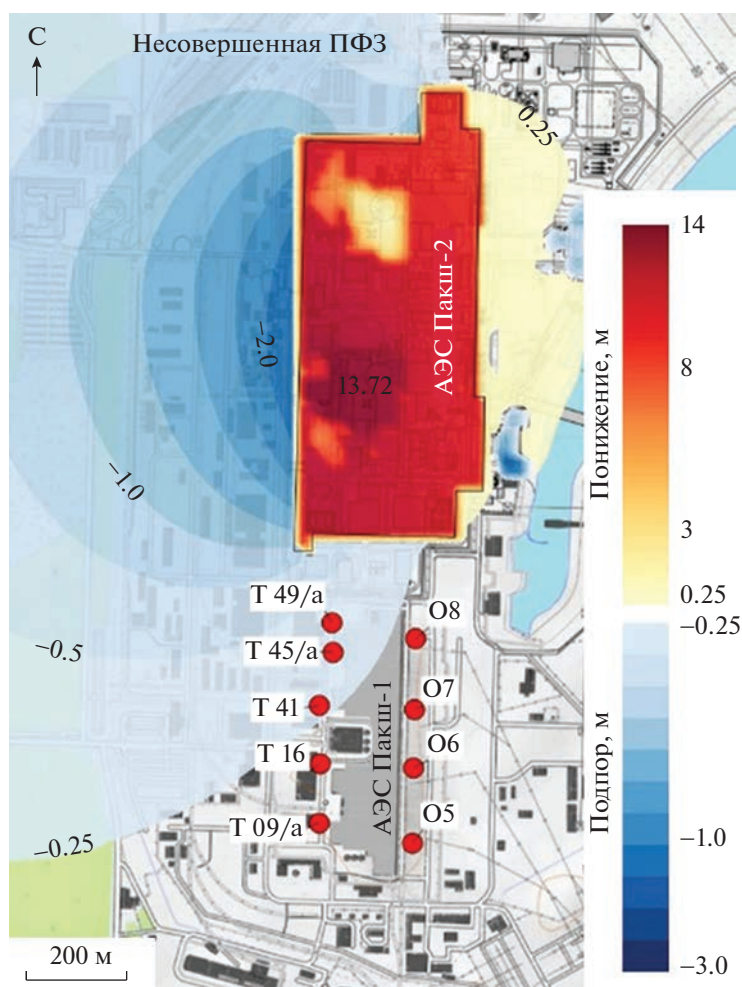


Рис. 12. Расчетные изменения УПВ при строительстве котлована АЭС Пакш-2 при различных конфигурациях ПФЗ.

ной части площадки действующей АЭС Пакш-1 (рис. 12). Из-за особенностей гидрогеологических условий гидродинамическое воздействие от строительного водопонижения на АЭС Пакш-1 будет сопоставимо как при совершенной, так и при несовершенной ПФЗ. Средние водопритоки в строительный котлован при совершенной ПФЗ составят $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$, а при несовершенной $2300 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Для верификации полученных модельных прогнозов на строительной площадке был организован тестовый участок ПФЗ. Он представлял собой уменьшенный аналог большого контура ПФЗ котлована. Его глубина составила 32 м, а размеры в плане $8 \times 8 \text{ м}$. Тестовый ПФЗ был расположен в самом неблагоприятном месте с точки зрения гидрогеологии — на южной границе площадки АЭС Пакш-2, т.е. там, где основной водупор опускается на глубину 90 м. Откачка из несовершенного по степени вскрытия тестового

ПФЗ подтвердила низкие водопритоки, которые были спрогнозированы на модели.

На основании выполненных расчетов было принято решение по строительству ПФЗ, несовершенной по степени вскрытия.

ВЫВОДЫ

На примере площадки строительства АЭС Пакш-2 было продемонстрировано, что в условиях сильной литологической неоднородности разреза, интерпретация исходных данных может быть крайне неоднозначной и многовариантной. На рис. 13 приведена эволюция представлений о геометрии основного водоупорного слоя на территории строительной площадки за период с 2014 по 2021 г. Лишь только применение специализированных видов работ и комплексирование всей имеющейся исходной информации позволило достоверно установить положение водоупорно-

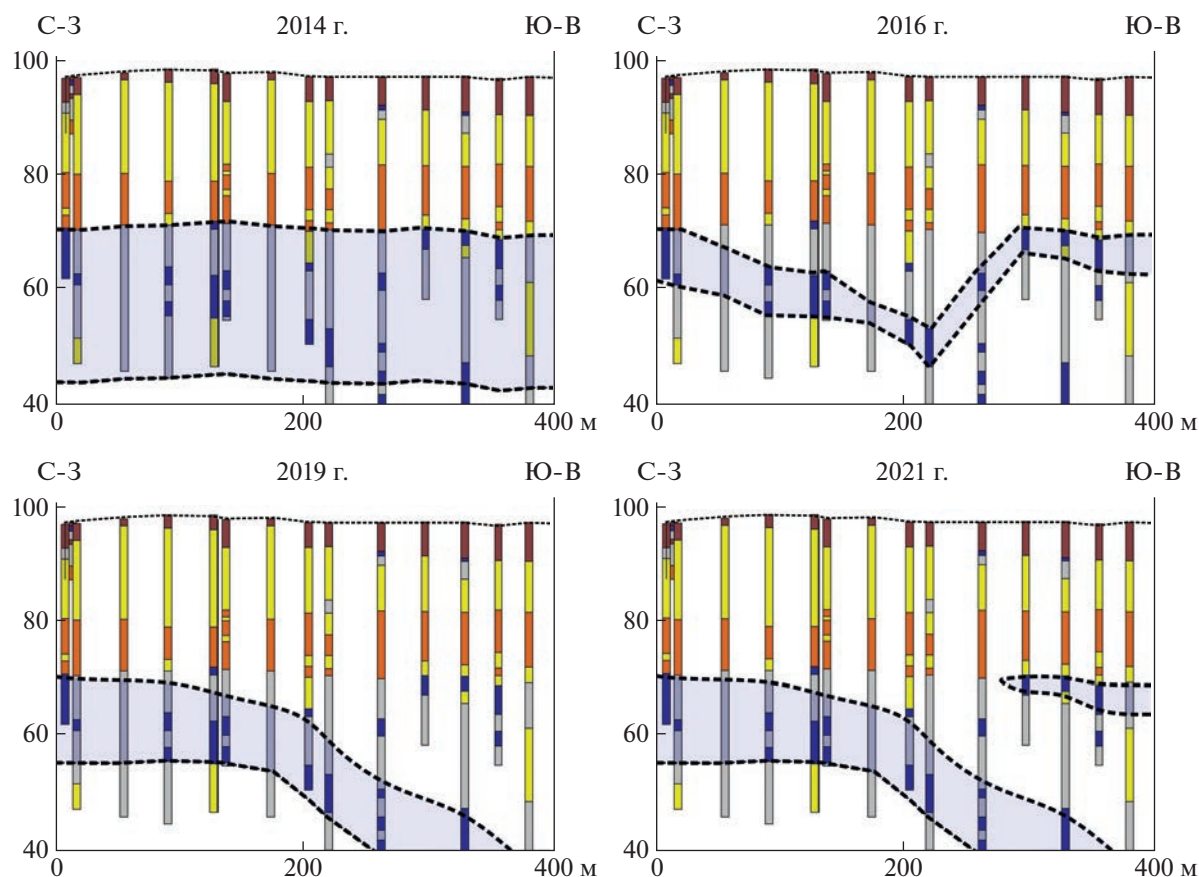


Рис. 13. Эволюция представлений о геометрии основного водоупорного слоя на территории площадки строительства АЭС Пакш-2 за период 2014–2021 гг.

го слоя, а также обосновать его изолирующие свойства.

Геофильтрационная модель была использована как эффективный инструмент, который позволил подтвердить корректность интерпретации структуры фильтрационных потоков, а также обосновать наиболее подходящее проектное решение для защиты действующей АЭС от гидродинамического воздействия строительного водоотлива.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Венгерского филиала АО «Атомстройэкспорт» (С. Кудрину и С. Пушкареву), АО «Оргэнергострой» (С. Ляскому), а также венгерским коллегам дирекции строящейся АЭС Паки-2 (Paks II Ltd.) Т. Шидлу и М. Золтану.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 368 с.
2. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.
3. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 607 с.
4. Alabert F. Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information. Master's thesis. Stanford University. 1987. 198 p.
5. Berg S. Comparison of Hydraulic Tomography with Traditional Methods at a Highly Heterogeneous Site // Groundwater. 2011. V. 53. P. 71–89.
6. Evans D.W., Pool D.R. Aquifer Compaction and Ground-Water Levels in South-Central Arizona // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 1999. 57 p.
7. Haas J. Geology of Hungary. Springer. 2013. 265 p.
8. Illaman W.A. Hydraulic Tomography in Fractured Granite: Mizunami Underground Research site, Japan // Water Resources Research. 2009. V. 45. 18 p.
9. Luo N., Zha Y., Park Y.J., Berg S.J. Three-dimensional hydraulic tomography analysis of long-term municipal wellfield operations: Validation with synthetic flow and solute transport data // Journal of Hydrology. 2020. V. 590(3). 15 p.

10. Niswonger R.G., Panday S., Ibaraki M. MODFLOW-NWT. A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey. 2011. 56 p.
11. Teloglou I.S., Bansal R.K. Transient solution for stream-unconfined aquifer interaction due to time varying stream head and in the presence of leakage // Journal of Hydrology. 2012. V. 428–429. 12 p.
12. Zhao Z., Illman W.A. Improved high-resolution characterization of hydraulic conductivity through inverse modeling of HPT profiles and steady-state hydraulic tomography: Field and synthetic studies // Journal of Hydrogeology. 2022. V. 612. 14 p.
13. Zhao Z., Illman W.A., Zha Y. et al. Transient Hydraulic Tomography Analysis of Fourteen Pumping Tests at a Highly Heterogeneous Multiple Aquifer–Aquitard System // Water. 2019. V. 11 (9). 18 p.
14. Zhao Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site // Journal of Hydrogeology. 2023. V. 617. P. 18.

FIELD AND MODEL RESEARCH OF THE GROUNDWATER FLOWS IN THE AREA OF THE PAKS-2 NPP CONSTRUCTION, HUNGARY

A. M. Nikulenkov^{a,b,#}, O. I. Novitskaya^c, V. G. Rumynin^{a,b}, M. V. Vil'kina^{a,b},
A. A. Shvarts^{a,b}, and L. N. Sindalovskii^{a,b}

^aSt. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Srednii pr. 41, St. Petersburg, 199004 Russia

^bSt. Petersburg State University,
Universitetskaya nab. 13, St. Petersburg, 199034 Russia

^cSt. Petersburg State University,
Savushkina ul. 82, St. Petersburg, 197183 Russia

[#]E-mail: annik@hgepro.ru

The construction of the nuclear power plant (NPP) requires conducting a large number of engineering and hydrogeological surveys, as well as assessment of the design decisions' safety. A deep excavation pit at the Paks II NPP construction site requires execution of the cut-off wall due to extremely high groundwater saturation of the alluvial deposits. However, lithological anisotropy and the presence of dislocation zones did not allow identifying the appropriate depth for the cut-off wall construction. Unfortunately, engineering geological boreholes with a 20-meter distance between them and surface and borehole geophysical surveys could not identify the hydrogeological units. Thus, to conceptualize the hydrogeological settings, an analysis of the groundwater head distribution and the large-scale pumping tests were conducted. The interpretation of the geological data and the distinguishing of the hydrogeological units were carried out iteratively using the hydrogeological numerical model. The flow model could represent the hydraulic head distribution, the response of the lithologically heterogeneous layers to the water fluctuations in the Danube river, and the pumping tests carried out at the different depths. The results of the hydrogeological modeling revealed the aquitard to be continuous throughout the territory; however, its top's depth changes from 30–35 to 90 m within the construction site of the Paks II NPP. This complex geometry of the aquitard is controlled by the plicated dislocation zone, which cuts the construction site in half and is revealed as the right wall of the graben. Correct hydrogeological stratification enabled us to ensure waterproof activities such as the cut-off wall construction using the hydrogeological model when excavating a deep pit for the Paks II NPP. This also minimizes the hydrodynamic impact on the closely located NPP Paks in operation.

Keywords: hydrogeological survey, hydraulic tomography, flow modeling, NPP construction

REFERENCES

1. Bochever, F.M., Garmonov, I.V., Lebedev, A.V., Shestakov, V.M. [Fundamentals of hydrogeological calculations]. Moscow, Nedra Publ., 1969, 368 p. (in Russian)
2. Sindalovskii, L.N. [Hydrogeological calculations using ANSDIMAT software]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2021, 891 p. (in Russian)
3. Terzagi, K., Pek, R. [Rock mechanics in engineering practice]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1958, 607 p. (in Russian)
4. Alabert, F. Stochastic imaging of spatial distributions using hard and soft information. Master's thesis. Stanford University. 1987, 198 p.
5. Berg, S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site. *Groundwater*, 2011, vol. 53, pp. 71–89.
6. Evans, D.W. Pool, D.R. Aquifer compaction and ground-water levels in South-Central Arizona. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1999, P. 57.
7. Haas, J. Geology of Hungary. Springer Publ., 2013, 265 p.

8. Illman, W.A. Hydraulic Tomography in Fractured Granite: Mizunami Underground Research site, Japan. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, p. 18.
9. Luo, N., Zha, Y. Park, Y.J., Berg, S.J. Three-dimensional hydraulic tomography analysis of long-term municipal wellfield operations: Validation with synthetic flow and solute transport data. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 590, 15 p.
10. Niswonger, R.G., Panday, S., Ibaraki, M. MODFLOW-NWT. A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey, 2011, 56 p.
11. Teloglou, I.S., Bansal, R.K. Transient solution for stream-unconfined aquifer interaction due to time varying stream head and in the presence of leakage. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 428–429, 12 p.
12. Zhao, Z., Illman, W.A. Improved high-resolution characterization of hydraulic conductivity through inverse modeling of HPT profiles and steady-state hydraulic tomography: Field and synthetic studies. *Journal of Hydrogeology*, 2022, vol. 612, 14 p.
13. Zhao, Z., Illman, W.A. Zha, Y. Yeh, T.C.J., Mok, C.M.B., Berg, S.J., Han, D. Transient hydraulic tomography analysis of fourteen pumping tests at a highly heterogeneous multiple aquifer–aquitard system. *Water*, 2019, vol. 11 (9), 18 p.
14. Zhao, Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site. *Journal of Hydrogeology*, 2023, vol. 617, 18 p.

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 004.981.2:551.435.6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ РИСКУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

© 2023 г. О. А. Вадачкоря^{1,*}

¹Сочинское географическое общество,
Курортный проспект 113, Сочи, 354024 Россия

*E-mail: vadachkoria@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2023 г.

После доработки 01.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Разработана цифровая модель из набора геологических, инженерно-геологических и цифровых карт рельефа для машинного обучения нейросети с помощью содержания карты природных процессов для территории г. Сочи. Описание природных процессов при подготовке входных данных для обучения нейросети основано на результатах исследований на Южном склоне Большого Кавказа. Основой нейросети являются входная и скрытая матрицы, распределяющие на выходе входной обучающий сигнал на составляющие элементы событий с приемлемой точностью, достигнутой при обучении. Автором разработана собственная библиотека с функциями, реализующими разработку нейросети, что расширило возможности для решения целевых задач. Для работы с нейросетью создан набор программ. Построенные нейросетью территории возможного проявления оползневых процессов хорошо коррелируются с имеющимися оползневыми картами и участками выявленных деформаций инженерных сооружений. Выполненная работа может стать удобным инструментом для разработчиков документов территориального планирования при функциональном зонировании территории.

Ключевые слова: цифровая модель, нейросеть, матрица, природный процесс

DOI: 10.31857/S0869780923060073, EDN: AOAECV

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В № 38–ФЗ “О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера” дано определение целей и задач инженерных изысканий при разработке документов территориального планирования от федерального уровня до отдельных поселений: “Территория, подверженная риску возникновения быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов, – это участок земельного, водного или воздушного пространства либо критически важный или потенциально опасный объект производственного и социального значения, отнесенные к указанной территории путем прогнозирования угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций и оценки социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций”.

Реализация поставленных задач выполняется на основании рекомендаций Минстроя России (СП 47.13330.2016). Предусмотрен ряд обязательных работ, состав которых также определен Постановлениями Правительства. Одними из составляющих инженерно-геологических исследований являются сбор и анализ фондовых и

архивных материалов, на основании которых ставятся задачи инженерных изысканий.

Цели данной работы:

- создать цифровую модель из набора геологических, инженерно-геологических и цифровых карт рельефа;
- создать цифровое описание природных процессов;
- выполнить машинное обучение нейросети прогнозу возникновения природных процессов;
- использовать нейросеть для выделения территорий вероятного развития опасных природных процессов на топографической карте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обучения нейросети использованы материалы ОАО “Росстройизыскания” (2007 г.) “Проведение расширенных инженерных изысканий территории г. Сочи для разработки документов территориального планирования с обновлением топографической основы”, выполненные при подготовке к проведению зимней Олимпиады в 2014 г. Историческое расселение на нынеш-

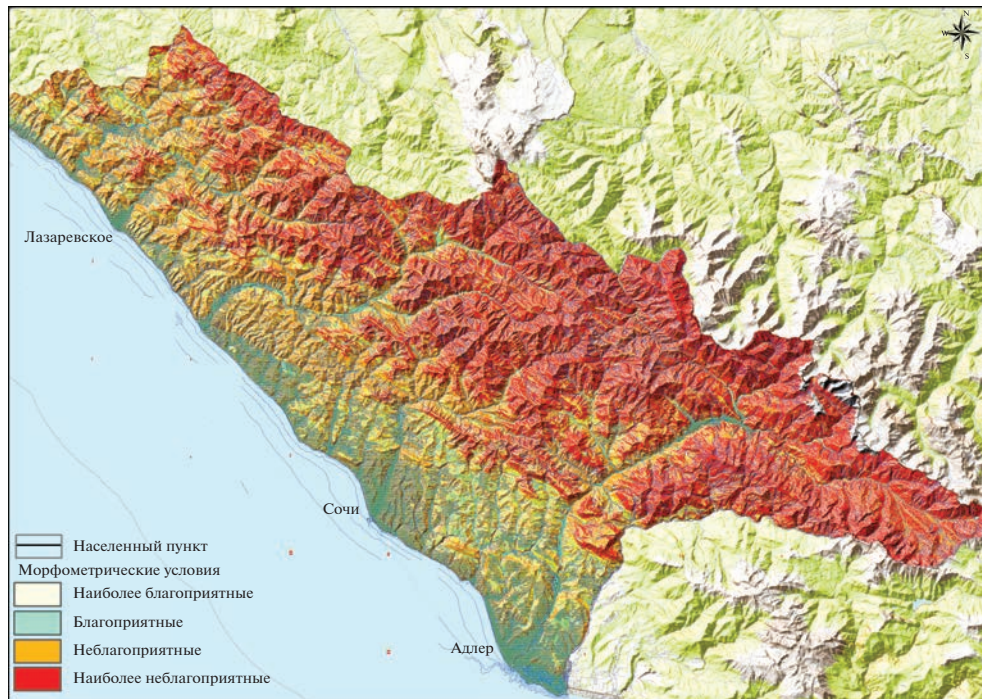


Рис. 1. Схема расселения и комплексная оценка территории г. Сочи по морфометрическим показателям (высотный пояс и крутизна склона).

ней территории Городского округа Сочи (3800 км²) происходило на пологих участках горного рельефа и речных террасах (рис. 1).

Большая часть поселений расположена на слаболитифицированных породах палеогена, представленных глинисто-песчанистой, песчано-глинистой, глинисто-карбонатной формациями (рис. 2), в которых оползневые процессы проявляются наиболее активно. Таким образом, условия оползнеобразования и угроза разрушения инженерных сооружений пространственно совпадают. Большое количество атмосферных осадков (1470 мм/год) со стоком с южных склонов Западного Кавказа в Черное море вызывает интенсивную линейную эрозию, как основных русел, так и на водораздельных склонах. Возникают условия массового смещения поверхностных отложений к местным базисам оползания.

Естественной преградой для образования оползней являются лесные массивы. Техногенное вмешательство в геологическую среду без компенсирующих мероприятий является дополнительным фактором, нарушающим устойчивость склонов. Прогнозирование активизации природных процессов при выборе участков будущего строительства, выбора конструкций инженерных сооружений и мониторинга за состоянием геологической среды является первоочередной задачей для всех стадий разработки документов территориального планирования.

Разработка цифровой модели из набора геологических, инженерно-геологических и цифровых карт рельефа

Количество исходных данных не должно быть избыточным. Соблюдается Принцип бритвы Оккама: *“Не следует привлекать новые сущности без крайней на то необходимости”*.

Для работы использовались следующие карты территории г. Сочи:

1. Геологическая карта. ФГУПП “Кавказгеол-съемка”. Масштаб 1:200000.
2. Карта покровных отложений. ОАО “Кавказ-гидрогеология”. Масштаб 1:100000.
3. Карта высотных поясов. Цифровая модель. Масштаб 1:25000.
4. Карта уклонов. Цифровая модель. Масштаб 1:25000.
5. Карта опасных природных процессов. ОАО “Росстройизыскания”. Масштаб 1:100000.

Из геологической карты выделяются слои стратиграфических и формационно-генетических комплексов, литологического состава горных пород в виде отдельных карт. Именно этот набор входит в состав рекомендуемых для разработки документов территориального планирования:

– карта инженерно-геологического районирования территории,

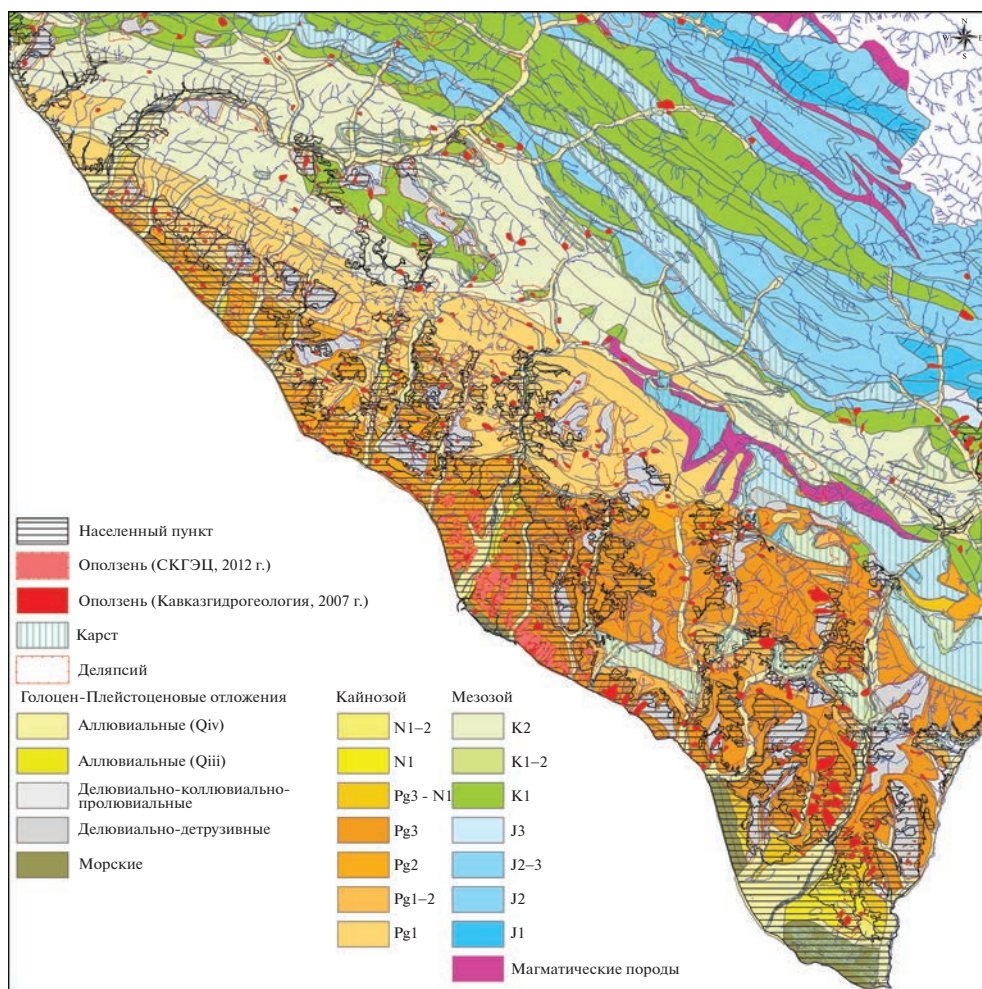


Рис. 2. Фрагмент геологической карты, совмещенный со схемой расселения и распространения оползней на территории городского округа Сочи.

— карта территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Таким образом, в нашем распоряжении имелась следующая информация: возраст пород, формационно-генетические комплексы, литологический состав коренных пород, тип поверхностных отложений, характеристика форм рельефа (высотные пояса и уклоны склона), а также карта опасных природных процессов. Поочередно карты преобразуются в таблицу: столбцы — ширина карты в пикселях, высота — количество строк в пикселях. Каждая ячейка таблицы состоит из набора индексов, несущих конъюнкцию сведений из введенного набора карт. Создается файл *Index.csv*. Используя порядковые номера элементов легенд, создаются возможные сочетания параметров, описывающих изучаемый процесс. Полученный результат преобразуется в набор входных одномерных матриц, используемых для машинного обучения, сведенных в файл

Legend.csv. Нейросеть в данном примере должна научиться выделять из входного потока данных файла *Index.csv* природные процессы: карст, затопление, оползни, обвалы, входящие в обучающий файл *Legend.csv*. Структура подготовки карт для обучения приведена на рис. 3.

Верхняя карта — карта опасных природных процессов. Оползни, по возможности, разделяются на маломощные площадные, оползни-потоки и блочные. Верхней карте природных процессов соответствуют 6 карт, участвующих в ее описании (см. рис. 3). Важное условие: карты должны быть одинакового размера, одного масштаба, в одной системе координат. Этого легко добиться, используя возможности геоинформационных систем.

Подготовка входных данных для машинного обучения нейросети

Описание природных процессов при подготовке входных данных для обучения нейросети

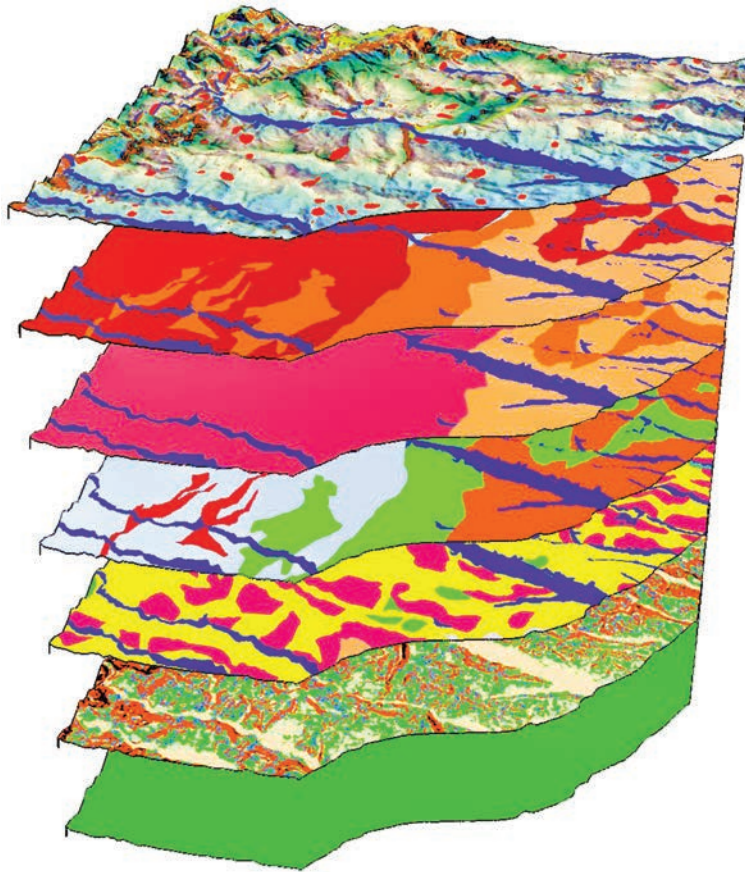


Рис. 3. Набор карт для обучения нейросети.

основано на результатах исследований природных процессов Южного склона Большого Кавказа [1–3, 5]. Для машинной обработки необходимо формализовать исходные данные с помощью высказываний, описывающих изучаемый процесс. При описании процесса используются порядковые номера параметров легенд с каждой карты (рис. 4). Для корректного описания природных процессов для машинного обучения нейросети применен аппарат алгебры логики. В задании, пригодном для машинного обучения, индексы вариантов из элементов легенд к картам сводятся в единую таблицу одномерных матриц (файл Legend.csv).

Возможны два варианта подготовки задания для обучения: *первый*, когда вручную в программу вводятся параметры легенд, участвующие, по мнению исполнителя, в образовании того или иного процесса; *второй*, когда программа самостоятельно делает выборку параметров из карт в границах контуров развития процессов с обучающей карты. Во втором случае необходимо провести дополнительную обработку исходных данных для исключения не имеющих место событий. Это необходимо при использовании картографических материалов мелкого масштаба при выне-

сении на топооснову более крупного масштаба. Таблица задания с перечнем вариантов возникновения событий в обоих случаях достигает значительных размеров. Итогом подготовки обучающего задания является файл Task.csv.

Создание нейросети

Основой нейросети являются входная и скрытая матрицы, распределяющие на выходе входной обучающий сигнал на составляющие элементы событий с приемлемой точностью, достигнутой при обучении. Смысл алгоритма обратного распространения ошибки, используемый для обучения нейросети и подробно описанный в [4], следующий:

$$1. L0 \rightarrow \text{WIN} \rightarrow L1 \rightarrow \text{WHO} \rightarrow L2.$$

Входной сигнал, содержащий описание природного процесса, проходит через входную матрицу, образуя промежуточный сигнал. Промежуточный сигнал проходит через скрытую матрицу, получая на выходе конечный результат также в виде одномерной матрицы.

$$2. \text{Err} = Y - L2.$$

Вычисляется разность между входным и конечным сигналами.

Если $E_{gr} \leq T_r$ – конец расчета.

Если $E_{gr} > T_r$ – переход к пункту 3.

3. $E_{gr} \rightarrow WHO \rightarrow L1 \rightarrow WIN$ – переход к пункту 1.

Ошибка расчета вносит коррективы в скрытую матрицу, в промежуточный результат, во входную матрицу.

Обозначения: $L0$ – входные параметры, Y – правильные ответы, T_r – допустимая точность расчета, $L1$ – промежуточный результат, $L2$ – конечный результат, WIN – матрица связи между входными параметрами и промежуточным результатом, WHO – матрица связи между промежуточным результатом и выходными параметрами, E_{gr} – точность вычисления.

Результат расчета – входная WIN и скрытая WHO матрицы, необходимые для работы нейросети. Операции 1–3 повторяются до тех пор, пока T_r не достигнет заранее оговоренной минимальной величины. Автором разработана собственная библиотека из необходимых функций, что расширило возможности для решения целого ряда подобных задач.

Из применяемой для машинного обучения нейросети карты распространения опасных природных процессов взяты: карст, затопление, бесструктурные маломощные оползни, оползни течения, блочные оползни, обвалы. Есть и другие, не менее важные, но остановимся пока на этих. Обработано 867 оползней, взятых из карты масштаба 1:100000, и 109 оползней из карты масштаба 1:10000. Произведен программный контроль входных данных для исключения ошибок выноса контуров оползней, затопления, карстовых областей на топооснову при переносе из мелкомасштабных карт на более детальные карты.

Для работы с нейросетью создан набор программ:

1. Программа перевода набора карт в табличный вид.
2. Программа создания Задания из набора вариантов, описывающих природные процессы, из легенд к картам.
3. Программа создания и контроля автоматически созданного задания.
4. Программа обучения нейросети.
5. Программа обработки нейросетью входного сигнала с определением прогнозируемого природного процесса с отражением на топографической карте. Возможно получение комплексного описания природных условий в точке, построение линейного профиля с выделением участков развития природных процессов, построение карты с прогнозом площадного развития природных процессов.

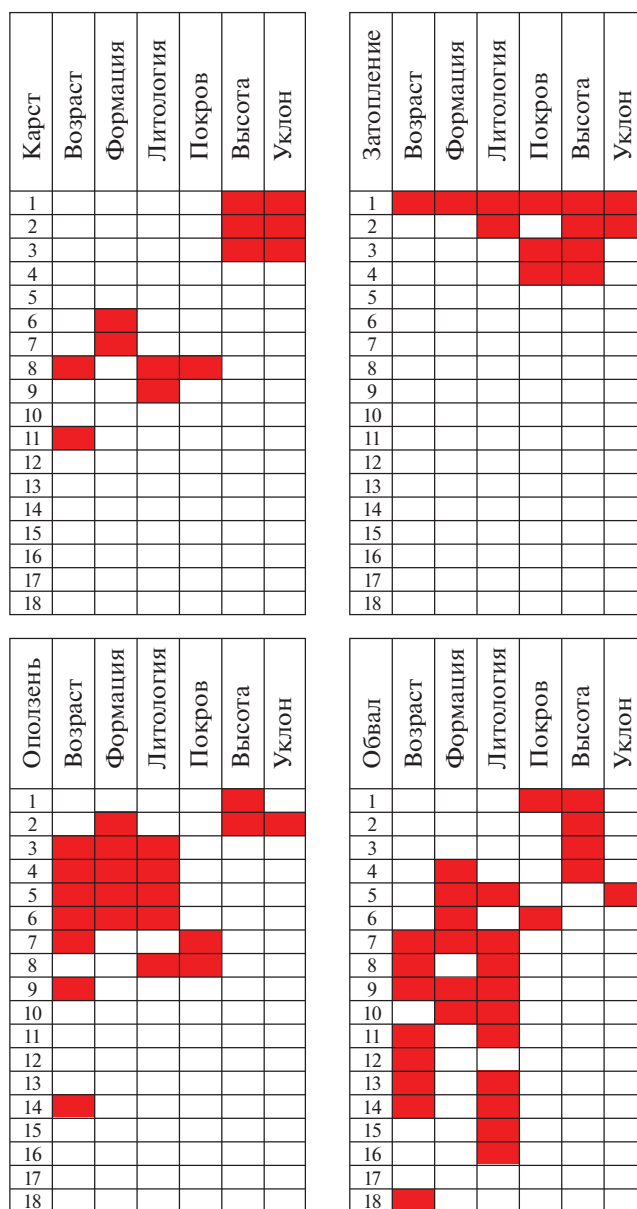


Рис. 4. Описание процессов карста, затопления, оползней, обвалов.

На рис. 5 приведена блок-схема реализации машинного обучения нейросети. Необходимо осознавать, что реализация работы нейросети является просто удобным математическим аппаратом выделения из потока данных объектов с конкретным набором признаков. Несомненное достоинство, что выделяемые нейросетью природные процессы могут быть совершенно разными по механизму образования. Процесс обработки задания и формирования нейросети приведен на рис. 6.

Во входном потоке обрабатываемых данных присутствовали: области развития карста и затопления, разновидности оползневых процессов, обвалы. Создается файл *Matrix.csv*, содержащий



Рис. 5. Структура создания нейросети.

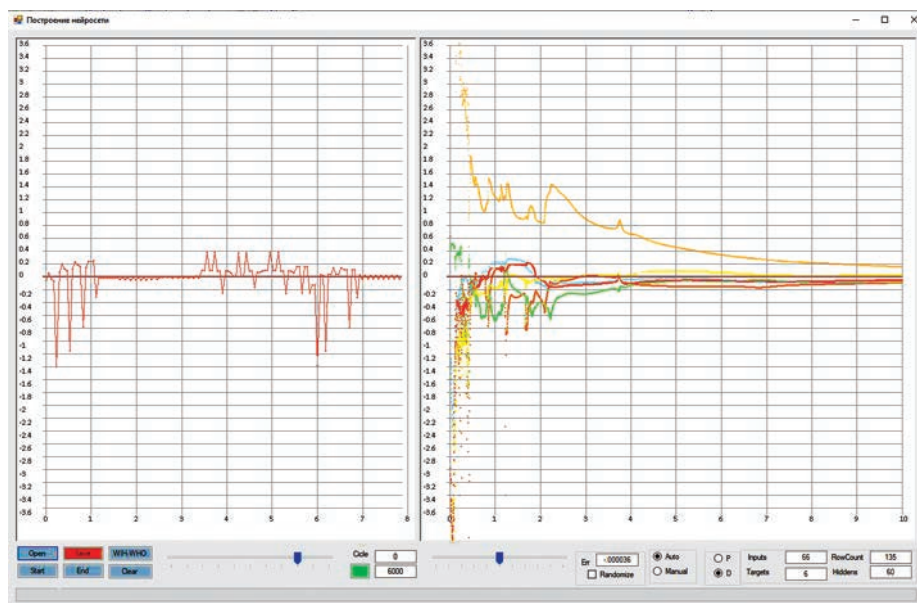


Рис. 6. Построение нейросети.

входную и скрытую матрицы. Конечный результат – программа, в которую пользователь загружает топографическую карту. Вводится цифро-

вой набор инженерно-геологических, геологических и других карт по выбору, использованных при обучении нейросети, т.е. для формирования

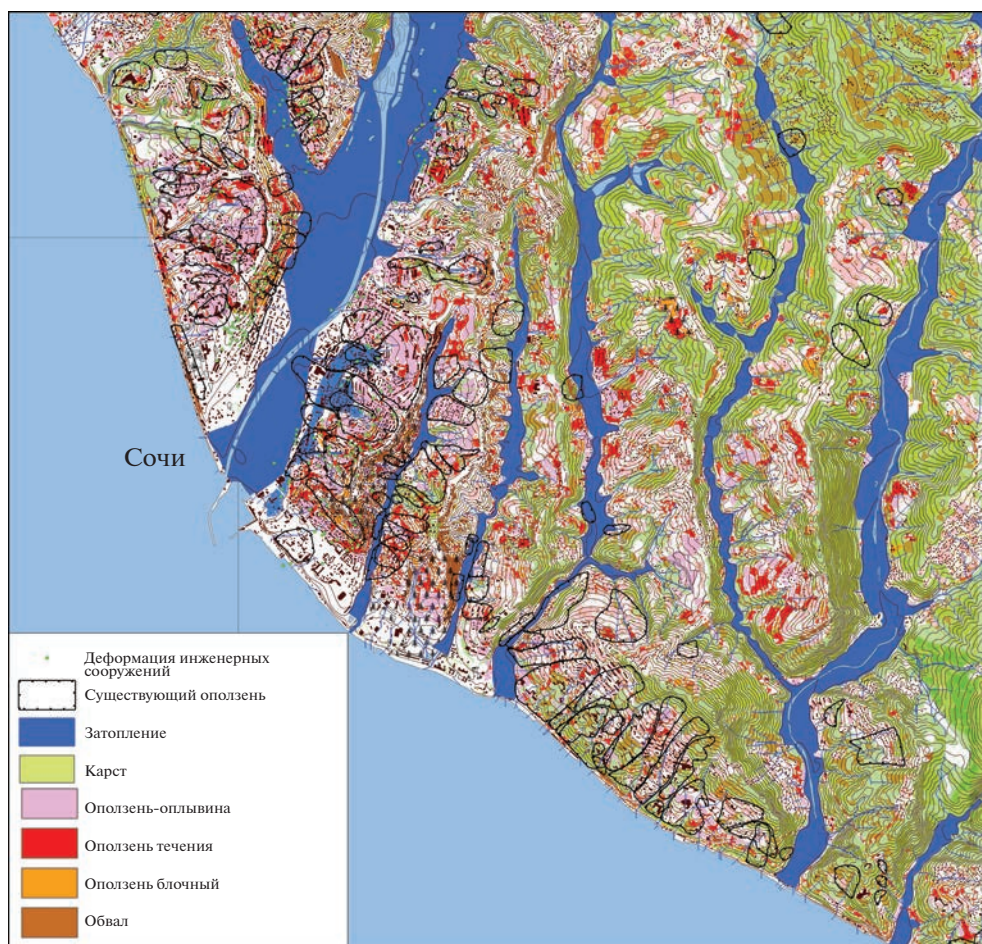


Рис. 7. Контроль работы нейросети при выделении природных процессов.

входной и скрытой матрицы. Вводится файл с матрицами. Входной сигнал считывается с координат топографической карты, совпадающих с координатами используемых инженерно-геологических карт. На выходе прогноз проявления для заданной точки, профиля или участка проявления природных процессов, или их отсутствие.

Контроль полученного результата

Окончательным критерием правильности работы нейросети является сравнение полученных результатов с материалами полевой оползневой съемки, а также визуальное обследование состояния инженерных сооружений. На рис. 7 приведен фрагмент оползневой карты, построенной нейросетью, с вынесенными контурами активных оползней с карты масштаба 1:10000, построенной сотрудниками СКГЭЦ г. Сочи в результате многолетнего мониторинга. На карту также вынесены результаты наблюдений, выполненные Департаментом строительства и архитектуры Администрации г. Сочи в 2022–2023 гг. Вынесены 430 точек с деформацией инженерных сооруже-

ний, а также участки с активными оползневыми процессами, затопления. После обработки цифровой модели рельефа построены и вынесены на карту оси поверхностного стока воды. Анализ результатов работы нейросети после совмещения с картой природных процессов показал:

1. Большая часть оползневых процессов наблюдается в породах глинисто-песчаной формации олигоцен-миоцена и песчано-глинистой формации палеоцена.
2. Построенные нейросетью территории возможного проявления оползневых процессов хорошо коррелируются с имеющимися оползневыми картами и участками выявленных деформаций инженерных сооружений.
3. Маломощные площадные оползни развиваются на пологих склонах водоразделов согласных падению слоев горных пород, блочные оползни — на крутых склонах с обратным падением горных пород. Оползни течения развиваются по осям временных и постоянных водотоков.
4. Площадь затопления построена нейросетью без учета существующих гидротехнических со-

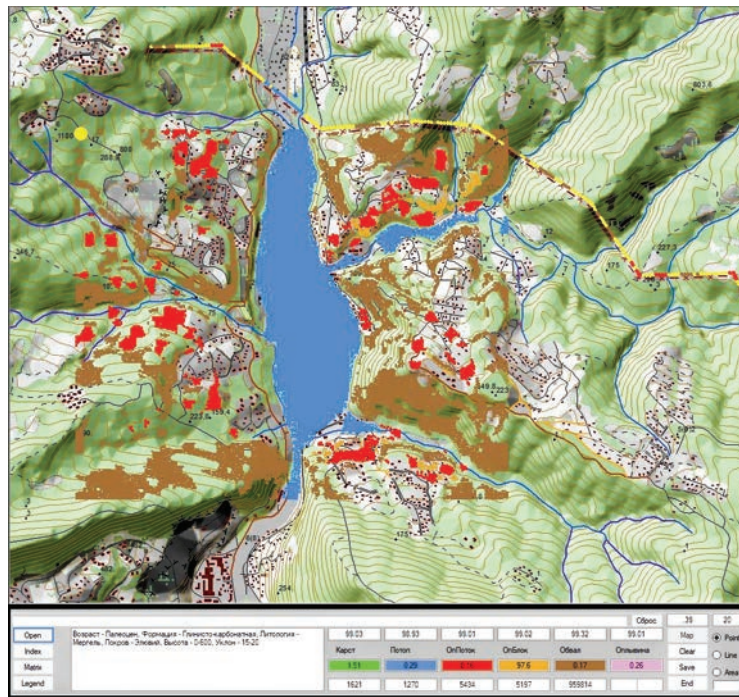


Рис. 8. Выделенные нейросетью участки прогнозирования затопления, обвалов, оползней.

оружий, тем не менее подтверждена паводковыми событиями последних лет.

5. Оползневая активность возрастает на участках вырубке леса, строительства инженерных сооружений.

6. Высока вероятность деформации водонесущих коммуникаций, подземных и поверхностных, а также подъема уровня грунтовых вод из-за масштабных сооружений инженерной защиты.

Работа с нейросетью

Для построения карт с использованием нейросети используются:

1. Файл *Index.csv* – таблица индексов, созданная из набора отобранных для обучения нейросети карт.

2. Файл *Matrix.csv* – матрицы связи нейросети.

Результаты работы нейросети выносятся на топографическую основу. На рис. 8 приведен фрагмент карты прогноза развития природных процессов на участке Хостинского района г. Сочи. Нейросеть выделила область возможного паводкового затопления, обвально-оползневые склоны. Обращает внимание факт относительно благополучного выбора территорий для проживания. В верхней части рис. 8 вдоль линии ЛЭП построен профиль, на котором нейросеть выделила участки затопления, обвально-оползневых процессов. Также появилась возможность получения

геологической информации в каждой точке топографической карты.

Выполненная работа может стать удобным инструментом для геологов при составлении программы полевых работ, для разработчиков документов территориального планирования при функциональном зонировании территории, для административных органов при выделении участков под строительство.

ВЫВОДЫ

1. Применение искусственного интеллекта путем создания целенаправленных нейросетей дает возможность пользователю получать разнообразную информацию из точки на карте, профиля по линейному объекту, территории поселения, включая прогноз возможного развития природных процессов.

2. Большая часть территории поселений Городского округа Сочи поражена оползневыми процессами. Это связано с тем, что исторически для строительства жилья выбирались участки с пологим рельефом, которые чаще всего являлись временно стабилизированными оползневыми ступенями или речными террасами.

3. В геологическом отношении породы, слагающие большую часть территории г. Сочи, молодые, слаболитифицированные, легкоразмываемые, набухающие при увлажнении и теряющие прочностные свойства от полускального состоя-

ния до текучепластичного породы палеогена глинисто-песчаной, песчано-глинистой формаций.

4. Высокая сейсмическая активность территории г. Сочи ускоряет процессы смещения покровных отложений по напластованию горных пород. Активные оползневые процессы при высокой сейсмичности территории города являются естественным ограничением его развития.

5. Поверхностным стоком атмосферных вод и эрозионно-оползневыми процессами формируется овражно-балочная сеть. Утечки из поврежденных водных коммуникаций ведут к катастрофической активизации оползневых процессов.

6. Пригрузка склонов после строительства инженерных сооружений ухудшает их устойчивость, изменяет направление грунтовых вод, приводит к активизации или возникновению оползневых процессов, сопровождающихся деревопадами без явных признаков, ранее существовавших в этих местах оползневых смещений.

7. Активная вырубка лесного покрова влечет за собой активизацию оползневых процессов на территориях, где их раньше не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арешидзе Г.М.* Оползни Грузинской ССР. Тбилиси: Изд-во “Мецниреба”, 1980. 148 с.
2. *Вадачкория О.А., Джанджгава И.К., Попов Ю.И.* Комплексный геолого-геофизический анализ условий и факторов формирования оползней на черноморском побережье Грузии // *Инженерная геология*. 1989. № 1. С. 58–65.
3. *Джавахишвили Э.А.* Формирование коры выветривания в горных породах юры и мела. Тбилиси: Изд-во “Мецниреба”, 1980. 144 с.
4. *Рашид Т.* Создаем нейронную сеть. СПб: Изд-во “Диалектика”, 2017, 272 с.
5. *Церетели Э.Д., Церетели Д.Д.* Геологические условия развития селей в Грузии. Тбилиси: Изд-во “Мецниреба”, 1985. 186 с.

USING A NEURAL NETWORK TO IDENTIFY TERRITORIES AT RISK OF NATURAL EMERGENCIES

O. A. Vadachkoria^{a, #}

^a*Sochi Geographical Society,
Kurortnyi pr. 113, Sochi, 354024 Russia*

[#]*E-mail: vadachkoria@mail.ru*

A digital model has been developed on the basis of a set of geological, engineering geological and digital terrain maps for machine learning of a neural network using the content of a map of natural processes for the Sochi territory. The description of natural processes in the preparation of input data for neural network training is based on the results of research on the Southern slope of the Greater Caucasus ridge. The neural network is based on the input and hidden matrices that distribute the input training signal at the output into the constituent elements of events with acceptable accuracy achieved during training. The author has developed his own library with functions that implement the development of a neural network, which has expanded the possibilities for solving target tasks. A set of programs has been created to work with the neural network. The territories of possible manifestations of landslide processes constructed by the neural network are well correlated with the available landslide maps and areas of identified deformations of engineering structures. The completed work can become a convenient tool for developers of territorial planning documents in the functional zoning of the territory.

Keywords: *digital model, neural network, matrix, natural process*

REFERENCES

1. *Areshidze, G.M.* [Landslides of the Georgian SSR.]. Tbilisi, Metsniereba Publ., 1980, 148 p. (in Russian)
2. *Vadachkoria, O.A., Dzhandzhgava, I.K., Popov, Yu.I.* [Complex geological and geophysical analysis of conditions and factors of landslide formation on the Black Sea coast of Georgia]. *Inzhenernaya geologiya*, 1989, no. 1, pp. 58–65. (in Russian)
3. *Dzhavakhishvili, E.A.* [Formation of weathering crust in Jurassic and Cretaceous rocks]. Tbilisi, Metsniereba Publ., 1980, p. 144. (in Russian)
4. *Rashid, T.* [Make your own neural network]. St. Petersburg, Dialectics Publ., 2017, 272 p. (in Russian)
5. *Tsereteli, E.D., Tsereteli, D.D.* [Geological conditions of mudflow development in Georgia]. Tbilisi, Metsniereba Publ., 1985, 186 p. (in Russian)

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.388

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ И СОПРЯЖЕННЫХ УЧАСТКОВ ЗАКАЧКИ

© 2023 г. А. М. Янников^{1,*}, А. С. Стручкова¹

¹Институт “Якутнипроалмаз” АК АЛРОСА (ПАО),
ул. Ленина 39, Мирный, Республика Саха (Якутия), 678174 Россия

*E-mail: yannikov90@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Безопасная отработка коренных месторождений алмазов Западной Якутии требует постоянного контроля гидрогеологического режима вскрываемых водоносных комплексов в пределах карьерных и шахтных полей месторождений, а также и на сопряженных участках закачки дренажных вод. За весь период отработки месторождений Алаakit-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей в процесс откачка-закачка было вовлечено порядка 400 млн м³ высокоминерализованных дренажных вод карьеров и рудников. Сложные криогидрогеологические условия территории такие, как: особенности литолого-фациальных условий, сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), структурная приуроченность кимберлитовых полей, разломно-блоковое строение отдельных трубок, имеют свое влияние на динамику происходящих изменений и делают криогидрогеологические условия каждой отдельной трубки уникальными и не имеющими полных аналогов. С целью успешного прогнозирования и последующей реализации технических решений, направленных на контроль формируемых в пределах шахтных и карьерных полей всех типов притоков, в институте Якутнипроалмаз была создана программа разработки, постоянного поддержания и актуализации “цифровых двойников” всех ключевых обрабатываемых месторождений. Моделирование гидрогеологических условий происходило с использованием лицензионной программы FEFLOW. Разработанные модели учитывают влияние как природных факторов, так и применяемые схемы вскрытия и осушения месторождений, которые накладывают свои ограничения. Создание и обновление постоянно действующих цифровых моделей позволило не только приобрести современный инструмент прогнозирования водопритокков, но и помогло улучшить процесс планирования в части бурения дренажных и закачных скважин, приобретения насосного оборудования и др. Отклонение прогнозных величин от фактически наблюдаемых в рамках краткосрочного прогноза за период использования 2021–2023 гг. составляло от 5 до 10%.

Ключевые слова: гидрогеологическое моделирование, кимберлитовое поле, депрессионная воронка, природные рассолы, участки закачки

DOI: 10.31857/S0869780923060097, **EDN:** AONHQV

ВВЕДЕНИЕ

Добыча природных алмазов в Западной Якутии осуществляется в сложных горно-геологических условиях. Все уникальные коренные месторождения: кимберлитовые трубки Айхал, Ботуобинская, Зарница, Интернациональная, Комсомольская, Майская, Мир, Нюрбинская, Сытыканская, Удачная и Юбилейная, прорывают осадочный чехол нижнепалеозойского возраста, в котором в интервале отработки выделяется от трех до четырех водоносных комплексов, содержащих природные рассолы [2, 4]. Перечисленные месторождения относятся к четырем кимберлитовым полям: Алаakit-Мархинскому, Далдынскому, Мирнинскому

и Накынскому, которые в зависимости от своей структурной позиции имеют свои криогидрогеологические особенности: глубины залегания подземных вод, типы природных рассолов, а также водообильность вскрываемых коллекторов.

Независимо от сложности криогидрогеологических условий отдельного месторождения его отработка и сопутствующее водопонижение приводят к формированию разноплощадных депрессионных воронок. А в случае реализации метода обратной закачки, в качестве способа обращения с дренажными водами, пьезометрическая поверхность моделируемых водоносных комплексов начинает напоминать диполь, состоящую из де-

прессионной воронки и наложенного репрессивного купола растекания [1, 3]. Обеспечение безопасных условий отработки требует строительства водоотлива, рассчитанного как на фактические, так и на прогнозные притоки подземных вод. Особенность отработки кимберлитовых тел заключается в планомерном увеличении глубины вскрытия: наиболее богатые трубки на первом этапе вскрываются открытыми горными работами с последующим переходом на подземную добычу. В настоящее время глубина отдельных рудников превысила 1250 м от дневной поверхности [7].

Планомерное увеличение глубины отработки приводит к поэтапному вскрытию водоносных комплексов с постоянным увеличением притоков, причем в зависимости от криогидрогеологических условий отдельно взятого кимберлитового поля, изменение объема дренажных вод может существенно отличаться. Например, суммарный приток рассолов на трубке Айхал при отработке открытым способом до глубины 400 м составлял порядка 40 м³/сут; в настоящее время суммарный приток природных рассолов к подземным горным выработкам рудника, с увеличением глубины до 700 м достиг 200 м³/сут, а прогнозируемый на конец отработки расход составит до 430 м³/сут. По трубке Удачная произошло более существенное увеличение притока при переходе на подземную добычу: при отработке открытым способом до глубины 640 м приток составлял от 1000 до 2000 м³/сут; в настоящее время суммарный приток природных рассолов к подземным горным выработкам рудника с увеличением глубины до 970 м достиг 7200 м³/сут, а прогнозируемый на конец отработки расход составит до 48000 м³/сут [6, 9].

Перечисленные факторы требуют не только комплексной и раздельной оценки поступающих притоков, но и создания инструмента для прогнозирования изменения гидрогеологической обстановки в процессе ведения горных работ. С целью своевременного реагирования на динамику изменения притоков подземных вод и параметров остаточного напора на месторождениях компании в качестве такого инструмента было выбрано гидрогеологическое моделирование на основе постоянно действующих “цифровых двойников”.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБЪЕКТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гидрогеологические условия являются определяющими при выборе применяемых технологий разработки и опережающего водопонижения. Наиболее простыми гидрогеологическими условиями характеризуются месторождения Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, наиболее сложными Далдынского и Мирнинского.

Гидрогеологические условия *Алакит-Мархинского кимберлитового поля* определяются его принадлежностью к Тунгусскому криоартезианскому бассейну. Основным объектом изучения здесь выступают подмерзлотные природные рассолы, представленные верхнекембрийским подмерзлотным водоносным комплексом (ВВК), что связано с его доминированием (до 90%) при формировании дренажных вод месторождений [5]. Комплекс характеризуется повсеместным распространением, приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской и мархинской свит верхнего кембрия. Кроме того, в мощной зоне многолетнемерзлых пород ограниченно существуют маломощные линзы и прослойки так называемых морозовых пород, имеющих отрицательную температуру, но без наличия жильного льда, содержащих свободную воду. К таким линзам морозовых отложений и приурочен межмерзлотный водоносный нижнеордовикский комплекс, характеризующийся весьма низкими значениями фильтрационных параметров и имеющий ограниченное распространение. Несмотря на низкие фильтрационные параметры данный водоносный комплекс участвует в обводнении месторождения, так как вскрыт подземными горными выработками [7].

Основными гидрогеологическими объектами, осложняющими горнотехнические условия отработки кимберлитовой трубки “Юбилейная” Алакит-Мархинского кимберлитового поля в отм. +620/+470 м, являются несквозные талики озер Проточное и Травянистое, имеющие ограниченное площадное распространение [8].

На месторождениях *Далдынского кимберлитового поля*, помимо ВВК, вскрывается среднекембрийский водоносный комплекс (СВК), приуроченный к переслаивающимся карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи и карбонатным отложениям верхней пачки удачининской свиты, а также нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК), расположенный ниже глубины 1350–1450 м и приуроченный преимущественно к трещинно-кавернозным коллекторам в доломитах нижней пачки удачининской свиты и окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты [10].

Гидрогеологические условия *Мирнинского кимберлитового поля* определяются его принадлежностью к Тунгусскому и Якутскому артезианским бассейнам. Здесь главным объектом изучения выступает первый от поверхности подмерзлотный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс, что связано не только с его доминированием (до 95%) при формировании дренажных вод месторождений, но и с использованием коллекторов горизонта для обратной закачки. Меньшее влияние имеют: слабоводоносные межсолевой олекминский и эльганский горизонты, обладающие низкими коллекторскими свойствами. Вы-

Таблица 1. Гидрогеологическая характеристика обрабатываемых месторождений

Кимберлитовое поле	Месторождение, (трубка)	Вскрываемые водоносные горизонты и комплексы	Прогнозный приток на конец отработки, м ³ /сут	Участок закачки тип коллектора
Алакит-Мархинское	Айхал	Нижнеордовикский Верхнекембрийский	430	Ноябрьский ММП
	Юбилейная	Несквозные талики	150	Пресные воды, не требующие закачки
Далдынское	Зарница	Нижнеордовикский Верхнекембрийский	1000	Заречный ММП
		Верхнекембрийский Среднекембрийский	700	Левобережный-2 ММП Нижнекембрийский юго-восточный региональный подмерзлотный
Мирнинское	Удачная	Верхнекембрийский Среднекембрийский Нижнекембрийский	48 000	Октябрьский ММП Киенгский ММП Левобережный ММП Левобережный-2 ММП Нижнекембрийский юго-восточный региональный подмерзлотный Среднекембрийский региональный подмерзлотный
	Интернациональная	Метегеро-ичерский Олекминский Толбачанский Эльгянский	29 000	УОЗ+УЗВ региональный подмерзлотный
Накынское	Мир	Метегеро-ичерский Олекминский Толбачанский Эльгянский	36 000	Тымтайдахский Южный региональный подмерзлотный
	Ботубобинская	Верхнекембрийский подмерзлотный	100	Ботубобинский ММП
	Нюрбинская	Верхнекембрийский межмерзлотный Верхнекембрийский подмерзлотный	150	

деляемый в рамках толбачанской свиты толбачанский газоводоносный комплекс, как правило, состоит из 15–17 коллекторов. Несмотря на высокие показатели пластовых давлений, в целом комплекс характеризуется незначительной водообильностью [9].

В пределах *Накынского кимберлитового поля* объектами исследования выступают верхнекембрийский подмерзлотный и верхнекембрийский межмерзлотный водоносные комплексы, последний имеет спорадическое распространение, вскрывался скважинами в пределах тектонических зон Северного и Южного разломов, в ордовикских и верхне-

кембрийских отложениях. Кровлей водоносного комплекса являются глинистые многолетнемерзлые отложения балыктахской и чаргольской свит нижнего ордовика и верхнего кембрия. Водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами.

Наибольшие притоки прогнозируются по трубке Удачная (Далдынское кимберлитовое поле), наименьшие – по трубке Ботубобинская (Накынское кимберлитовое поле). Прогнозные притоки природных рассолов, как осложняющий фактор отработки, а также сопряженные участки закачки, приведены в табл. 1.

Исходя из представленной в табл. 1 информации, можно выделить следующие объекты для создания “цифровых двойников”:

1. В пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля – рудник Айхал, карьер Юбилейный, участки закачки Заречный и Ноябрьский.

2. В пределах Далдынского кимберлитового поля – рудник Удачный, карьер Зарница, участки закачки Октябрьский, Киенгский, Левобережный, Левобережный-2, Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

3. В пределах Мирнинского кимберлитового поля – рудники Интернациональный и Мир, участки закачки УОЗ, УЗВ, Тымтайдахский и Южный.

4. В пределах Накынского кимберлитового поля – карьер Ботубобинский, карьер Нюрбинский, участок закачки Ботубобинский.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Созданию “цифровых двойников” предшествовали качественный анализ, обобщение с последующим написанием отчетной фондовой документации в части прогноза по остаточной емкости участков, а также определение оптимального режима эксплуатации систем защиты рудников и карьеров от затопления и сопряженных участков за-

качки. В результате полученный массив данных был структурирован в виде базы данных (БД). Иерархия созданной БД представлена на рис. 1, а структура на рис. 2.

Для удовлетворения потребности основного производства – горно-обогатительных комбинатов, в качественно прогнозировании динамики изменения гидрогеологических условий, возникающих в результате техногенного воздействия на геологическую среду, было принято решение о создании целого ряда постоянно действующих гидрогеологических моделей отдельных карьеров, рудников и участков закачки. Отличием постоянно действующих гидрогеологических моделей от прогностических является постоянное пополнение новой информацией, с последующей ежегодной калибровкой и выдачей уточненного краткосрочного (на один год), среднесрочного (на три года) и долгосрочного прогноза (более 3 лет). В случае необходимости созданные модели позволяют оценить притоки к месторождению на всем его “жизненном цикле”.

Решение фильтрационной задачи осуществляется с использованием лицензионной программы FEFLOW, выполняющей моделирование гидрогеологических условий методом конечных элементов в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону граничных условий (ГУ) I,

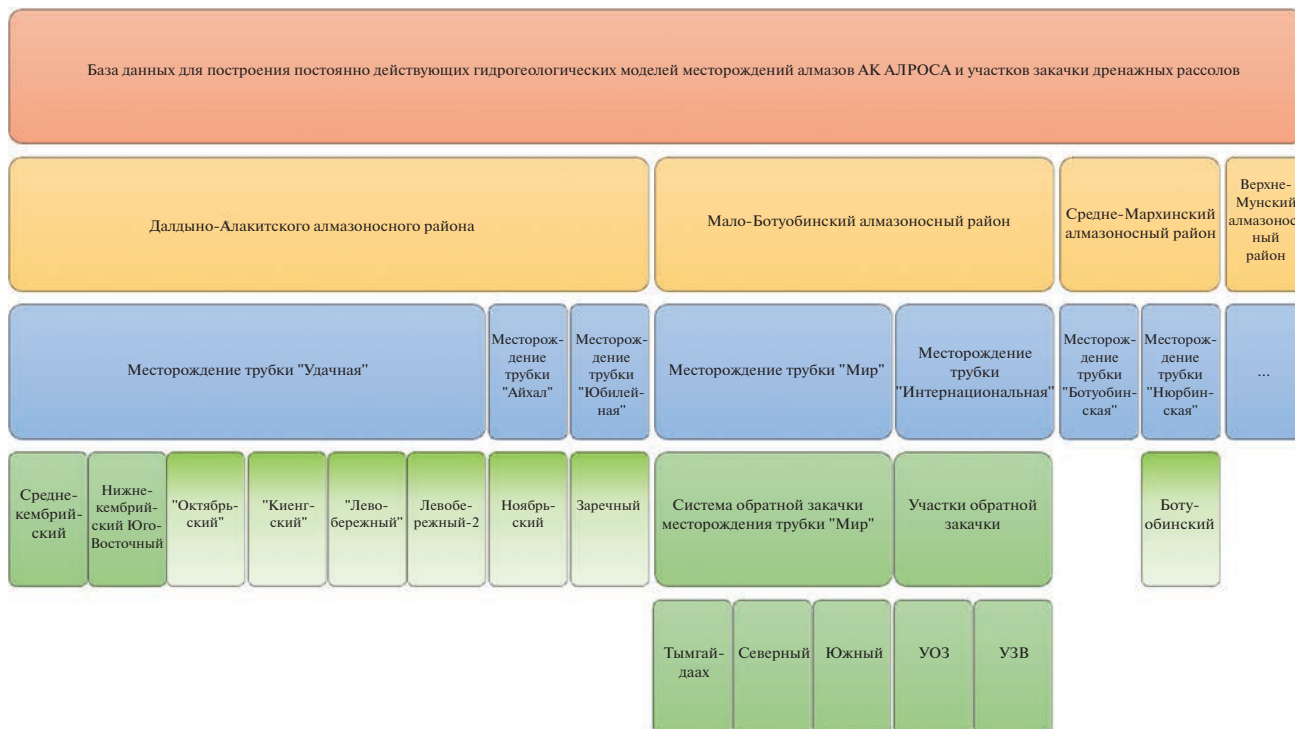


Рис. 1. Иерархия созданной БД гидрогеологических моделей месторождений алмазов АК АЛРОСА и сопряженных участков закачки.

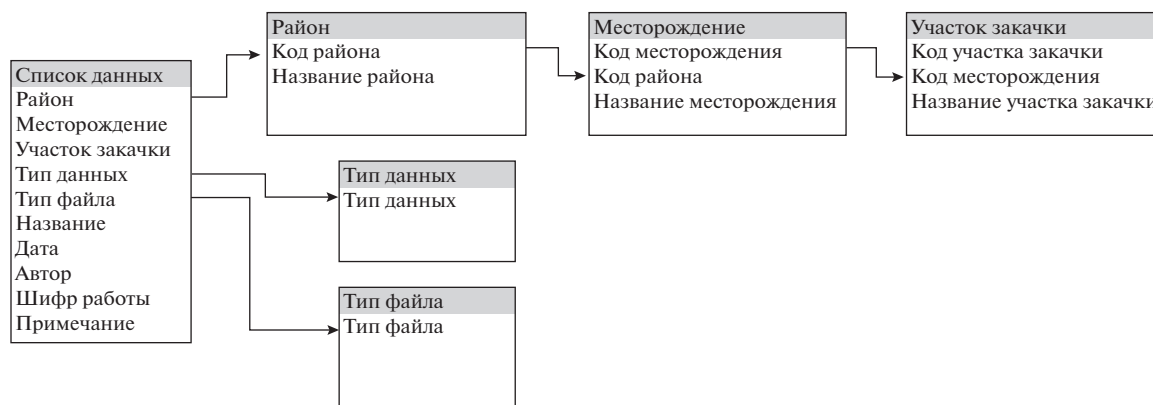


Рис. 2. Структура БД гидрогеологических моделей месторождений алмазов АК АЛРОСА и сопряженных участков закачки.

II, III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, а также вертикальной фильтрации. В зависимости от гидрогеологических условий отдельного кимберлитового поля и решаемых задач, были определены размеры области фильтрации, реализуемые на модели, позволяющие учитывать в процессе исследований все основные режимобразующие факторы [11].

Для шахтных и карьерных полей создавались 3-мерные многослойные модели. Количество слоев определялось гидрогеологическими условиями (количество водоносных горизонтов) и схемой вскрытия (размер эксплуатационного блока). Дополнительным фактором выступала необходимость прогноза притока для отдельной горной выработки, что требовало создание сетки из десятков тысяч элементов. Например, модель трубки Айхал, описывающая его текущее состояние, т.е. до глубины 700 м от дневной поверхности, состоит из 23 слоев, где карьер задан двумя слоями, нижнеордовикский водоносный комплекс, вскрываемый подземными горными выработками – 9, а верхнекембрийский водоносный комплекс – 12. Моделируемая область шахтного поля размером $4100 \times 3600 \text{ м}^2$ разбита неравномерной сеткой, состоящей из 68 345 элементов в каждом слое и 34 220 узлов в каждом слайсе. Размеры элементов от 1.5 до 100 м. Размеры элементов определяются существующей инфраструктурой рудника.

При создании моделей подземные горные выработки рудника задавались как ГУ I рода таким образом, чтоб отметка горной выработки в каждом конкретном узле не оказывалась ниже подошвы соответствующего слоя. На ГУ было наложено ограничение по величине стока, чтобы граница не могла выступать в качестве питающей. С помощью функции модуляции учитывались последовательность отработки и схема вскрытия конкретного рудни-

ка. Условия питания подземного потока на границах шахтного поля реализовались на модели ГУ III рода с поддержанием уровня воды на фактически наблюдаемых отметках через дополнительное фильтрационное сопротивление. Разломы, выделяемые в пределах объекта моделирования, также рассматривались в качестве ГУ III рода [12].

В качестве начальных условий, при решении обратной задачи, принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени. Дополнительными параметрами для итераций являлись:

- балансовые наблюдения на руднике или карьере;
- значения фильтрационных параметров, ранее полученных опытным путем или в процессе выполненных исследований;
- закономерности пространственной изменчивости фильтрационных свойств изучаемого объекта.

Построение гидрогеологических моделей участков закачки, использующих подмерзлотные региональные водоносные комплексы, осуществлялось схожими методами, однако имелся ряд отличий:

- площади моделируемых объектов существенно отличались. Если площади карьерных и шахтных полей, как правило, составляли 3–5 км², то площади участков закачки составляли от 200 до 400 км²;
- закачные скважины задавались ГУ II рода.

Моделирование процесса закачки в толщу ММП реализовалось по принципу фильтрации в “сухой грунт” с присущим ему фронтом продвижения границы раздела между “сухим” и насыщенным грунтом. В связи с этим вместо начальных условий для напоров в первом и втором слоях модели задавался признак “сухих” блоков. В дальнейшем при моделировании такие блоки могут “за-

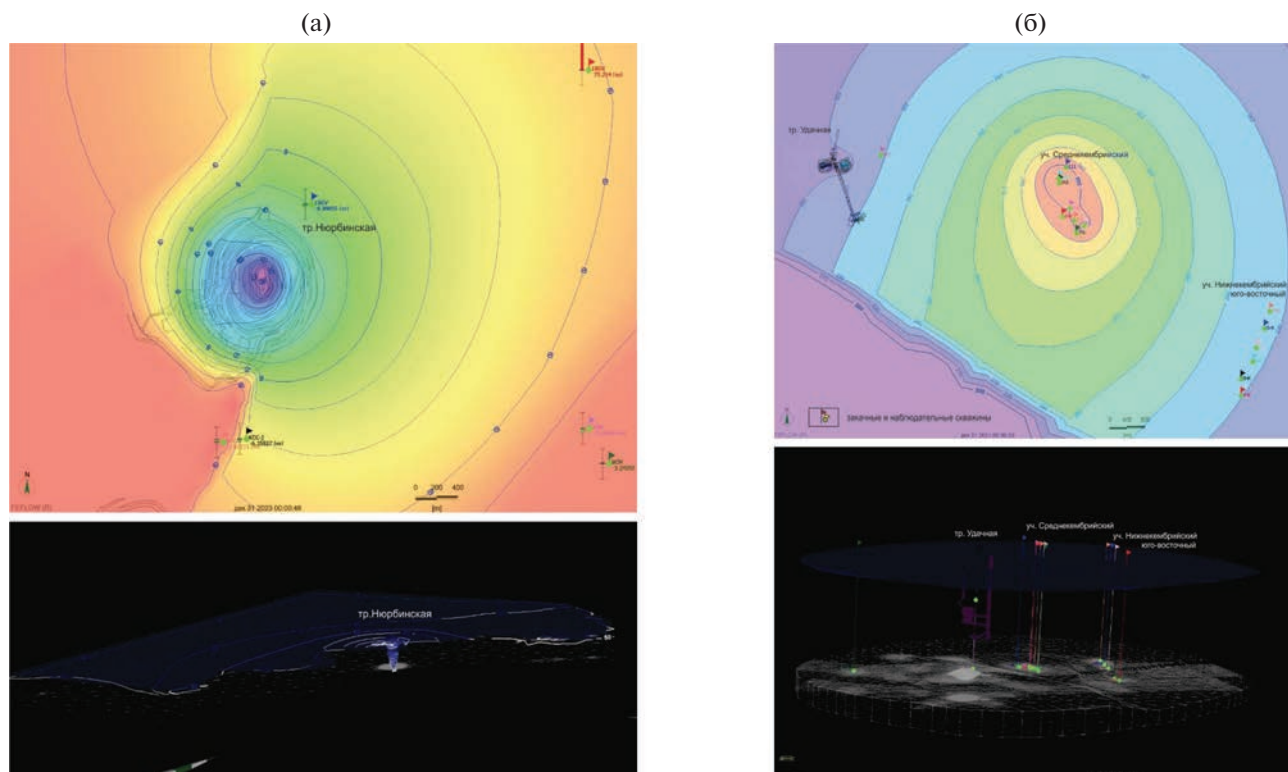


Рис. 3. Прогнозируемое распределение уровня подземных вод в пределах: а – карьерного поля трубки Нюрбинская (абс. отм., м); б – участков закачки Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

мачиваться” при появлении напоров в соседних блоках выше отметок подошвы слоя. На внешних границах 1, 2-го слоев граничные условия не задавались, так как закачиваемые рассолы не достигают внешних границ. Эксплуатационные скважины участков закачки моделировались как граничное условие 2-го рода (задавался фактический расход закачки). Значения фильтрационных параметров (коэффициентов фильтрации и емкостных свойств) принимались по имеющимся литературным и фондовым материалам. В процессе моделирования на этапе решения обратной задачи (калибровка модели) эти параметры уточнялись.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанных работ в период 2020–2022 гг. были созданы постоянно действующие “гидрогеологические двойники” основных месторождений компании – трубок Айхал, Ботуобинская, Интернациональная, Мир, Нюрбинская, Удачная и Юбилейная, а также сопряженных участков закачки. В качестве примера реализации программы гидрогеологического моделирования представим “цифровые двойники” трубки Нюрбинская и участков закачки Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный (рис. 3).

Создание и последующая актуализация постоянно действующих моделей позволили не только приобрести современный инструмент прогнозирования водопритоков, но и помогли улучшить процесс планирования в части бурения дренажных и закачных скважин, приобретения насосного оборудования и др. Отклонение прогнозных величин от фактически наблюдаемых в рамках краткосрочного прогноза за период использования 2021–2023 гг. составляло от 5 до 10%.

В настоящее время контроль и актуализация моделей осуществляются силами специалистов института Якутнипроалмаз в следующем режиме: построенные модели ежегодно актуализируются с учетом информации, поступающей непосредственно с объекта и собранной в процессе регламентного ежемесячного гидрогеологического мониторинга. В ноябре каждого года на основе постоянно действующей модели выдается информационный отчет с прогнозным на весь будущий год поблочным распределением притоков подземных вод и картами-схемами распределения уровня (напора), приведенными помесечно. Например, в ноябре 2023 г. в горно-обогатительные комбинаты будут направлены отчеты, содержащие искомую помесечную информацию по притокам и напорам на весь 2024 г. В течение 2024 г.

на основе вновь поступившей информации модель будет ежеквартально актуализироваться и в ноябре 2024 г. будет выдан прогноз на 2025 г.

Дополнительным критерием успешного применения данного инструмента является постоянное расширение портфеля “цифровых двойников”:

– первая модель, построенная в 2020 г. в ПО FEFLOW для рудника Удачный, уже прошла две актуализации в 2021 и 2022 г., в настоящее время подготавливается третья актуализация;

– в 2021 г. по приведенному сценарию были реализованы “цифровые двойники” рудника Интернациональный, Мир, карьеров Нюрбинский и Юбилейный; дополнительно были построены модели участков закачки Киенгский и Левобережный-2;

– в 2022 г. дополнительно были построены модели рудника Айхал и карьера Ботуобинский, а также участков закачки Левобережный, Ноябрьский, Заречный, Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

ВЫВОДЫ

Постоянно растущая техногенная нагрузка на геологическую среду, возникающая в регионах интенсивного недропользования, требует современных инструментов контроля и прогнозирования. Для обеспечения безопасных условий отработки коренных месторождений алмазов Западной Якутии в АК АЛРОСА в рамках процесса цифровизации производства были реализованы гидрогеологические “цифровые двойники” главных месторождений и сопряженных участков закачки.

Несмотря на применение общепринятых и стандартных решений для прогнозирования динамики подземных вод, создание моделей имеет ряд особенностей в части формирования слоев, количества блоков и размеров элементов, определяемых системами вскрытия и размерами эксплуатационных блоков конкретного месторождения, а также изначальными криогидрогеологическими условиями кимберлитового поля.

Разработанные институтом Якутнипроалмаз гидрогеологические модели соответствуют предъявляемым требованиям, несмотря на сложные криогидрогеологические и структурно-тектонические условия каждого месторождения. Отклонения прогнозных величин не превышают фактически наблюдаемые на 5–10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавич И.К. Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.

2. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
3. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
4. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
5. Климовский И.В., Готовцев С.П., Шенелев В.В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки “Удачная” // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 45–50.
6. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горногеологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
7. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.
8. Янников А.М., Брычаев Н.М. Использование природно-техногенных несквозных таликов в качестве резервных источников водоснабжения (на примере участка долины реки Сытыкан, Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2022. № 4. С. 118–126.
<https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/118-126>
9. Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 60–73.
https://doi.org/10.25018/02361493_2022_9_0_60
10. Bidwell V.J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics // Mathematics and Computers in Simulation. 2005. V. 69. Iss. 1–2. P. 12–20.
<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>
11. Pouladi B., Bour O., Longuevergne L., Bernardie J. de La, Simon N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media // J. of Hydrology. 2021. V. 598. № 126450.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>
12. Zhao C., Wang Y., Chen X., Li B. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software // Ecological Modelling. 2005. V. 187. Iss. 2–3, pp. 341–351.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.10.019>

GEOFILTRATION MODELING OF WATER FLOWS TO PRODUCED PRIMARY DIAMOND DEPOSITS AND INJECTION IN ASSOCIATED AREAS

A. M. Yannikov^{a,#} and A. S. Struchkova^a

^a*Yakutnioproalmaz ALROSA PJSC,
ul. Lenina, 39, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

[#]*E-mail: yannikov90@mail.ru*

Safe development of primary diamond deposits in Western Yakutia requires constant monitoring of the hydrogeological regime of the exposed aquifer complexes within the quarry and mine fields of the deposits, as well as in the adjacent areas of drainage water injection. Over the entire period of development of the Alakit-Markhinsky, Daldynsky, Mirninsky and Nakynsky kimberlitic fields, about 400 million m³ of highly mineralized drainage water from quarries and mines were involved in the pumping-injection process. Complex cryohydrogeological conditions of the territory, i.e., lithological-facial specifics, continuous distribution of permafrost, structural confinement of kimberlite fields, fault-block structure of individual pipes, influence the dynamics of occurring changes and make the cryohydrogeological conditions of each individual pipe unique and having no complete analogues. In order to predict successfully and implement subsequently technical solutions aimed at controlling inflows of all types formed within mine and quarry fields, the Yakutnioproalmaz Institute elaborated a program for the development, constant maintenance and updating of hydrogeological “digital twins” of all key mining deposits. The developed models take into account the influence of both natural factors and the applied schemes for opening and draining deposits, which impose their own limitations. The filtration problem was solved out using the licensed program FEFLOW, which performs modeling of hydrogeological conditions by the finite element method in a multilayer strata for areas of arbitrary configuration with boundary conditions of type I, II, III changing according to the known law in the presence of filtration heterogeneities in plan and section, as well as vertical filtration. The creation and constant updating of permanent digital models made it possible not only to acquire a modern tool for forecasting water inflows, but also helped to improve the planning process in terms of drilling drainage and injection wells, purchasing pumping equipment, etc. Deviation of predicted values from those actually observed within the short-term forecast for the period of use 2021–2023 ranged from 5 to 10%.

Keywords: *hydrogeological modeling, kimberlitic field, depression funnel, natural brine, injection areas*

REFERENCES

- Gavich, I.K. [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI Publ., 1982, 79 p. (in Russian)
- [Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 384 p. (in Russian)
- Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU Publ., 2008, 507 p. (in Russian)
- Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P. [Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 167 p. (in Russian)
- Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P., Shepelev, V.V. [Hydrogeocryological conditions of the landfill for underground burial of drainage waters from the “Udachnaya” pipe]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 3, pp. 45–50. (in Russian)
- Kolganov, V.F., Akishev, A.N., Drozdov, A.V. [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia], *Mirnyi, Mirninskaya tipografiya Publ.*, 2013, 568 p. (in Russian)
- Yannikov, A.M. [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field]. *Mirnyi, ZYANTs/YaNA Publ.*, 2021, 240 p. (in Russian)
- Yannikov, A.M., Zyryanov, I.V., Korepanov, A.Yu., Struchkova, A.S. [Dynamics and forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian aquifer within the Daldynskaya flexure]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2022, no. 9, pp. 60–73. (in Russian)
- Yannikov, A.M., Brychaev N.M. [Using natural and man-made blind taliks as backup sources of water supply (a case study of a section of the Sytykan river valley, Republic of Sakha (Yakutia))]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2022, no. 4, pp. 118–126. (in Russian)
- Bidwell, V.J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2005, vol. 69, issues 1–2, pp. 12–20, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.
- Pouladi, B., Bour, O., Longuevergne, L., Bernardie, J. de La, Simon, N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 598, 126450. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>.
- Zhao, C., Wang, Y., Chen, X., Li, B. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software. *Ecological Modelling*, 2005, vol.187, nos. 2–3, pp. 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.10.019>

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ
И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.3:622.841

МЕТОД ПРОГНОЗА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДОПРИТОКА
К ПОДЗЕМНЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ
ВОДОСБОРА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

© 2023 г. Л. И. Лесничий^{1,*}, К. И. Гриценко¹

¹Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ),
21 линия Васильевского острова 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*E-mail: Lesnichiy_LI@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Для прогноза сезонных изменений водопритоков к горным выработкам авторами предложено использовать модель водосбора с сосредоточенными параметрами. Ранее, на примере трех объектов, разрабатывающих месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, показана ее эффективность для прогнозов сезонных изменений водопритоков к открытым горным выработкам. В данной статье на основании предлагаемой модели водосбора разработана простая, не требующая специального программного обеспечения, методика составления прогноза. Приведен пример ее применения для прогноза среднемесячных значений водопритока с заблаговременностью один месяц к одной из шахт Кузбасса.

Ключевые слова: прогноз водопритоков, горные выработки, частично-инфинитное моделирование, модель водосбора

DOI: 10.31857/S086978092306005X, EDN: ZGAJJD

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возможно выполнять расчеты притоков подземных вод к объектам при помощи большого количества численных и аналитических методов [4, 6–9, 13]. В последние два десятилетия наиболее распространенной практикой стал расчет водопритоков с использованием математических моделей. Их применение обусловлено не только точностью расчетов, но и возросшей доступностью этих методов и универсальностью их применения для разных геолого-гидрогеологических условий. В качестве математических моделей, как правило, применяются геофильтрационные модели, основанные на законе Дарси и уравнении неразрывности [7].

Общеизвестна эффективность этих моделей для расчетов средних и максимальных значений водопритоков. Но в литературе не удалось найти примеров по их успешному и широкому применению для оперативных, регулярных прогнозов сезонных изменений водопритоков с заданной заблаговременностью (например, среднемесячными значениями водопритоков с заблаговременностью один месяц). Связано это, прежде всего, с тем, что сезонные изменения уровня режима подземных вод и водопритоков к горным выработкам во многом определяются изменением

условий питания водоносных горизонтов, входом в геофильтрационную модель – условиями на ее гидродинамических границах. Например, инфльтрационным питанием, распределение которого ни по площади водосбора, ни во времени достоверно неизвестно, в связи с отсутствием прямых наблюдений. Решением в этом случае может стать создание комплексной модели водосбора. Например, для прогноза водопритоков, вызванных процессами снеготаяния, комплексная модель должна включать в себя следующие модели: процесса снеготаяния, поверхностного стока и поступления питания в зону аэрации, влагопереноса в ненасыщенной зоне, и геофильтрационную модель. Очевидно, что обеспечить такую сложную модель точными и специфическими параметрами и данными затруднительно.

Другое решение прямо противоположно и заключается в упрощении представлений о водосборе путем пространственного осреднения описывающей его модели. В частности, известна модель склонового сосредоточенного притока с водосбора вида (1). Приведенная модель получена [3] осреднением двумерной модели стекания по водосбору [5]. В рамках частично инфинитного моделирования было обосновано ее применение для прогнозов как суммарных притоков (подземного, по-

верхностного и речного стока) с водосбора, так и отдельно поверхностного и подземного стоков (минимального 30-суточного стока) [2].

$$\tau \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k} Q = \dot{X}, \quad (1)$$

где Q – сток с водосбора (приток в рудник), м³/сут; τ – время добегания, сут; k – коэффициент стока; \dot{X} – эффективные осадки, м³/сут; t – время, сут.

Для модели (1) нет различий в том, чем дренируется сток с водосбора: рекой, озером, карьером или рудником. Свойства этого объекта, как и всего водосбора, “сжатого” в точку, отражены в коэффициентах модели. По этой причине модель водосбора с сосредоточенными параметрами может быть использована для прогнозов водопритоков и к карьерам, и к подземным горным выработкам. Но эффективность и границы ее применения должны быть установлены и обоснованы [2].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для оценки применимости модели (1) для прогнозов водопритоков к карьерам и подземным горным выработкам проведен ряд исследований. На первом этапе проведена оценка применимости этой модели для прогнозов среднегодовых значений притоков к горным предприятиям, разрабатывающим месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива (Коашвинский и Ньюрпахкский карьеры и Кировский рудник с комбинированной разработкой). Расчеты показали “хорошую” оправдываемость прогнозов. Точность прогнозов по критерию S/σ [11] составила: 0.34 для Коашвинского и 0.57 для Ньюрпахкского карьеров. Для Кировского рудника значение критерия S/σ для ряда среднемесячных притоков составило 0.58. Подробно результаты первого этапа исследований представлены в [1].

На втором этапе исследований была проведена оценка применимости модели для прогнозов среднемесячных значений притоков с заблаговременностью один месяц для подземных горных выработок на примере одной из шахт Кузнецкого угольного бассейна. Результаты исследований представлены в настоящей статье.

Для практического применения разработанных методов прогноза наибольший интерес представляют те, реализация которых на производстве не требует высокой квалификации персонала и использования специализированного программного обеспечения. Поэтому из семейства моделей водосбора и их численных реализаций для расчета притока к подземным горным выработкам была рассмотрена численная реализация модели (2) с корректировкой, задачу идентификации пара-

метров которой можно свести к решению системы линейных алгебраических уравнений.

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t + \frac{\Delta t}{\tau} X_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t, \quad (2)$$

где t – момент времени; Δt – шаг по времени, равный заблаговременности прогноза.

Под корректировкой понимается то, что на каждом временном шаге в качестве Q_t задаются фактические (измеренные) значения расходов воды. Шаг расчета равен заблаговременности прогноза. При наличии рядов фактических наблюдений за расходами (Q_1, \dots, Q_n) и осадками (X_1, \dots, X_n) задача идентификации параметров модели может быть сформулирована, как нахождение коэффициентов модели, при использовании которых ошибка расчета (прогноза) будет минимальна, т.е. решена с помощью метода наименьших квадратов [12].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{\text{нп}} - Q_t^{\text{ф}})^2}{n-1}} \rightarrow 0, \quad (3)$$

где S – среднеквадратическая ошибка расчетов, м³/сут; $Q_t^{\text{ф}}$ – фактический (измеренный) сток с водосбора в момент времени t , м³/сут; $Q_t^{\text{нп}}$ – рассчитанный по модели сток с водосбора в момент времени t , м³/сут; n – длина ряда наблюдений.

Подставив (2) в (3) и преобразуя, получаем:

$$f(k, \tau) = \sum_{t=1}^n \left(Q_t - Q_{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{\tau} X_t - \frac{\Delta t}{k\tau} Q_t \right)^2 \rightarrow 0. \quad (4)$$

В случае использования модели с корректировкой начальных условий, когда все члены рядов Q_t , $Q_{t+\Delta t}$, X_t в (4) известны, решая задачу минимума, можно найти коэффициенты k и τ аналитически.

Аналитическое решение можно получить как для случая, когда $k = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$, так и для ряда случаев с переменными значениями коэффициентов $1/k = f(Y_1)$ и $1/\tau = f(Y_2)$, где Y_1 и Y_2 – известные измеренные параметры (например, температура воздуха, атмосферные осадки, величина снежного покрова, уровни воды и т.п.), в том числе данные дистанционного зондирования Земли [10].

Для случая $k = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$ решение выглядит следующим образом:

$$\tau = \frac{\Delta t \cdot (A_1^2 - A_3 \cdot A_5)}{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}, \quad (5)$$

$$k = \frac{A_1 \cdot A_4 - A_2 \cdot A_3}{A_1^2 - A_2 \cdot A_1 - A_3 \cdot A_5 + A_4 \cdot A_5}, \quad (6)$$

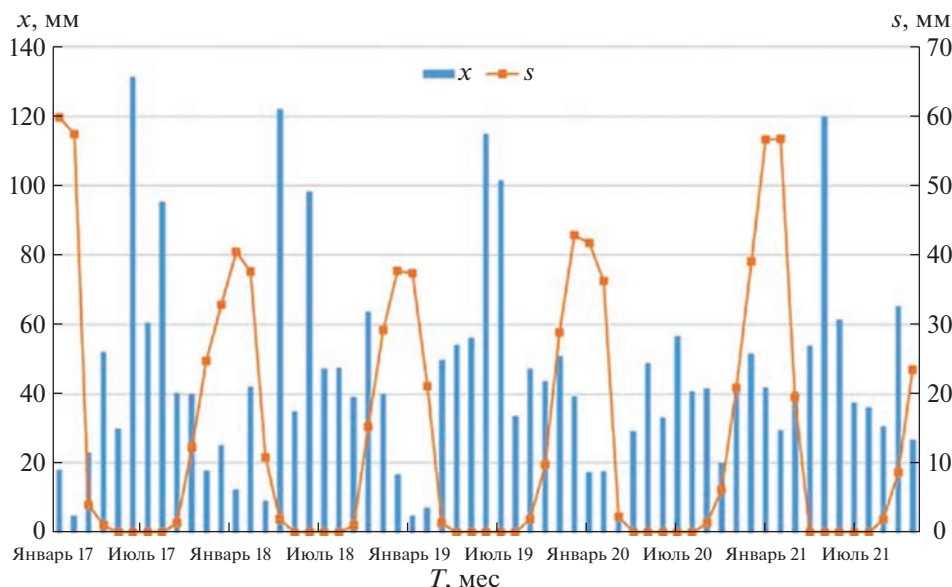


Рис. 1. Данные о суммарных за месяц атмосферных осадках (x) и среднемесечной высоте снежного покрова (s) на метеостанции Мыски.

$$\begin{aligned}
 \text{где } A_1 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot X_t), \quad A_2 = \sum_{t=1}^n (Q_{t+\Delta t} \cdot X_t), \\
 A_3 &= \sum_{t=1}^n (Q_t)^2, \\
 A_4 &= \sum_{t=1}^n (Q_t \cdot Q_{t+\Delta t}), \quad A_5 = \sum_{t=1}^n (X_t)^2.
 \end{aligned}$$

Это решение позволяет предложить следующую методику составления оперативных прогнозов среднемесечных значений водопритоков:

1. Ряд совместных наблюдений за водопритоком и осадками разделяется на две равные части, длиной не менее 15–20 наблюдений.
2. По первой половине ряда рассчитываются коэффициенты модели по (5) и (6) (проводится идентификация параметров модели). Оценивается точность идентификации параметров.
3. По второй половине ряда проводятся поверочные прогнозы, оценивается их точность. Для оценки точности прогнозов целесообразно использовать критерии S/σ или S/σ_{Δ} [11], суть которых в преимуществе предлагаемого метода над простейшим инерционным прогнозом (соотношение среднеквадратических ошибок их прогнозов).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОДОПРИТОКОВ ОДНОЙ ИЗ ШАХТ КУЗБАССА

В соответствии с представленной методикой проведены прогнозы для одной из шахт Кузбасса. В качестве исходных данных приняты атмосферные осадки и величина снежного покрова по метеостанции Мыски, которые представлены на рис. 1. Атмосферные осадки, измеряемые на ме-

теостанции, не в полной мере соответствуют входу в модель (осадкам (\bar{X}), поступающим на водосбор), поскольку твердые осадки в виде снега запасаются и поступают на водосбор в процессе снеготаяния, который не контролируется прямыми наблюдениями. Если рассматривать этот процесс, оставаясь в рамках модели (1), то он будет зафиксирован изменением коэффициентов модели, в зависимости от высоты снежного покрова. Поэтому при составлении прогнозов в холодный период года (октябрь–февраль) жидкие осадки принимались равными “0”, в марте – равными измеренным выпавшим осадкам. В период апрель–май за жидкие осадки принимались измеренные осадки за период октябрь–февраль, распределенные между двумя месяцами (апрель и май) пропорционально глубине снежного покрова. В остальные месяцы жидкие осадки принимались равными измеренным (на метеостанции Мыски). При идентификации параметров модели коэффициенты k и τ рассматривались как линейные функции от высоты снежного покрова для учета поступления влаги на водосбор в процессе снеготаяния.

В результате была получена следующая модель:

$$Q_{t_2} = Q_{t_1} + K_1 \times X_{t_1} - K_2 \times Q_{t_1}, \quad (7)$$

где Q – водоприток в шахту, $\text{м}^3/\text{ч}$; t_2 – прогнозный месяц; t_1 – предшествующий прогнозному (текущий) месяц; $K_1 = 0.88504904S + 0.1498$; $K_2 = -0.00592430S + 0.1654$; S – высота снежного покрова на метеостанции Мыски, см; X – жидкие осадки, поступающие на водосбор, мм.

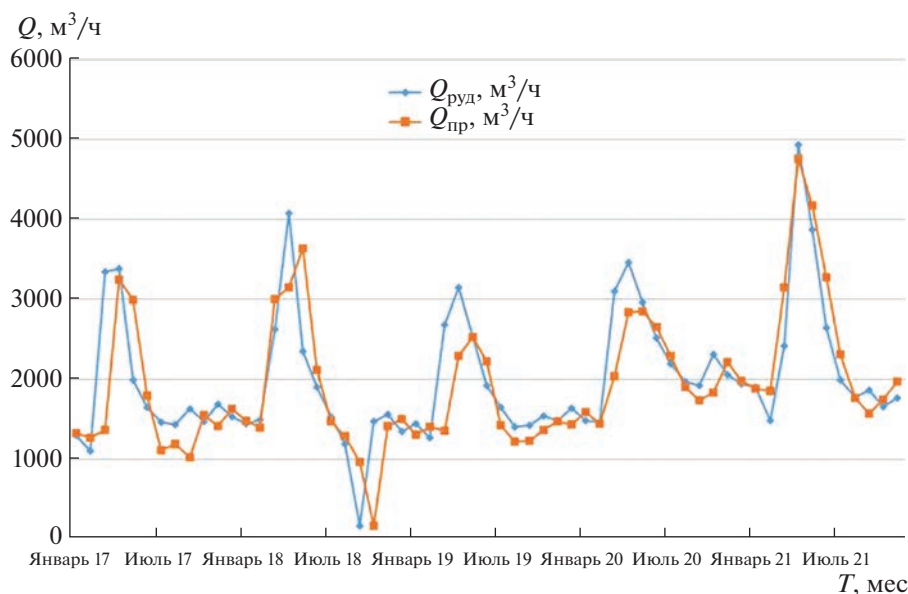


Рис. 2. Прогнозный и фактический гидрографы среднемесячных притоков в шахту.

Прогнозный гидрограф, полученный с помощью этой модели, и фактические данные о водопритоках представлены на рис. 2. Точность модели при идентификации параметров по критерию S/σ [11] составила 0.59, по критерию S/σ_{Δ} – 0.66. Такой прогноз принято считать “удовлетворительным”.

ВЫВОДЫ

1. На основании модели водосбора, основанной на модели склонового стока с сосредоточенными параметрами, разработана доступная для применения без специализированного программного обеспечения методика прогнозов водопритоков. Она может быть реализована в любых распространенных редакторах электронных таблиц (MS Excel, OpenOffice Calc и т.п.).

2. Составленные с помощью разработанной методики прогнозы водопритоков для одной из шахт Кузбасса имели “удовлетворительную” точность ($S/\sigma \approx 0.6$).

3. Результаты применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для прогноза сезонных изменений водопритоков совместно с ранее полученными результатами по ее применению для карьеров [1] дают основания утверждать о перспективности применения модели водосбора с сосредоточенными параметрами для прогнозов водопритоков к горным выработкам.

4. Подход к описанию водосбора упрощенными моделями, кроме ряда преимуществ, неизбежно приводит к “размытию” физического смысла коэффициентов (свойств) модели, переходу в область частично-инфинитного моделирования.

Поэтому для оценки возможности (целесообразности) и границ применения представленного метода необходимо более широкое его применение в разных гидрогеологических условиях. Только на основании обобщения эмпирического опыта можно будет сделать более полные соответствующие выводы и обоснования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко К.И., Лесничий Л.И. Прогноз сезонных и годовых изменений водопритоков к карьерам с использованием модели склонового стока с сосредоточенными параметрами // Горный журнал. 2023. № 5. С. 104–108.
2. Коваленко В.В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процесса формирования речного стока. СПб.: РГГМУ, 2004. 197 с.
3. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: РГГМУ, 2006. 556 с.
4. Котлов С.Н., Шамшев А.А. Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин // ГИАБ. 2019. № 6. С. 45–55.
5. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
6. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румьнин В.Г. Горно-промышленная гидрогеология. М.: Недра, 1989. 287 с.
7. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 2001. 519 с.
8. Норватов Ю.А., Сергутин М.В. Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки Горного института. 2015. С. 89–94.

9. Носков В.А., Бадтиев Б.П., Павлович А.А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ // Горный журнал. 2020. № 2. С. 51–55.
10. Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Волков М.А., Гринюк А.П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103–113.
11. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 256 с.
12. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
13. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л.: Недра, 1979. 512 с.

METHOD OF PREDICTING SEASONAL VARIATIONS IN WATER INFLOW TO UNDERGROUND MINE WORKINGS USING THE WATER CATCHMENT MODEL WITH CONCENTRATED PARAMETERS

L. I. Lesnichii^{a,#} and K. I. Gritsenko^a

^aSt. Petersburg Mining University,
21st Line 2, V.O., St. Petersburg, 199106 Russia

[#]E-mail: Lesnichiy_LI@pers.spmi.ru

The authors suggest using the water catchment model with concentrated parameters for prediction of seasonal variation in water inflow to mines. The efficiency of the slope runoff model application was previously shown on the base of three test subjects operating apatite-nepheline ore deposits in the Khibiny massif. The article provides a simple methodology for water inflow prediction which doesn't require any specific software. The example is provided of using this methodology for monthly water inflow prediction based on an underground mine in Kuzbass.

Keywords: water inflow prediction, underground openings, partially infinite modeling, water catchment model

REFERENCES

1. Gritsenko, K.I., Lesnichii, L.I. [Forecast of seasonal and annual variation in water inflow to open pit mines using the slope runoff model with concentrated parameters]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 5, pp. 104–108. (in Russian)
2. Kovalenko, V.V. [Partially infinite modeling and forecasting of river runoff]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2004, 197 p. (in Russian)
3. Kovalenko, V.V., Viktorova, N.V., Gaidukova, E.V. [Modeling hydrodynamic processes]. 2nd edition. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2006, 558 p. (in Russian)
4. Kotlov, S.N., Shamshev, A.A. [Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes]. *GIAB*, 2019, no. 6, pp. 45–55. (in Russian)
5. Kuchment, L.S. [River runoff models]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 143 p. (in Russian)
6. Mironenko, V.A., Mol'skii, E.V., Rumynin, V.G. [Mining hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 287 p. (in Russian)
7. Mironenko, V.A. [Dynamics of groundwater]. Moscow, MGU Publ., 2001, 519 p. (in Russian)
8. Norvatov, Yu.A., Sergutin, M.V. [Forecast of water inflows into mine workings in the process of combined open-underground ore mining operations]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2015, vol. 212, pp. 89–94. (in Russian)
9. Noskov, V.A., Budtiev, B.P., Pavlovich, A.A. [Risk management in open-pit mining]. *Gornyi zhurnal*, 2020, no. 2, pp. 51–55. (in Russian)
10. Ponomarenko, M.R., Kutepov, Yu.I., Volkov, M.A., Grinyuk, A.P. [Space methods as a part of comprehensive monitoring of deformations of the Earth's surface at a mining enterprise]. *GIAB*, 2020, no. 12, pp. 103–133. (in Russian)
11. Popov, E.G. [Hydrogeological forecasts]. 2nd edition. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 257 p. (in Russian)
12. Sikan, A.V. [Methods for statistical processing of hydrometeorological information]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2007, 279 p. (in Russian)
13. [Reference book of a hydrogeologist]. 3rd ed. Maksimov, V.M., Ed., Leningrad, Nedra Publ., 1979, vol. 1, 512 p. (in Russian)

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.3:622; 004.94

ПРОГНОЗНАЯ ЧИСЛЕННАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРИТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КАРЬЕР ГОРЕВСКОГО ГОКА

© 2023 г. Е. В. Леонтьева^{1,*}, Р. Ю. Сапачёв^{2,**}, А. А. Гришин^{3,***}

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы 85, Белгород, 308015 Россия

²ООО «ПроТех Инжиниринг»,
26 линия Васильевского острова 15, к. 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

³ООО НИП «СИБМАРКПРОЕКТ»,
Вузовский пер. 17, оф. 291, Красноярск, 660131 Россия

*E-mail: leonteva@bsu.edu.ru

**E-mail: roman.sapachev@pte.eurochem.ru

***E-mail: arseniy.grishin.2012@mail.ru

Поступила в редакцию 12.10.2023 г.

После доработки 26.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Горевское месторождение свинцово-цинковых руд расположено в уникальных условиях – на левом берегу и под современным руслом р. Ангары, в 38 км от ее устья. Данные обстоятельства играют весьма важную роль в характеристике гидрогеологических условий месторождения и условиях его разработки. Сложность гидрогеологических условий Горевского месторождения определяется природными условиями: характером залегания и строением водоносных горизонтов, а также присутствием слабопроницаемых и водоупорных отложений; степенью изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород; наличием тектонических нарушений и их гидродинамической ролью; наличием поверхностных водных объектов и их связью с подземными водами. Основная цель исследований – оценка прогнозного притока воды в карьер Горевского ГОКа и определение положения уровня подземных вод на конец отработки. Для достижения этой цели было выбрано численное моделирование геофильтрации методом конечных разностей в программном комплексе Visual MODFLOW. В статье рассмотрены этапы работ: сбор, обработка и анализ исходных данных; построение концептуальной гидрогеологической модели; создание эпигнозной численной модели; калибровка модели для естественных природных условий и фактического положения открытых горных работ; анализ чувствительности и создание прогнозной численной модели. В результате получена прогнозная величина притока подземных вод в карьер. Отстроено прогножное положение уровня подземных вод на конец отработки карьера. Проведенный анализ чувствительности модели по ряду сценариев позволил выявить факторы, оказывающие существенное влияние на приток подземных вод в карьер.

Ключевые слова: гидрогеологическое моделирование, численная геофильтрационная модель, карьер, уровень подземных вод, гидрогеологическая модель, метод конечных разностей, Modflow

DOI: 10.31857/S0869780923060048, **EDN:** CTYNOL

ВВЕДЕНИЕ

Одним из научных методов исследований, который в сравнительно короткий срок вошел в практику почти всех гидрогеологических работ, является численное моделирование геофильтрации – искусственное воспроизведение процессов фильтрации подземных вод и связанных с ними явлений для обеспечения эффективного решения различных гидрогеологических задач [6]. Данный метод дает возможность в сложных и в весьма сложных гидрогеологических условиях детально изучить рассматриваемый объект, учесть дей-

ствие большого числа факторов, дать им количественную оценку [10].

Кроме того, численное моделирование геофильтрации позволяет получить детальную расшифровку водного баланса моделируемой области, что сделать другими методами либо крайне затруднительно, а чаще – просто невозможно [6]. Это касается расшифровки статей естественных и привлекаемых ресурсов, структуры водопритоков к открытым и подземным горным выработкам и т.д. (с учетом их пространственной дифференциации) [8].

Построение численной геофильтрационной модели дает возможность получить положение уров-

ней подземных вод (УПВ) на любой момент времени. Это, в частности, позволяет провести расчеты устойчивости бортов карьеров в сложных и весьма сложных гидрогеологических условиях [7].

В определенных условиях моделирование способствует повышению степени надежности исходной информации, позволяет решать задачи по принципу оптимального поиска. Это качество метода особенно важно в связи с теми высокими требованиями к точности и достоверности, которые в настоящее время предъявляются практикой к результатам инженерных прогнозов и расчетов.

В связи с вышеперечисленным, именно численное моделирование геофильтрации методом конечных разностей позволило сымитировать весьма сложные и уникальные гидрогеологические условия Горевского ГОКа.

Основная цель работ – оценка прогнозного притока воды в карьер Горевского ГОКа и положение УПВ на конец отработки.

Для реализации этой цели было проведено решение ряда задач:

- проведены сбор, обработка и анализ исходных данных с 1959 по 2022 г.;
- построена концептуальная гидрогеологическая модель, схематизированы гидрогеологические и геофильтрационные условия;
- создана эпигнозная численная модель, плановая дискретизация модельной области;
- произведена калибровка модели посредством решения обратных задач: для естественных природных условий (по УПВ); для периода отработки карьера на конец 2022 г. (на основании фактических данных о карьерном водоотливе);
- проведен анализ чувствительности модели;
- создана прогнозная численная модель для определения прогнозного водопротока в карьер за счет подземных вод и положения уровня подземных вод на конец отработки карьера.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Горевское месторождение свинцово-цинковых руд расположено в весьма сложных, в своем роде уникальных гидрогеологических условиях на левом берегу и под современным руслом р. Ангара в 38 км от ее устья [3]. Данные обстоятельства играют весьма важную роль в характеристике гидрогеологических условий месторождения и условиях его отработки.

Изучение гидрогеологических условий Горевского ГОКа было начато одновременно с его детальной разведкой в период 1959–1963 гг. Учитываемая сложность гидрогеологических условий освоения месторождения, к их изучению и разработке методов защиты от подземных и поверхностных

вод в разные годы были привлечены организации: Стрелковская и Ангарская экспедиции Красноярского геологического управления, МГУ, институты Гидропроект, ЦНИИгоросушение, Союзшаштосушение, Гипроцветмет, ВИОГЕМ, Институт горного дела АН СССР, КраСТИСИЗ, Новосибирская контора “Гипроречтранс”, Горевский ГОК и др. [1, 2].

Кратко можно выделить следующие периоды изучения гидрогеологических условий месторождения: период разведки (1959–1964 гг.); начальный этап разработки месторождения (1964–1986 гг.); доразведка месторождения (1986–1989 гг.); освоение месторождения карьером 1 очереди после завершения доразведки (1990–2012 гг.); дополнительный комплекс гидрогеологических исследований для обоснования отработки Главного и Северо-Западного рудных тел под защитой дамбы II очереди и непосредственно строительства дамбы II очереди (2013–2021 гг.).

Для изучения гидрогеологических условий Горевского месторождения пробурено и опробовано большое количество скважин по площади и по глубине, в том числе в акватории р. Ангара. Проведена статистическая обработка рассчитанных значений коэффициента фильтрации по площади и глубине для различных частей рудного поля, в том числе береговой территории, под руслом Ангара, приразломных зон, по выделенным интервалам разреза и т.д. По данным статистической обработки более полутора тысяч различных откаток приняты расчетные значения коэффициентов фильтрации для различных зон на площади месторождения, окружающей территории и по выделенным по глубине интервалам разреза.

Гидрогеологические условия района Горевского месторождения характеризуются наличием двух водоносных комплексов в четвертичных отложениях и трещиноватых палеозойских и протерозойских образованиях. Оба комплекса гидравлически связаны между собой и имеют единый УПВ.

Водоносный комплекс в четвертичных отложениях довольно широко распространен и приурочен к аллювиальным отложениям русла и надпойменных террас долины р. Ангара. Питание четвертичного водоносного комплекса в основном происходит за счет атмосферных осадков, а в прирусловой зоне – водами Ангара в период половодья. По химическому составу воды аллювиальных отложений относятся к пресным гидрокарбонатно-магниево-кальциевым с сухим остатком не более 250–350 мг/л [3, 5].

Водоносный комплекс трещинных и трещинно-жильных вод горевской свиты верхнего рифея характеризуется хорошо выраженной неоднородностью состава водовмещающих пород, степенью их монолитности и трещиноватости, определяемой характером тектонических нарушений, раздробленностью пород в различных тектониче-

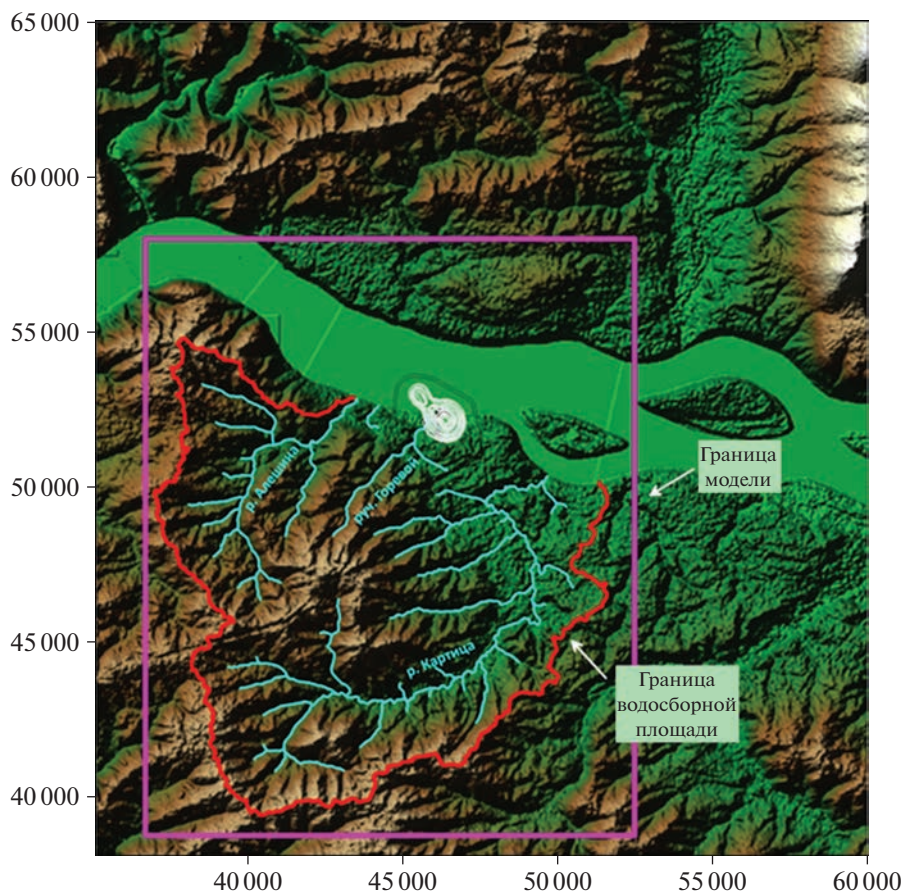


Рис. 1. 3D модель рельефа дневной поверхности анализируемой территории с границей модели.

ских зонах, зависимость от их кинематического типа и, соответственно, гидродинамической роли. Водоносный горизонт характеризуется неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород не только по площади, но и по глубине.

Анализ полученного материала приводит к выводу о резко неравномерной трещиноватости и фильтрационных свойствах карбонатных пород на месторождении в плане и по глубине. Рассматривая гидрогеологические условия Горевского месторождения, их можно квалифицировать как весьма сложные.

МЕТОДИКА РАБОТ

Этап 1. Анализ исходных данных, подготовка данных для создания концептуальной гидрогеологической модели. Первый этап заключался в изучении и анализе исходных данных, а также в подготовке графических и численных данных, необходимых для создания концептуальной гидрогеологической модели (КГМ), которая служит основой для численной геофильтрационной модели [4]. В рамках данного этапа созданы необходимые базы данных для построения КГМ, а также произведена работа с гра-

фическим материалом, в частности выполнены: привязка всех графических материалов, полученных не в цифровом формате, в соответствующую систему координат (карты, разрезы), оцифровка рельефа на необходимые территории и контуров литологических разностей, изолиний мощностей рыхлых отложений, рек и т.д.

Этап 2. Определение внешней границы моделируемой области. В первую очередь была определена граница модели. Исходя из анализа исходных данных, основными притоками Ангары в районе месторождения являются реки Картица и Алешина, а также руч. Горевой. Максимальные меженные расходы их соответственно 1.05, 0.2 и 0.03 м³/с. В паводок и при выпадении ливневых дождей их расходы увеличиваются от 2 до 5 раз. Построение рельефа дневной поверхности, выделение водосборной площади для рек Алешина, Картица и руч. Горевой показали целесообразность включения данных рек с притоками в границы моделируемой области (рис. 1). Таким образом, плановые размеры модели составляют с запада на восток 15.68 км, с севера на юг 19.2 км.

Этап 3. Создание концептуальной гидрогеологической модели участка. КГМ состоит из 10 слоев,

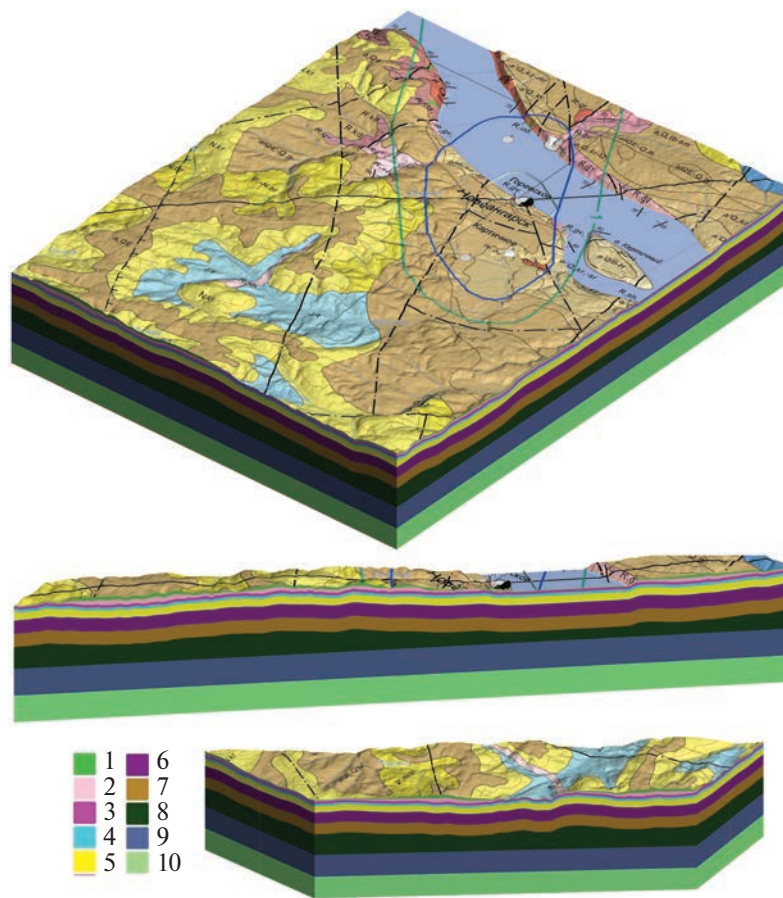


Рис. 2. Концептуальная гидрогеологическая модель участка.

создана в программном комплексе Leapfrog Geo (Seequent Inc.) (рис. 2).

Слои 1, 2 имеют переменную мощность и отражают распространение рыхлых отложений (суглинки и супеси), а также четвертичных отложений в русле р. Ангара. Кровля слоя 1 совпадает с рельефом дневной поверхности. Подошва слоя 2 совпадает с подошвой рыхлых отложений, при этом в русле р. Ангара слой 1 имеет минимальную мощность 1 м. Для слоя 2 на остальной территории модельной области принимались средние значения мощности рыхлых отложений, исходя из усредненного разреза к геологической карте и информации из геологической карты.

Слои 3 и 4 имеют также переменную мощность и учитывают верхнюю, наиболее проницаемую часть водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород, выделены для учета зон фильтрационной неоднородности. Кровля слоя 3 совпадает с подошвой рыхлых отложений слоя 2, подошва проведена по глубине 20 м от подошвы рыхлых отложений. Кровля слоя 4 совпадает с подошвой слоя 3, подошва проведена по глубине 40 м от подошвы рыхлых отложений.

Слои 5, 6, 7. Средние интервалы водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород. Подошвы слоев проведены последовательно по глубине соответственно 100, 200, 300 м от дневной поверхности со сглаживанием получаемых карт для уменьшения влияния рельефа.

Слои 8, 9, 10. Нижние интервалы водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород. Подошва проведена соответственно по абсолютным отметкам -300 , -500 , -700 м.

Этап 4. Создание численной геофильтрационной модели, плановая дискретизация модельной области. На данном этапе на базе КГМ создана численная модель, выполнена плановая дискретизация модельной области. Принцип разделения области модели на расчетные блоки заключался в нахождении баланса между требуемой детализацией модели и скоростью расчета. Основной целью создания модели являлась оценка прогнозных притоков подземных вод в карьер. В связи с этим выбранный минимальный размер блока 20 м достаточен, чтобы описать геометрию уступов карьера с необходимой точностью. Так как на периферии модели нет необходимости в ее плановой

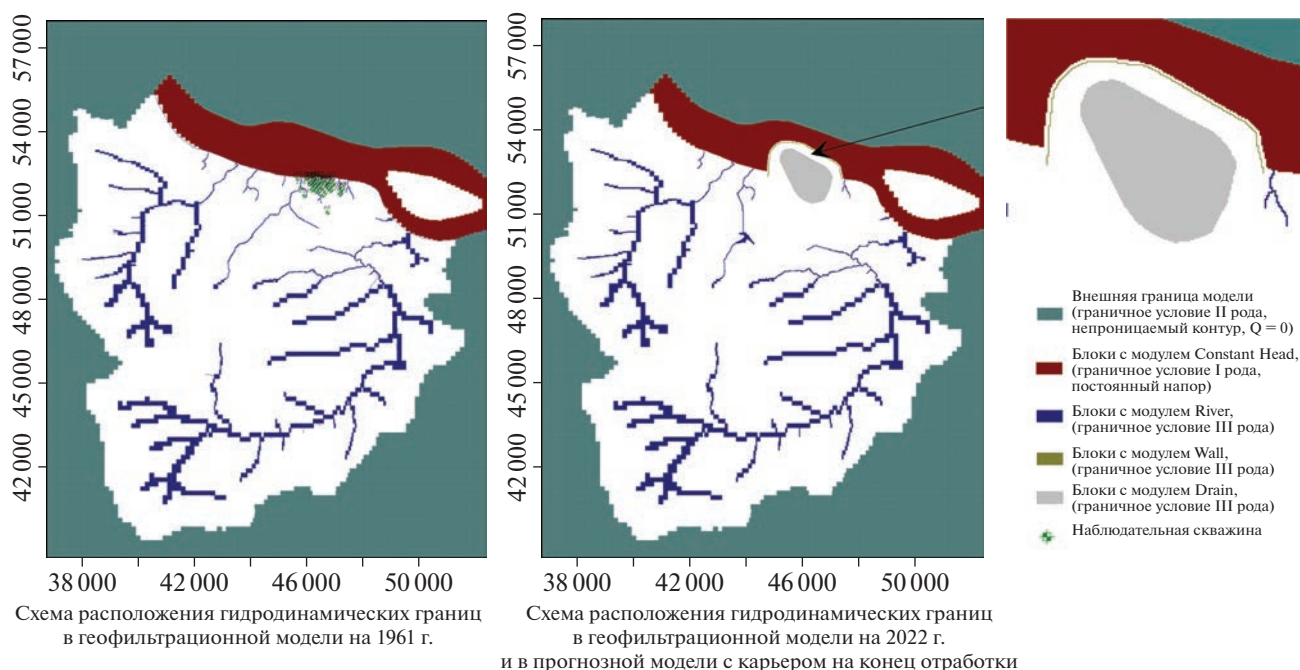


Рис. 3. Гидродинамические границы модели.

детализации, размеры расчетных ячеек были увеличены до 160×160 м. В связи с особенностями решения дифференциальных уравнений в виде конечных разностей сетка модели составлена таким образом, что размеры соседних колонок и строк различались не более чем в 2 раза.

Этап 5. Задание гидродинамических границ модели. Так как калибровка осуществлялась по двум эпигнозным моделям, ниже приведено описание заданных гидродинамических границ для этих моделей (рис. 3).

Гидродинамические границы эпигнозной модели на 1961 г. Для эпигнозной модели, эмитировавшей естественные условия до отработки месторождения карьером и проведения опытной групповой откачки, задавались следующие внешние граничные условия: с запада, юга и востока – по обобщенной границе водосборной площади для рек Алешина, Картица и руч. Горевой, с севера – по руслу р. Ангара на расстоянии $2/3$ от левого берега. Внешние границы модели реализованы граничным условием II рода (непроницаемая граница $Q = 0$) (см. рис. 3).

Верхней границей модели является дневная поверхность, на которой реализовано инфильтрационное питание, задавалось граничным условием (ГУ) II-го рода ($Q = \text{const}$) с помощью модуля Recharge, равное 91 мм/год, что составляет 18.8% от общего числа атмосферных осадков 484 мм/год.

Нижняя граница проведена условно по отметке -700 м, ее положение обеспечивает возмож-

ность реализации буферной зоны под проектными выработками.

Внутренними граничными условиями с севера является р. Ангара, задана модулем Constant Head, который реализует ГУ I рода постоянный напор 96.7 м на первом модельном слое. Граница постоянного напора отнесена от карьера на расстояние, превышающее вскрытую мощность, и проведена на расстоянии $2/3$ от береговой линии, что позволяет пренебречь влиянием, оказываемым с противоположного берега Ангары.

Задание граничных условий по всем ручьям и рекам производилось с помощью пакета River, который в Modflow соответствует ГУ III рода.

Гидродинамические границы для эпигнозной модели на 2022 г. и прогнозной модели. Для эпигнозной модели на 2022 г. и прогнозной модели внесены следующие изменения и дополнения в граничных условиях: 1) руч. Горевой отведен в руслоотводной канал; 2) по р. Ангара убрано ГУ постоянного напора на территории, ограниченной дамбой II очереди, на остальной территории по р. Ангара задан постоянный напор 89 м, что соответствует среднегодовому значению уровня в реке на современном этапе; 3) работа дамбы II очереди эмитировалась посредством модуля Wall, в котором задавались ширина дамбы и коэффициент фильтрации для границы; 4) карьер задавался на модели через ГУ III рода (опция Drain) с отметками дренирования в блоках, отвечающими отметкам его поверхности. Для точного задания положения карьера использовались 3D модели карье-

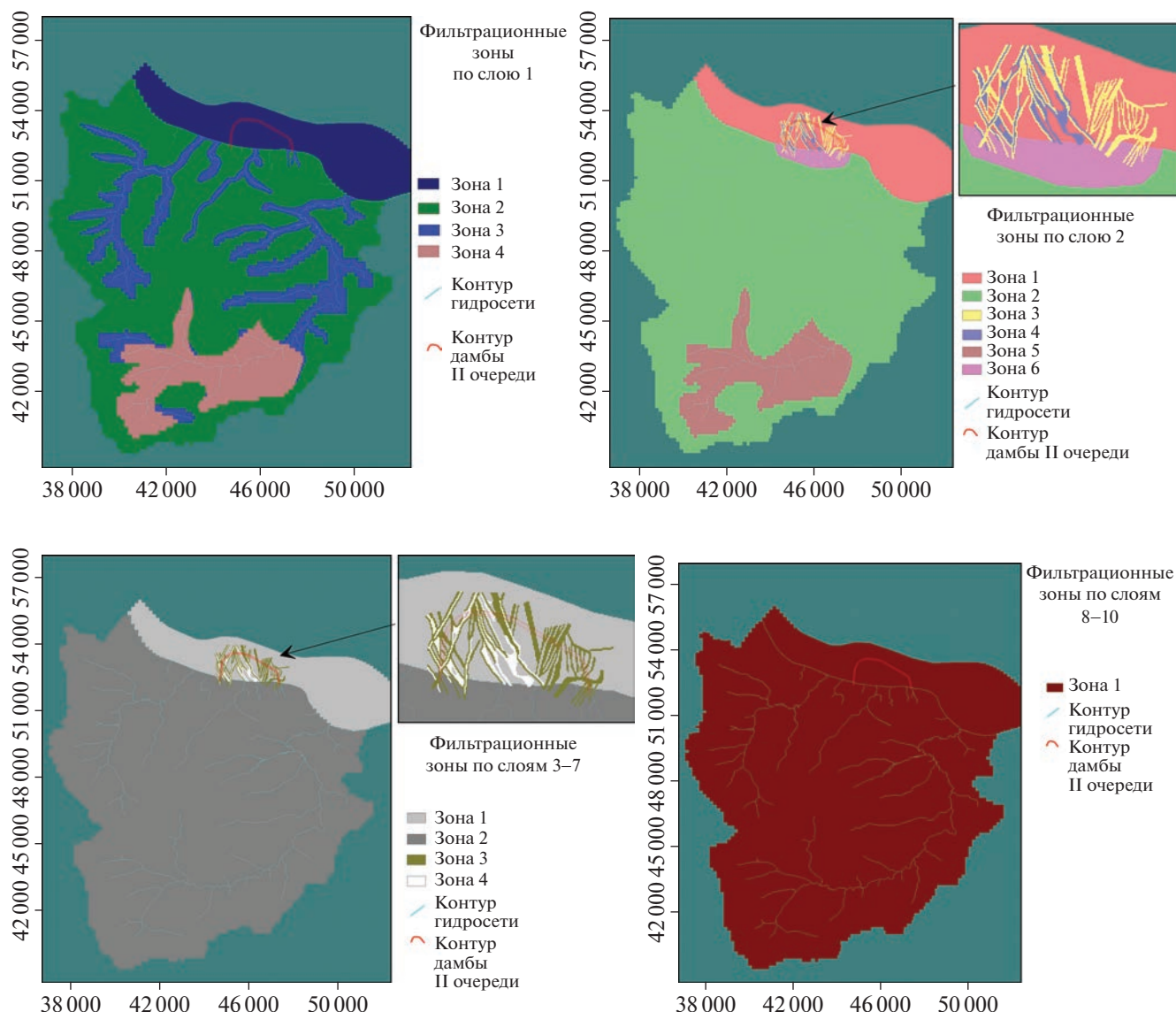


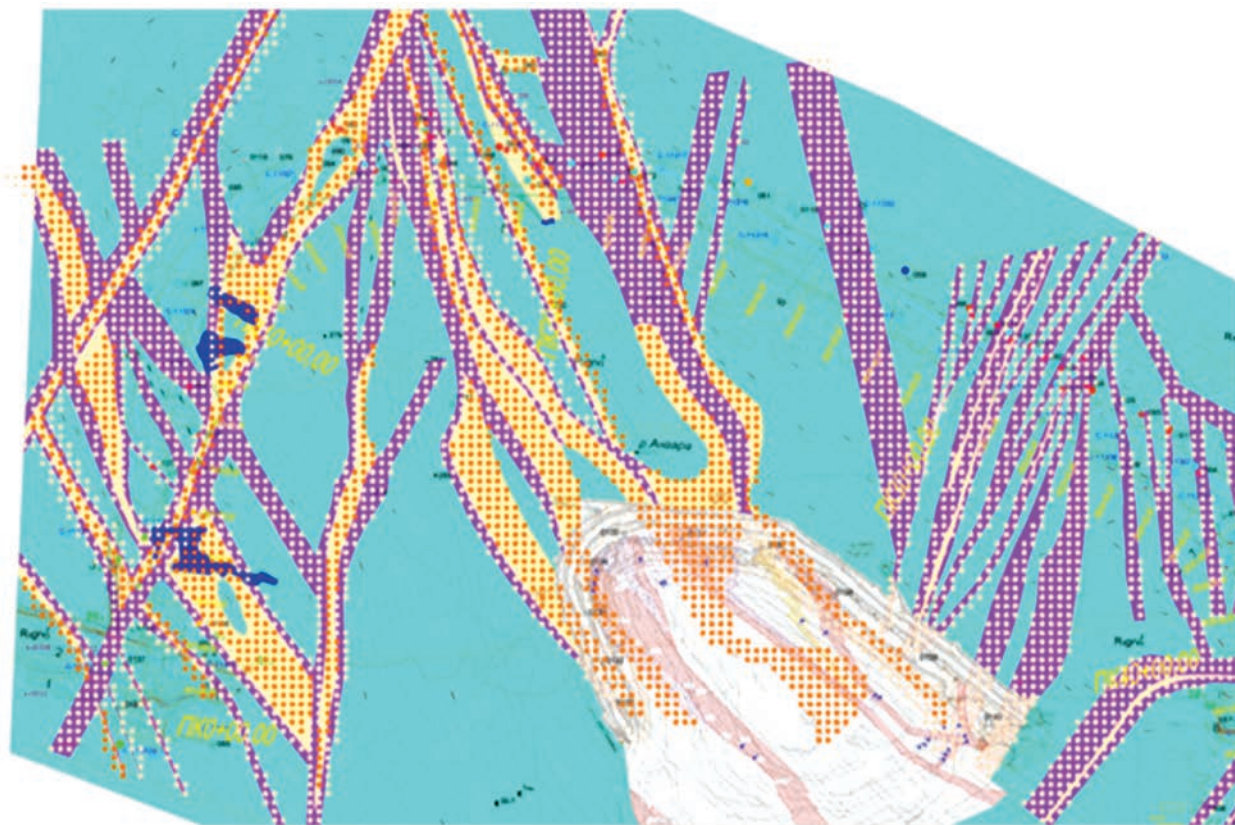
Рис. 4. Фильтрационные зоны по модельным слоям.

ра по состоянию на 2022 г. и на конец отработки карьера, с которых автоматически считывались абсолютные отметки поверхности карьера при задании опции Drain.

Этап 6. Задание фильтрационных параметров. Выбор фильтрационных параметров для каждого модельного слоя базировался на основе анализа исходных данных опытно-фильтрационных опробований. На месторождении за период 1961–1989 гг. выполнено более 1600 откачек воды [10], в том числе кустовые откачки, а также длительное опытное водопонижение при разведке месторождения и водоотливы при проходке подземных выработок разведочных и дренажных шахт и строительстве опытно-промышленного карьера ГОКа. Поинтервальными (100-метровыми) от-

качками изучены глубокие горизонты месторождения до 400 м (39 скважин) и до 1100 м (3 скважины): учитывались параметры водоносных горизонтов горевской свиты, а также закономерности изменения коэффициентов фильтрации (Кф) горевской свиты с глубиной по данным откачек и расходомерии, по фильтрационной карте и разрезам к ней [1, 8].

В модели выделено 10 расчетных слоев. В слоях с 1 по 7 присутствуют отдельно выделенные зоны фильтрационной неоднородности (рис. 4). В слоях с 2 по 7 в соответствии с фильтрационной картой участка учтены зоны очень сильно проницаемых краевых частей тектонических нарушений и внесены фильтрационные параметры для пород участков центрального разлома (рис. 5).



Водопроницаемость	Массив	Тектонические нарушения		Цвет на модели	Приуроченность к элементам массива
	Средние Кф, м/сут	Средние Кф, м/сут	Средне-максимальные Кф, м/сут		
Водопроницаемые	0.1–0.5			(B) / (A)	Породы зоны "B", зоны "A" участков центрального разлома
Водопроницаемые	1.0				Породы зоны "B", на глубине свыше 20 м
Водопроницаемые	2.0				Породы зоны "B", до глубины 20 м
Сильноводопроницаемые		5.0	10.0		Крайевые части тектонических нарушений в зоне "B" (на глубине >40 м)
Очень сильноводопроницаемые		10.0	50.0		Крайевые части тектонических нарушений в зоне "B" (на глубине 20–40 м)
Очень сильноводопроницаемые		20.0 / 100.0	70.0 / 150.0		Крайевые части тектонических нарушений в зоне "B" (на глубине <20 м), русловые галечниковые отложения

Рис. 5. Фильтрационная карта с учтенными в модели зонами тектонических нарушений.

Таким образом, слой 1 содержит 4 фильтрационные зоны.

Зона 1 – водоносные горизонты современных аллювиальных отложений (aQIV), приуроченные к аллювию поймы и русла р. Ангара. Водовмещающими породами являются гравийно-галечниковые грунты с песчаным заполнителем и пески, подстилающими – известковистые сланцы и глинистые известняки горевской свиты.

Зона 2 – суглинки и супеси, повсеместно перекрывающие водоносные горизонты низких и средних террас, из-за чего замедляется инфильтрация атмосферных осадков.

Зона 3 – аллювиальные отложения притоков Ангары.

Зона 4 – с южной стороны модели, согласно геологической карте, происходит выклинивание четвертичных отложений песчаниками, выветре-

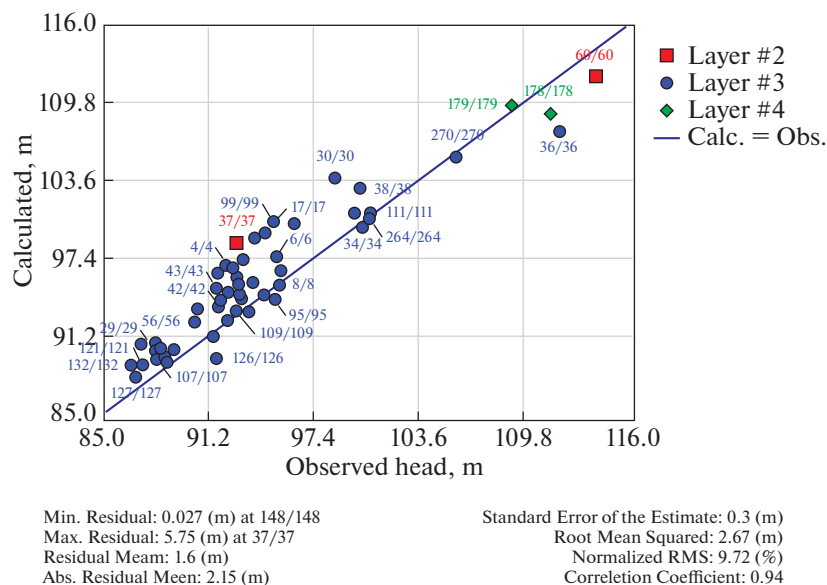


Рис. 6. Результаты калибровки модели по уровням подземных вод.

лыми алевролитами, аргиллитами юрского возраста.

Слой 2 содержит 6 фильтрационных зон.

Зона 1 – породы зоны “Б” до глубины 20 м, согласно фильтрационной карте.

Зона 2 – водоносные горизонты низких и средних террас; поскольку нет данных, которые позволили бы учесть всю фильтрационную неоднородность внутри четвертичного комплекса, для первоначальных расчетов был принят средний Кф 1 м/сут.

Зона 3 – русловая часть, зона краевых частей тектонических нарушений, для первоначальных расчетов принят коэффициент фильтрации 20 м/сут.

Зона 4 – русловая часть, породы центрального разлома, согласно фильтрационной карте.

Зона 5 – с южной стороны модели, так же, как и на 1-м слое, согласно геологической карте, происходит выклинивание четвертичных отложений песчаниками, выветрелыми алевролитами, аргиллитами юрского возраста.

Зона 6 – незначительная часть береговой зоны, которая отвечает проницаемой части водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород.

Слои 3–7 отражают наиболее проницаемую, верхнюю часть и средние интервалы водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород. На каждом слое выделено по 4 фильтрационной зоны: *зона 1* – русловая часть массива, *зона 2* – береговая зона, *зона 3* – русловая часть, очень сильно проницаемые краевые части тектонических нарушений и *зона 4* – русловая часть, породы центрального разлома.

Слои 8–10 соответствуют нижнему интервалу водоносной зоны трещиноватости метаморфических пород. Подошва слоев имеет горизонтальное простирание. Повышенная проницаемость в русловой зоне не выявлена. То же можно сказать и относительно приразломных участков выщелоченных пород. Различие проницаемости на участках выщелоченных пород и на остальной площади не существенно. Для каждого слоя выделена единая фильтрационная зона. Кф в пределах 0.05–0.007 м/сут.

Этап 7. Калибровка модели. Решение обратных задач при калибровке геофильтрационной модели производилась на двух эпигнозных моделях:

1) естественные условия до начала опытной групповой откачки; калибровка модели осуществлялась по 52 скважинам наблюдательной сети по состоянию на 20.11.1961 г.

2) эпигнозная модель на современный период по состоянию на 2022 г.; калибровка модели осуществлялась на основании данных о карьерном водоотливе.

Все задачи решались в стационарной постановке из-за расположения Ангары в непосредственной близости от карьера. Гравитационная и упругая водоотдача практически не играют никакой роли из-за быстрой стабилизации от реки.

В результате решения обратной задачи на модели 1961 г. получено среднее отклонение расчетного значения уровня от фактического 1.6 м. Ошибка, рассчитанная как процент отношения средней квадратической ошибки (RMS) к диапазону уровня, составила 9.72%, что не превышает допустимых 10%. Коэффициент корреляции имеет значение 0.94 (рис. 6).

Таблица 1. Баланс эвригностной модели на 2022 г.

Параметр	Приток		Отток	
	м ³ /сут	м ³ /час	м ³ /сут	м ³ /час
Реки	41482.22	1728.43	52488.3555	2187.01
Инфильтрация	38404.21	1600.18		0.00
Дрены			46290.82	1928.78
Постоянный напор	30492.59	1270.52	11599.85	483.33
Всего	110379.03	4599.13	110379.03	4599.13
Разница, м ³ /сут	0			
Разница, %	0			

При решении второй обратной задачи калибровка модели осуществлялась на основании данных о карьерном водоотливе в меженный период, который в феврале 2022 г. составил 1928 м³/ч, баланс по модели приведен в табл. 1. Распределение модельных уровней по результатам решения обратных задач представлено на рис. 7.

Этап 8. Анализ чувствительности модели. Цель анализа чувствительности модели – определение степени влияния каждой из существующих неопределенностей в схематизации гидрогеологических условий на приток подземных вод в карьер, а также на распределение напоров подземных вод. Значимым для анализа чувствительности считается процент изменения от базового варианта более чем на 10% как в одну, так и в другую сторону.

Анализ чувствительности основан на последовательно-единичном изменении всех проверяемых неопределенностей в схематизации гидрогеологических условий: на каждом шаге меняет свое значение одна из неопределенностей в прогнозируемое число раз, что приводит к пересчету притока подземных вод в карьер, а также распределения напоров.

В рамках анализа чувствительности были рассмотрены следующие сценарии, в которых было оценено влияние:

1) фильтрационных свойств проницаемых приразломных участков зоны трещиноватости (краевых частей тектонических нарушений) на притоки воды в карьер; для этого горизонтальные и вертикальные коэффициенты фильтрации пород краевых частей тектонических нарушений были увеличены и уменьшены в 10 раз;

2) зоны повышенной проницаемости вдоль тектонических нарушений на всю территорию за пределами дамбы II очереди; для этого были выделены дополнительные зоны (одна в слоях 2–4, вторая – в

слоях 5 и 6), где увеличены горизонтальные и вертикальные коэффициенты фильтрации;

3) величины инфильтрации на притоки воды в карьер; для этого было увеличено в 2 раза инфильтрационное питание на участке отвала;

4) уровня воды в р. Ангара на приток воды в карьер; был задан уровень воды в р. Ангара, равный 1% обеспеченности.

Результаты анализа чувствительности приведены в табл. 2.

Этап 9. Прогнозное моделирование. На прогнозной модели при помощи модуля Drain задавалось проектное положение карьера. Для точного задания положения карьера использовалась 3D модель карьера, с которой автоматически считывались абсолютные отметки поверхности карьера при задании опции Drain. Результаты прогнозного моделирования: распределение модельных УПВ в абсолютных отметках и модельная 3D поверхность УПВ проиллюстрированы на рис. 8. По результатам моделирования прогнозируемый приток в карьер составит около 2940 м³/час.

Таблица 2. Результаты анализа чувствительности

№ сценария	Расход разгрузки в дрены, м ³ /ч	Разница между базовым сценарием, %
Базовый	1929	0
Сценарий 1.1	3201	+65.9
Сценарий 1.2	1559	-19.2
Сценарий 2	1935	+0.3
Сценарий 3	1945	+0.8
Сценарий 4	1951	+1.1

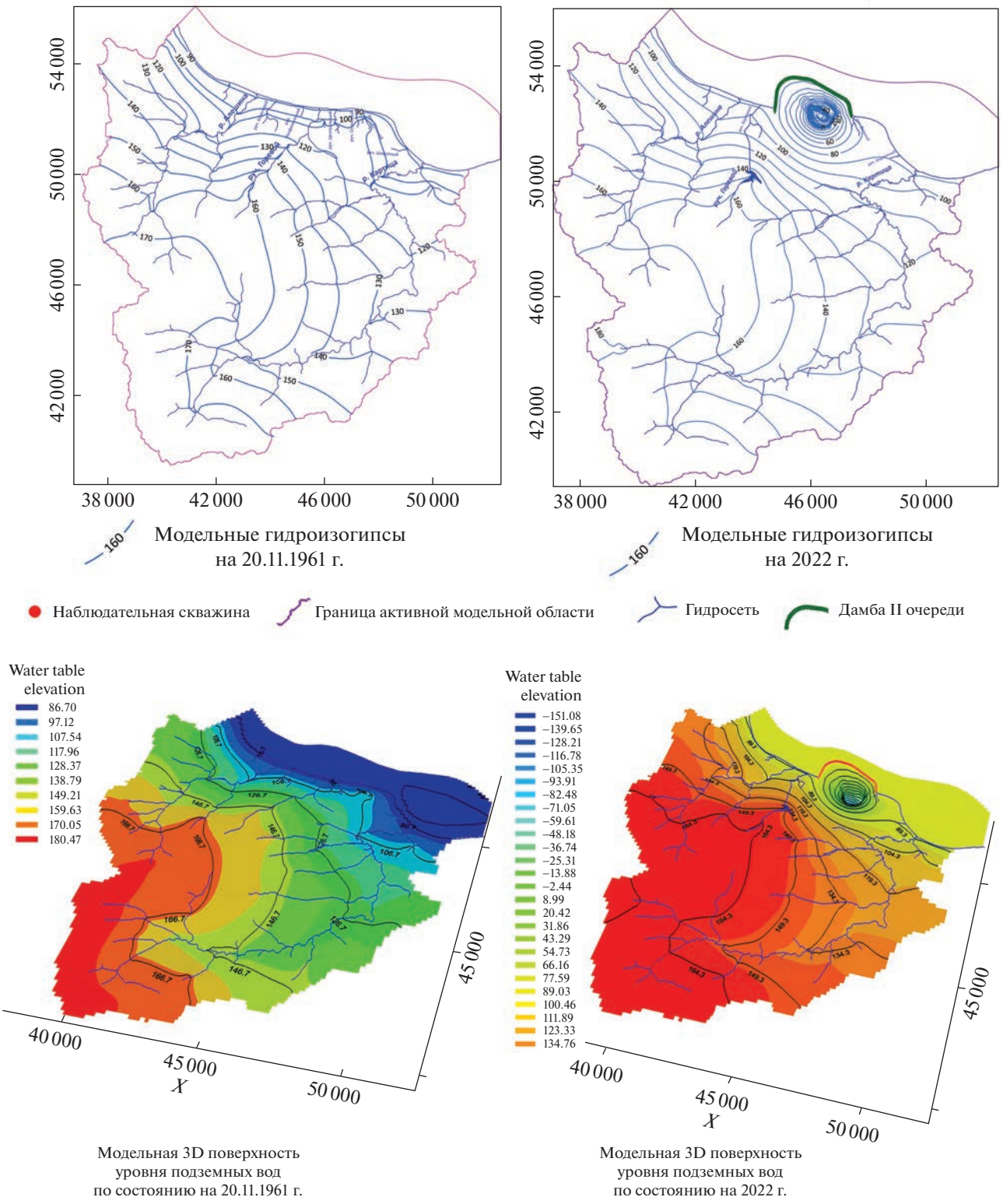


Рис. 7. Распределение модельных уровней по результатам решения обратных задач.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенных работ была создана прогнозная численная геофильтрационная мо-

дель с целью оценки притока подземных вод в карьер Горевского ГОКа на конец его отработки. Модель создавалась на основе предварительно откалиброванной эпигнозной модели.

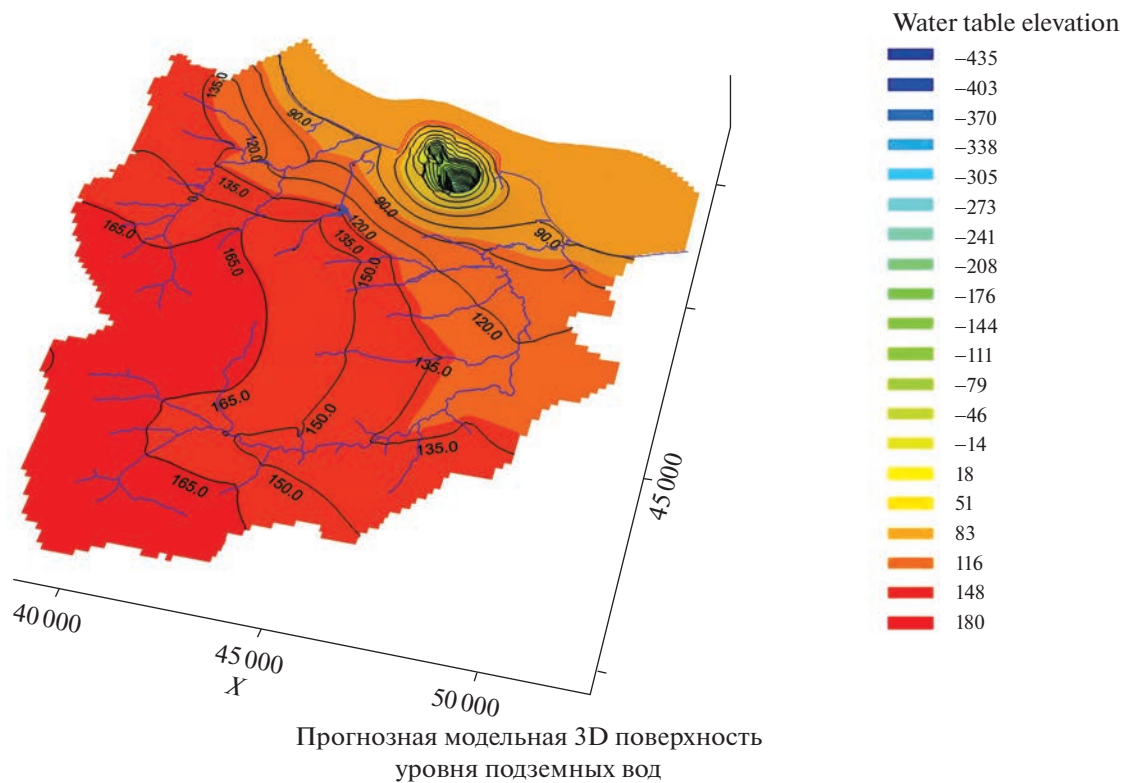
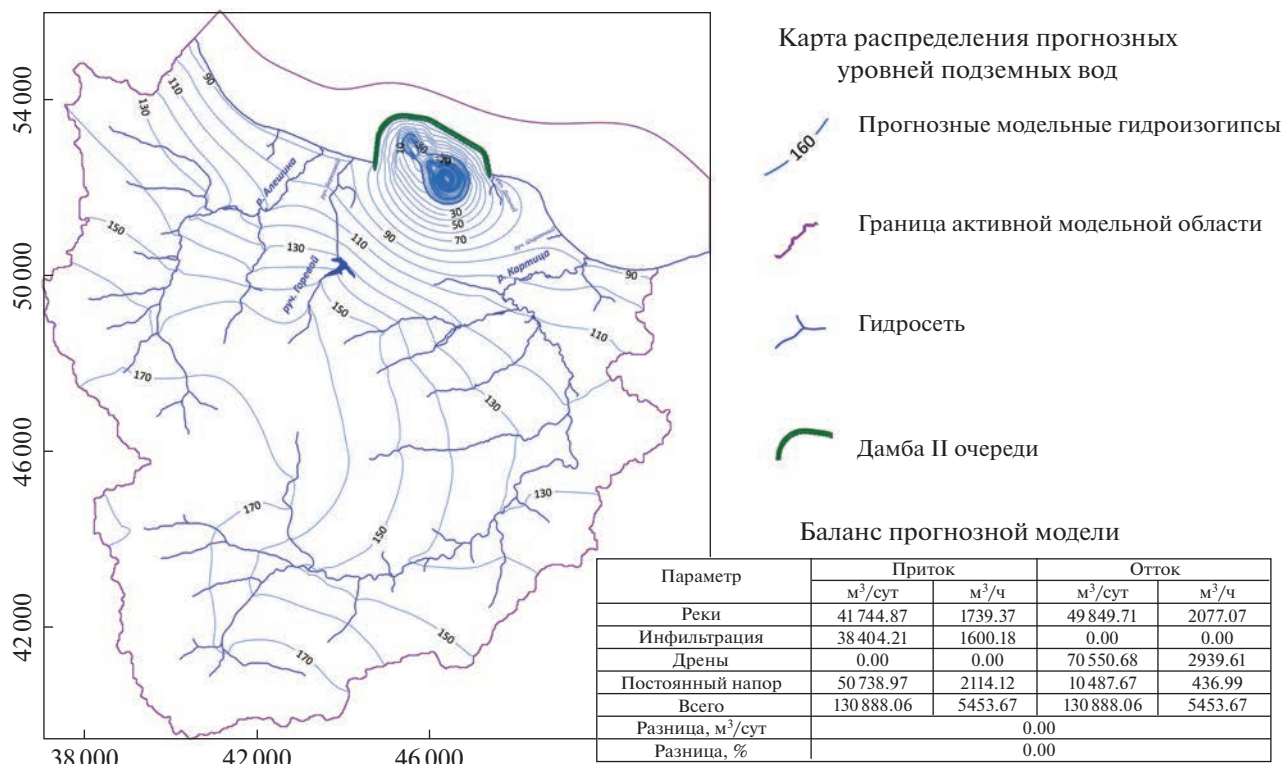


Рис. 8. Результаты прогнозного моделирования.

На геофильтрационной модели по состоянию на 20.11.1961 г. (естественные условия) калибровка осуществлялась на основе сопоставления расчетных и фактических данных по сети наблюдательных скважин.

На базе геофильтрационной модели по состоянию на 20.11.1961 г. была создана геофильтрационная модель по состоянию на 2022 г. с отметкой дна у карьера –155 м. Калибровка производилась по данным о карьерном водоотливе. На данном этапе проводилась основная калибровка и корректировка основных параметров модели, результаты калибровки вносились в геофильтрационную модель по состоянию на 20.11.1961 г. Калибровка двух моделей производилась параллельно до того момента, пока по двум моделям не были достигнуты значения, удовлетворяющие решению обратных задач.

В результате решения обратной задачи на модели 1961 г. получено среднее отклонение расчетного значения уровня от фактического 1.6 м. Ошибка, рассчитанная как процент отношения средней квадратической ошибки (RMS) к диапазону уровня, составила 9.72%, что не превышает допустимых 10%. Коэффициент корреляции имеет значение 0.94.

В результате решения обратной задачи на модели по состоянию на 2022 г. по данным о карьерном водоотливе получен приток в карьер за счет подземных вод в размере 1928.7 м³/ч, при среднем значении в январе-феврале 2022 г. 1928 м³/ч.

После калибровки модели проведен анализ чувствительности по ряду сценариев, который подтвердил результаты калибровки и правильность выбора базовой модели.

На основе откалиброванной геофильтрационной модели по состоянию на 2022 г. была создана прогнозная модель с отметкой дна карьеров, соответствующей проектному контуру.

Согласно прогнозным расчетам, приток в карьер за счет подземных вод на конец отработки карьера составит 2940 м³/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахит Ф.Б., Буйков А.А., Валента Г.П., Пельтек Е.И.* О структуре Горевского полиметаллического месторождения Енисейского кряжа по геолого-геофизическим данным // Рудные формации и месторождения Сибири. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1979. С. 115–117.
2. *Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Лобанов К.В. и др.* Горевское полиметаллическое месторождение (Сибирь, Россия): минеральный состав руд и особенности рудоотложения // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 4. С. 302–336.
3. *Кузнецов В.В., Пономарев В.Г., Акимцев В.А. и др.* Горевское свинцово-цинковое месторождение // Геология рудных месторождений. 1990. № 5. С. 3–18.
4. *Леонтьева Е.В., Квачев В.Н.* Цифровизация гидрогеологических процессов в горнодобывающей промышленности // Горный журнал. 2020. № 10. С. 95–100.
5. *Шерман М.Л.* Горевское свинцово-цинковое месторождение / Геологические исследования в Красноярском крае и Тув. АССР. Кызыл: Тувинск. Книжн. Изд., 1968. С. 32–38.
6. Guidelines for open pit slope design in weak rocks. Derek Martin, Peter Stacey, Eds., Csiro Publ. 2018. 383 p.
7. Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability. G. Beale, J. Read, Eds., Australia, Csiro Publ. 2013. 611 p.
8. Guidelines for open pit slope design. J. Read, P. Stacey, Eds., Csiro Publ. 2009. 511 p.
9. *Leonteva E.V., Sapachev R.Yu.* Numerical profile modeling for transient groundwater flow at pit slope // The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation. Taylor & Francis Group, 2021. P. 309–315.
10. *Mary P. Anderson, William W. Woessner, Randall J. Hunt.* Applied Groundwater Modeling, Second Edition, Simulation of Flow and Advective Transport-Academic. Academic Press, Elsevier. 2015. 602 p.

PREDICTIVE NUMERICAL GEOFILTRATION MODEL OF GROUNDWATER INFLOW INTO THE GOREVSKY GOK QUARRY

E. V. Leont'eva^{a, #}, R. Yu. Sapachev^{b, ##}, and A. A. Grishin^{c, ###}

^aBelgorod National Research University,
ul. Pobedy 85, Belgorod, 308015 Russia

^bProTech Engineering LLC,
26 Line, 15/2, V.O., St. Petersburg, 199106 Russia

^c“SIBMARKPROEKT”,
Vuzovsky her. 17, off. 291, Krasnoyarsk, 660131 Russia

[#]E-mail: leonteva@bsu.edu.ru,

^{##}E-mail: roman.sapachev@pte.eurochem.ru

^{###}E-mail: arseniy.grishin.2012@mail.ru

Gorevskoe zinc-lead ore deposit is located within a unique terrain: it follows the left bank of the Angara River and lies underneath its current river bed, starting 38 km far from the Angara River mouth. This plays a signif-

ificant role in the ore field hydrogeology and has a great impact on its further development. The complexity of ore field hydrogeology is defined by a number of natural factors, i.e., the occurrence of both aquifers as well as low-permeable and water-proof layers; tectonic failures (if any) and their functioning in terms of hydrogeology dynamics; variability in terms of water-bearing rocks hydraulic properties; water bodies on the surface and their connection with groundwater flows. All the above mentioned features allow us to classify Gorevskoe deposit hydrogeology as rather complex and complicated. The main task of the work performed was to evaluate and forecast the water inflow to Gorevskii open-pit mine and to determine the groundwater level at the end of mining operations. Because of the deposit rather complex hydrogeology, it was decided to perform the task on the basis of numerical geohydraulic modelling using finite difference method (FDM) in the environment of Visual MODFLOW software tools. The paper describes the following steps of works performed within the project: input data acquisition, processing and analysis; creation of concept-based hydrogeology model; development of hindcasting numerical model; model calibration in the context of environmental conditions and actual mining operations hosted within the open-pit; sensitivity analysis and advanced simulation to develop the forecasting numerical model. When performed, the forecast value in terms of groundwater inflow to the pit has been calculated. Thus, pit groundwater level at the end of mining operations has been developed. Following a number of scenarios applied, model sensitivity analysis has been made and this provided the basis to identify the factors that have the most essential impact on water inflow to the pit.

Keywords: *hydrogeology modeling, numerical geohydraulic model, water inflow to the pit, groundwater level, complex hydrogeology, conceptual hydrogeology model, finite difference method (FDM), Modflow*

REFERENCES

1. Baksht, F.B., Buikov, A.A., Valenta, G.P., Pel'tek, E.I. [On the structure of the Gorevsky polymetallic deposit of the Yenisei Ridge according to geological and geophysical data]. In: [Ore formations and mineral deposits in Siberia]. Tomsk, 1979, pp. 115–117. (in Russian)
2. Kovalev, K.R., Kalinin, Yu.A., Lobanov, K.V., et al. [Gorevskoe polymetallic deposit (Siberia, Russia): mineral composition of ores and ore deposition specifics]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 2023, vol. 65, no. 4, pp. 302–336. (in Russian)
3. Kuznetsov, V.V., Ponomarev, V.G., Akimtsev, V.A. et al. [Gorevskoye lead-zinc deposit]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 1990, no. 5, pp. 3–8. (in Russian)
4. Leont'eva, E.V., Kvachev, V.N. [Digitalization of hydrogeological processes in the mining industry]. *Gornyi zhurnal*, 2020, no. 10, pp. 95–100 (in Russian)
5. Sherman, M.L. [Gorevskoe lead-zinc deposit]. In: [Geological research in the Krasnoyarsk krai and Tuva ASSR]. Kyzyl, Tuvinsk Publ., 1968, pp. 32–38. (in Russian)
6. Guidelines for open pit slope design in weak rocks. Derek Martin, Peter Stacey, Eds., Csiro Publ. 2018, 383 p.
7. Guidelines for evaluating water in pit slope stability. G. Beale, J. Read, Eds., Australia, Csiro Publ., 2013, 611 p.
8. Guidelines for open pit slope design. J. Read, P. Stacey, Eds., Csiro Publ. 2009. 511 p.
9. Leonteva, E.V., Sapachev, R.Yu. Numerical profile modeling for transient groundwater flow at pit slope. In: The evolution of Geotech – 25 years of innovation. Taylor & Francis Group, 2021, pp. 309–315.
10. Anderson, Mary P., Woessner, William W., Hunt, Randall, J. Applied groundwater modeling. In: Simulation of flow and advective transport-Academic. Academic Press, Elsevier, 2015, 602 p.