

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 прогнозное 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 откачек 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-

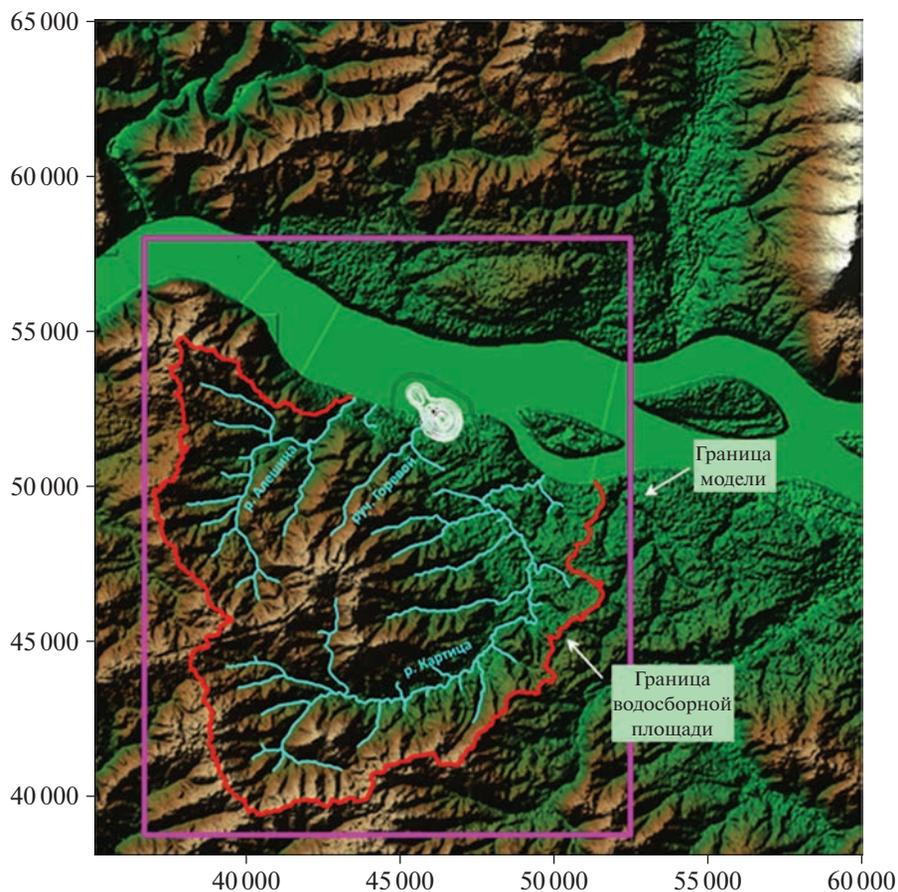


Рис. 1. 3D модель рельефа дневной поверхности анализируемой территории с границей модели.

ских зонах, зависимость от их кинематического типа и, соответственно, гидродинамической роли. Водонесущий 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,

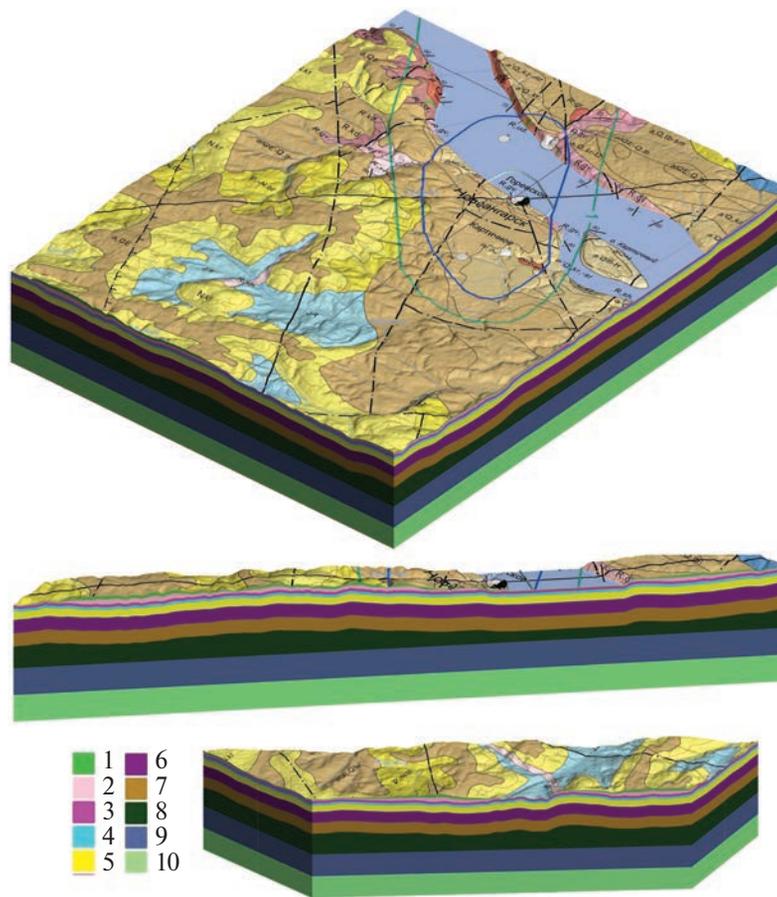


Рис. 2. Концептуальная гидрогеологическая модель участка.

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

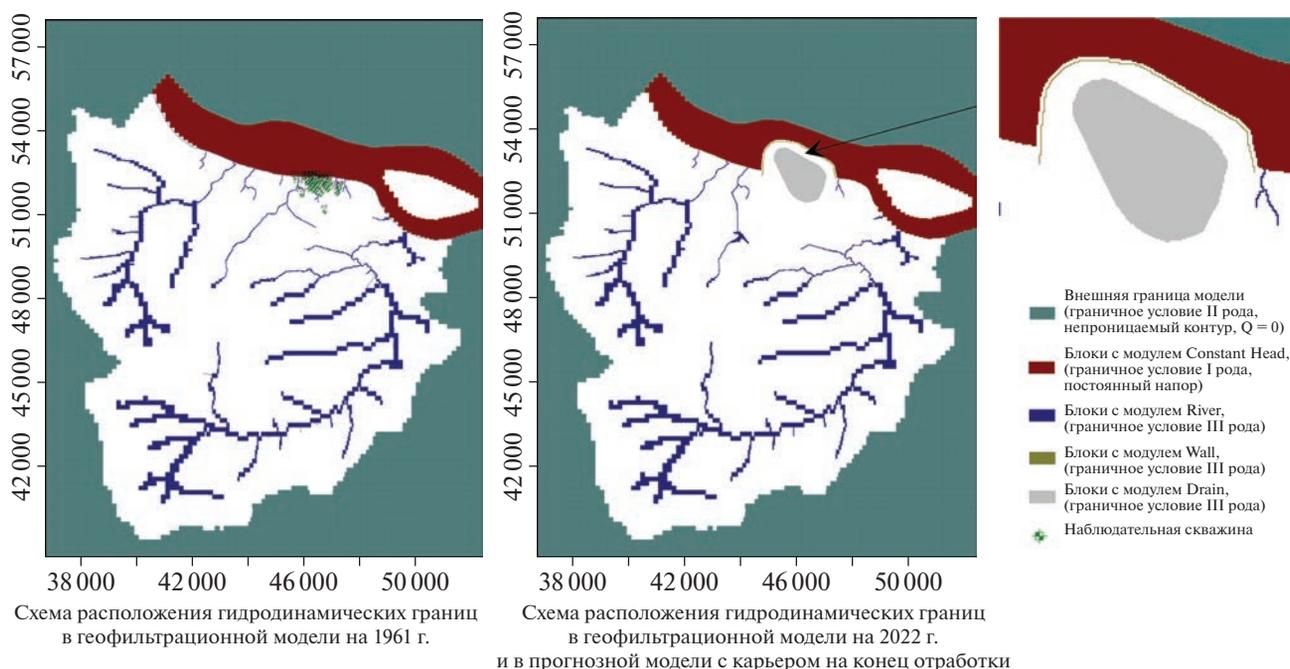


Рис. 3. Гидродинамические границы модели.

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-

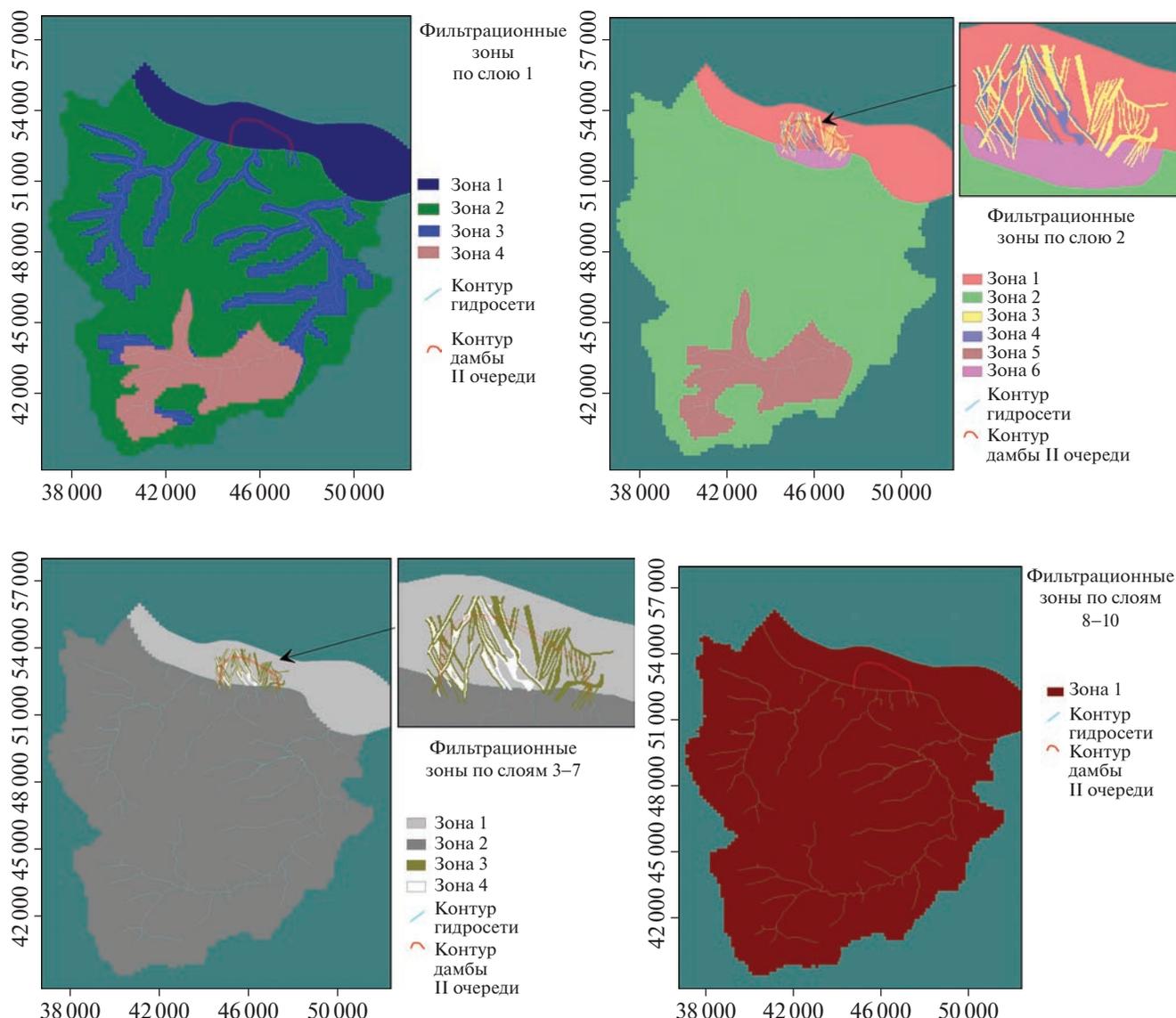


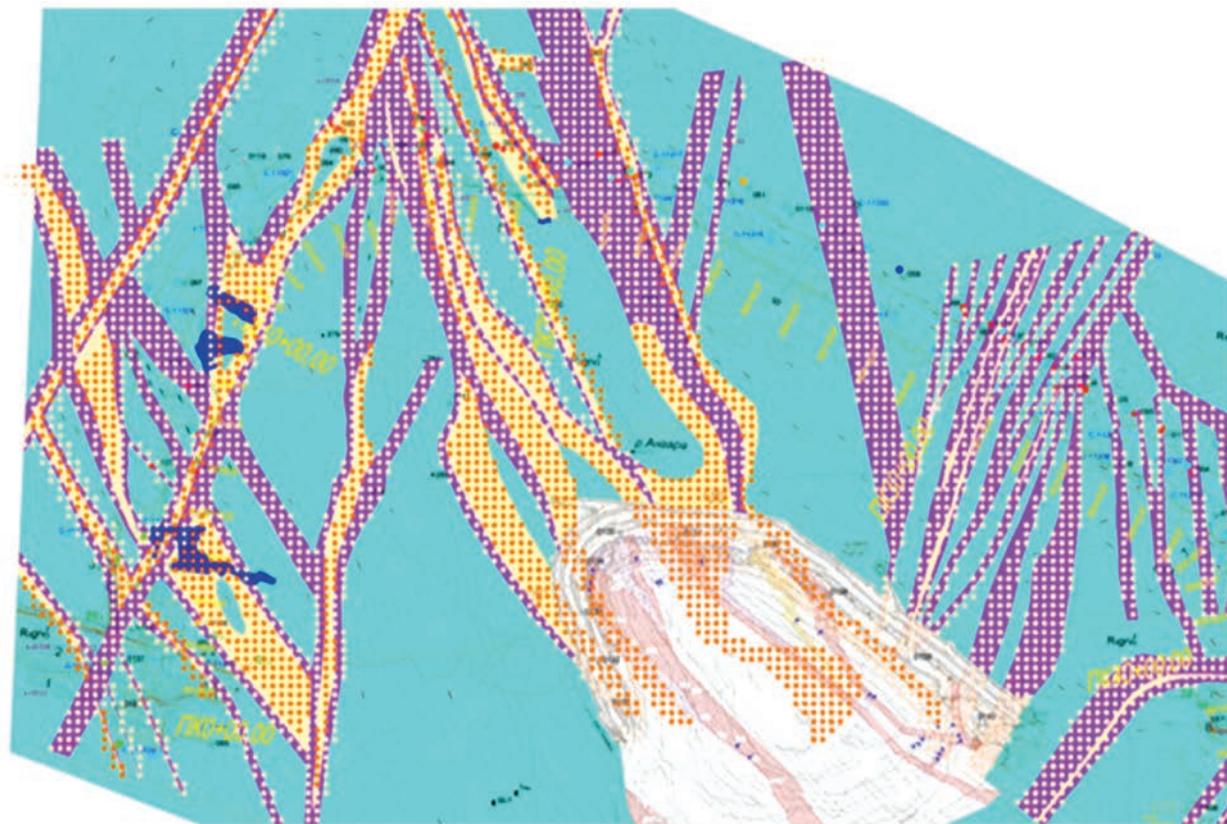
Рис. 4. Фильтрационные зоны по модельным слоям.

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			Ⓑ / Ⓐ	Породы зоны "В", зоны "А" участков центрального разлома
Водопроницаемые	1.0				Породы зоны "Б", на глубине свыше 20 м
Водопроницаемые	2.0				Породы зоны "Б", до глубины 20 м
Сильноводопроницаемые		5.0	10.0		Краевые части тектонических нарушений в зоне "В" (на глубине >40 м)
Очень сильноводопроницаемые		10.0	50.0		Краевые части тектонических нарушений в зоне "Б" (на глубине 20–40 м)
Очень сильноводопроницаемые		20.0 / 100.0	70.0 / 150.0		Краевые части тектонических нарушений в зоне "Б" (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 (аQIV), 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-

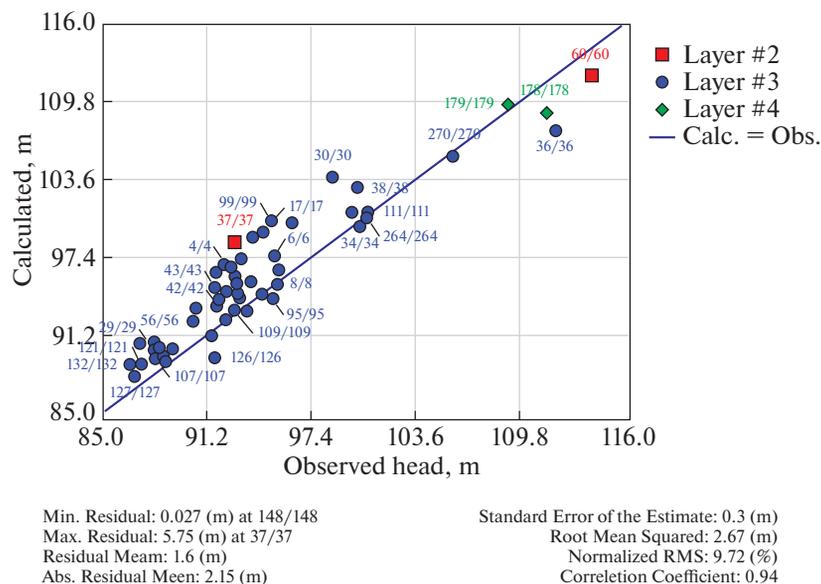


Рис. 6. Результаты калибровки модели по уровням подземных вод.

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 прогнозное 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 прогнозный 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

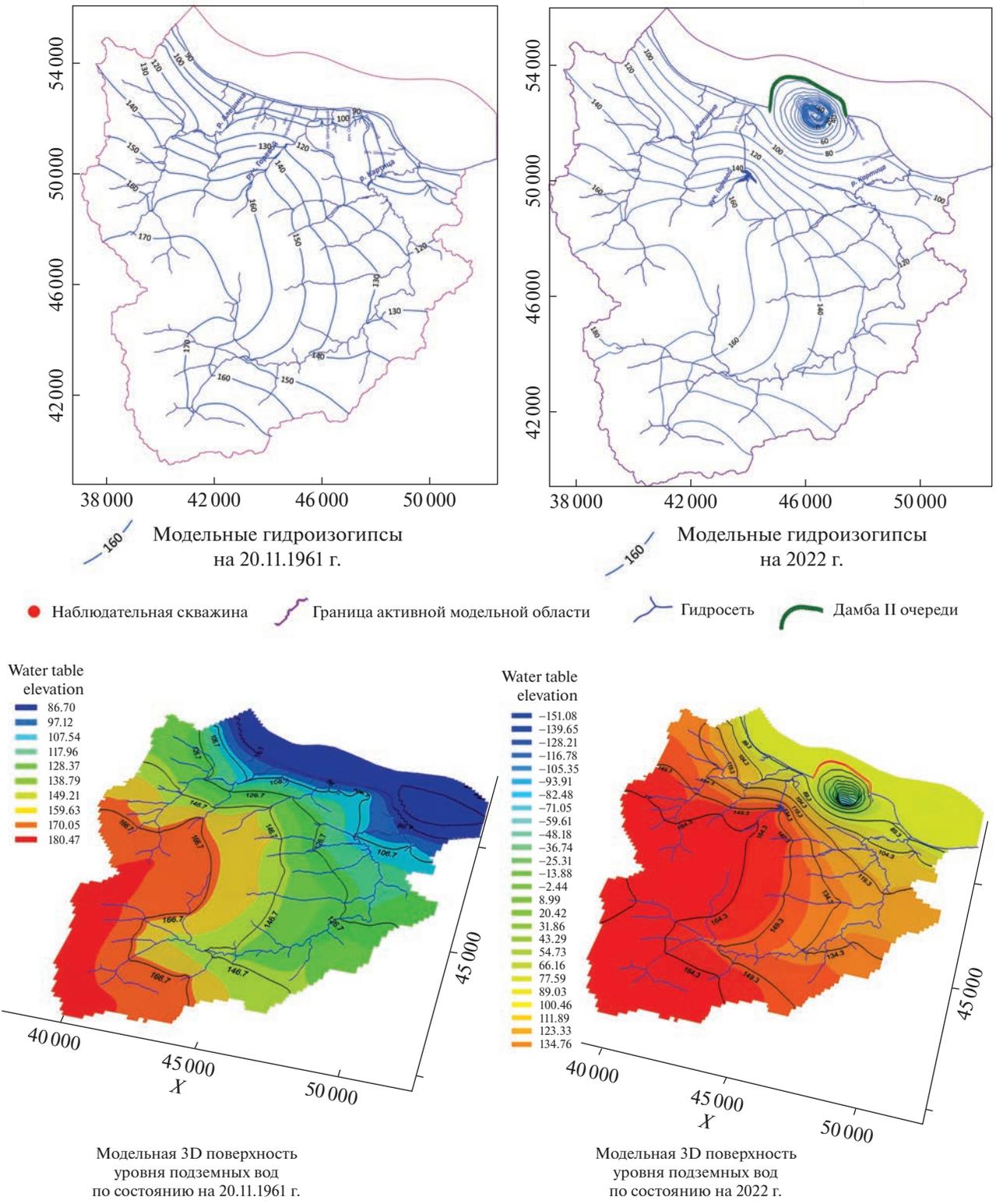


Рис. 7. Распределение модельных уровней по результатам решения обратных задач.

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.

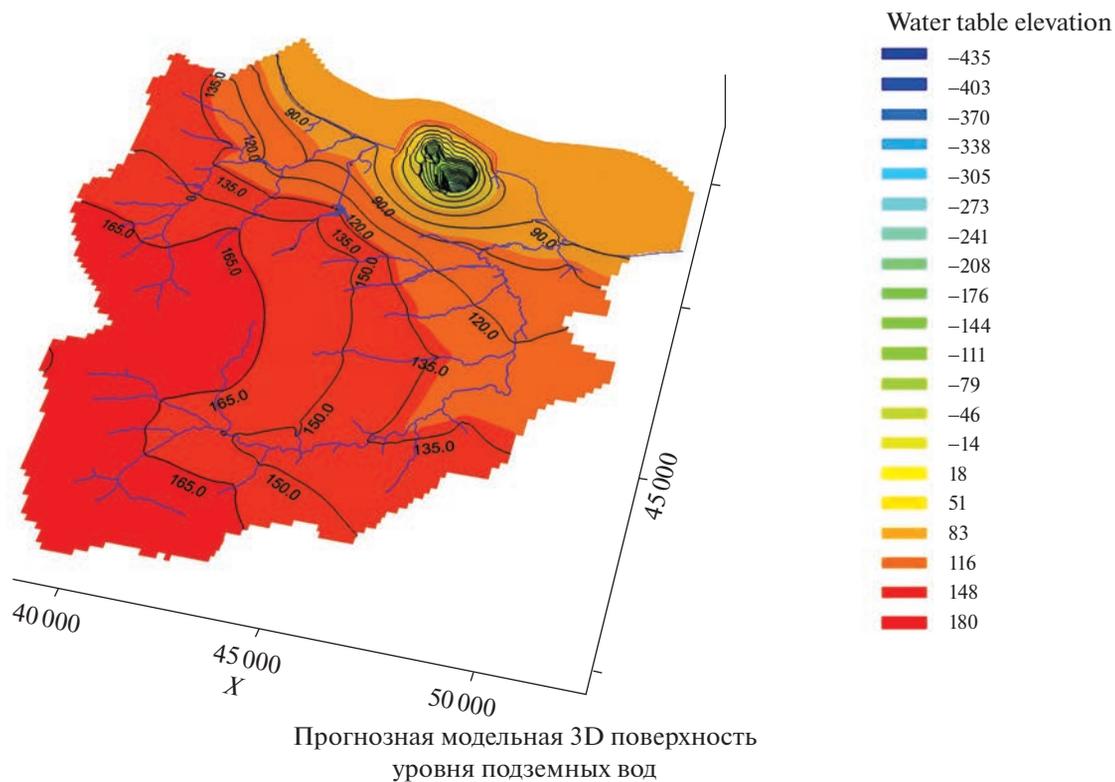
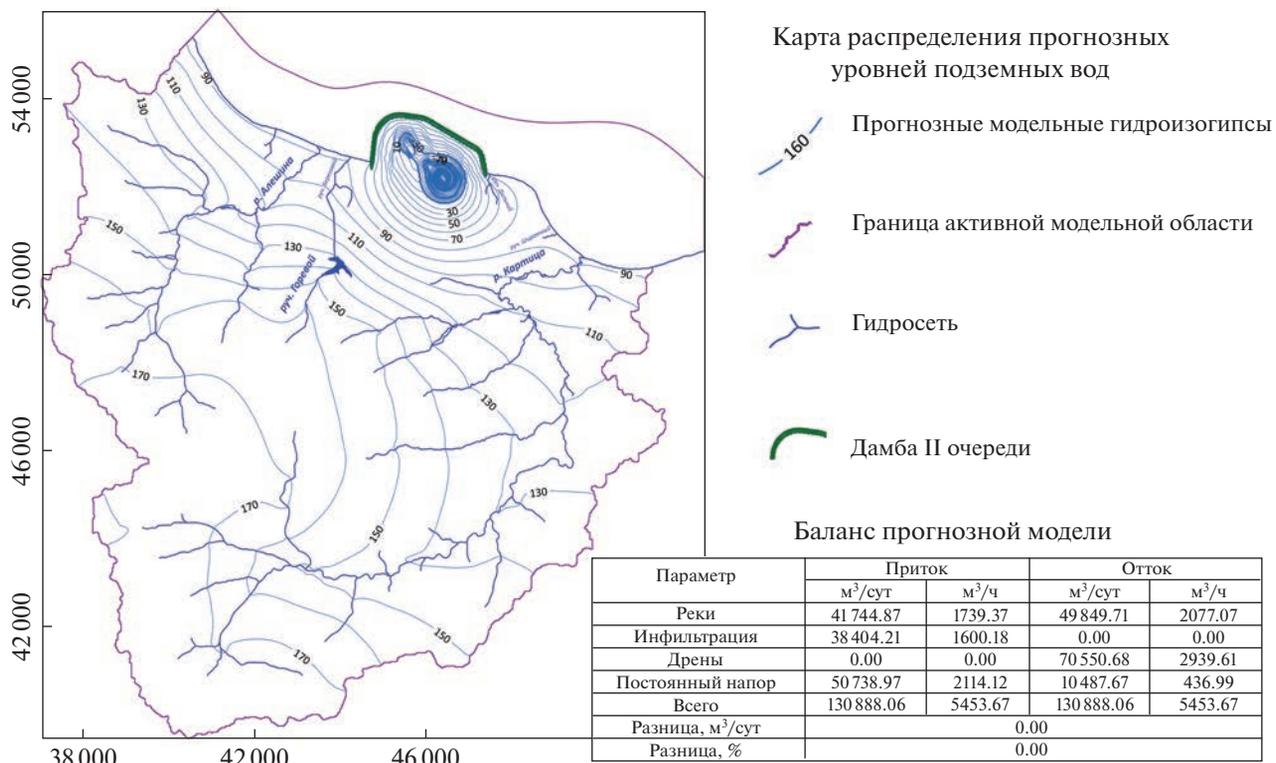


Рис. 8. Результаты прогнозного моделирования.

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.