

ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.3.06,556.3.013

А. А. Потанов

РЕГИОНАЛЬНАЯ ЧИСЛЕННАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Представлена региональная численная трехмерная геофильтрационная модель, разработанная для оперативных и долгосрочных прогнозных оценок водопритоков подземных вод из надсолевой толщи пород в выработанное пространство рудника БКПРУ-1 на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей в результате его аварийного затопления в 2006–2008 гг. Приводится подробное обоснование структуры модели, созданной на базе пакета Processing Modflow (v.5.3), методики ее разработки и калибровки в стационарном и нестационарном режимах, а также прогнозные расчеты и их результаты. Библиогр. 14 назв. Ил. 7.

Ключевые слова: месторождение калийно-магниевых солей, затопление рудника, геофильтрационная численная модель, граничные условия, калибровка модели, прогнозные расчеты.

A. A. Potanov

A REGIONAL NUMERICAL GROUNDWATER FLOW MODEL OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS FOR THE SOUTHERN VERKHNEKAMSKOYE DEPOSIT

Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The article provides a regional three-dimensional numerical groundwater flow model designed for both operational as well as for long-term projections of inflows from groundwater in the BKPRU-1 mine workings on Verkhnekamsk potassium-magnesium salts from 2006-2008. We give a detailed description of the model structure created on the basis of the Processing Modflow package (v. 5.3). We also provide a method for the development and calibration of the model in steady-state and transient simulation and projections. Refs 14. Figs 7.

Keywords: deposit of potassium-magnesium salts, flooding mine, groundwater flow numerical model, boundary conditions, calibration models, projections.

Введение

В октябре 2006 г. на 1-м Березниковском калийном руднике (БКПРУ-1) началось аварийное затопление выработанного в соляных горных породах пространства (всего около 85 млн. м³) распространенными в надсолевом комплексе

пород подземными водами через субвертикальную зону нарушения сплошности развитых над рудником водоупорных соляных пород. Полное затопление рудника длилось около двух лет, до октября 2008 г. В связи с необходимостью выполнения в этот период прогнозных оценок возможного изменения интенсивности водопритоков из надсолевой толщи в рудник была создана специализированная численная геофильтрационная модель, методика разработки и калибровки которой, а также выполнения с ее помощью прогнозных оценок рассматривается в настоящей статье.

Очевидно, что детальные прогнозные оценки водопритоков к любому техногенному объекту, вскрывающему подземные воды, в том числе и к рассматриваемой зоне прорыва подземных вод в рудник БКПРУ-1, на современном уровне решения задач с использованием численного моделирования должны учитывать различные возможные гидрогеодинамические (а в общей ситуации и гидрогеохимические) изменения в пределах практически всей предполагаемой области возмущающего воздействия данного объекта. В соответствии с данным тезисом для оценки масштабов прогнозной расчетной области введем понятие гидрогеологический объект прогнозирования — гидравлически и гидрогеохимически условно изолированная в трехмерном пространстве структура, границы которой определяются в зависимости от решаемых гидрогеологических задач, исходя из принципа практической неизменности гидрогеодинамического и гидрогеохимического режима за пределами данного объекта в течение всего расчетного прогнозного периода рассматриваемого возмущающего гидрогеологического воздействия. При этом автоматически предполагается, что при прогнозных оценках должен быть проведен предварительный анализ гидрогеологической информации по всему объему указанного объекта. То есть фактически «гидрогеологический объект прогнозирования» следует также определить как гидрогеологический объект исследования (изучения).

Предложенный подход к оценке масштаба и конфигурации модельной расчетной области предполагает предварительное изучение (как по фондовым материалам, так и по результатам специально организованных для решения поставленной задачи гидрогеологических исследований) геологической, гидрогеологической и гидрологической обстановки в районе.

Физико-географическая характеристика

Территория Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКМС) расположена в области денудационной равнины Предуралья. Ее современный рельеф представляет собой относительно слабо расчлененную равнину с колебаниями абсолютных отметок от +107 до +260 м [1]. В качестве основных геоморфологических элементов выделяются две крупные единицы: долина р. Камы и слабовсхолмленные водораздельные пространства, дренированные многочисленными водотоками разных порядков.

Простирание долины р. Камы северо-северо-западное, участками северо-восточное (рис. 1). С созданием Верхнекамского водохранилища русло и большая часть поймы оказались залитыми водой. Ширина современного водотока водохранилища колеблется в широких пределах от 0,5 до 9 км, составляя в районе г. Безрезники 2,0–2,5 км. Искусственно регулируемый уровень воды в водохранилище

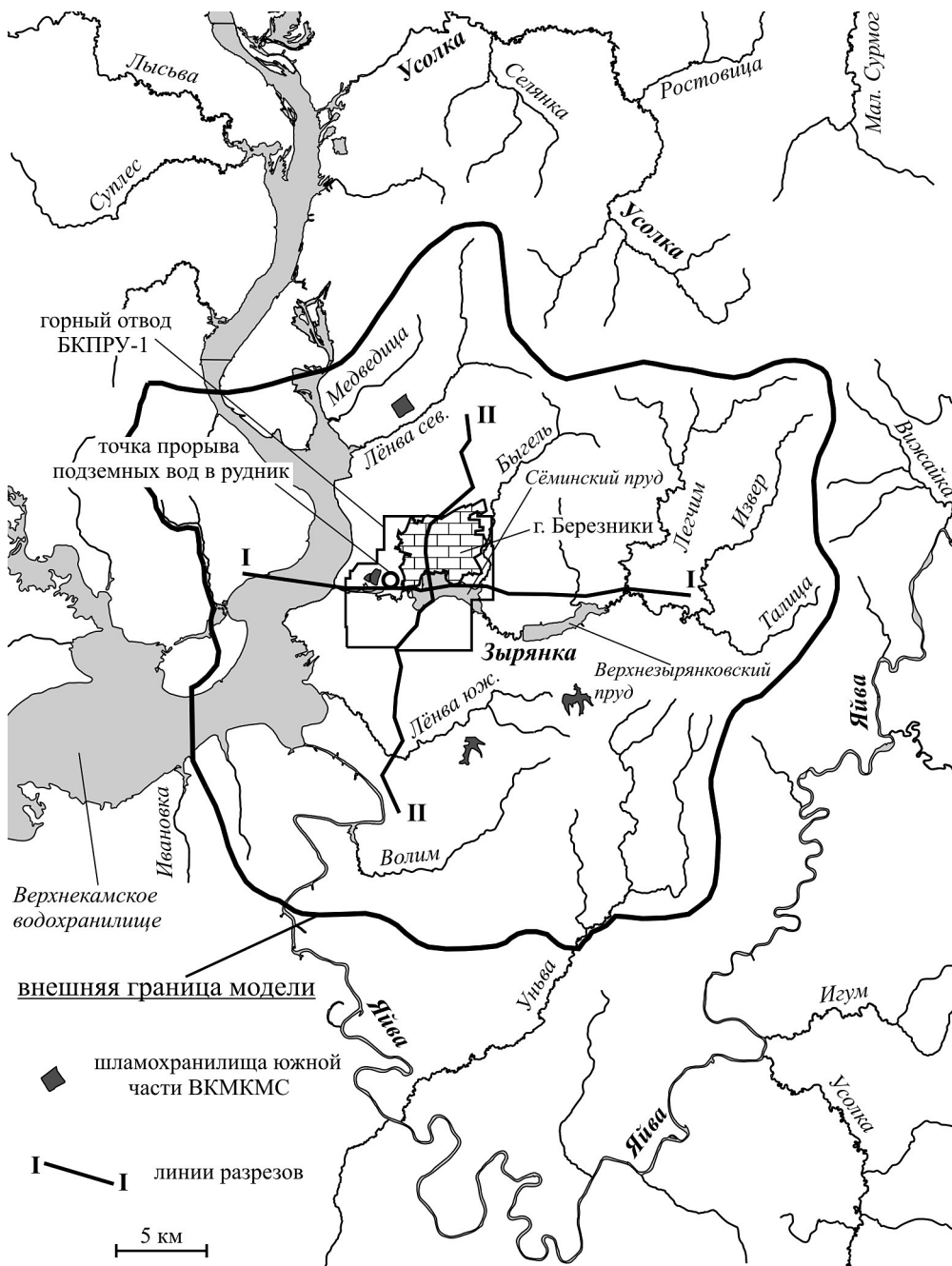


Рис. 1. Водно-бассейновая карта-схема южной и средней частей ВКМКС для определения внешних плановых границ численной геофильтрационной модели

в настоящее время изменяется от +102,5 м в первой половине апреля до +109,5 в конце мая — первой половине июля.

Основными левобережными притоками р. Камы в пределах рассматриваемой территории, южной и средней частей ВКМКС, являются реки Усолка, Зырянка и Яйва с многочисленными правыми и левыми притоками. В состав малых рек, впадающих непосредственно в р. Каму, входят, кроме того, реки Медведица, Лёнва Сев., Толыч (к северу от р. Зырянки) и Лёнва Южн. и Волим (к югу от р. Зырянки). Все реки района, как и Западного Урала в целом, в среднем и нижнем течении характеризуются высокой обеспеченностью водными ресурсами, о чем свидетельствует тот факт, что сток рек существенно превышает испарение с поверхности их водосбора.

Естественные водоемы представлены преимущественно мелкими озерами старичного происхождения, сосредоточенными в долинах крупных рек Камы и Яйвы. Искусственные водоемы, помимо упомянутого Верхнекамского водохранилища, представлены двумя крупными водохранилищами (прудами), созданными на р. Зырянке вблизи г. Березники: Семинским и Верхнезырянковским прудами, а также различными шламонакопителями и рассолосборниками калийных рудников, химических и других предприятий, основные из которых показаны на рисунке. Все искусственные водоемы функционируют на рассматриваемой территории в течение не одного десятилетия.

В пределах территории ВКМКС в условиях умеренно-континентального климата хорошо выражены сезонные изменения: зима холодная и продолжительная с минимальной среднемесячной температурой $-16,0^{\circ}\text{C}$ (январь), а лето теплое и дождливое с максимальной среднемесячной температурой $+17,5^{\circ}\text{C}$ (июль). Годовая сумма выпадающих атмосферных осадков составляет около 600–700 мм.

Геологическое строение

ВКМКС располагается в центральной части Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба [2, 3]. Кроме генеральных отрицательных структур уральского простирания, каковым является Камский прогиб, на рассматриваемой площади выявлены также отрицательные структуры меньшего порядка: например, широтная структура — Дуринский прогиб, который оконтуривает южную часть ВКМКС с севера, или располагающийся южнее Дурыманский прогиб, раскрытый в Камский прогиб, с пологим юго-западным погружением шарнира. Данные отрицательные структуры сопряжены с замкнутыми положительными структурами — куполовидными поднятиями: Березниковским, Легчимо-Изверским, Талицким и др. (рис. 2).

Всю верхнюю часть разреза, представленную нижнепермскими отложениями кунгурского и уфимского ярусов, можно разделить на две основные толщи: соляная залежь и надсолевой комплекс пород. При этом тектонические формы надсолевых отложений связаны с рельефом кровли соляной залежи и повторяют его в более сглаженных очертаниях [4].

Соляная залежь представляет собой сложное геологическое тело, включающее (снизу вверх): подстилающую каменную соль — ПДКС ($\text{P}_1\text{k irn}_2$); сильвинитовую — СЗ ($\text{P}_1\text{k irn}_3 \text{ sil}$) и сильвинито-карналлитовую — СКЗ ($\text{P}_1\text{k irn}_3 \text{ crn}$) пачки/зоны;

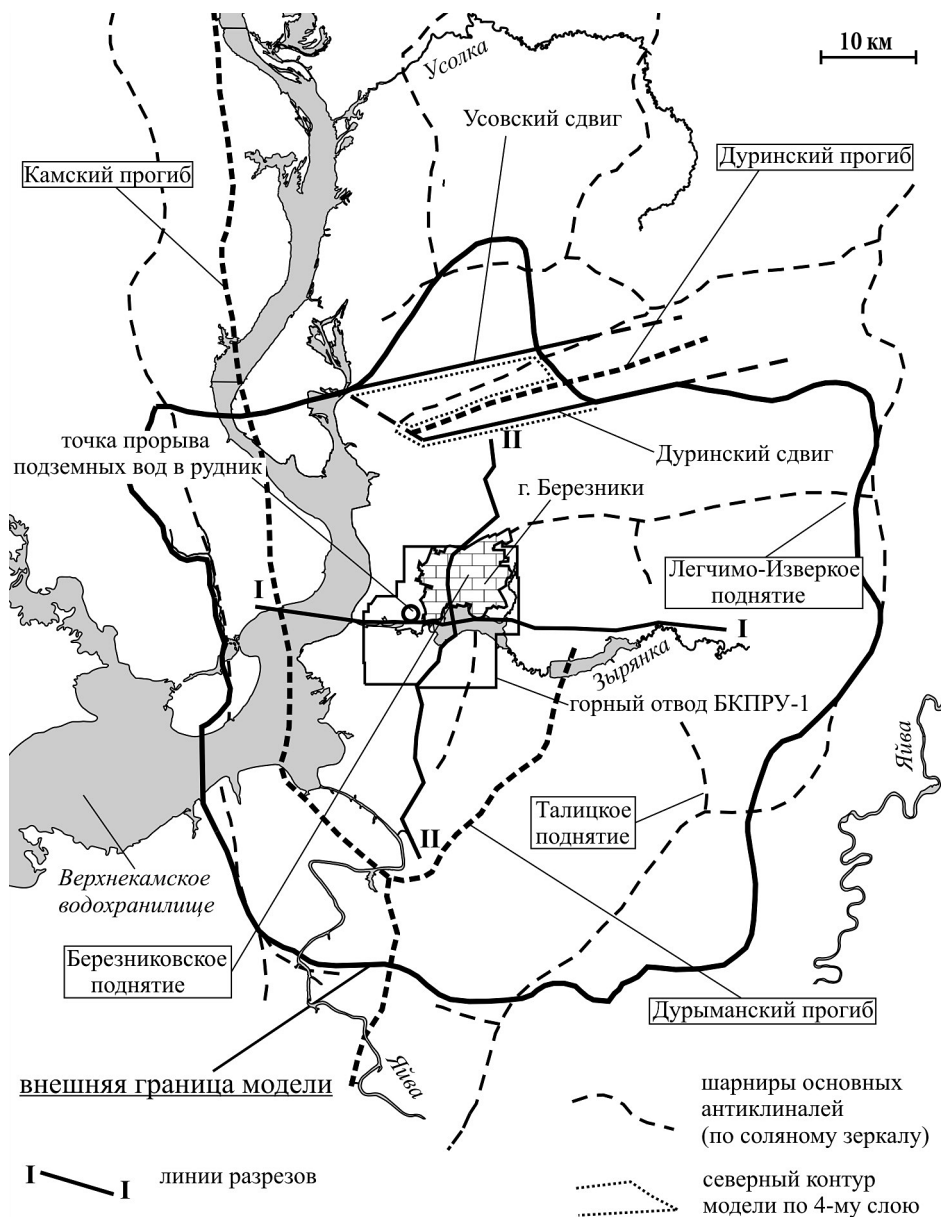


Рис. 2. Карта-схема основных линементов южной и средней частей ВКМКС для определения внешних плановых границ численной геофильтрационной модели

покровную каменную соль — ПКС ($P_1k\ irn_4$) и нижнюю подтолщу соляно-мергельной толщи $СМТ_1$ — ($P_{1u}\ sl_1^1$) (рис. 3 и 4). СЗ средней мощностью порядка 20 м состоит из чередующихся продуктивных (отрабатываемых) пластов сильвинитов и пластов каменной соли. СКЗ средней мощностью порядка 50 м содержит в разрезе девять пластов, сложенных карналлитом либо сильвинитом, перемежающихся

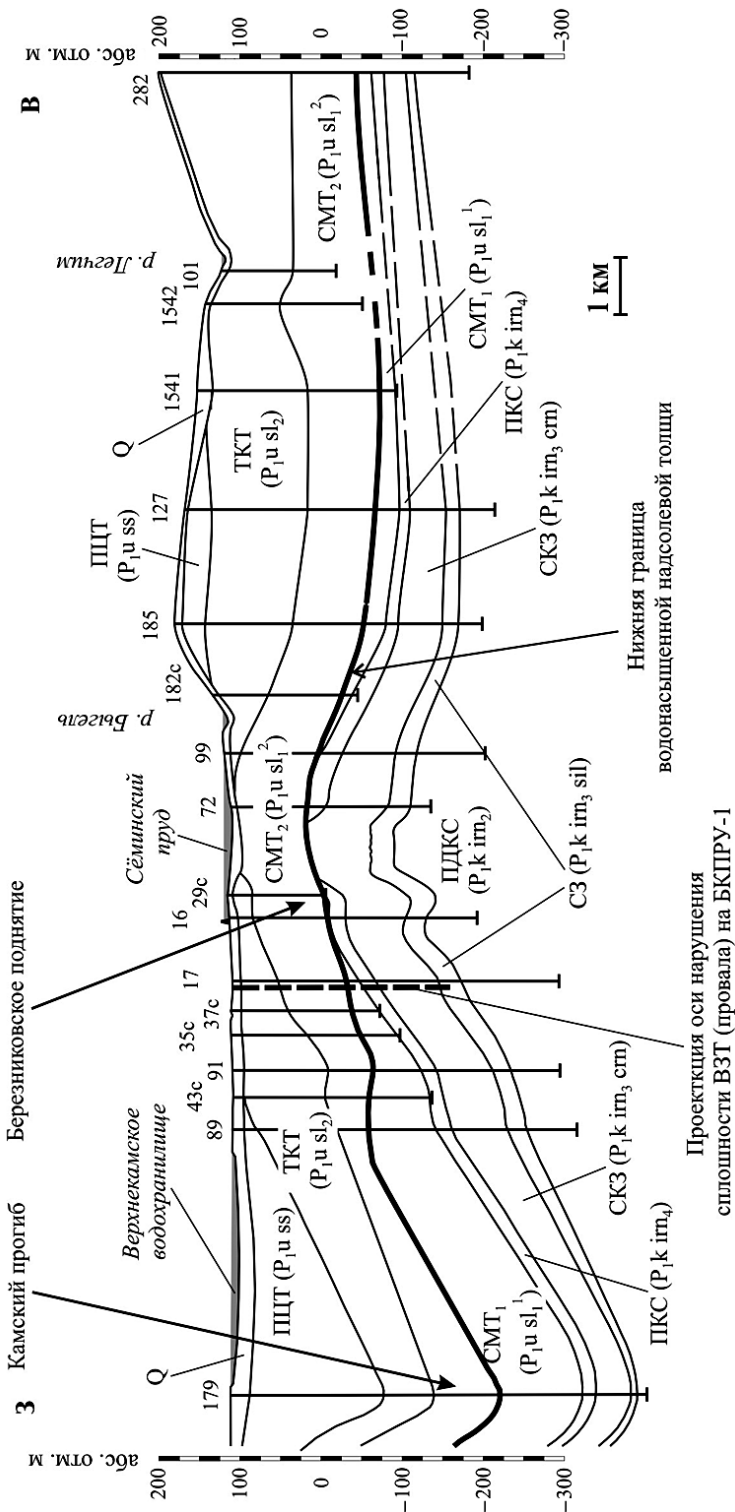


Рис. 3. Геологический разрез по линии I-I (см. рис. 1 и 2) (по обобщающим материалам А.И. Петрика)

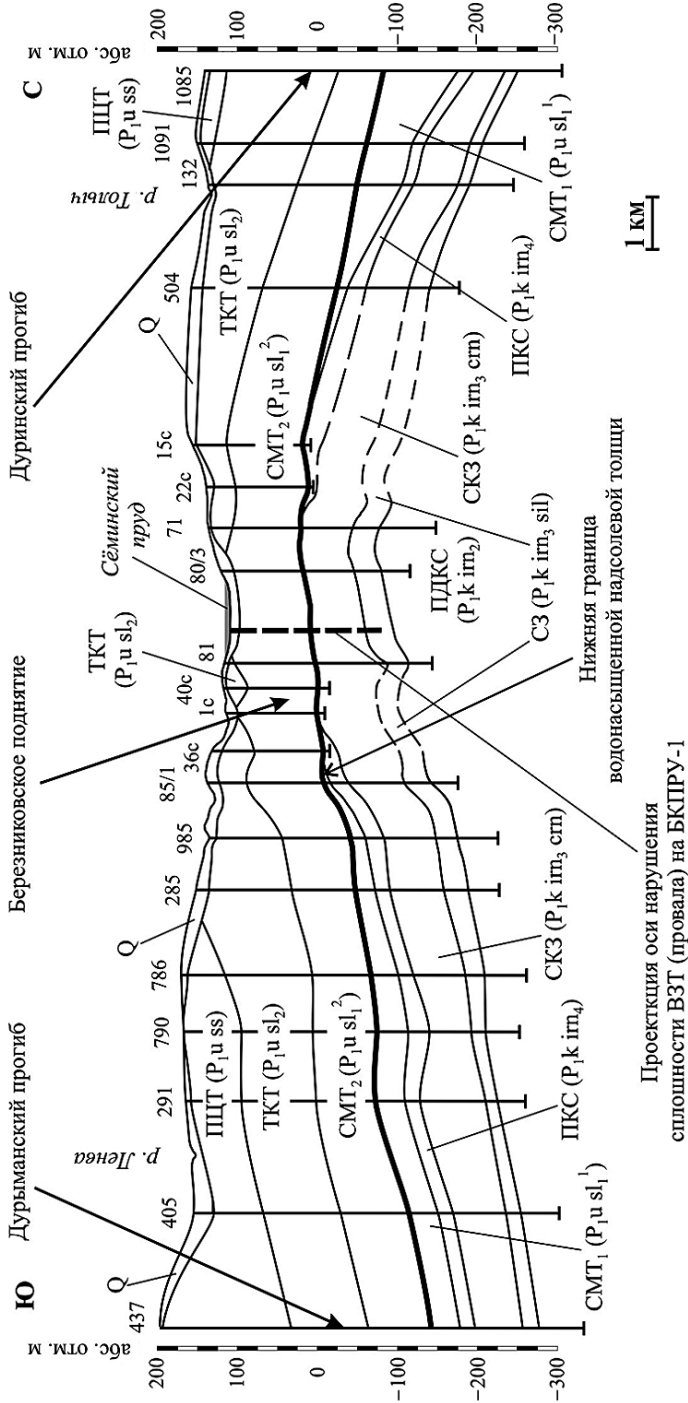


Рис. 4. Геологический разрез по линии II-II (см. рис. 1 и 2) (по обобщающим материалам А. И. Петрика)

с пластами каменной соли. Нижний пласт карналлита (пласт В) также отрабатывался на БКПРУ-1. ПКС средней мощностью порядка 50 м сложена в основном каменной солью на отдельных участках с тонкими прослоями глинистого мергеля. СМТ₁ сложена чередующимися пластами каменной соли мощностью от 0,3 до 11 м и глинистого мергеля с включениями каменной соли и ангидрита мощностью от 0,2 до 12 м. Мощность отложений СМТ₁ увеличивается в направлении погружения структур от 0–30 м на поднятиях и бортах прогибов до 50–70 м на участках их днищ.

Верхний надсолевой комплекс пород включает в себя (снизу вверх): верхнюю подтолщ соляно-мергельной толщи — СМТ₂ (P_{1u} sl₁²); терригенно-карбонатную толщу — ТКТ (P_{1u} sl₂), пестроцветную толщу — ПЦТ (P_{1u} šš) и четвертичные отложения (Q). СМТ₂, залегающая непосредственно над породами соляной залежи, сложена глинистыми мергелями с прослоями гипса, глинисто-гипсо-карбонатных слоев с желваками ангидрита, глинистых известняков и известковых глин. Мощность пород СМТ₂ уменьшается в направлении гипсометрически наиболее погруженных участков от 80–100 м на поднятиях и бортах прогибов до 50–60 м в их днищах. ТКТ в нижней части разреза (~50 м) сложена глинистыми известняками с линзами и прослоями песчаников, алевролитов и мергелей, а в верхней части (~50 м) — преимущественно песчаниками с линзами и прослоями алевролита, известняка и аргиллита. На отдельных присводовых участках мощность отложений ТКТ постепенно снижается до нуля. ПЦТ представлена переслаивающимися глинистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами с редкими маломощными прослоями известняков. В зонах прогибов мощность их достигает 120 м, а на участках поднятий отложения ПЦТ часто полностью выклиниваются. Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены болотными, аллювиальными, аллювиально-делювиальными и элювиально-делювиальными образованиями мощностью от 5 до 15–25 м.

Гидрогеологические условия

Соляная толща ВКМКМС является региональным водоупором [5]. Верхняя часть соляной залежи, развитая над горными выработками и представленная СМТ₁, ПКС и средней и верхней частями СКЗ, определена в качестве водозащитной водоупорной толщи (ВЗТ), отделяющей горные выработки от водоносных горизонтов надсолевой толщи пород. Нарушение сплошности ВЗТ в октябре 2006 г. и привело к началу аварийного затопления рудника БКПРУ-1.

Коллекторские свойства горизонтов надсолевого водоносного комплекса обусловлены преимущественно трещиноватостью и кавернозностью, сформированными в процессе гипергенеза пород [6–8]. Основными поверхностями, отражающими глубину разновременных гипергенных преобразований пород и, как следствие, их гидрогеологическую стратификацию, являются «соляное зеркало» и «гипсовое зеркало». Формирование «соляного зеркала» («СЗ»), располагающегося в кровле СМТ₁ — подошве СМТ₂, обусловлено процессами подземного выщелачивания-солеобразования. Его поверхность отражает в своем рельефе два уровня стояния вод опресненного бассейна во время эрозии смятой соляной толщи. Положение «СЗ» обычно определяется по первому от поверхности проявлению каменной соли в керне скважин. И хотя «СЗ» не представляет собой стратиграфической поверхности,

оно служит границей между водоупорными соленосными и водоносными надсолевыми породами. «Гипсовое зеркало» («ГЗ»), располагающееся на большей части территории в нижней части ТКТ, выделяется по первым от поверхности прослоям и включениям гипса. На присводовых участках «ГЗ» располагается ниже, в верхней части СМТ₂. То есть сульфатоносные породы повсеместно в верхних слоях затронуты здесь процессами сульфатного выщелачивания. Блоки слаботрещиноватых и некавернозных огипсованных пород, расположенных ниже «ГЗ», относятся к относительно водоупорным. На рассматриваемой территории поверхности «СЗ» и «ГЗ» разобщены по глубине надсолевого разреза на десятки метров.

В целом на рассматриваемой территории вниз по разрезу надсолевой толщи происходят снижение активности водообмена и проницаемости пород на фоне увеличения минерализации и изменения химического состава приуроченных к ним подземных вод [9, 10]. Основная область питания надсолевой водоносной толщи в целом находится восточнее шахтных полей и приурочена к восточным поднятиям, и, следовательно, основное движение подземных вод осуществляется с востока на запад в сторону долины р. Камы.

В пределах ВКМКМС в соответствии с описанным выше геологическим строением можно выделить несколько водоносных горизонтов.

Водоносный горизонт четвертичных отложений. Коэффициенты фильтрации в максимуме достигают 8–14 м/сут. В прослоях супесей, суглинков, мелкозернистых песков и торфа они снижаются до 10^{-3} – 10^{-1} м/сут. На собственно водоразделах мощность зоны аэрации достигает десятков метров, и поэтому там в четвертичных породах имеет место только верховодка. В естественных условиях воды четвертичных пород пресные с минерализацией менее 1 г/л, гидрокарбонатные натриевые.

Водоносный горизонт ПЦТ. Уровни подземных вод, в зависимости от гипсометрического положения водовмещающих пород, располагаются на глубинах от единиц до 20–30 и более метров (последнее — на приводораздельных площадях). Коэффициенты фильтрации пород составляют обычно порядка 0,3–1,0 м/сут. Воды — пресные с минерализацией 0,2–0,4 г/л, гидрокарбонатные кальциевые.

Водоносный горизонт ТКТ и верхних слоев СМТ₂ над «ГЗ». На большей части территории находится в состоянии полного водонасыщения. Уровни подземных вод в речных долинах расположены вблизи дневной поверхности, а на водоразделах — на глубине до 50–70 м (часть горизонта в зоне аэрации). Коэффициенты фильтрации пород ТКТ изменяются в пределах 0,05–15,0 м/сут. Наиболее низкие значения (порядка 1 м/сут) отмечаются на водораздельных участках, а в долинах рек проницаемость пород максимальна. В верхних слоях СМТ₂ развиты слабопроницаемые слои: глины, гипсы, которые обуславливают общую низкую проницаемость в вертикальном направлении. Наряду с этим, в рассматриваемой части разреза присутствуют и сравнительно хорошо проницаемые трещиноватые мергели и кавернозные прослои, сформировавшиеся в основном в результате сульфатного выщелачивания. Подземные воды ТКТ в верхних слоях толщи относятся к пресным, гидрокарбонатным кальциево-магниевым. На глубине в породах ТКТ иногда фиксируется наличие соленых подземных вод с минерализацией от 2–10 до 40–50 г/л. Состав их в основном сульфатный кальциево-магний, а с повышением минерализации — хлоридно-сульфатный натриевый. В верхних слоях СМТ₂ на гипсометрически приподнятых участках вскрываются хлоридные натриевые со-

ленные воды с минерализацией до 10–30 г/л, а при погружении пород СМТ₂ в их верхних слоях развиты более крепкие хлоридные натриевые рассолы до 50–100 г/л.

Водоносный горизонт средних и нижних слоев СМТ₂ под «ГЗ», так называемый «рассольный горизонт». Отделяется от вышележащего именно по «ГЗ». Подземные воды в нем повсеместно напорные. Проницаемость пород изменяется как в разрезе, так и по площади. Неоднородность коллекторских свойств связана в значительной мере с различной интенсивностью процессов выщелачивания в породах подтолщи. Наиболее проницаемые отложения с коэффициентом фильтрации до 200 м²/сут развиты в весьма узких локальных зонах, отмечающихся, в частности, и на площади БКПРУ-1 на западной границе шахтного поля. В основном же коэффициент фильтрации в горизонте колеблется в пределах 0,3–1,0 м/сут. На большей части площади в нижней части разреза развиты высококонцентрированные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания с минерализацией до 250–300 г/л, т. е. близкой к величине насыщения по соли NaCl. На присводовых участках в нижней части СМТ₂ развиты также хлоридные натриевые рассолы выщелачивания, но с меньшей минерализацией — до 150 г/л. Величина хлор-бромного коэффициента всегда больше 500, что лишним раз указывает на то, что это именно рассолы выщелачивания, и тем самым подтверждает инфильтрационный характер питания надсолевой толщи на всю ее мощность.

Общая характеристика геофильтрационной модели

Для создания трехмерной геофильтрационной модели надсолевой толщи была использована программа MODFLOW, разработанная геологической службой США, в составе программного пакета Processing Modflow, ver 5.3 (PM-5), которая находится в свободном доступе в Интернете [11]. Данное программное средство предназначено для моделирования методом конечных разностей трехмерных фильтрационных потоков в стационарных и нестационарных условиях для областей произвольной пространственной конфигурации в плане и в разрезе с теоретически неограниченным количеством прямоугольных расчетных блоков и расчетных слоев.

Для обоснования плановой и профильной структуры численной модели были обобщены фондовые материалы по геологическому строению и гидрогеологическим условиям района на основании более чем сорока отчетов, составленных по результатам работ, выполненных в 1963–2012 гг. Обобщение геологических материалов включало анализ и систематизацию данных по всем структурным, разведочным и гидрогеологическим скважинам — всего более 400 шт. Для оценки воднобалансовых составляющих подземного потока были обобщены результаты выполненных в период с начала 1990-х гг. регулярных гидрометрических наблюдений службы мониторинга ОАО «Уралкалий» и разовых или периодических гидрометрических измерений Горного института УрО РАН — всего по 27 створам.

Гидрогеологическая схематизация для численной геофильтрационной модели производилась нами в соответствии с введенным выше понятием — «гидрогеологический объект прогнозирования». Поэтому для решения задачи оценки аварийных водопритоков в рудник БКПРУ-1 учитывалось гидравлическое влияние зоны прорыва на всю мощность надсолевой толщи пород, в связи с чем было принято четырехслойное строение модели в разрезе. Первый (верхний) модельный слой

имитировал четвертичные отложения вне зависимости от того, являются ли они обводненными или находятся в зоне аэрации. Абсолютные отметки его поверхности соответствовали земной поверхности, а подошва слоя задавалась по соответствующим отметкам подошвы четвертичных отложений в зонах их существенного развития в долинах рек; в остальной области — условно: на 10 м ниже поверхности земли в данном расчетном блоке. Второй модельный слой соответствовал водоносному горизонту в ПЦТ. В области выклинивания ПЦТ подошва слоя задавалась на 20 м ниже подошвы 1-го слоя (в этой области в пределах 2-го слоя имитировалась верхняя часть ТКТ). Третий модельный слой отображал в основном ТКТ: в областях развития ПЦТ — на всю мощность; в областях выклинивания ПЦТ — нижнюю и среднюю части. Его подошва задавалась по отметкам «ГЗ». Четвертый (нижний) модельный слой соответствовал в основном СМТ₂: на большей части территории — на всю мощность, а в локальных зонах выклинивания ТКТ — нижней и средней частям СМТ₂. Подошва 4-го слоя задавалась по «СЗ». Поверхности кровли-подошвы расчетных слоев строились методом интерполяции по указанным выше более чем 400 скважинам.

При определении габаритных плановых границ модели в соответствии с введенным выше понятием «гидрогеологический объект прогнозирования» был использован бассейновый подход — выделение замкнутого бассейна подземного стока. Моделируемая область была ограничена по гидравлическим водоразделам, оконтуривающим область подземного стока по верхним слоям надсолевой толщи, исходя из того принципа, что питание подземных вод осуществляется только за счет инфильтрации атмосферных осадков. В контур модели был включен весь бассейн р. Зырянки, а также бассейны более мелких рек, непосредственно впадающих в р. Каму севернее и южнее р. Зырянки: Медведицы, Лёнвы Сев., Толыча, Ленвы Южн. и Волима (см. рис. 1). Так как в ходе режимных наблюдений в первые два месяца после начала аварийного затопления рудника БКПРУ-1 было зафиксировано понижение уровня воды в наблюдательной скважине, оборудованной на соляно-мергельный водоносный горизонт и располагающейся в верхней части бассейна р. Волим, на расстоянии 15 км от точки прорыва, то южная граница модели была заведомо отодвинута к юго-востоку с захватом части бассейна р. Яйвы по верхнему течению р. Уньвы. С указанными границами общего бассейна водосбора приблизительно совпадает контур «водоразделов» по «СЗ», во многом определяющий направление потока тяжелых рассолов в самой нижней части надсолевой толщи (в 4-м расчетном слое) от шарниров соответствующих антиклиналей в сторону понижения отметок «СЗ» (см. рис. 2). С севера граница модели по нижнему 4-му расчетному слою также соответствует условно непроницаемой границе Дуринского прогиба, ограниченно-го Усовским и Дуринским сдвигами. В итоге габаритные размеры моделируемой области составили: 32 км в меридиональном и 35 км в широтном направлениях.

Плановая разбивка модели на расчетные блоки была сделана неравномерной. Блоки с наименьшими размерами 100 × 100 м располагаются в центральной части, в пределах площади шахтного поля БКПРУ-1 (рис. 5). Далее размеры блоков постепенно увеличиваются от центра к периферии, и максимальные их размеры в крайних частях модели составляют 500 × 500 м. Общее количество расчетных блоков по каждому модельному слою составляет 224 × 257, соответственно в меридиональном и широтном направлениях.

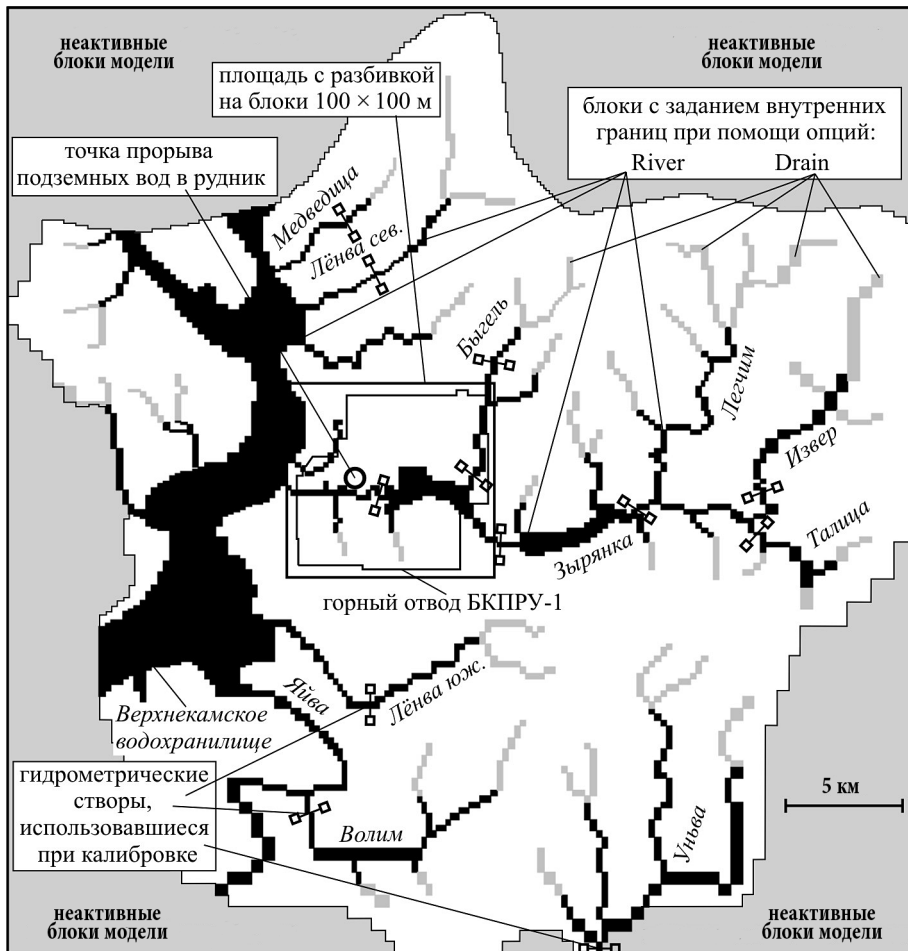


Рис. 5. Плановая структура региональной численной геофильтрационной 3D-модели южной части ВКМКС (по 1-му модельному слою)

Граничные условия модели

Внешние плановые границы численной геофильтрационной модели по каждому расчетному слою в соответствии со сказанным выше автоматически были заданы непроницаемыми. Контур неактивных блоков модели показан на рисунке.

Внутренние границы модели, соответствующие локальным областям разгрузки — всем рекам и пресным водоемам, включая Верхнекамское водохранилище, Семинский и Верхнезыряновский пруды, были заданы в 1-м (верхнем) модельном слое при помощи использующихся в программном пакете PM-5 опций River или Drain с граничным условием III рода (каждый водный объект со своим фильтрационным сопротивлением русловых отложений), совмещенным с граничным условием I рода, т. е. с заданием отметки дренирования, равной отметке уреза воды в водоемах и реках в каждом расчетном блоке модели. Отличие реализации данного граничного условия в указанных двух опциях заключается в том, что, если

напор в расчетном блоке оказывается меньше, чем заданная в этом блоке отметка дренирования, то при использовании опции Drain граничное условие автоматически отключается, а при использовании опции River моделируется отток воды из реки или водоема в модель (т. е. фактически, как от границы обеспеченного питания) с учетом указанного выше фильтрационного сопротивления. Поэтому все реки в верхнем их течении задавались в модели при помощи опции Drain, а в среднем и нижнем течении, как и все водоемы, — с использованием опции River. Таким образом, исключалась возможность виртуального модельного (невозможного в реальности) оттока воды из относительно мелких ручьев, образующих фактически верховья рек, и на стадии калибровки модели, и тем более при прогнозных расчетах формирования депрессионной воронки от точки прорыва подземных вод в рудник БКПРУ-1. Изменения в плане отметок дренирования по рекам были заданы в соответствии с топографической картой масштаба 1:50 000. При этом значения параметра Conductance (величины, обратной фильтрационному сопротивлению, вводимой при реализации опций River и Drain, м²/сут) в пределах водоемов, где акватория включала несколько расчетных блоков целиком, задавались пропорционально площади этих блоков в соответствии с детальностью разбивки, а на реках и ручьях, где акватория занимала лишь небольшую часть расчетного блока, — пропорционально длине русла в пределах блока, т. е. фактически пропорционально линейному размеру блока.

В 3-м модельном слое, т. е. над кровлей «ГЗ», были заданы основные шламохранилища рудников (см. рис. 2) в виде границ II рода (постоянный расход), имитирующих зафиксированные ранее постоянно действующие величины утечек рассолов из этих искусственных водоемов в надсолевую толщу пород, измеряемые несколькими тысячами кубических метров в сутки для каждого хранилища. Таким образом, на наш взгляд, наиболее адекватно учитывалось преимущественно вертикальное просачивание тяжелых рассолов от поверхности земли в нижнюю часть ТКТ, до первого относительного водоупора — «ГЗ».

Границы IV рода (границы смены фильтрационных параметров) в плане и в разрезе задавались автоматически введением соответствующих зон с различными значениями параметров в каждом расчетном блоке в каждом модельном слое (одинаковыми в пределах каждой зоны).

Исходные (перед калибровкой) значения горизонтальных коэффициентов фильтрации в верхних трех модельных слоях задавались по материалам представленных в фондовых отчетах ранее проведенных опытно-фильтрационных работ: для четвертичных отложений — 1 м/сут, аллювиальных отложений в речных долинах — 5 м/сут; для отложений ПЦТ в основной области развития — 0,5 м/сут, в долинах — 1 м/сут; для отложений ТКТ на водораздельных пространствах — 1 м/сут, непосредственно в долинах рек и низовьях логов — 10 м/сут, в междуречьях — 3 м/сут. Для водоносного горизонта в пределах СМТ₂ (4-й модельный слой) горизонтальные коэффициенты фильтрации задавались по схеме специального районирования, выполненного старшим научным сотрудником Горного института УрО РАН В. И. Трофимовым на основании обобщения данных о всех проведенных в разные годы опытных откачках, с максимальным разбросом значений от 0,1 до 10 м/сут.

Исходные значения вертикальных коэффициентов фильтрации задавались по

опыту наших исследований в аналогичных горных породах: для коренных пород $k_z = (0,01 - 0,03) k_x$, для аллювиальных отложений — 1 м/сут, для остальных четвертичных отложений — 0,1 м/сут.

Исходные значения емкостных параметров также задавались по аналогии с похожими отложениями в других регионах: коэффициент упругоэластичности отложений ПЦТ — $0,00003 \text{ м}^{-1}$, ТКТ — $0,00001 \text{ м}^{-1}$, СМТ₂ — $0,000001 \text{ м}^{-1}$; коэффициент гравитационной водоотдачи четвертичных отложений — 0,1, пород ПЦТ — 0,01, ТКТ — 0,005, СМТ₂ — 0,005.

Средняя величина инфильтрационного питания водоносных горизонтов, оценивавшаяся для рассматриваемой площади ранее, по гидрометрическим наблюдениям, выполненным в 1970-е — начале 1980-х гг., составляла 0,00034 м/сут. При создании настоящей модели нами были обработаны гидрометрические наблюдения, выполненные в течение 2004–2007 гг. службой мониторинга ОАО «Уралкалий». Оценка среднемеженного значения площадного модуля стока по всем гидрометрическим створам дала приблизительно одинаковые результаты — в среднем 8,0 л/с с квадратного километра, что соответствует величине инфильтрации 0,00069 м/сут. Эта величина и задавалась в модели как исходное одинаковое для всей модельной области значение инфильтрационного питания с использованием опции Recharge (фактически граница II рода в каждом расчетном блоке в плане в первом от поверхности активном, т. е. не осушенном на счете, модельном слое). Увеличение подземного стока к 2000-м гг. по сравнению с началом 80-х гг. прошлого века практически в 2 раза является нормальным, зафиксированным, по крайней мере, для средней полосы Российской Федерации (умеренный гумидный климат) явлением, связанным с потеплением климата, особенно с увеличением средней температуры зимнего периода [12, 13]. В контурах акваторий искусственных водоемов задавалось нулевое инфильтрационное питание.

Калибровка модели в стационарном режиме

На начальной стадии калибровка модели осуществлялась в стационарном режиме для естественных условий геофильтрационного потока — одновременно по двум основным критериям соответствия реальных и модельных значений расходов рек и напоров подземных вод в разных водоносных горизонтах.

Для калибровки по первому критерию применялись реально определенные расходы рек по 12 гидрометрическим створам, расположенным по возможности наиболее близко к устьям водотоков. При этом в качестве калибровочных значений были использованы статистически оцененные среднемеженные или приведенные к ним расходы по соответствующим створам.

Для калибровки модели по напорам применялись собственно значения абсолютных отметок уровней воды, реально замеренные в разные годы в 57 скважинах, относительно равномерно распределенных в пределах южной части ВКМКС (в том числе 14 существовавших до аварии скважин режимной сети ОАО «Уралкалий», расположенных в районе г. Березники и на прилегающих территориях) и оборудованных на разные водоносные горизонты: 7 скважин на четвертичный горизонт, 6 скважин на ПЦТ, 30 скважин на ТКТ, 14 скважин на СМТ₂. В ходе калибровки использовались приведенные значения напоров с учетом минерализации

(плотности) воды в скважине, что являлось весьма существенным в первую очередь для скважин на СМТ₂.

При калибровке прежде всего подбирались наименее обоснованные с точки зрения полевых опробований и наблюдений параметры геофильтрационной модели. К таковым относятся величина инфильтрационного питания, фильтрационные свойства подрусловых отложений рек и коэффициенты фильтрации в вертикальном направлении.

Порядок калибровки модели имел следующий вид. На первом этапе производился позонный подбор значений инфильтрационного питания и величины Conductance в блоках с использованием опций River и Drain. При этом одновременно контролировались оба критериальных параметра: и расход на данном участке водотока, и величина напора в скважинах, расположенных вблизи этого участка, включая значения напоров в глубоких горизонтах. В тех ситуациях, когда подбором величины инфильтрации и Conductance не удавалось достичь нужного результата, изменялись значения фильтрационных параметров водоносных пластов. Здесь, опять следуя принципу, по возможности, не менять наиболее надежно определенные в ходе опытно-фильтрационных работ коэффициенты, в первую очередь мы подбирали вертикальные коэффициенты фильтрации. И уж если этот подбор не мог привести в соответствие реальные и модельные напоры и расходы, то в последнюю очередь велась калибровка модели по горизонтальным коэффициентам фильтрации водоносных горизонтов.

В итоге калибровки модели в стационарном режиме было достигнуто минимальное отклонение модельных и измеренных расходов рек и напоров в водоносных горизонтах. Отклонение по расходам рек не превышало 4 %, а по напорам в районе шахтного поля БКПРУ-1 — 1 м, в остальной модельной области — 3 м (т.е. не более 2 % от максимального перепада напоров в модели в целом +107 — +243 м абс.).

Подобранные при калибровке значения горизонтальных коэффициентов фильтрации колеблются в пределах: в четвертичных отложениях — от 1 м/сут на основной площади до 10 м/сут в аллювиальных породах в отдельных речных долинах; в ПЦТ от 0,5 м/сут на водораздельных площадях до 3 м/сут в долинах; в ТКТ от 0,3 м/сут на водоразделах до 10 м/сут в долинах рек и низовьях логов; в СМТ₂ от 0,3 м/сут на водораздельных площадях до 3 м/сут в долинах относительно крупных рек. Значения вертикальных коэффициентов фильтрации изменяются: в четвертичных отложениях от 0,1 м/сут на основной площади до 1 м/сут в аллювиальных породах; в ПЦТ от 0,005 м/сут на водораздельных площадях до 0,3 м/сут в долинах; в ТКТ от $5 \cdot 10^{-5}$ м/сут на водоразделах до 0,03 м/сут в долинах рек и низовьях логов; в СМТ₂ от $1,5 \cdot 10^{-5}$ м/сут на водоразделах до $5 \cdot 10^{-3}$ м/сут в долинах относительно крупных рек. Величина инфильтрационного питания позонно (полями неоднородности, совпадающими обычно с локальными бассейнами стока) изменяется в пределах от $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ м/сут, составляя в среднем, как и было задано изначально, $6,9 \cdot 10^{-4}$ м/сут.

Результирующие модельные карты гидро- и пьезоизогипс для различных модельных слоев представлены на рис. 6, где видно, что в верхней части гидрогеологического разреза отчетливо выделяются микробассейны подземного стока и весьма большое значение имеет дренирующий эффект ближайших рек или водоемов (рис. 6, а). При этом в пределах четвертичного водоносного горизонта

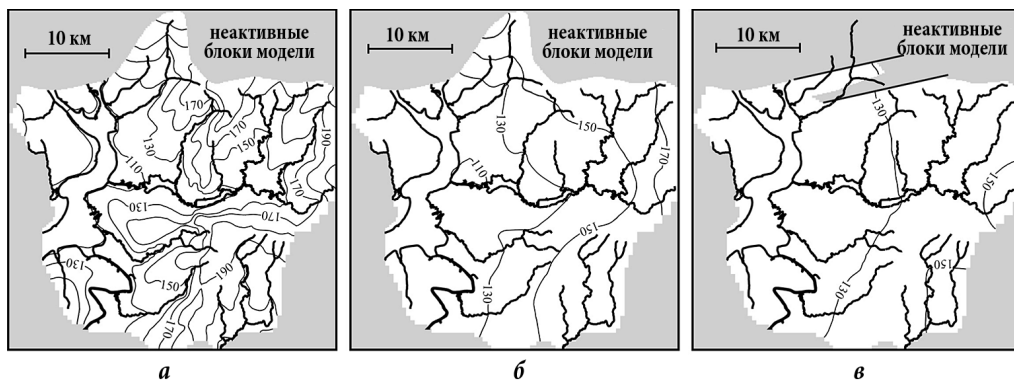


Рис. 6. Модельные карты гидро- и пьезоизогипс по результатам калибровки модели в стационарном режиме естественного потока подземных вод для различных модельных слоев:

а — 2-й модельный слой (ПЦТ или верхняя часть ТКТ); б — 3-й модельный слой (ТКТ на всю мощность или нижняя и средняя части); в — 4-й модельный слой (СМТ₂).

(1-й модельный слой) в модели на счете на приводораздельных площадях были получены осушенные области, приблизительно соответствующие по своей конфигурации областям развития реальной зоны аэрации в четвертичных породах. По мере углубления в водоносные горизонты надслоевой толщи пород интенсивность водообмена существенно снижается, и уже в пределах ТКТ и особенно СМТ₂ имеет место региональный поток, направленный в основном с востока на запад, в сторону генеральной дрены — р. Камы, с некоторым дренирующим влиянием р. Зырянки (рис. 6, б и в).

Калибровка модели в нестационарном режиме и прогнозные расчеты

Постоянная в течение двух лет затопления рудника калибровка модели в нестационарном режиме производилась в несколько последовательных этапов по результатам наблюдений за развитием аварийной ситуации и каждый раз сопровождалась текущими уточняющими прогнозными оценками водопритоков в рудник. Оценочными критериями при этом служили: понижения (а в соответствующие паводковые периоды и повышения) уровней воды в 17 скважинах сети мониторинга ОАО «Уралкалий», оборудованных на различные водоносные горизонты (в основном в районе шахтного поля БКПРУ-1), и среднемесячные и среднедекадные водопритоки воды в рудник из надслоевой толщи.

Изменение гидрогеодинамической обстановки было прослежено на модели по четырем этапам: 1) с середины октября 2006 г. по конец марта 2007 г., т. е. в период зимней межени; 2) с начала апреля до середины июля 2007 г., в паводковый и послепаводковый периоды; 3) с середины июля 2007 г. до середины апреля 2008 г., т. е. после образования провала земной поверхности в точке прорыва и до конца следующей зимней межени; 4) с середины апреля до конца октября 2008 г., т. е. до окончания затопления рудника.

На первых трех этапах отток из надслоевой толщи в рудник имитировался при помощи опции Drain с подбором соответствующего фильтрационного сопротивления (Conductance). Дрена размещалась в блоке (блоках), соответствующем месту

прорыва (провала), для первых двух этапов (до образования провала) — только в 4-м модельном слое, для третьего этапа — во всех четырех слоях. Отметка дренирования при этом задавалась практически (на 0,1 м выше) на отметках подошвы каждого модельного слоя в соответствующем блоке. На четвертом этапе калибровки, естественно, уже не предполагавшем производство дальнейших прогнозных оценок, расход оттока из надсолевой толщи в рудник задавался в соответствии с эмпирическим графиком при помощи опции Well — граница II рода с изменяющимся во времени по стресс-периодам расходом. Калибровка велась последовательно по указанным этапам с передачей конечных модельных напоров в каждом блоке на предыдущем этапе в качестве начальных для последующего этапа.

Постепенно в ходе калибровки выяснилось, что понижение и повышение уровня воды в наблюдательных скважинах зависело не только от изменения расхода оттока воды из надсолевой толщи в рудник, но и от сезонных колебаний инфильтрационного питания и уровня воды в Верхнекамском водохранилище от +103 до +109 м абс. Поэтому в модели по стресс-периодам воспроизводился график колебания уровня воды в Верхнекамском водохранилище, заданном при помощи опции River, в соответствии с результатами ежесуточных измерений. Кроме того, в ходе калибровки в соответствии с общим среднегодовым балансом по стресс-периодам подбирались также изменение величины инфильтрационного питания (пропорционально для всех выделенных ранее зон модельной области), годовое распределение которого оказалось следующим: для зимнего периода с октября по март — нулевое; в период с июня до середины октября — равное среднегодовому значению $6,9 \cdot 10^{-4}$ м/сут; в период весеннего половодья с апреля до середины июня — в 2,5 раза превышающим среднегодовое значение.

Приоритеты в последовательности подбора тех или иных фильтрационных и балансовых параметров оставались теми же, что и при калибровке в стационарном режиме. После каждого цикла нестационарной калибровки на всех трех этапах докалибровывалась стационарная модель и начинался следующий цикл в нестационарном режиме. В итоге нескольких циклов калибровки на четырех этапах было достигнуто минимальное отклонение модельных и измеренных водопритоков в рудник и соответствующих понижений напоров: по водопритокам в рудник на первых трех этапах — не более 5 %, а по результирующим понижениям уровня воды во всех 17 наблюдательных скважинах на конец четвертого этапа — не более 20 %, и при этом для тех скважин, где измеренное понижение составляло более 3 м, данная невязка не превысила 10 %.

Прогнозные водопритоки в рудник, полученные по результатам калибровки по первым трем этапам, и реальные их последующие значения отличались друг от друга не более чем на 30 % при максимальном диапазоне изменения среднемесячных расходов от 1800 до 7000 м³/ч (средневзвешенное — 4500 м³/ч) в течение всего двухлетнего периода затопления.

В результате четырехэтапной калибровки в нестационарном режиме были уточнены значения всех фильтрационных параметров надсолевой толщи для района шахтного поля БКПРУ-1. Значения горизонтальных коэффициентов фильтрации на территории, прилегающей к провалу, составили для четвертичных отложений — 5–10 м/сут; для верхней части ТКТ — 3–10 м/сут; для средней и нижней частей ТКТ — 3–10 м/сут; для СМТ₂ — 0,3–3 м/сут; а значения вертикальных

коэффициентов фильтрации — для четвертичных отложений — 0,1–1 м/сут; для верхней части ТКТ — 0,02–0,3 м/сут; для средней и нижней частей ТКТ — $3 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ м/сут; для СМТ₂ — $5 \cdot 10^{-5}$ – $3 \cdot 10^{-3}$ м/сут. В целом для района шахтного поля БКПРУ-1 величины коэффициентов упругоэластичности для ТКТ на всю ее мощность оказались равными $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, для СМТ₂ — $1\text{--}3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, коэффициенты гравитационной водоотдачи для четвертичных отложений составили $7 \cdot 10^{-2}$, а для ТКТ также на всю мощность — $0,8\text{--}1 \cdot 10^{-2}$ (СМТ₂ все время оставалась в напорном состоянии).

Результирующие на конец затопления рудника, т. е. на конец октября 2008 г., модельные карты изолиний понижения уровня подземных вод в различных водоносных горизонтах представлены на рис. 7. Как видно, в приповерхностном водоносном горизонте верхней части ТКТ (2-й модельный слой) воронка депрессии фактически замкнулась на ближайший крупный водоток — р. Зырянку, а в более глубоких горизонтах нижней и средней частей ТКТ (3-й слой) и СМТ₂ (4-й слой) оказалась развитой в радиусе до 10 и 15 км соответственно и при этом достигла западной внешней границы модельной области. Очевидно, что в такой ситуации при моделировании провала с использованием опции Drain имело бы место занижение прогнозных водопритоков в рудник. В связи с этим нами были произведены дополнительные расчеты, при которых водопритоки к провалу оценивались с использованием опции Drain (а не Well) в течение всех четырех указанных выше этапов, но по соответствующим участкам западной внешней границы модели в 3-м и 4-м модельных слоях (в пределах приведенного на рис. 7, б и в модельного понижения уровня более 0,3 м) было задано граничное условие I рода (граница обеспеченного питания) с теми отметками напоров в каждом расчетном блоке, которые были получены при калибровке в стационарном режиме естественного фильтрационного потока. Такой подход должен неминуемо приводить, наоборот, к некоторому завышению водопритоков в рудник, и, следовательно, при сравнении двух вариантов прогнозных расчетов должна получаться диапазонная оценка их величины [14]. В итоге разница в водопритоках к провалу при реализации обоих вариантов задания внешней границы не превысила 5 %.

Представленная региональная численная геофильтрационная модель южной части ВКМКС стала фактически постоянно действующей и была использована

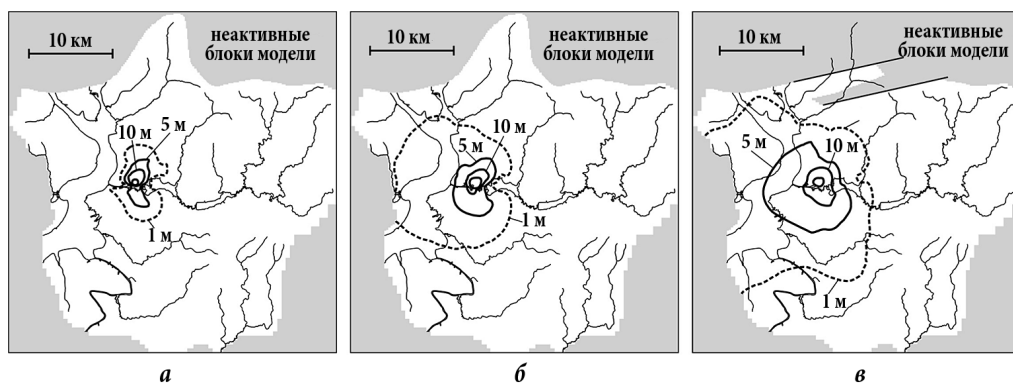


Рис. 7. Модельные карты прогнозных понижений напоров подземных вод на момент полного затопления рудника БКПРУ-1 для различных модельных слоев:

а — 2-й модельный слой (ПЦТ или верхняя часть ТКТ); б — 3-й модельный слой (ТКТ на всю мощность или нижняя и средняя части); в — 4-й модельный слой (СМТ₂).

в качестве базовой для производства прогнозных оценок, связанных с решением разнообразных гидрогеологических проблем: подтопление территорий после окончательного затопления рудника БКПРУ-1; развитие ореолов засоления при закачке через скважины избыточных рассолов из шламохранилищ; просадки земной поверхности в пределах селитебной территории г. Березники в связи с изменением уровня режима подземных вод и др.

Литература

1. Шимановский Л. А. Основные факторы формирования рельефа Пермского Прикамья // Учен. зап. Пермского ун-та. 1970. № 210. 37 с.
 2. Иванов А. А., Воронова М. Л. Верхнекамское месторождение калийных солей (стратиграфия, минералогия и петрография, тектоника, генезис). Л.: Недра, 1975. 219 с.
 3. Копнин В. И. Основные положения концептуальной тектонической модели Верхнекамского месторождения калийных солей // Региональное совещание по проблеме надвигов на ВКМКС. Пермь. 1992. С. 100–113.
 4. Костенко Н. П. и др. Рельефообразующие процессы и значение их изучения в прикладных целях // Современные экзогенные процессы рельефообразования. М.: Наука, 1980. С. 29–36.
 5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрогеологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама / под ред. В. В. Николаенко. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 324 с.
 6. Киселева О. В., Поликарпов А. И., Липницкий В. К. Особенности дедоломитизации надсолевых пород Верхнекамского месторождения // Проблемы морского и континентального галогенеза. Новосибирск: Наука, 1991. С. 43–45.
 7. Поликарпов А. И., Киселева О. В. Палеогеографическое и палеогидрогеологическое значение силифицированных галогенных пород в зоне гипергенеза // Состав и условия образования морских галогенных формаций. Новосибирск: Наука, 1991. С. 30–33.
 8. Ходьков А. Е. Основные черты гидрогеологии важнейших эксплуатационных соляных (калийных) месторождений // Материалы по гидрогеологии и геологической роли подземных вод. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1971. 27 с.
 9. Вахрамеева В. А. Годовые слои соляных пород Верхнекамского месторождения // Бром в соляных отложениях и рассолах. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 27–33.
 10. Шлеймович Р. Э. Бром в соляных породах Верхнекамского месторождения // Бром в соляных отложениях и рассолах. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 48–50.
 11. Wen-Hsing Chiang, Kinnzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. 2001, 346 p.
 12. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия, СПб.: Наука, 2002. С. 152–164.
 13. Семенов В. А. Особенности климатических изменений стока рек равнинных и горных территорий севера и центра России // VI Всероссийский гидрологический съезд, 28 сентября — 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург. Тезисы докладов, секция 3. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 232–233.
 14. Коносовский П. К., Соловейчик К. А. Математическое моделирование геофильтрационных процессов. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 95 с.
- Для цитирования:** Потапов А. А. Региональная численная геофильтрационная модель южной части Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2016. Вып. 3. С. 4–23. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.301

References

1. Shimanovskii L. A. Osnovnye faktory formirovaniia rel'efa Permskogo Prikam'ia [The main factors of the relief forming of the Perm Prikamye]. *Uchen. zap. Permskogo un-ta* [Scientific Notes Perm. University], 1970, no. 210, 37 p. (In Russian)
2. Ivanov A. A., Voronova M. L. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie kaliinykh solei (stratigrafiia, mineralogiia i petrografiia, tektonika, genezis)* [Verkhnekamsk deposit of potassium salts (stratigraphy, petrography and mineralogy, tectonics, genesis)]. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 219 p. (In Russian)
3. Kopnin V. I. Osnovnye polozheniia kontseptual'noi tektonicheskoi modeli Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [The main provisions of the tectonic conceptual model of Verkhnekamsk potas-

sium salts deposit]. *Regional'noe soveshchanie po probleme nadvigov na VKMKS [Regional meeting on the problem of nappe on VKMKS]*. Perm, 1992, pp.100–113. (In Russian)

4. Kostenko N.P. et. al. dr. Rel'efoobrazuyushchie protsessy i znachenie ikh izucheniia v prikladnykh tseliakh [Relief-forming processes and the value of studying them for applied purposes]. *Sovremennye ekzogenyye protsessy rel'efoobrazovaniia [Modern exogenous relief formation processes]*. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp.29–36. (In Russian)

5. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrogeologicheskaya izuchennost'. T. 11. Srednii Ural i Priural'e. Vyp. 1. Kama [Surface water resources of the USSR. Hydrogeological studies. Vol. 11. Middle Ural and Urals area. Issue 1. Kama]*. Ed. by V.V.Nikolaenko. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966. 324 p. (In Russian)

6. Kiseleva O.V., Polikarpov A.I., Lipnitskii V.K. Osobennosti dedolomitizatsii nadoslevykh porod Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Features of dedolomitization oversaline rock of the Verkhnekamskoye deposits]. *Problemy morskogo i kontinental'nogo galogeneza [Problems of marine and continental halogenesis]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, pp.43–45. (In Russian)

7. Polikarpov A.I., Kiseleva O.V. Paleogeograficheskoe i paleogidrogeologicheskoe znachenie silifitsirovannykh galogenykh porod v zone gipergeneza [Paleogeographic and paleohydrogeological value of silifitsirovannykh halogen rocks in the hypergenesis zone]. *Sostav i usloviia obrazovaniia morskikh galogenykh formatsii [The composition and conditions of formation of marine halogen formations]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, pp.30–33. (In Russian)

8. Khod'kov A.E. Osnovnye cherty gidrogeologii vazhneishikh ekspluatatsionnykh solianyykh (kaliinykh) mestorozhdenii [The main features of hydrogeology of the most important working salt (potassium) deposits]. *Materialy po gidrogeologii i geologicheskoi roli podzemnykh vod [Materials on hydrogeology and geology of groundwater]*. Leningrad, LSU Publ., 1971. 27 p. (In Russian)

9. Vakhrameeva V.A. Godovye sloi solianyykh porod Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Annual layers of salt rocks of the Verkhnekamskoye deposit]. *Brom v solianyykh otlozheniiakh i rassolakh [Bromine in salt sediments and brines]*. Moscow, MSU Publ., 1976, pp.27–33. (In Russian)

10. Shleimovich R.E. Brom v solianyykh porodakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Bromine in salt rocks of the Verkhnekamskoye deposit]. *Brom v solianyykh otlozheniiakh i rassolakh [Bromine in salt sediments and brines]*. Moscow, MSU Publ., 1976, pp.48–50. (In Russian)

11. Wen-Hsing Chiang, Kinnzelmach W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. 2001, 346 p.

12. Shiklomanov I. A., Georgievskii V. Iu. Vliianie antropogennykh izmenenii klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy [The impact of anthropogenic climate changes on the hydrological regime and water resources]. *Izmeneniia klimata i ikh posledstviia [Climatic changes and their effects]*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2002, pp.152–164. (In Russian)

13. Semenov V. A. Osobennosti klimaticheskikh izmenenii stoka rek ravninnykh i gornyykh territorii severa i tsentra Rossii [Features of climatic changes of river discharge of the sluggish rivers and mountain territories of the north and center of Russia]. *VI Vserossiiskii gidrologicheskii sezd, 28 sentiabria — 1 oktiabria 2004 g., Sankt-Peterburg. Tezisy dokladov, sektsiia 3 [VI All-Russia Hydrological Congress, 28 September — 1 October 2004. St. Petersburg, Abstracts, Section 3]*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2004, pp.232–233. (In Russian)

14. Konosavskii P.K., Soloveichik K. A. *Matematicheskoe modelirovanie geofil'tratsionnykh protsessov [Mathematical modeling of geofiltration processes]*. St. Petersburg, Publishing House of Mining Institute, 2001. 95 p. (In Russian)

For citation: Potapov A. A. Regional groundwater flow numerical model southern Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. *Vestnik SPbSU. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 3, pp. 4–23. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.301

Статья поступила в редакцию 30 мая 2016 г.

Контактная информация:

Потапов Александр Анатольевич — кандидат геолого-минералогических наук, доцент;
a.potapov@spbu.ru

Potapov Alexandr A. — PhD, Associate Professor; a.potapov@spbu.ru