

ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
УСИНСКОГО РАЙОНА (ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО
АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

© 2021 г. Т. С. Егоров*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: tsegorov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.

После доработки 05.08.2020 г.

Принята к публикации 16.10.2020 г.

Выполнен анализ существующего освоения ресурсов подземных вод на территории муниципально-образования городского округа Усинск Республики Коми, и обоснована возможность наращивания водоотбора на месторождениях. Создана гидрогеодинамическая модель геолого-гидрогеологических условий, адекватная природно-техногенной обстановке, с помощью которой выполнена оценка прогнозных ресурсов, соответствующих современным нормативным требованиям. Рассмотрены основные источники формирования баланса подземных вод, и выполнена оценка ущерба речному стоку для перспективного водоотбора.

Ключевые слова: гидрогеодинамическое моделирование, прогнозные ресурсы, запасы подземных вод, четвертичные образования, криолитозона.

DOI: 10.31857/S032105962103007X

ВВЕДЕНИЕ

Район исследования относится к городскому округу Усинск, входящему в состав республики Коми. Климат на территории – умеренно-континентальный. Среднегодовая температура – (-3.2°C) . Среднегодовая сумма осадков составляет 495 мм. Испарение – 160 мм. Основные населенные пункты – г. Усинск и с. Усть-Уса. Население здесь более 40 тыс. человек. Район исследования относится к двум основным речным бассейнам рек Усы и Печоры с их притоками – Большой Макарихой, Колвой и Лаей. За последнее десятилетие на гидрологическом режимном посту р. Уса – с. Усть-Уса, который фактически характеризует качество поверхностных вод исследуемой территории, регулярно отмечалось превышение допустимых концентраций по ряду химических компонентов: железу общему, меди, нитритам, нефтепродуктам, ХПК и др. [11].

Усинский район – основной центр нефтедобычи Республики Коми – обеспечивает $>65\%$ производимой в республике нефти и 15% газа. На начало 2016 г. в Усинском районе открыто 44 месторождения нефти и газа, добыча нефти ве-

дется на 31 месторождении, в их числе – одни из самых крупных нефтяных месторождений Центральной части России: Возейское, Верхневозейское, Усинское и др. В период с 2006 г. по настоящее время добыча нефти в Усинском районе возросла на $>40\%$ [4]. Учитывая высокую степень ($>77\%$) геологической разведанности начальных суммарных ресурсов нефти и характер локализованных объектов (мелкие с трудноизвлекаемыми запасами), можно отметить, что устойчивое развитие добычи здесь определяется не экстенсивным расширением минерально-сырьевой базы за счет открытия новых месторождений, а интенсификацией работ по повышению нефтеотдачи пластов разрабатываемых месторождений и применением новейших технологий добычи.

Прогнозные ресурсы подземных вод отдельно для Усинского района ранее не оценивались, выполнялась оценка ресурсов для всей Республики Коми и Печорского артезианского бассейна. Региональная оценка прогнозных ресурсов подземных вод на территории Республики Коми до 1990-х гг. выполнялась не менее трех раз: Е. В. Быковым (1962 г.), И. А. Конжиным (1970 г.), Н. Г. Оберманом (1984 г.). Оценка определялась в основном сработкой емкостных запасов для заданного срока эксплуатации (25–50 лет) проектируемых во-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-90018).

дозаборов, при этом питанию подземных вод практически не уделялось внимания. Впервые учет питания подземных вод выполнен при оценке прогнозных ресурсов подземных вод Республики Коми в 1999 г. ОАО “Полярноуралгеология” под руководством Г.П. Огородниковой при научно-методическом сопровождении сотрудников ЗАО “ГИДЭК” (Б.В. Боревским, Л.С. Язвиным, Л.А. Субботиным и др.) в рамках работы по оценке обеспеченности всей территории России подземными водами питьевого и хозяйствственно-бытового назначения [3, 20]. В отличие от предыдущих работ, при оценке прогнозных ресурсов были исключены: площади распространения основных водоносных горизонтов с низкими фильтрационными свойствами, с минерализацией воды $>3 \text{ г/дм}^3$, особо охраняемые территории, территории с проблематичностью создания санитарных зон. Выполненная работа – хорошая основа планирования расширения эксплуатации и дальнейшего изучения подземных вод, которые могут использоваться при разработке комплексных схем использования и охраны водных ресурсов, а также учитываться при дальнейших оценках прогнозных ресурсов [16]. В дальнейшем метод оценки прогнозных ресурсов нашел продолжение в работе по созданию комплекта гидрогеологических карт Печорского артезианского бассейна, выполненной в 2017 г. ФГУП “ВСЕГИНГЕО” под руководством Р.И. Плотниковой. В работе подробно изучены ресурсы подземных вод с минерализацией до 1 г/дм^3 с учетом геокриологических условий территории.

В предшествующих исследованиях оцененные прогнозные ресурсы подземных вод отражают общую обеспеченность территории (субъектов, гидрогеологических структур) водными ресурсами. Расчет прогнозных ресурсов выполнялся при условии одновременной эксплуатации водозаборных сооружений, расположенных по сетке, между которыми формируются водоразделы, где градиенты потока равны нулю [2, 3]. Согласно [12], оцененные ресурсы следует относить к категориям P_2 и P_3 .

В условиях нестабильного качества поверхностных вод в Усинском районе, а также с развитием нефтедобычи кондиционные пресные подземные воды позволяют существенно повысить водообеспеченность района. В предлагаемой работе изучаются “перспективные” прогнозные ресурсы подземных вод по категории P_1 на участках, уже имеющих соответствующую инфраструктуру, находящихся непосредственно рядом с водопотребителем. Согласно [12], прогнозные ресурсы категории P_1 учитывают возможность увеличения запасов на разведанных или оцененных месторождениях подземных вод, количество которых в

Усинском районе за последние 20 лет увеличилось в более чем 5 раз.

В предлагаемом исследовании оценка прогнозных ресурсов выполнена с использованием метода математического моделирования, способного описать сложные геолого-гидрогеологические условия территории, рассчитать величину привлекаемых ресурсов, формирующихся за счет поверхностных вод, и оценить латеральный поток подземных вод, которому ранее практически не уделялось внимания. Оценка прогнозных ресурсов опиралась преимущественно на материалы крупномасштабных, реже – среднемасштабных съемочных работ, а также на данные опытно-фильтрационных работ и фактические данные, полученные при бурении скважин. В работе учтены материалы по 111 разведочно-эксплуатационным, поисковым и картировочным скважинам. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами предыдущих исследований, дополняя их.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Геолого-гидрогеологическая карта и типичный разрез исследуемой территории показаны на рис. 1. Пресные и слабосолоноватые (реже соленые) подземные воды сосредоточены в триасовых, юрских и четвертичных отложениях.

Исследуемая территория имеет двухслойное строение многолетней мерзлоты: погребенная (реликтовая) и распространенная с поверхности. Реликтовая мерзлота распространена повсеместно на исследуемой территории, практически полностью промораживая отложения юрской и частично четвертичной систем. Глубина залегания кровли реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) составляет 80–200 м, подошвы – до 240–465 м. Глубокозалегающие ММП (реликтовая мерзлота) можно рассматривать как региональный водоупор, подстилающий водоносные горизонты с пресными подземными водами, перспективными для питьевых целей, и разделяющий горизонты, вмещающие слабосолоноватые и соленые воды. ММП препятствует проникновению в зону свободного водообмена некондиционных солоноватых вод из нижележащих горизонтов. Мерзлота, развитая с поверхности, распространена в северо-восточной части исследуемой территории и относится к зоне крупноостровного развития. Мощность ее колеблется от нескольких до 30 м. ММП здесь практически непроницаемые, затрудняют питание подземных вод, которое осуществляется в пределах таликовых зон долин рек.

Район принадлежит к гидрогеологической структуре II порядка – Печорскому артезианскому бассейну. В предлагаемом исследовании рас-

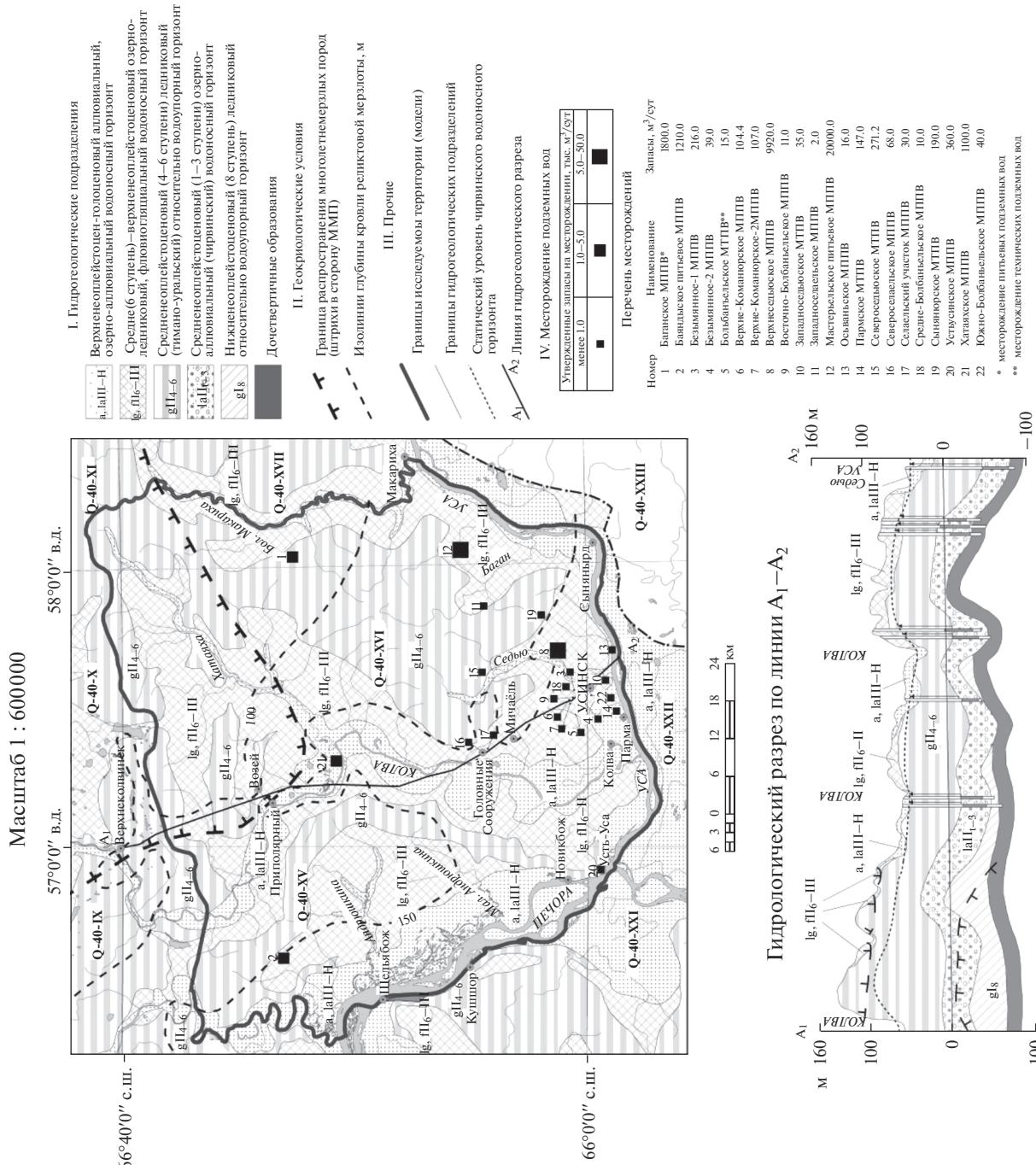


Рис. 1. Картосхема геолого-гидрологических условий исследуемой территории.

сматривается только верхняя часть разреза, представленная четвертичной системой. В гидрологическом плане в четвертичных отложениях на исследуемой территории выделяют два основных водоносных горизонта [8]: верхненеоплейстоцен-голоценовый аллювиальный, озерно-аллювиальный водоносный горизонт, имеющий локальное распространение и приуроченный к речным долинам, и средненеоплейстоценовый (1–3 ступени) озерно-аллювиальный водоносный горизонт (в местной стратификации – чирвинский) – на исследуемой территории основной водоносный горизонт для целей водоснабжения. В гидрологическом разрезе также выделяется средненеоплейстоценовый озерно-ледниковый, флювиогляциальный водоносный горизонт, не выдержаный по мощности (обычно общей мощностью до нескольких метров) и не обладающий единой уровенной поверхностью, что подтверждается региональными исследованиями [5]. Водоносность этого горизонта имеет сезонный характер при низких значениях дебита, а сам горизонт, по большей части, “транзитный” для нижележащих гидрологических подразделений.

Чирвинский водоносный горизонт распространен повсеместно, выдержан по мощности – порядка 35 м, представлен песчано-гравийно-гальчными отложениями с прослойями супесей и суглинков. Отложения горизонта сформировались в чирвинское межледниковые, при этом формирование осадков в понижениях палеорельефа происходило интенсивнее, заполняя депрессии грубоисперсным материалом. В понижениях палеорельефа в дальнейшем сформировалась современная речная сеть, которая размыла моренные образования тимано-уральского времени, перекрывающие повсеместно чирвинский водоносный горизонт [8]. Подземные воды чирвинского горизонта поровые, напорные. В целом пьезометрическая поверхность наклонена от водораздела в сторону крупных рек, дополнительно поток “перехватывается” более мелкими реками. Данное строение пьезометрической поверхности определяется местным характером питания и разгрузки потока. Межпластовое залегание чирвинского горизонта свидетельствует о том, что питание и разгрузка подземных вод происходят путем перетекания через суглинисто-глинистую толщу тимано-уральских отложений. Наличие местного питания и разгрузки подтверждается соотношением напоров в вертикальном разрезе. Если на водоразделах, бортах долин, надпойменных террасах пьезометрический уровень чирвинского горизонта располагается ниже свободных поверхностей и пьезометрических уровней вышележащих голоценовых и верхненеоплейстоценовых гидрологических подразделений, то в поймах крупных рек наблюдается инверсия этого соотно-

шения. Подтверждение этому – самоизлив подземных вод чирвинского горизонта в скважинах, пройденных в долинах рек. Водообильность чирвинского горизонта неоднородна, что объясняется различным в процентном соотношении содержанием в песчаной толще глинистых прослоев и линз, т.е. мощностью песчаной составляющей разреза. По данным опытно-фильтрационных работ, коэффициент фильтрации меняется от 0.1 до 26.4 м/сут соответственно, проводимость составляет от 6.1 до 442.0 м²/сут. Дебиты скважин – в основном 2–5 л/с. В скважинах, пройденных в современных речных долинах, где мощность песчаной части горизонта составляет 20–34 м, дебит возрастает до 7.3–14.0 л/с. Удельные дебиты меняются от 0.2 до 1.0 л/с м. По химическому составу воды соответствуют требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 [18], за исключением показателей по железу, превышение которого повсеместно в регионе. По данным [10], на участках Возейского и Усинского нефтяных месторождений зафиксированы единичные превышения допустимых концентраций по содержанию алюминия, аммония и мутности.

На исследуемой территории разведано 17 очень мелких (с запасами <1.0 тыс. м³/сут), 3 мелких (с запасами 1.0–5.0 тыс. м³/сут) и 2 средних месторождения (Верхнеседьюское МППВ и Мастерьельское МППВ с запасами 9.92 и 20.0 тыс. м³/сут соответственно) на чирвинском водоносном горизонте (рис. 1). Запасы на мелких месторождениях утверждены в 2005–2016 гг., эксплуатируются преимущественно одиночными скважинами и разрознено. Верхнеседьюское МППВ и Мастерьельское МППВ, разведанные в 1989 и 1990 гг., до настоящего времени не были востребованы (относятся к нераспределенному фонду недр).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

В рамках исследования оценка ресурсов подземных вод выполнена по категории Р₁ на участках месторождений подземных вод. Оценка прогнозных ресурсов категории Р₁ основана на результатах геологических, гидрологических, гидрохимических, гидрометрических работ и исследований в районах разведенных и оцененных месторождений [12].

Сложные геолого-гидрологические условия исследуемой территории, а именно:

пространственная неоднородность отложений четвертичных образований;

два типа мерзлоты (развитой с поверхности и реликтовой);

различные условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод;

неоднородность условий инфильтрационного питания;

наличие крупного и мелкого водоотбора, неравномерного по площади;

сложные условия формирования химического состава подземных вод

— определяют существенный разброс значений основных расчетных параметров и граничных условий. Оценка прогнозных ресурсов подземных вод выполнена гидродинамическим методом — математическим моделированием. Именно с использованием гидродинамического моделирования можно оценить реальные гидрогеологические условия на период работы действующего водоизбора и дать прогноз их дальнейшего развития с учетом дополнительной нагрузки на уже действующие водозаборы.

По геолого-гидрогеологическим условиям территории исследования представляет собой водоносную систему, состоящую из двух водоносных пластов средненеоплейстоцен(6-я ступень)-голоценовая водоносная толща и чирвинский водоносный горизонт), разделенных относительно водоупорным горизонтом (тимано-уральским). Распространение ММП гипсометрически ниже чирвинского водоносного горизонта ограничивает отток из горизонта в нижележащие гидрогеологические подразделения. Уравнения, описывающие взаимодействие фильтрационных процессов в средненеоплейстоцен(6-я ступень)-голоценовом и чирвинском пластах, содержат в качестве искомых функций: напор $H = H(t, x, y)$ в чирвинском горизонте и уровень грунтовых вод $h = h(t, x, y)$. В дальнейшем предполагается, что в пластах, перекрывающих чирвинский водоносный горизонт, можно пренебречь фильтрацией в горизонтальном направлении. Это упрощение предложено в работах [7, 15] для задач в неоднородно-слоистых пластах. В приближении Мятиева–Гиринского движение воды описывается уравнениями (1):

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial h}{\partial t} = Q_{\text{vert}} + R \\ \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) - Q_{\text{vert}} + q_{\text{well}} + q_{\text{riv}} \end{cases} \quad (1)$$

где μ , μ^* — коэффициент гравитационной и упругой емкости; T — проводимость проницаемого изотропного слоя в горизонтальном направлении; Q_{vert} — поток подземных вод из напорного горизонта в безнапорный; R — инфильтрационное питание; q_{well} и q_{riv} — интенсивность поступления воды в горизонт из скважин и рек соответственно в расчете на единицу площади (в случае водоизбора из скважин величина q_{well} отрицательна). Поток

подземных вод из напорного горизонта в безнапорный задается соотношением:

$$Q_{\text{vert}} = k_0 \frac{H - h}{m_0}, \quad (2)$$

где k_0 — коэффициент вертикальной фильтрации слабопроницаемого слоя; m_0 — мощность слабопроницаемого слоя (в случае, если уровенная поверхность располагается ниже подошвы средненеоплейстоцен(6-я ступень)-голоценовых отложений, $m_0 = m_0(h)$ равна расстоянию по вертикали от кровли чирвинского горизонта до поверхности грунтовых вод).

Стоит отметить, что гидрогеологическое строение на большей части исследуемой территории способствует тому, что инфильтрационное питание поступает сразу же в слабопроницаемый слой тимано-уральских отложений. При подсчете прогнозных ресурсов подземных вод следует ориентироваться на весьма длительный, практически неограниченный период эксплуатации, поэтому в работе использована стационарная версия уравнений (1). В этом случае $Q_{\text{vert}} = -R$ и задача сводится к одному уравнению относительно напора $H(x, y)$:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) - Q_{\text{vert}} + q_{\text{well}} + q_{\text{riv}} = 0, \quad (3)$$

а соотношение (2) может использоваться при необходимости для определения оставшейся искомой функции $h(x, y)$ и/или для уточнения значений параметров. Исходная нестационарная форма уравнений (1) позволяет исследовать устойчивость и стабилизацию решений при меняющихся во времени условиях в различных практических задачах (например, [1, 14, 21]).

Уравнение (3) следует дополнить краевыми условиями и соотношениями, связывающими “источниковые” члены q_{riv} и q_{well} с искомой функцией $H(x, y)$. В качестве последних принимаются формулы:

$$q_{\text{riv}} = T_{\text{riv}} (H_{\text{riv}} - H) \quad (4)$$

и

$$q_{\text{well}} = T (H_{\text{well}} - H), \quad (5)$$

где H_{riv} и H_{well} — уровни воды в реке и в скважине соответственно, T_{riv} и T — эмпирические коэффициенты, нормируемые на единицу площади.

Отметим, что форма уравнения (1) с выражениями (4) и (5) подразумевает, что при численных решениях задач размер расчетных ячеек должен быть больше ширины реки и характерного размера воронки депрессии около скважины.

Порядок коэффициента T_{riv} определяется интегральной вертикальной проводимостью подрусловых отложений. Последняя оценивается по типу этих отложений со значительными допущениями.

Поэтому при практических расчетах величину T_{riv} имеет смысл определять в процессе калибровки модели. Коэффициент T зависит от горизонтальной проводимости пласта, от конструкционных особенностей скважины, а также может содержать поправки, связанные с конечными размерами ячейки и положением скважины в ней. Информация о детальном распределении проводимости горизонта вокруг скважины известна со значительными погрешностями, поэтому выбирать значение T с помощью теоретического решения задачи о скважине нецелесообразно. T выбиралось в диапазоне, соответствующем данным, полученным в результате опытных откачек, а затем уточнялось калибровкой численной модели. Определенные в результате этой процедуры коэффициенты учитывают и неравномерность распределения проводимости, и конструкционные особенности скважин, и поправки, связанные с геометрией ячеек.

Численное решение уравнения (3) строилось в программной системе "ModTech" (ЗАО "Геолинк Консалтинг", 2008) и проведено на основе метода конечных разностей (т.е. метода сеток).

ГЕОФИЛЬРАЦИОННАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ

При построении модели изначально были определены ее размеры, а также описаны внешние границы. При этом было учтено несколько действующих факторов, а именно:

- исходный масштаб исследования;
- минимальное влияние водоотбора на внешние границы модели;
- конфигурация депрессионных воронок;
- естественные подземные водоразделы по основному эксплуатационному горизонту;
- границы речных водосборных бассейнов;
- границы месторождений подземных вод.

Основным критерием при выборе шага сетки была густота распределения имеющихся и проектируемых водопотребителей городских и сельских населенных пунктов на оцениваемой территории, при этом также была учтена природная обстановка, определяющая условия и возможность размещения объектов водопотребления (характер рельефа местности, заболоченность, наличие месторождений полезных ископаемых и др.). В целом природную обстановку можно оценить как одинаковую по площади, а именно – полого-холмистый рельеф на всей территории с локальной заболоченностью (в понижениях рельефа). Густота размещения населенных пунктов неравномерна по площади и в основном определяется наличием крупных транспортных артерий: автомобильных, железнодорожных и речных. В местах отсутствия дорожной сети населенные пункты практически отсутствуют, расстояние между ни-

ми сильно варьирует – от 2 до 25 км. В пределах территории исследования рассмотрено 111 гидрологических скважин (картировочных, поисковых, разведочно-эксплуатационных и др.), среднее расстояние между которыми составляет 2.8 км, причем у трети скважин это расстояние < 1 км. На основе этого выбрана достаточно крупная для данного масштаба исследования ортогональная сетка размером 500 м на 500 м, позволяющая детально отобразить особенности формирования гидрологических условий и водоотбора на исследуемой территории. При использовании специальных программных средств, способных интерполировать исходную информацию на модельные блоки, выбор шага сетки обоснован.

Внешние границы модели определены граничным условием III рода [19] (на В – р. Большая Макариха, на ЮВ и Ю – р. Уса, на ЮЗ – р. Печора; на З – р. Лая) и граничным условием I рода (на С – водораздел). По данным предшествующих исследований, конфигурация гидроизогипс в чирвинском водоносном горизонте вблизи этих рек резко меняется, что позволяет принять их за гидрологически обусловленные внешние границы. В плановом потоке также определены внутренние границы III и II родов [19], заданные по водотокам и скважинам.

После определения внешних границ общая площадь модели составила 5815.8 км² при количестве блоков 23 263.

Схематизация модели в разрезе определяется развитием на территории основных водоносных горизонтов (комплексов) и разделяющих слабопроницаемых отложений, наличием необходимого и достаточного фактического материала по основным эксплуатационным горизонтам, опытом регионального моделирования. На основе этого определен 1 водоносный горизонт – 1 расчетный слой. Чирвинский водоносный горизонт, развитый повсеместно, выдержаный по мощности (35 м), – основной источник водоснабжения в Усинском районе. Горизонт определен как напорный. Для решения задачи использована стационарная геофильтрационная модель.

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

На следующем этапе модельная база была наполнена необходимой и достаточной информацией – параметрами. После определения численного метода необходимыми параметрами для решения задачи были: инфильтрационное питание, проводимость чирвинского водоносного горизонта и интегральная проводимость подрусловых отложений. Основные данные для построения модели получены при использовании компьютерной картографической и фактографической баз данных.

Картографическая часть базы включает в себя топографические, геологические, структурные и другие карты масштабов 1 : 50 000, 1 : 100 000, 1 : 200 000, 1 : 500 000 и 1 : 1 000 000.

Фактографическая часть базы содержит:

- информацию о величинах водоотбора по эксплуатационным скважинам;
- информацию об уровне подземных вод по режимным и эксплуатационным скважинам в разные моменты времени;
- описание геологических колонок скважин;
- данные об оборудовании скважин;
- результаты опытно-фильтрационного опробования, материалы по условиям лицензирования и т.д.

Параметр инфильтрационного питания задан по ландшафтному признаку, для этого использована информация региональных исследований всего Печорского артезианского бассейна. В результате определено 5 типов ландшафтов на исследуемой территории: лес с зоной аэрации, представленной супесями; лес с зоной аэрации, представленной суглинками; речные долины с зоной аэрации, представленной супесями и песками; зона распространения ММП с поверхности; селитебные территории. Каждому ландшафту присвоены величины интенсивности инфильтрационного питания подземных вод исходя из условия, что величина инфильтрационного питания составляет от 1 до 30% от среднегодовой суммы осадков, поступающих на поверхность на незастроенных территориях, минус среднегодовое испарение с поверхности (при этом градация инфильтрационного питания напрямую зависит от растительности в ландшафте и состава зоны аэрации) и до 50% – на застроенных территориях за счет дополнительного питания – утечек. Для зоны распространения поверхностной мерзлоты присвоено значение 0. Соответственно, рассмотрен диапазон от 9.2×10^{-6} до 2.8×10^{-4} м/сут для незастроенных территорий и до 4.6×10^{-4} м/сут для селитебных зон. Стоит отметить, что при определении значения параметра был принят ряд допущений: типизация условий формирования инфильтрационного питания рассмотрена по одному признаку – ландшафтному, метеоусловия приняты одинаковыми для всей территории, не учтена глубина залегания подземных вод, состав зоны аэрации упрощен и пр.

Параметр проводимости чирвинского горизонта задан исходя из результатов ранее проведенных опытно-фильтрационных работ (в основном, одиночных откачек) при разведке и оценке на участках месторождений. По ретроспективным данным, проводимость чирвинского водоносного горизонта варьирует от 6.1 до 442.0 м²/сут. При этом с учетом особенностей геокриологиче-

ских и гидрогеологических условий выделено три зоны: повышенной проводимости (приурочена к понижениям палеорельефа, в пределах которых развита современная речная сеть), зона вне распространения ММП и зона с ММП, где горизонт частично проморожен.

Величина интегральной проводимости подрусловых отложений определяется в основном коэффициентом фильтрации подрусловых отложений. По данным [5], отложения русла р. Колвы (ее аналоги – реки Лая, Большая Макариха) представлены песками, супесями, суглинками и галечниками; отложения русел крупных рек Печоры и Усы, относящиеся к горбуновскому горизонту, представлены среднезернистыми песками и галечниками. Характерная черта малых водотоков – их заиливание, приводящее к заболачиванию. Таким образом, можно судить об увеличении коэффициента фильтрации ложа рек и, соответственно, интегральной проводимости от малых водотоков к крупным.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Для калибровки гидрогеодинамической модели подземных вод Усинского района решена обратная задача с использованием отметок уровней чирвинского водоносного горизонта за 2016 г. Решение обратной задачи сводилось к последовательному решению серии прямых задач с перебором расчетных параметров модели: проводимости чирвинского водоносного горизонта, инфильтрационного питания, интегральной проводимости подрусловых отложений.

Проведена оценка достоверности модели по достижению приемлемой сходимости модельных и фактических данных по уровням подземных вод. Величина допустимой невязки между уровнями определена исходя из следующих факторов:

замеры уровня выполнены в эксплуатационных скважинах, уровень в которых не восстановился после отключения насоса;

замеры глубины уровней проведены не единовременно и не учитывают поправку на межень и паводок;

фактический уровень относится к центру блока, а скважина в действительности может быть расположена на его границе;

погрешность определения высотной отметки скважины – 5–10 м [17].

Исходя из этого, доверительный интервал принят равным 10% от перепада напоров по всей моделируемой области [6]. Максимальный перепад составляет 70 м (от $H = 100$ м – абсолютная отметка уровня на водоразделе между Колвой и Большой Макарихой до $H = 30$ м в районе с. Усть-Уса); таким образом, доверительный интервал составил 7 м. Под верификацией модели понима-

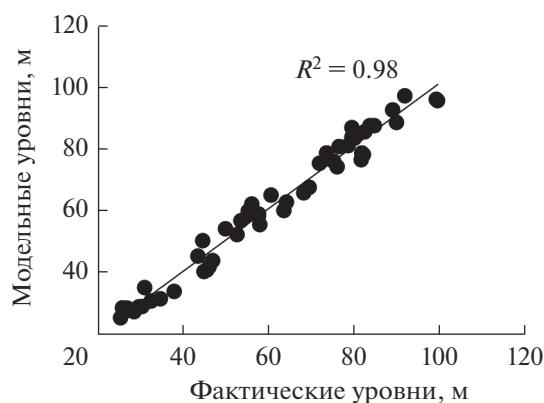


Рис. 2. Соотношение между модельными и фактическими уровнями подземных вод чирвинского водоносного горизонта (обратная задача на 2016 г.).

ется такой выбор ее параметров, при котором разница между измеренными и расчетными значениями напоров по всем скважинам попадает в доверительный интервал.

По достижении критерия согласования получена верифицированная модель, адекватная природно-техногенной обстановке на территории исследования. Невязка модельных и фактических уровней чирвинского водоносного горизонта – в диапазоне от –6.2 до 6.3 м (рис. 2).

Инфильтрационное питание составило, м/сут: для лесного ландшафта, сложенного преимущественно суглинками, -2.5×10^{-5} ; для сложенного преимущественно супесями -5×10^{-5} ; для речных долин -1×10^{-4} ; для зоны распространения поверхностной мерзлоты – 0; для селитебных территорий и земель, отведенных под сельскохозяйственные угодья, -4×10^{-4} . Полученные величины инфильтрационного питания для Усинского района не противоречат предшествующим региональным оценкам – на уровне 20–40 мм/год [9, 13].

Таблица 1. Формирование модельного баланса

Статья баланса	Ненарушенное состояние, м ³ /сут	При водоотборе					
		сценарий 1			сценарий 2		
		Q, м ³ /сут	δ, м ³ /сут	δ, %	Q, м ³ /сут	δ, м ³ /сут	δ, %
Поступление							
Инфильтрационное питание	289162	289162	0	–	289162	0	–
Приток из рек	58800	59876	1076	18.6	91511	32711	41.6
Расходование							
Отток в реки	–347962	–343266	4696	81.4	–302028	45934	58.4
Скважины	0	–5771.6	–5771.6	–	–78645	–78645	–
Итого	0	0	0	100	0	0	100

Интегральная величина проводимости подрусловых отложений составила, м²/сут: для малых рек – 250, для верхнего течения средних рек – 500, для среднего и нижнего течения средних рек – 1000, для крупных рек (Уса и Печора) – 2000.

Проводимость чирвинского водоносного горизонта составила, м²/сут: в пределах внemerзлотной части исследуемой территории – 60; там, где чирвинский водоносный горизонт частично проморожен, в 2 раза меньше – 30; в пределах речных долин – 100.

Все модельные величины укладываются в диапазоны, заложенные на этапе формирования модели. По результатам решения обратной задачи получено модельное распределение напоров в чирвинском водоносном горизонте. Итоговый баланс гидрологической модели формируется за счет изменения количества воды на границе модельного слоя. Формирование баланса происходит в основном за счет рек – 58% (приток из рек – 8, отток в реки – 50) и инфильтрационного питания – 42% (табл. 1).

РЕШЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ ЗАДАЧ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе верифицированной модели осуществлено 2 сценария воздействия на гидрологическую обстановку. При решении прогнозных задач допустимое понижение уровня подземных вод определено разницей между абсолютными отметками модельного уровня (обратная задача) и кровлей чирвинского водоносного горизонта.

Сценарий 1. Организация водоотбора на месторождениях распределенного фонда недр (20 мелких месторождений) в объеме утвержденных запасов 5771.6 м³/сут

На разведанных участках 20 мелких месторождений распределенного фонда недр организован водоотбор, равный утвержденным запасам в пол-

ном объеме ($5771.6 \text{ м}^3/\text{сут}$). При данном сценарии максимальное понижение в эксплуатационных скважинах составило 26.7 м (Баганское МППВ). Запас предельно допустимого понижения (до кровли водоносного горизонта) составил от 39.0 (Баганское МППВ) до 58.7 м. При данном сценарии возможно существенное наращивание водоотбора.

Формирование баланса чирвинского водоносного горизонта происходит за счет, %: рек – 58 (приток из рек – 9, отток в реки – 49), инфильтрационного питания – 41, водоотбора скважинами – 1 (табл. 1). При этом сценарии произошло перераспределение статей баланса по сравнению с модельным балансом, полученным при обратной задаче, за счет сокращения оттока в реки на 1.8% и увеличения питания из рек на 1.3%.

Сценарий 2. Максимально возможный водоотбор на месторождениях распределенного фонда недр

Запасы на месторождениях зачастую оцениваются исходя не из гидрогеологических условий, а из заявленной потребности недропользователя. С учетом данного факта на таких месторождениях возможно существенное наращивание водоотбора за счет прогнозных ресурсов категории P_1 . Чтобы учесть взаимодействие всех водозаборных скважин, целесообразно использование постоянно действующих моделей или верифицированной модели на определенный год. Таким образом, максимально возможный водоотбор на участках недр будет определяться суммой запасов и прогнозных ресурсов категории P_1 при сохранении заданных ограничений.

Стоит отметить, что запасы на Верхнеседьюском МППВ и Мастерьельском МППВ, оцененные в 1989 и 1990 гг., уже несколько раз пересматривались в сторону их сокращения и до настоящего времени так и не были востребованы (относятся к нераспределенному фонду недр). Запасы при их сроке давности постановки на учет должны быть сняты с баланса, так как за более чем 30 лет переоценка запасов на месторождениях не была проведена. С учетом этого запасы на данных участках целесообразно отнести к “неликвидным” и не учитывать при моделировании, на остальных участках месторождений (20 мелких) организовать максимально возможный водоотбор до достижения допустимого понижения.

Данный сценарий на модели может реализовываться двумя способами:

перебор расходов в каждой эксплуатируемой скважине до получения предельно допустимого понижения ($Q = \text{const}$);

задание абсолютной отметки кровли водоносного горизонта в блоках с эксплуатируемыми скважинами и получение распределения расходов в этих узлах ($H = \text{const}$);

комбинированный способ.

Для решения сценария 2 использован комбинированный способ. Сначала были получены расходы путем задания постоянного уровня. Далее полученные расходы наращивались до получения допустимого понижения в пределах 0–1 м. При данном сценарии максимальное понижение в эксплуатационных скважинах составило 66.9, минимальное – 49.1 м. Суммарный расход на месторождениях распределенного фонда недр – $78645 \text{ м}^3/\text{сут}$. Таким образом, прогнозные ресурсы категории P_1 на этих участках составляют $72873.4 \text{ м}^3/\text{сут}$. При данном сценарии запасы подземных вод на этих участках можно увеличить в 13.6 раз.

Формирование баланса чирвинского водоносного горизонта происходит за счет, %: рек – 52 (приток из рек – 12, отток в реки – 40), инфильтрационного питания – 38, водоотбора скважинами – 10 (табл. 1). При этом сценарии произошло перераспределение статей баланса по сравнению с модельным балансом, полученным при обратной задаче, за счет сокращения оттока в реки на 55.6% и увеличения питания из рек на 13.2%.

ОЦЕНКА УЩЕРБА РЕЧНОМУ СТОКУ

Оценка ущерба речному стоку выполнена при максимально возможном водоотборе на 20 мелких месторождениях распределенного фонда недр (сценарий 2 – $78645 \text{ м}^3/\text{сут}$). При этом максимальный ущерб стоку в пределах речного бассейна не должен превышать 80% (при условии, что подземный сток в реки рассчитан по наиболее жесткому критерию 95%-й обеспеченности наименьших средних за 30 сут в период зимней межени), на практике эта величина возвратных вод, т.е. максимальный региональный ущерб речному стоку (за счет безвозвратных потерь, в основном – испарения) составляет $\leq 20\%$.

В табл. 2 приведена информация об изменении речного стока под влиянием прогнозного водоотбора за счет сокращения разгрузки подземных вод и увеличения притока из рек. Отметим, что весь объем подземной составляющей среднемноголетнего речного стока формируется непосредственно на его территории. Расчеты ущерба речному стоку приводятся без учета бытовых и промышленных сбросов воды (оборотные воды). Для того чтобы оценить реальный ущерб стоку рек, выбраны два частных водосборных бассейна: рек Колвы и Седью, по которым имеются фактические данные о меженном стоке 95%-й обеспеченности. Эти бассейны достаточно представительные, поскольку имеют большую площадь водосбора ($>300 \text{ км}^2$), а также в них наблюдается максимальное изменение стока при модельном

Таблица 2. Ущерб речному стоку при максимальном водоотборе

Речной бассейн	Площадь бассейна, км ²	Изменение стока (сценарий 2)		Ущерб речному стоку, %
		Расход 95%	тыс. м ³ /сут	
Колва	2414.0	37.3	4838.4	0.8
Седью	322.7	24.8	53.6	46.3

водоотборе. Ущерб в других реках в разы меньше, чем в р. Седью – аналоге для средних рек: Баган, Малой Андрюшкиной и др. Ущерб стоку на р. Колве составил <1%, на р. Седью – 46%.

При перспективном водоотборе ущерб речному стоку незначителен и в пределах допустимого, увеличение водоотбора на исследуемой территории не приведет к заметным изменениям сложившегося к настоящему времени баланса подземных вод.

ВЫВОДЫ

Исследованы геологические и гидрогеологические условия восточной части Печорского артезианского бассейна, построена математическая геофильтрационная модель, с помощью которой оценены прогнозные ресурсы категории Р₁ в объеме 72873.4 м³/сут для перспективной потребности развивающегося городского округа Усинск и основные источники формирования баланса подземных вод.

Решение прогнозной задачи по модели показало, что на уже разведенных участках месторождений распределенного фонда недр возможно наращивание запасов в 13.6 раз по сравнению с утвержденными. Таким образом, суммарный водоотбор в 78645 м³/сут (при утвержденных запасах на месторождениях распределенного фонда недр – 5771.6 м³/сут) может рассматриваться для перспективного развития региона, так как модельные понижения уровней оказались меньше допустимых, т.е. заявленная потребность в воде надежно обеспечивается этими водозаборами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А.Ю., Кричевец Г.Н., Ахметьева Н.П. Методы теории фильтрации в задачах, возникающих при обводнении болотных массивов // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 385–395.
2. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеотехиздат, 1963. 204 с.
3. Боревский Б.В., Язвин Л.С. Оценка обеспеченности населения Российской Федерации ресурсами подземных вод для хозяйствственно-питьевого водоснабжения (Методические рекомендации по проведению второго этапа работы). М.: ГИДЭК, 1995. 72 с.
4. Бурый О.В., Калинина А.А., Луканичева В.П. Роль топливного сектора субарктических районов в экономике Республики Коми // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 5 (29). С. 65–76.
5. Водолазская В.П., Опаренкова Л.И., Зархидзе Д.В., Иванов Н.Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Сер. Уральская. Лист Q-40 – Печора. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 365 с.
6. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1980. 358 с.
7. Гиринский Н.К. Некоторые вопросы динамики подземных вод // ВСЕГИНГЕО. Гидрогеология и инженерная геология. 1947. № 9. С. 27–32.
8. Егоров Т.С., Ершов В.В. Особенности гидрогеологического расчленения плиоцен-четвертичных отложений печорского артезианского бассейна // Разведка и охрана недр. 2015. № 8. С. 32–36.
9. Зекцер И.С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Науч. мир, 2012. 374 с.
10. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2018 г. Вып. 42. Тверь: Талан Групп, 2019. 294 с.
11. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодники за 2011–2018 гг. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГХИ.
12. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. М.: МПР России, 2007.
13. Коноплянцев А.А. Подземный сток территории Центральной и Восточной Европы. М.: ВСЕГИНГЕО, 1982. 288 с.
14. Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Обработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи // Разведка и охрана недр. 1968. № 10. С. 34–38.
15. Мятисев А.Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы // Изв. АН СССР. Отд. тех. наук. 1947. № 9. С. 106–1088.
16. Плотникова Р.И., Лукьянчиков В.М. К оценке прогнозных ресурсов подземных вод // Разведка и охрана недр. 2013. № 3. С. 7–10.
17. Рошаль А.А., Потапова Е.Ю. Гидродинамическое и миграционное моделирование при оценке запасов

- подземных вод (на примере Московского региона) // Недропользование XXI век. 2012. № 2 (33). С. 70–75.
18. СанПиН 2.1.4.1074-01. “Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества”.
19. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
20. Язвин Л.С. Оценка прогнозных ресурсов питьевых подземных вод и обеспеченность населения России подземными водами для хозяйственно-питьевого водоснабжения // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 13–20.
21. Belyaev A. Yu., Krichevets G. N. Qualitative effects of hydraulic conductivity distribution on groundwater flow in heterogeneous soils // Fluids. 2018. V. 3. Iss. 4. P. 102.
<https://doi.org/10.3390/fluids3040102>