

Санкт-Петербургский государственный университет

КОТОВА Ольга Михайловна

Выпускная квалификационная работа

Оценка ресурсного потенциала вендского водоносного комплекса на базе численного моделирования на примере Ленинградской области

Уровень образования:

Направление *05.04.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *ВМ.5515.2018 «Геология»*

Профиль «Инженерная геология»

Научный руководитель:

доцент кафедры гидрогеологии

Института наук о Земле СПбГУ, к.г.-м.н

Виноград Наталия Анатольевна

Научный консультант:

ведущий специалист РЦ РДМИ

Научного парка СПбГУ, к.г.-м.н

Токарев Игорь Владимирович

Рецензент:

Директор по научной работе ООО

«Водный центр СПбГУ», к.г.-м.н, доцент

Коносавский Павел Константинович

Санкт-Петербург

2020

Содержание

Введение.....	3
1 Физико-географическая характеристика района работ	5
2 Геологическое строение района работ	11
3 Гидрогеологическая характеристика района работ	18
4 Условия формирования ресурсов вендского водоносного комплекса.....	27
4.1 Методы оценки: интерпретация изотопных данных.....	28
4.2 История развития Беломоро-Балтийского региона в позднечетвертичное время	29
4.3 Изотопные данные и их интерпретация	31
4.4 Формирование палеодолин	37
5 Численная геофильтрационная модель	39
6 Прогноз влияния техногенной нагрузки	57
6.1 Современное состояние.....	57
6.2 Сохранение текущего водоотбора (прогноз на 25 лет).....	58
6.3 Увеличение водоотбора в 2 раза (прогноз на 25 лет).....	60
6.4 Прогноз максимально допустимого водоотбора.....	61
6.5 Прогноз максимально допустимого водоотбора с учётом климатических вариаций ..	63
7 Оценка влияния палеоклиматических условий.....	65
7.1 Похолодание	66
7.2 Потепление	69
Заключение.....	73
Список использованных источников и информационных материалов	75

Введение

Тема выпускной квалификационной работы (ВКР) для получения степени магистра геологии «Оценка ресурсного потенциала вендского водоносного комплекса на базе численного моделирования на примере Ленинградской области» была выбрана как развитие бакалаврской выпускной квалификационной работы «Составление численной геофильтрационной модели вендского водоносного комплекса с целью уточнения его области питания».

Объект исследования: вендский водоносный комплекс на территории Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург.

Актуальность темы определяется тем, что ресурсы вендского водоносного комплекса используются для хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения Карельского перешейка и части северных районов Санкт-Петербурга, являются резервом на случай чрезвычайных ситуаций и в особый период, местами эксплуатируются в бальнеологических целях. Необходимость принятия корректных управленческих решений в области природопользования делают актуальным создание численной геофильтрационной модели водоносного комплекса, позволяющей произвести прогнозную оценку воздействия антропогенной нагрузки на его ресурсный потенциал с учётом сложившейся ситуации и перспективного роста водопотребления в рамках условий, определяемых природными и техногенными факторами.

Новизна исследования заключается в том, что создана численная геофильтрационная модель вендского водоносного комплекса для калибровки и актуализации которой, кроме предусмотренной нормативными документами информации, использованы данные об изотопном составе воды. Выполнена а) оценка влияния техногенной нагрузки на водоносный комплекс, в том числе, с учётом долговременного изменения ресурсов подземных вод под влиянием вероятных климатических изменений и б) рассмотрены изменения условий формирования запасов вендского комплекса при различных сценариях географо-климатического развития территории в позднем плейстоцене и голоцене.

Цель: оценка значимости климатических изменений и антропогенного воздействия на ресурсный потенциал вендского водоносного комплекса в пределах Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург посредством численного моделирования.

Задачи:

- 1) обобщение результатов изучения физико-географических условий, геологического и гидрогеологического строения района исследования на базе опубликованных и фондовых материалов;

- 2) анализ реконструкций условий формирования ресурсов и химического состава подземных вод в ходе климатических вариаций;
- 3) обобщение материалов по геолого-гидрогеологическим условиям Карельского перешейка и истории эксплуатации вендского водоносного комплекса;
- 4) построение численной модели водоносного комплекса в пределах Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург;
- 5) калибровка модели с учётом взаимодействия с перекрывающимися отложениями и трещиноватой зоной фундамента;
- 6) модельная оценка влияния техногенной нагрузки на ресурсы вендского водоносного комплекса, в том числе, с учётом вероятных изменений климата;
- 7) модельная реконструкция долговременных изменений условий формирования ресурсов и качества подземных вод вендского водоносного комплекса под влиянием климатических изменений в плейстоцене и голоцене.

Методология работ. В рамках выполнения ВКР осваиваются три основных методологических компонента 1) анализ фондовой и опубликованной литературы; 2) генерализация параметрического наполнения модели и воднобалансовых показателей; 3) получение прогнозных оценок с помощью математического (численного) моделирования. В ходе написания выпускной квалификационной работы используются следующие программные продукты: Processing Modflow 8 (программа для численного гидрогеологического моделирования), ArcGIS 10 (геоинформационная система), CorelDraw 18 (векторный графический редактор), Surfer 15 (картографический редактор), стандартный пакет MS Office 2016 (Word, Excel, Access, PowerPoint), Adobe Acrobat DC. Программы были предоставлены кафедрой гидрогеологии СПбГУ и РЦ РДМИ НП СПбГУ.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту Игорю Владимировичу Токареву за общее руководство работой, ценные советы и предоставленные материалы, научным руководителям А.А. Потапову (на 1 курсе) и Н.А. Виноград (на 2 курсе) за решение организационных вопросов, директору по научной работе ООО «Водный центр СПбГУ» П.К. Коносавскому за предоставленные материалы и советы по моделированию, главному гидрогеологу АО «Северо-Западное ПГО» Г.Ю. Воронюку за предоставленные материалы, ФБУ «Территориальные фонды геологической информации по Северо-Западному федеральному округу» за предоставленные материалы.

1 Физико-географическая характеристика района работ

Административное положение

Исследуемая территория (выделена на рисунке 1 красным прямоугольником) расположена на Северо-Западе Российской Федерации. Её площадь составляет 19,2 тыс. км². Она охватывает г. Санкт-Петербург и часть районов Ленинградской области (Выборгский, Приозерский и Всеволожский, расположенные на Карельском перешейке, и Ломоносовский, Волосовский, Гатчинский, Тосненский и Кировский, расположенные к югу от р. Невы и Финского залива).

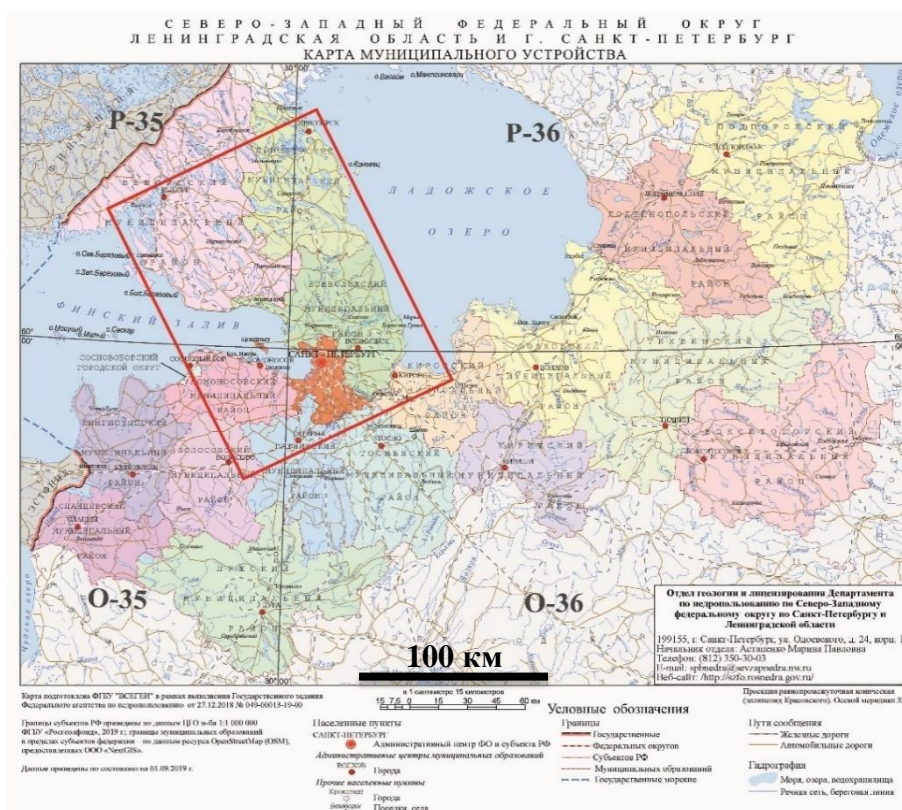


Рисунок 1. Карта муниципального устройства Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга. Здесь и далее: красным прямоугольником выделена граница исследуемой территории. Источник: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019 (<http://atlaspacket.vsegei.ru/>)

Рельеф

Рельеф исследуемой территории разнообразен по морфологии и генезису. В гипсометрическом отношении она расположена в северо-западной части Восточно-Европейской равнины на Прибалтийской низменности, где отчётливо выделяется ряд местных понижений и возвышенностей. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017) Физическая карта территории приведена на рисунке 2.

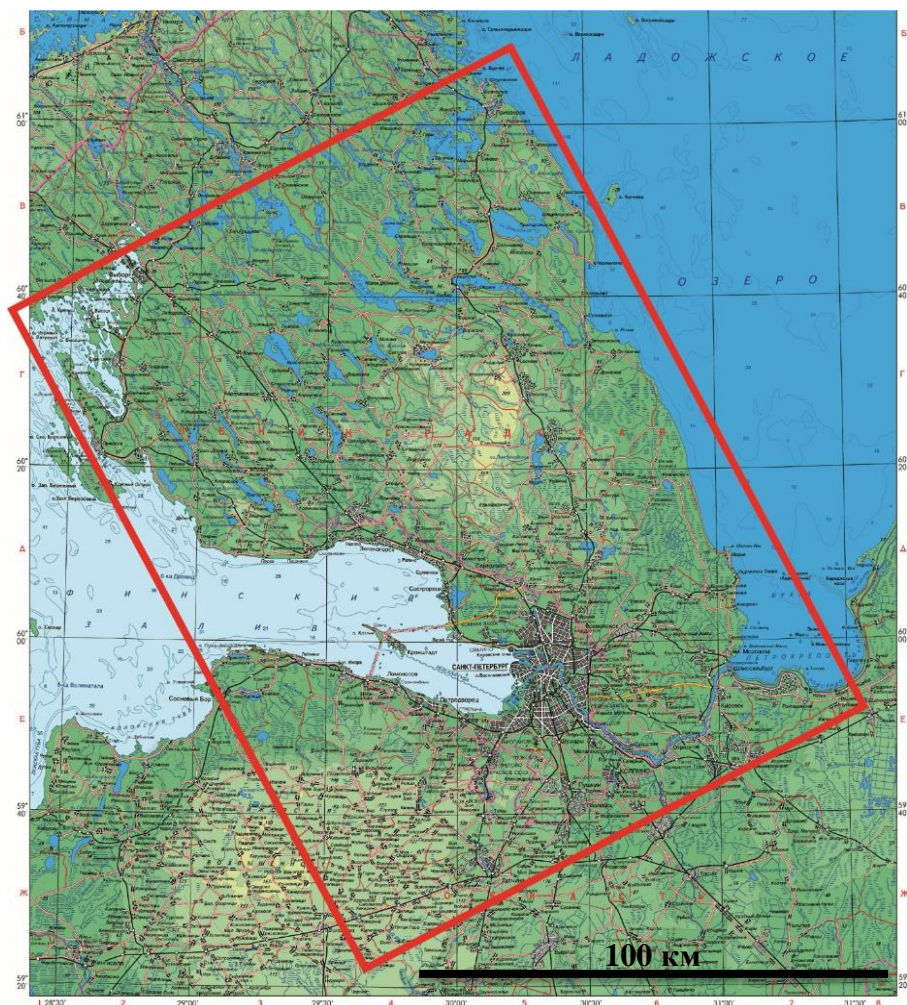


Рисунок 2. Физическая карта Карельского перешейка, г. Санкт-Петербург и его окрестностей (фрагмент). Источник: <https://geographyofrussia.com/karta-karelskij-peresheek-sankt-peterburg-i-okrestnosti/>

Территория делится на три части: низменную – Вуоксинская, Приморская низины, Приневская и Приладожская низменности; возвышенную – Лемболовская и Ижорская возвышенности и равнинную – Приморская равнина. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Вуоксинская низина расположена в северной части Карельского перешейка. Она приуроченная к зоне глубокого прогиба фундамента. Поверхность низины с абсолютными отметками 5-50 м наклонена к Ладожскому озеру. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Южнее территорию занимает Лемболовская возвышенность (Центральная возвышенность Карельского перешейка). Она представляет сочетание холмов и гряд с относительными высотами в среднем 20-30 м, изредка 60-70 м с преобладающими абсолютными отметками высот 130-180 абс. м. Общее повышение поверхности происходит с запада на восток и близ восточного склона возвышенности её абсолютные отметки достигают максимума – 205,4 абс. м. Возвышенность сильно расчленена речной сетью, глубина врезки которой составляет 20-30 м. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Приморская равнина занимает обширную территорию в центре Карельского перешейка, окаймляя Лемболовскую возвышенность. Её абсолютные отметки составляют от 40 до 110 абс. м, Приморская равнина имеет ряд террас, которые чётко выражены до абсолютных отметок 45-50 абс. м системой уровней, разделённых уступами высотой 2-10 м или пологими склонами на более возвышенных участках территории. В целом, равнина представляет собой ряд крупных эрозионно-экзарационных останцов, в понижениях между которыми располагаются современные водотоки, водоёмы и болота. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Предглинтовая низменность охватывает южное побережье Финского залива, Приневскую и Приладожскую впадины. Южная граница низменности проходит по Балтийско-Ладожскому уступу (глинту). Рельеф этой территории плоский, спускающийся несколькими террасами к заливу и Ладожскому озеру. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Приневская низменность представляет собой, в основном, заболоченную, плоско-волнистую террасированную равнину, относительные превышения которой обычно не более 5 м. С севера она ограничена камовыми холмами Карельского перешейка. Абсолютные высоты изменяются от 30 до 0 абс. м со ступенчатым опусканием к Финскому заливу и р. Нева. Ширина Приневской низменности составляет 35-50 км. Общий равнинный характер нарушается наличием отдельных грядовых и островных возвышенностей в южной части Карельского перешейка с абсолютными отметками до 85-90 абс. м. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Приладожская низменность прослеживается широкой полосой вдоль западного побережья Ладожского озера. Абсолютные отметки постепенно повышаются от Ладожского озера на запад от 4,3 абс. м (уровень Ладожского озера) до 30-40 абс. м. Плоская Приладожская низменность на больших пространствах сильно заболочена. Вдоль побережья Ладожского озера протягиваются серии параллельных песчаных пологих гряд с сухими сосновыми борами, являющихся древними береговыми валами. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Приморская низина охватывает узкую прибрежную зону вдоль северного и южного побережья Финского залива, а в его восточной части ширина низины существенно расширяется до 3-12 км. С юга она ограничивается глинтом. Приморская низина также занимает центральную западную часть Карельского перешейка. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Ижорская возвышенность является частью Ордовикского плато и имеет абсолютные отметки поверхности до 120-175 абс. м. С севера оно ограничено Балтийско-Ладожским

уступом (глинтом) общего широтного направления, высотой до 25 м. (Отчёт о создании современной гидрогеологической карты ЛАБ., 2007)

Гидрография

Все водотоки на рассматриваемой территории принадлежат бассейну Балтийского моря и имеют сток в Ладожское озеро или в Финский залив. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Финский залив вытянут с запада на восток на 420 км, его площадь около 29,5 тыс. км². Южный берег изрезан слабо, большей частью низменный и песчаный, лишь на ограниченных участках, где глинт подступает к морю, обрывистый. Северный берег сложен кристаллическими породами, сильно изрезан и имеет многочисленные заливы и скалистые острова. Финский залив неглубокий (средняя глубина – 38 м), глубина Невской губы – 2,5-6 м, а в береговой полосе до 1 м. Солёность Финского залива невысокая – всего 6‰. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Ладожское озеро – самое большое из пресноводных озёр Европы. Оно образовалось в доледниковой тектонической впадине. Его площадь с островами – 18,3 тыс. км², длина 200 км, ширина 125 км. Высота над уровнем моря – 4,3 м. Средняя глубина озера – 50 м, а наибольшая – 233 м (севернее острова Валаам). Северные берега – изрезанные, крутые, южные – низкие, заболоченные. Кроме Ладожского, на территории имеется большое количество озёр: Вуокса, Суходольское (проточные озера), оз. Лемболовское, Нахимовское, Глубокое Кавголовское, Пионерское, Красноармейское и др. Их глубина преимущественно составляет 3-6 м. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017; СКИОВО, 2005)

Речная сеть очень густая и разветвленная. Реки центральной части перешейка фактически являются протоками между озерами, приуроченными к котловинам тектонико-ледникового, ледникового и эрозионного происхождения. Озёра и реки тесно связаны между собой и представляют единую озёрно-речную систему. В южной части Карельского перешейка водоразделом для рек, стекающих в Финский залив и Ладожское озеро, является Лемболовская возвышенность. Форма речных долин корытообразная, что свидетельствует о молодости речной сети. Нева – одна из крупнейших рек Европейской части России. Она берёт начало из Ладожского озера и впадает через 74 км в Финский залив. Среднегодовой расход реки – 2550 м³/сек. Площадь водосбора реки около 281 тыс. км². Она транспортирует сток со всей восточной части области, включая Ладожское и Онежское озёра. В приустьевой части, в пределах г. Санкт-Петербурга, она разделяется на рукава с образованием дельты и многочисленных островов. К менее крупным водотокам территории относятся: р. Вуокса, Сестра, Волочаевка, Чёрная, Охта, Морьё, Авлога, Вьюн, Рощинка, Перовка и др. Они имеют ширину в среднем течении 25-30 м, глубину 1,5-2,5 м. Питание рек и озёр происходит, в основном, за счёт весеннего снеготаяния (более 50 %), обуславливающего максимальные

расходы и уровни, дождей (20-30 %) и подземных вод (15-20 %). Характерна низкая продолжительная межень и осенние «дождевые паводки». (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017; СКИОВО, 2005)

Болота занимают около 50 % территории в Приладожской и Приневской низменностях. Большая часть болот верхового типа. Мощность торфа достигает нескольких метров. Гидрогеологическая роль болот очень велика – аккумулируя поверхностный сток в паводковые периоды, болота постепенно расходуют его на пополнение ресурсов поверхностных и подземных вод. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017...»; СКИОВО, 2005)

Климат

Территория Карельского перешейка расположена в умеренном климатическом поясе. Под воздействием морских атлантических и континентальных воздушных масс умеренных широт, частых вторжений арктического воздуха и активной циклонической деятельности, на территории формируется климат, основными особенностями которого являются высокая влажность воздуха, умеренно тёплое и влажное лето и довольно продолжительная умеренно холодная зима с частыми оттепелями. В холодное полугодие преобладают циркуляционные климатообразующие факторы, в тёплое – радиационные. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Температура воздуха.

Среднегодовая температура воздуха на территории составляет +2,6°. Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль. Тёплый период (с положительной среднесуточной температурой) начинается в первой декаде апреля и длится до конца октября - начала ноября, в среднем 205-220 дней. Первые заморозки наступают в сентябре-октябре, последние – в мае. Снежный покров устанавливается в конце ноября - начале декабря, наибольшая высота снежного покрова 40-50 см, число дней снежного покрова 120-140. Сходит снег в конце марта начале апреля в течение 10-15 дней. Среднемноголетний (за 1961-1990гг.) годовой ход температуры воздуха на метеостанции, расположенной в г. Санкт-Петербург приведён на рисунке 3. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

Осадки и испарение.

Рассматриваемая территория относится к зоне избыточного увлажнения. Это объясняется небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью, которая проявляется во все сезоны года. Наибольшее количество осадков выпадает на возвышенностях, наименьшее - на побережье Ладожского озера. Среднегодовое количество осадков составляет 570-800 мм, более 70 % из них выпадает в тёплое время. За холодный период количество осадков колеблется от 150 до 200 мм. За тёплый период количество осадков составляет 400-500 мм. Число дней с осадками – около 200 в году. Среднемноголетнее (за 1961-1990гг.) годовое распределение осадков приведено на рисунке 4. Запас воды в снежном

покрове в среднем составляет 120-140 мм. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017, Отчёт о создании современной гидрогеологической карты ЛАБ., 2007)

Среднегодовая величина испарения в пределах рассматриваемой территории изменяется от 295 до 375 мм. Это на 200-300 мм меньше суммы годовых осадков, что создаёт благоприятные условия для питания поверхностных и подземных вод. Наибольшие величины приходятся на летние месяцы, а в зимние месяцы оно практически отсутствует. (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

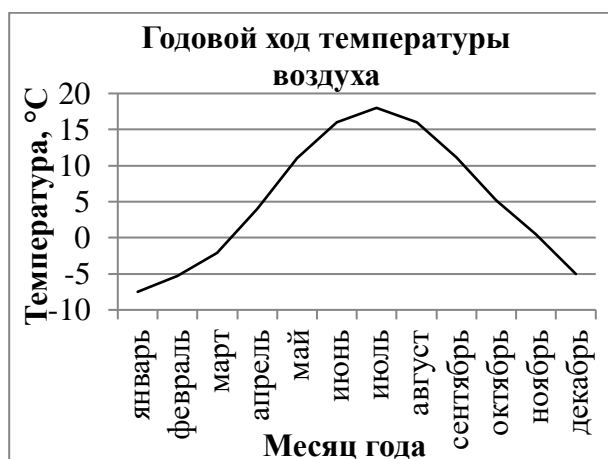


Рисунок 3. Среднемноголетний годовой ход температуры воздуха на метеостанции в г. Санкт-Петербург. Источник: ФГБУ «Северо-Западное УГМС»

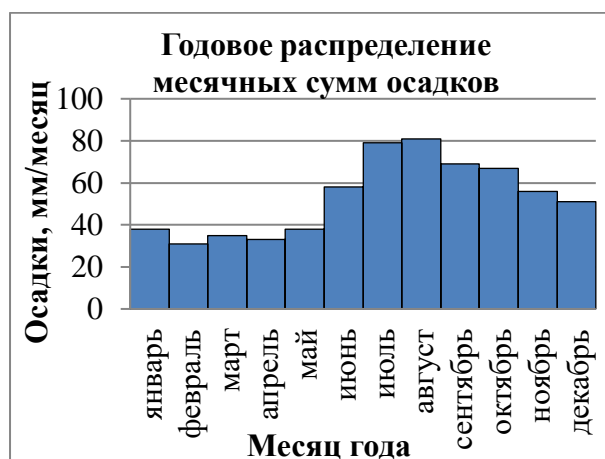


Рисунок 4. Среднемноголетнее годовое распределение месячных сумм осадков на метеостанции в г. Санкт-Петербург. Источник: ФГБУ «Северо-Западное УГМС»

(<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>) (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>)

2 Геологическое строение района работ

Исследуемая территория в геолого-структурном отношении располагается в зоне сочленения южной окраины Фенноскандинавского (Балтийского) щита и северо-западного крыла Московской синеклизы – крупнейшей структуры Русской плиты. Выделяются два структурных этажа: 1) нижний – Балтийский кристаллический щит и фундамент Русской плиты, сложенные магматическими и метаморфизованными нестратифицированными породами архея-нижнего протерозоя; 2) верхний – платформенный чехол Русской плиты, представленный рифейско-фанерозойскими и четвертичными отложениями. Геологическая карта исследуемой территории представлена на рисунке 5.

В данной главе приводится описание пород, слагающих исследуемую территорию в соответствии с действующими серийными стратиграфическими легендами к Госгеолкартам масштаба 1:200 000 (Ильменская, Онежская, Карельская серии ГК-200 второго поколения (<http://slegenda.vsegei.ru/ser-200/index.html>) и 1:1000 000 (Центрально-Европейской и Балтийской серий ГК-1000 третьего поколения (<http://slegenda.vsegei.ru/serlegenda/index.html>)).

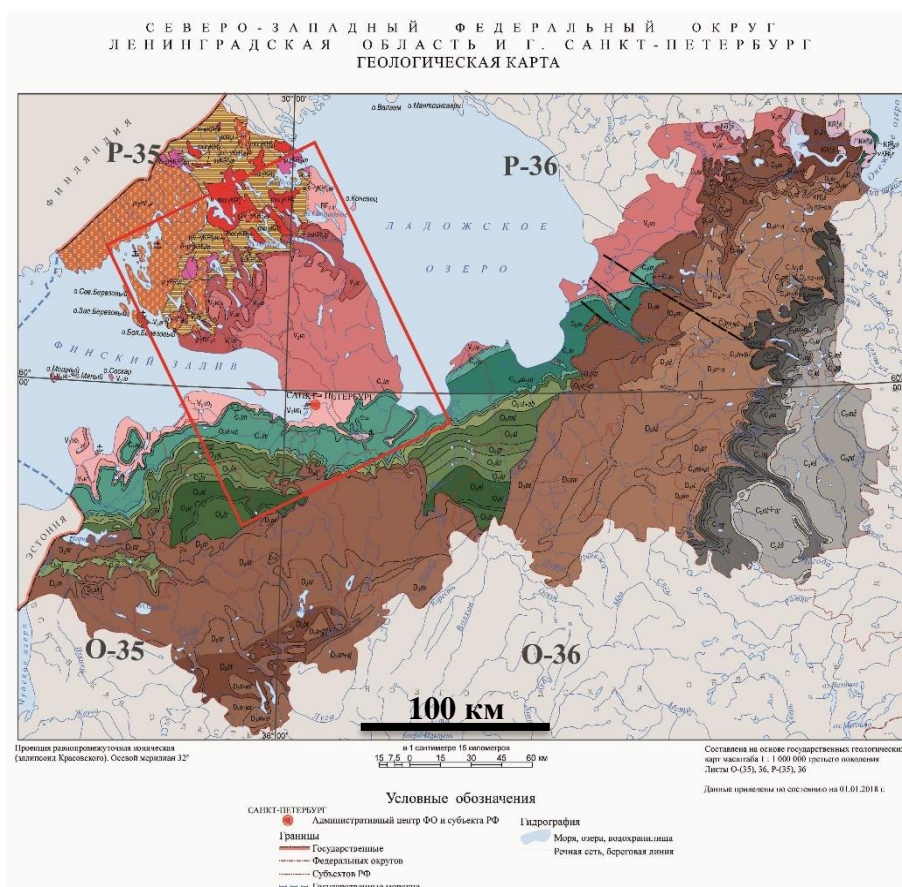


Рисунок 5. Геологическая карта Ленинградской области и г. Санкт-Петербург. Источник: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018 (<http://atlaspacket.vsegei.ru/>)

НИЖНИЙ СТРУКТУРНЫЙ ЭТАЖ

Архей - нижний протерозой (AR-PR₁)

Архей-нижнепротерозойские (карельские) образования представлены гнейсами гранат-биотитовыми и мигматитами по ним, гранитами биотитовыми, гранитами, граносиенитами, кварцевыми сиенитами, гранодиоритами, монцонитами, кварцевыми диоритами. На дочетвертичную поверхность они выходят только на севере моделируемой площади. В юго-восточном направлении породы карелия погружаются на глубину 790 м, в районе п. Песочный и п. Сертолово.

ВЕРХНИЙ СТРУКТУРНЫЙ ЭТАЖ

Верхний протерозой (PR₂)

Верхнепротерозойские образования выделяются на рассматриваемой площади в составе рифея и венда.

Рифей (R₂₋₃)

Приозерская (R_{2pr}), приладожская (R_{3pl}) и яблоновская (R_{3jb}) свиты

Рифейские образования распространены в Западном Приладожье и приурочены к Ладожскому прогибу. Они залегают резко несогласно на эродированных породах кристаллического фундамента и состоят из трёх свит. Приозерская свита представлена толщей грубозернистых красноцветных плотных песчаников с прослоями галечниковых песчаников и тончайшими прослойками аргиллитов, её мощность зависит от положения в тектонических блоках и может достигать 450 м. Приладожская свита залегают линзами мощностью около 30 м и сложена терригенно-карбонатными (доломитистые известняки и доломитовые мергели) и терригенными (аргиллиты) породами. Яблоновская свита представлена разнозернистыми песчаниками с включениями гравийного и галечного материала, беспорядочно распространённого по всему разрезу и редкогалечными конгломератами, её мощность достигает 90 м.

Вендская система (V)

Верхний венд. Валдайский комплекс.

Редкинский горизонт (V_{2rd})

Старорусская свита (V_{2sr})

Отложения старорусской свиты широко развиты на всей площади Русской плиты. Свита представлена песчано-глинистой толщей, залегающей с размывом на коре выветривания кристаллического фундамента, а в пределах Ладожского грабенообразного прогиба – резко несогласно на отложениях приозерской, приладожской или яблоновской свит. Перекрывается старорусская свита с частичным размывом василеостровской свитой, либо (в северных районах) выходит на дочетвертичный срез. Наибольшая мощность старорусской

свиты в пределах локальных впадин поверхности кристаллического фундамента (в районе озёр Мичуринское, Нахимовское, у пос. Дубровка) достигает 60-105 м, постепенно уменьшаясь в северо-западном и юго-восточном направлениях до 26 м. На большей части полная мощность отложений свиты изменяется в пределах 31,0-54,4 м.

В разрезе свиты выделяются две ритмично построенные толщи – *нижняя* (V_{2sr1}), и *верхняя* (V_{2sr2}) *старорусские подсвиты*, каждая из которых сложена внизу гравелитами или разнозернистыми песчаниками, а вверху – темно-серыми аргиллитами. Обе толщи имеют невыдержанную мощность. Суммарная мощность нижней песчаной толщи изменяется от 2 до 67 м, а верхней – глинистой - 3,0-88,5 м.

Локально разрез старорусской свиты завершает кора выветривания мощностью 20 м.

Котлинский горизонт (V_{2kt})

Василеостровская свита (V_{2vo})

Представлена также нижней и верхней подсвитами, которые соответствуют двум ритмам осадконакопления.

Нижняя подсвита василеостровской свиты (V_{2vo1}) распространена на большей части изучаемой территории. У северных границ моделируемой площади она отсутствует, а далее к югу породы подсвиты выходят на дочетвертичный срез в эрозионных останцах изометричной формы и в виде вытянутого участка меридионального направления, протягивающегося от оз. Журавлевское до п. Ушково. Границы её с подстилающими образованиями старорусской свиты чёткие, с перекрывающей верхней подсвитой – постепенные. В основании разреза залегают разнозернистые песчаники, мощность которых не превышает первых метров. Выше – переслаивающиеся тонкослоистые мелкозернистые песчаники, алевролитовые глины и алевролиты. Мощность подсвиты изменяется от первых метров до 80м. В стратотипическом разрезе скважины «Геолкома» (Васильевский остров г. Санкт-Петербург), нижняя подсвита (интервал 164 -117 м) внизу сложена 42-х метровой песчаной пачкой, вверху – глинами, уплотнёнными мощностью 5 м при общей её мощности 47 м.

Верхняя подсвита василеостровской свиты (V_{2vo2}) залегает на нижней подсвите и перекрывается на Карельском перешейке повсеместно четвертичными образованиями, а южнее Финского залива – осадками ломоносовской свиты балтийской серии нижнего кембрия. Нижняя граница не вполне отчётливая, верхняя достаточно чёткая. Подсвита занимает основную центральную площадь работ. Представлена подсвита зеленовато-серыми глинами, переходящими вниз по разрезу в алевритистые глины, а ближе к подошве появляются прослой мощностью 0,1-7,0 м мелкозернистых песчаников и слюдястых алевролитов. Мощность её полностью зависит от глубины эрозионного четвертичного вреза и достигает в юго-восточной части Карельского перешейка – 139 м.

Фанерозой

Фанерозойские отложения (кроме четвертичных) играют очень малую роль на исследуемой территории, их краткое описание приведено в таблице 1.

Таблица 1. Описание фанерозойских отложений исследуемой территории

Эрагема	Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Свита	Описание	
Палеозойская (PZ)	Кембрийская (Є)	Нижний	Томмотский	Лонговаский (Є _{1ln})	Ломоносовская (Є _{1lm})	Распространена в южной части рассматриваемой территории в полосе шириной 1-2 км. Сложена пачкой переслаивающихся песчаников и алевролитов с маломощными прослоями глин вверху. Мощность изменяется от 3-4 м (на севере) до 16 м.	
					Сиверская (Є _{1sv})	Распространена в пределах предглинтовой низины. Сложена сравнительно однородной толщей зеленовато-серых, голубоватых глин мощностью от 40 до 80 м.	
					Люкатиская (Є _{1lk})	Распространена ограниченно в районе п. Копорье, под четвертичными отложениями. Сложена песчаниками и глинами. Мощность – от 0,15-3,0 м до 8-13 м.	
			Средний	Амгинский	Дейменский (Є _{2dm})	Тискреская (Є _{1ts})	Распространена ограниченно. Мощность – 2,8–5,5 м. Сложена мелко-тонкозернистыми светло-серыми, кварцевыми песчаниками, с прослоями голубоватых глин.
						Саблинская (Є _{2sb})	Распространена к югу от Балтийско-Ладожского уступа. Отсутствует в районе глинта к западу от Красного Села. Имеет незначительную мощность – около 5 м. Свита сложена песками с редкими тонкими прослойками глин.
						Ладожская (Є _{3ld})	Распространена не широко и приурочена к приглинтовой зоне. Мощность свиты в зоне глинта 1-3 м, на юг возрастает до 6 м. Сложена песками и песчаниками, в средней части присутствуют прослойки глин.

Эратема	Ордовикская (O)						Описание
Система	Верхний			Средний			
Отдел	Нижний						
Ярус	Лланвирнский		Аренгский	Аренгский	Аренгский	Тремадокский	
Горизонт	Карадак	Кундаский (O _{2ku})	Волховский (O _{2vl})	Латорпский (O _{1lt})	Пакерортский (O _{1pk})	Тосненская (O _{1ts})	
Свита	Солецкая (O _{3sl})	Медниковская (O _{2md})	Обуховская (O _{2ob})	Волховская (O _{2vl})	Лезтесская (O _{1lt})	Копорская (O _{1kp})	
	Представлена известняками в различной степени доломитизированными, доломитами пористыми и кавернозными. Мощность свиты достигает 14 м.						
	Сложена глинистыми, местами доломитизированными известняками с прослоями доломитов, мергелей, с линзовидными прослойками кукурситов мощностью до 35-40 м. Мощность колеблется от 10 до 13 м.						
	В основании представлена слоем глинистого известняка с тонкими прослойками мергеля и глины. Верхняя часть свиты представлена пластами доломитизированных известняков и доломитов. Мощность свиты колеблется от 6,0 до 11 м.						
	Вскрыта на глубинах 30-50 м на юге исследуемой территории. Сложена тремя подсвитами: доломитами глауконитовыми, мергелями и известняками охристо-жёлтыми и известняками доломитизированными с глауконитом, прослоенными глинами и мергелями Мощность свиты 3,5-5,5 м.						
	Мощность непостоянна и меняется от 0,25-0,50 м (на юго-востоке) до 1,8 м к западу от Красного Села. Она сложена кварцево-глауконитовыми песками и песчаникам зелёной окраски, с тонкими линзочками известняков и доломитов.						
	Пачка «диктионемовых сланцев» местами с песчаными прослойками. Распространена в пределах моделируемой площади повсеместно к югу от глинта. Мощность свиты в приглинтовой зоне составляет 3 - 3,3 м.						
	Сложена оболочными песчаниками и песками, вверху с прослойками тёмно-серого аргиллита - диктионемового сланца. Мощность в приглинтовой зоне составляет 1,5-2,5 м.						

Эратема	Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Свита	Описание
Девонская (D)	Средний	Эйфельский	Идавский	Грязновская	Грязновская (O _{3gr})	Сложена известняками, доломитизированными известняками с прослоями в нижней части глин и кукерсита её мощность изменяется от 11 до 16 м.
				Шундоровская	Шундоровская (O _{3sⁿ})	Сложена доломитами с прослоями глинистого известняка, мергеля и глины, линзовидными прослойками кукерсита, нередко с кремниевыми конкрециями.
			Наровский	Наровская свита (D _{2nr})	Со значительным размывом залегает на ордовикских отложениях. Сложена известняками, мергелями, доломитами с прослоями глин, песчаников, алевролитов, в основании с базальным конгломератом. Полная мощность свиты на данной территории не более 15 м.	
			Арукюлааский	Арукюлааская свита (D _{2ar})	Представлена однородной толщей красноцветных песков или слабосцементированных песчаников мелко среднезернистых в различной степени глинистых, кварцевых, с прослоями плотносцементированных железистых кальцитовых песчаников и алевролитов, а также редких мергелеподобных прослоев глин. Мощность свиты до 10 м.	

Четвертичная система (Q)

Четвертичные образования распространены повсеместно практически на всей исследуемой территории. Исключение составляют незначительные участки в северной части, где на дневную поверхность выходят дочетвертичные образования кристаллического фундамента. Четвертичные отложения перекрывают венд-палеозойские породы покровом неравномерной мощности – до 20 м на юго- и северо-западе территории и до 70–160 м в пределах локальных и площадных ледниковых и водноледниковых аккумулятивных возвышенностей и погребенных эрозионных врезов.

Плейстоцен. Неоплейстоцен. Среднее звено.

Среднерусский надгоризонт

На дневную поверхность отложения не выходят, но, судя по строению разрезов, развиты повсеместно распространены, отсутствуя лишь на Ижорском плато, в Предглинтовой низменности и в редких местах размыва водно-ледниковой деятельностью.

Вологодский горизонт (gIIvl, fIIvl, lgIIvl)

Залегают в основании четвертичной толщи непосредственно на дочетвертичных породах. Представлен ледниковыми (мощностью до 70 м), водно-ледниковыми (от 1-2 до 40-70 м) и озёрно-ледниковыми (от 2-3 до 36 м) осадками.

Московский горизонт (gIIms, fIIms, lgIIms)

Отложения, связанные с московским оледенением, представлены ледниковыми (мощностью от 1-2 до 40-55 м), водно-ледниковыми (3-18 м) и озёрно-ледниковыми (от 1-2 до 46 м) осадками, аналогично вологодскому горизонту.

Верхнее звено

Микулинский горизонт (mIIImk)

Отложения представлены исключительно морскими фациями. Широко развиты в Приневской низине, а также в Предглинтовой низменности в древних погребённых долинах в районе г.Сосновый Бор. Мощность микулинских отложений колеблется от 2,5 до 37,6 м.

Валдайский надгоризонт.

Подпорожский горизонт (lgIIIpd)

Представлен разнообразными озёрно-ледниковыми отложениями. Мощность колеблется от 5 до 42,1 м.

Ленинградский горизонт (l,bIIIln)

Состоит из озёрно-болотных отложений. Сохранился ограниченно и вскрыт единичными скважинами на Лемболовской возвышенности и на северном побережье Финского залива. Мощности озёрной толщи меняются от 3,5 до 24 м.

Осташковский горизонт (gIIIkr, fIIIkr, lgIIIkr, lgIIIbl)

Отложения ледникового комплекса осташковского горизонта покрывают практически всю территорию, составляя основную верхнюю часть разреза четвертичного покрова. Горизонт включает карельские ледниковые (мощностью от 1 до 30-40 м), водно-ледниковые (от 0,5-2 до 25-50 м), озёрно-ледниковые отложения (от 4 до 25-45 м) и отложения Балтийского ледникового озера (от 1-2 до 15-25 м).

Голоцен (m,II, aII, bII, eII, tII)

Голоценовые отложения на территории имеют повсеместное распространение. Обычная их мощность не превышает нескольких метров, максимальная достигает значений 20-25 м. Голоценовые образования представлены, в основном, отложениями водного ряда, главным образом, морскими и озёрными (до 25 м). Большое площадное распространение имеют биогенные (болотные) отложения (до 15 м). На побережье Финского залива распространены эоловые отложения (до 15 м). На небольших участках развиты, хемогенные и техногенные образования (до 8 м), а по всем рекам аллювиальные отложения (до 3 м).

3 Гидрогеологическая характеристика района работ

Согласно «Перечню и классификатору объектов гидрогеологического районирования территории Российской Федерации», принятому Федеральным агентством по недропользованию (протокол № 18/83-пр от 07.02.2012), рассматриваемая территория расположена в зоне сочленения гидрогеологических структур I порядка: Восточно-Европейского сложного бассейна пластовых безнапорных и напорных вод и Балтийского сложного гидрогеологического массива. Подавляющая часть моделируемой площади находится в пределах северо-западного крыла Ленинградского артезианского бассейна (гидрогеологическая структура II порядка), в составе Восточно-Европейского артезианского бассейна (рис. 6).

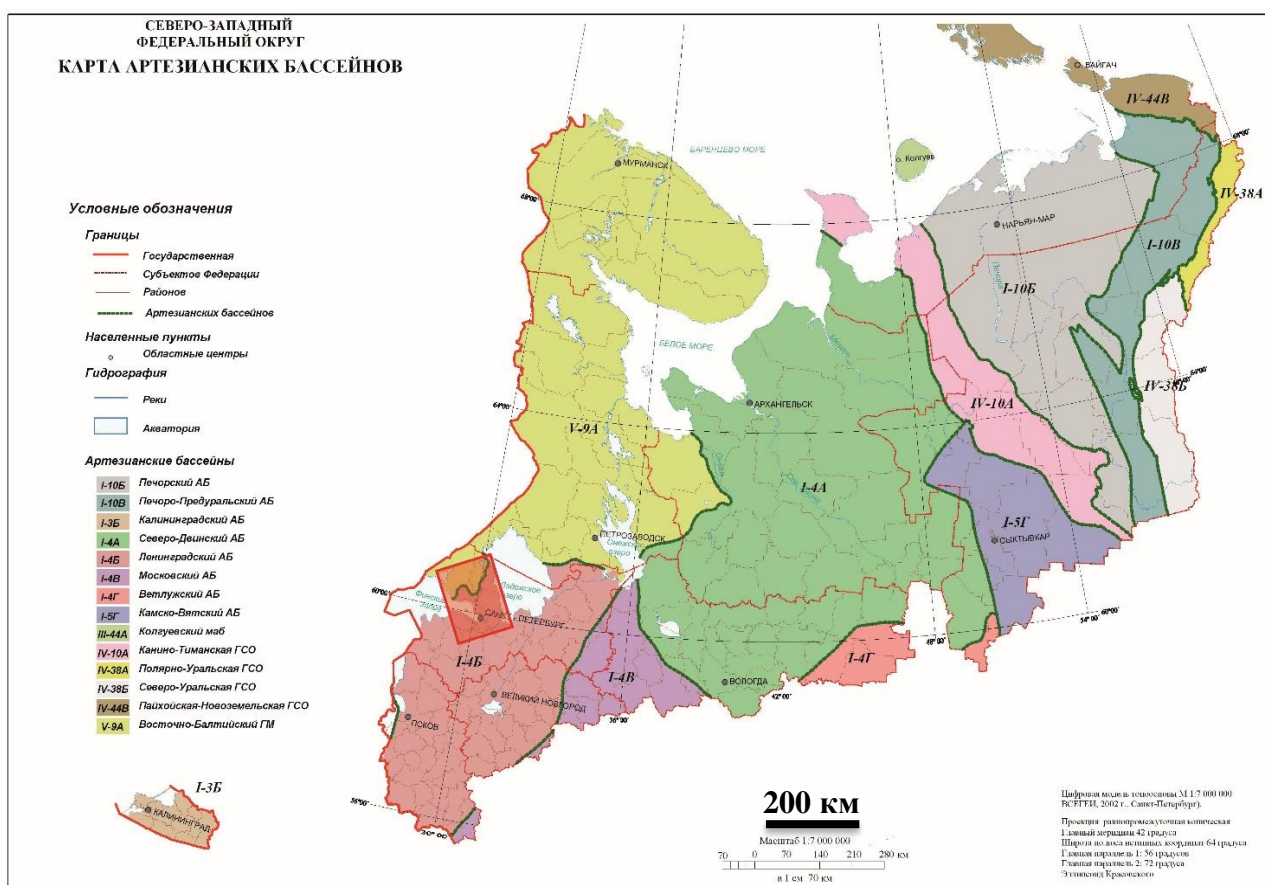


Рисунок 6. Карта артезианских бассейнов Северо-Западного федерального округа.

Источник: Севзапнедра, 2019 (<http://sevzapnedra.nw.ru/Maps/SZFO/VG.jpg>)

Гидрогеологическая стратификация разреза базируется в основном на легенде Ильменской серии листов Государственной гидрогеологической карты РФ масштаба 1:200 000 (Андреева, Журавлева, 2002).

Подземные воды четвертичных отложений

К четвертичной толще, включающей отложения неоплейстоцена и голоцена, приурочен четвертичный водоносный комплекс. Четвертичные отложения развиты повсеместно и характеризуются большой литолого-генетической неоднородностью и колебаниями мощности осадков – от первых метров до 110-170 м. В зависимости от литологического состава пород, положения их в разрезе и степени проницаемости, в четвертичном водоносном комплексе выделяются надморенные, моренные и межморенные водоносные и относительно водоупорные горизонты.

Надморенный водоносный комплекс

Надморенный комплекс объединяет водоносные горизонты, залегающие выше первой (осташковской) морены. Подземные воды приурочены к современным техногенным, биогенным, аллювиальным, морским, эоловым, озерным отложениям и осташковским озёрно-ледниковым и водно-ледниковым отложениям мощностью 1-40 м (иногда до 90 м).

Надморенные горизонты содержат грунтовые (безнапорные) воды. Глубина залегания вод составляет 0,5-3,5 м, в пределах камовых холмов и озовых гряд достигает 10-45 м. Уровенный режим грунтовых вод подчиняется общим закономерностям естественного режима и зависит от метеорологических факторов. Водообильность комплекса неравномерная. Удельный дебит скважин изменяется от тысячных и сотых долей л/с до 1-2 л/с и более.

Химический состав вод достаточно пёстрый и определяется как природными, так и антропогенными факторами. Грунтовые воды повсеместно не защищены от поверхностного загрязнения, поэтому их качество часто не соответствует требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 и фоновым значениям по следующим показателям: перманганатная окисляемость, содержание аммония, железа, марганца, нефтепродуктов, поверхностно-активных веществ.

Грунтовые воды широко используются садоводческими товариществами, мелкими хозяйствами для питьевых и бытовых нужд с помощью копаных колодцев, каптированных родников, редко скважин.

Моренные горизонты

В разрезе четвертичной толщи выделяются относительно водоупорные моренные отложения осташковского (gIIIos) до 40 м, московского (gIIms) до 90 м и вологодского (gIvl) до 62 м оледенения. В слабопроницаемой толще всех разновозрастных морен встречаются прослойки и линзы песков и супесей, с которыми связана локальная обводнённость. Мощность песчаных включений чаще составляет 0,2-2,0 м, реже достигает 3-6 м.

По химическому составу воды осташковской морены самые разнообразные с минерализацией от 0,1 до 0,7 г/дм³.

Практического значения подземные воды моренных отложений не имеют. Возможно крайне ограниченное использование подземных вод только осташковской морены для небольших индивидуальных хозяйств.

Московско-осташковский межморенный водоносный горизонт (lg, fIIIms-IIIos)

Включает водноледниковые отложения московского, ледниково-озёрные ленинградского, подпорожского и морские микулинского горизонтов, залегающие между осташковской и московской мореной. Межморенный водоносный горизонт имеет площадное развитие. Глубина залегания межморенного водоносного горизонта варьирует от 1,7 до 93,0 м (в центральной части Лемболовской и Токсовской возвышенностей). Общая мощность комплекса изменяется от первых единиц до 65 м, преобладающая мощность – 10-30 м.

Подземные воды напорные на всех участках развития перекрывающего относительно водоупорного моренного осташковского горизонта. Величина напора зависит от глубины вскрытия кровли обводнённой толщи и изменяется от 0,5 до 62,0- 94,0 м. по направлению к Финскому заливу. Водообильность горизонта определяется литологическим составом водовмещающих пород и в целом она невелика. Удельный дебит скважин изменяется от 0,001-0,13 л/с до 32,6-36,9 л/с.

По химическому составу воды межморенного водоносного горизонта обладают минерализацией 0,1-0,8 г/дм³. Недостатком качества этих вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения является высокое содержание железа до 8-10 мг/дм³ и до 50-65 мг/дм³ на месторождениях железистых минеральных вод и марганца.

В районе работ московско-осташковский водоносный горизонт имеет эксплуатационное значение и используется для централизованного водоснабжения, а также для целей резервного водоснабжения. На территории работ разведаны не менее 25 месторождений пресных и минеральных лечебных вод на данный водоносный горизонт. Кроме того, ряд месторождений разведаны для совместной эксплуатации с нижележащим вологодско-московским горизонтом.

Вологодско-московский межморенный водоносный горизонт (lg, fIIIvl-ms)

Приурочен к вологодско-московским водно-ледниковым отложениям. Водоносный горизонт имеет локальное, чаще площадное, распространение, но также распространён в древних долинах. Глубина залегания кровли горизонта варьирует от 16,0 до 116,2 м, в среднем составляет 50,0-77,0 м. Мощность горизонта изменяется от 0,5 до 87,0 м в древних долинах.

Воды горизонта напорные, величина напора составляет 6,0-93,0 м. Общее снижение уровня происходит от Лемболовской возвышенности к Финскому заливу и к Ладожскому озеру. Водообильность горизонта зависит от гранулометрического состава водовмещающих

песков и изменяется в широких пределах. Удельные дебиты скважин составляют 0,012-2,7 л/с и увеличиваются до 16,2 л/с в районе п. Белоостров - п. Лисий Нос.

По химическому составу воды в основном гидрокарбонатные. В районе г. Всеволожск и п. Новое Девяткино – п. Рапполово минерализация составляет 0,1-0,7 г/л, а в пп. Горская, Лисий нос, минерализация возрастает до 2,1-3,2 г/л, состав воды меняется на хлоридный натриевый. Повышенная минерализация скорее всего связана с подтоком солоноватых вод из дочетвертичных водоносных горизонтов. В водоносном горизонте отмечается превышение предельно допустимой концентрации по содержанию железа до 9,0 мг/дм³ и марганца до 0,8 мг/дм³.

Вологодско-московский межморенный водоносный горизонт для целей водоснабжения используется в г. Зеленогорск и многих посёлках в районе работ.

Вологодский подморенный водоносный горизонт (lg,flvl)

Приурочен к водно-ледниковым и озёрно-ледниковым отложениям, залегающим в нижних частях древних долин. Глубина залегания кровли составляет 43,0-102,0 м. Вскрытая скважинами мощность горизонта изменяется от 7,5 до 67,0 м. Воды горизонта напорные, величина напора составляет 56,0-96,0 м. Удельный дебит скважин 0,01-0,21 л/с. Минерализация вод 0,07-0,17 г/дм³.

Водоносный подморенный горизонт может составлять интерес для водоснабжения, но в связи с локальностью его распространения и большой глубиной залегания, возможности его использования ограничены.

Подземные воды дочетвертичных отложений

В дочетвертичном разрезе рассматриваемой территории выделяются следующие гидрогеологические подразделения:

- Верхнеэфельско-нижнефранский водоносный горизонт ($D_{2ef2}-D_{2f1}$);
- Верхнеэфельский (наровский) относительно водоупорный горизонт $D_{2ef2}(nr)$;
- Ордовикский водоносный горизонт (O_{2-3});
- Тремадокский (копорско-леэтсеский) относительно водоупорный горизонт $O_{2t}(kp-lt)$;
- Кембро-ордовикский водоносный горизонт (C_1-O_1);
- Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт (C_1ln);
- Нижнекембрийский (ломаносовский) водоносный горизонт (C_1lm);
- Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт (V_{2kt});
- Вендский водоносный комплекс (V);
- Рифейский водоносный комплекс (R);
- Архей-нижнепротерозойская водоносная зона экзогенной трещиноватости ($AR-PR_1$).

В рамках проводимых исследований рассматриваются только вендские и архей-протерозойские водовмещающие и водоупорные породы, изолированные от остальных дочетвертичных горизонтов.

Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт (V2kt)

Включает осадки верхней подсвиты василеостровской свиты. Горизонт развит в центральной и южной частях территории Карельского перешейка и Предглинтовой низменности. В районе Санкт-Петербурга, Всеволожска и на участках дочетвертичной эрозии, горизонт залегает под четвертичными образованиями на глубине от первых метров до 50-60 м (в пределах древних долин) и до 120-150 м под образованиями кембрия и ордовика на юге изучаемой территории. Горизонт сложен плотными тонкослоистыми зеленовато-серыми глинами и является мощным региональным водоупором на всей территории Ленинградского артезианского бассейна. Мощность горизонта не выдержана и изменяется в широких пределах, с севера на юг и с запада на восток – от первых метров в северной части района до 139 м в юго-восточной. Коэффициент вертикальной фильтрации котлинских глин, определённый МГУ в 1982 г методом математического моделирования, составил $(7,4-11,0) \times 10^{-5}$ м³/сут. Спорадически встречаются тонкие прослои песчаников или песчанистых алевролитов мощностью 0,1- 0,5 м, реже 1-3 м. Подземные воды, содержащиеся в песчаных прослоях, напорные. Величина напора, зависящая от глубины залегания водоносного прослоя, изменяется от 7 до 70-90 м. Глубина залегания уровня 1,5-11,0 м. Удельный дебит скважин составляет тысячные и реже сотые доли л/с. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатно-хлоридные и хлоридные с минерализацией 1,2-2,1 г/дм³.

Вендский водоносный комплекс (V)

Комплекс в пределах Санкт-Петербурга и Карельского перешейка является объектом проводимого исследования. Он повсеместно распространён в пределах Ленинградского артезианского бассейна. В северо-западной части Карельского перешейка залегает непосредственно под четвертичными отложениями, а в центральной и южной перекрыт верхневендским (котлинским) водоупорным горизонтом. Комплекс повсеместно подстилается кристаллическими породами фундамента, а вдоль Ладожского озера – песчаниками рифейского возраста.

Вендский водоносный комплекс включает терригенные породы котлинского (нижняя подсвита василеостровской свиты) и редкинского (верхняя и нижняя подсвиты старорусской свиты) горизонтов. В составе комплекса выделяются: котлинский и редкинский водоносные горизонты, разделенные относительно водоупорным верхневендским (редкинским) горизонтом. Такое расчленение нередко условное в связи со схематическим описанием разреза, вскрытого скважинами, а также ввиду того, что в большинстве случаев

эксплуатируются оба водоносных горизонта. Ниже приводится имеющаяся раздельная характеристика для каждого из горизонтов по материалам гидрогеологического доизучения моделируемой площади (Баскова, 2013).

Котлинский водоносный горизонт (V_{2kt}) развит под верхневендским (котлинским) водоупорным горизонтом, а в северной части территории и на отдельных участках, выходит на дочетвертичную поверхность, где перекрывается четвертичными образованиями. Горизонт не имеет сплошного распространения. Он отсутствует вдоль Ладожского озера и оз. Суходольское и далее выклинивается в северо-северо-западном направлении. Горизонт представлен переслаиванием песчаников, тяготеющим чаще к его подошве, алевролитов и глин. Кровля горизонта погружается в юго-восточном направлении на глубину от 27,0 до 203,0 м, составляя 105-120 м на площади Санкт-Петербурга. Мощность горизонта изменяется от 4,0 до 80,0 м (п.п. Лемболово, Щеглово и др.).

Воды горизонта напорные, величина напора составляет 17,0- 179,8 м, увеличиваясь с погружением под вышележащие отложения. Глубина залегания уровня варьирует от 2,0 до 95,0 м (Сосновый Бор). Подземные воды напорные. В естественных условиях величина напора в г. Санкт-Петербург составляла 140-160 м. В настоящее время не превышает 70-100 м, что вызвано длительной эксплуатацией горизонта. Водообильность котлинских отложений очень изменчива и зависит от литологического состава водовмещающих пород. В верхней, наиболее глинистой части горизонта, отмечается незначительная водообильность. Удельные дебиты составляют от 0,004 до 0,08 л/с. В нижней части, где преобладают песчаники, удельные дебиты скважин варьируют от 0,2 до 2-3 л/с.

Химический состав подземных вод горизонта неоднороден. Севернее линии Белоостров-Сертолово-Агалатово – Нижние Осельки воды пресные с минерализацией до 1,0 г/дм³. В юго-восточном направлении она увеличивается до 2,8 г/дм³. В Санкт-Петербурге в верхней части горизонта минерализация составляет 2-2,5 г/дм³, а к подошве уже до 4,2-5,0 г/дм³. В этом же направлении меняется состав подземных вод – от гидрокарбонатных до хлоридных натриевых.

Верхневендский (редкинский) относительно водоупорный горизонт $V_2(rd)$ развит повсеместно, кроме северо-западной части территории. Он разделяет котлинский и редкинский водоносные горизонты. Глубина залегания горизонта увеличивается в юго-восточном направлении от 27,0 до 235,0 м, составляя в прибрежной зоне Финского залива 50-100 м, а в Санкт-Петербурге на территории ВСЕГЕИ, залегает на глубине 164 м. В центральной, и локально в северо-западной части территории, он залегает под четвертичными образованиями. Горизонт сложен глинами и аргиллитами с редкими прослоями песчаников.

Общая мощность горизонта изменяется от 3,0-88,5 м, составляя 20-25 м в прибрежной части Финского залива.

В зонах тектонических нарушений, в пределах глубоких древних долин водоупорные свойства горизонта ослаблены и возможен подток подземных вод из нижележащего редкинского водоносного горизонта.

Редкинский водоносный горизонт (V_{2rd}) приурочен к породам нижней посквиты старорусской свиты. Развита повсеместно на территории платформенного чехла и залегает на кристаллических породах фундамента и на песчаниках рифейского возраста. Перекрывается горизонт редкинским относительно водоупорным горизонтом, а в местах его размыва котлинскими либо четвертичными образованиями. Глубина залегания кровли горизонта варьирует от 25,0 до 274,0 м, возрастая в юго-восточном направлении. Мощность горизонта изменяется от 2,0 до 67,0 м. Водовмещающие породы представлены мелко- и разнозернистыми песчаниками, в подошве обогащенными гравийно-галечным материалом, встречаются тонкие прослой глины и алевролита. Водообильность горизонта не равномерна, удельные дебиты скважин составляют от 0,003 до 5,0 л/с, чаще 0,1-3,3 л/с.

Химический состав редкинского водоносного горизонта постепенно сменяется с гидрокарбонатного (северо-западная часть территории) на хлоридный натриевый по мере удаления от области питания (Лемболовской возвышенности) в юго-восточном направлении. Минерализация подземных вод при этом увеличивается от 0,2-0,4 до 5,0-9,6 г/дм³ (п.п. Марьино, Мурино, Щеглово соответственно). Изолиния минерализации 1 г/дм³ проходит в районе пп. Белоостров – Сертолово – Агалатово – Нижние Осельки, далее граница распространяется севернее пп. Куйвози- Никитилово- Катумы- Никулясы. В подземной воде возможно повышенное содержание бария и радионуклидов.

Подземные воды горизонта напорные и высоконапорные, величина напора составляет 4,0-229,0 м (п. Лесколово). Глубина залегания уровня изменяется от 1,0 до 103,0 м, а в устье р. Бурная и на побережье оз. Суходольское и в северной части на побережье Ладожского озера, пьезометрический уровень устанавливается выше поверхности земли от 0,2-0,4 до 1,0-2,4 м. Снижение отметок пьезометрической поверхности происходит от Лемболовской возвышенности в радиальном направлении. Подземные воды редкинского горизонта имеют обычно более высокий напор, чем вышележащий котлинский горизонт. Однако в процессе многолетней эксплуатации происходит нарушение первоначальной изолированности этих двух горизонтов и образуется единая пьезометрическая поверхность.

Для практических целей, как правило, редкинский и котлинский горизонты рассматриваются совместно в составе вендского водоносного комплекса. В северной части

территории в основном эксплуатируется более водообильный редкинский горизонт. По направлению к югу большей водообильностью характеризуется котлинский горизонт.

Пьезометрическая поверхность вендского комплекса осложнена депрессионными воронками, образовавшимися в условиях эксплуатации и взаимодействия групповых водозаборов. Наибольшее современное снижение уровня от первоначального его положения составляет 60 м (Черная Речка-Агалатово-Грузино), в северной части Курортного района Санкт-Петербурга 8-10 м, в южной (Репино-Солнечное) - порядка 20-33 м, в районе водозаборного узла п.п. Лемболово-Стекланный около 50 м.

Пресные подземные воды вендского комплекса имеют большое значение для хозяйственно-питьевого централизованного водоснабжения на Карельском перешейке, включая Курортный район Санкт-Петербурга. На территории развития солоноватых вод комплекс является источником производственно-технического и резервного водоснабжения на особый период, а также используется в качестве минеральных вод (на данной территории разведано 11 участков Петербургского месторождения лечебных минеральных вод и одно Александровское). Водопроницаемость на утверждённых участках месторождений изменяется от 12,5-20 м²/сут (Комаровской 1, Песочное) до 303-437 м²/сут (Северорощинское, Стрельнинское). Коэффициент пьезопроводности на утверждённых участках месторождений изменяется от $9,35 \cdot 10^4$ до $3,2 \cdot 10^7$ м²/сут, составляя в частности для всех водозаборов на территории Рощино – $2 \cdot 10^5$ м²/сут; для водозаборов Зеленогорска и Смолячково-Молодёжное-Серово-Ушково – 10⁵ м²/сут, для Репино и Комарово $5 \cdot 10^5$ м²/сут. При региональной оценке запасов подземных вод 1982 года, средняя водопроницаемость для Санкт-Петербурга принималась 320 м²/сут, коэффициент пьезопроводности $2,6 \cdot 10^6$ м²/сут.

Рифейский водоносный комплекс (R)

Комплекс распространён в пределах Ладожского грабена и охватывает терригенные образования яблоньской, приладожской свит верхнего рифея и приозерской свиты среднего рифея, сходные по литологическому составу и положению в разрезе. Комплекс подстилается кристаллическими образованиями позднего карелия, перекрывается – образованиями венда почти повсеместно, за исключением ложбины оз. Суходольское, на севере района работ, где он перекрыт четвертичными образованиями. Здесь комплекс залегает относительно неглубоко – на глубине 50,0 -95,3 м, а в южном направлении погружается на глубину до 210,0-230,0 м (п.п. Рахья, Ириновка).

Комплекс сложен грубозернистыми плотносцементированными песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов. Вскрытая мощность комплекса колеблется от 20 м до 355,35 м, полная предположительно до 600 м. Подземные воды напорные. Величина напора составляет 24,1-157,0 м. Пьезометрический уровень воды устанавливается на глубине 6,0-

50,0 м, а в районе озера Суходольское выше поверхности земли на высоте 7,0 м. Удельный дебит скважин 0,01-0,8 л/с.

Химический состав вод изменяется в зависимости от глубины залегания комплекса. До глубины 130-140 м развиты гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды с минерализацией 0,2-1,3 г/дм³. В скважине в д. Денисово на глубине 500,4 м вскрыты хлоридные натриевые воды с минерализацией 2,25 г/дм³.

Воды рифейского водоносного комплекса эксплуатируются ограниченно совместно с вендским водоносным комплексом для хозяйственно-питьевого водоснабжения в индивидуальных хозяйствах и на небольших водозаборах п.п. Сосново, Снегирёвка, Денисово и др.

Архей-протерозойская водоносная зона экзогенной трещиноватости (AR-PR₁)

Породы кристаллического фундамента Восточно-Балтийского массива обрамляют отложения венда, рифея с севера и погружаются под терригенные образования на глубину от 25-96 м на северо-западе до 220–300 м в Санкт-Петербурге и у южной границы Карельского перешейка. В пределах распространения образований рифейского возраста (Ладожского грабенообразного прогиба) кристаллический фундамент резко погружается и уходит на глубину 500-700 м. Породы фундамента представлены, в основном: гранито-гнейсами, гнейсами, мигматитами, в меньшей степени интрузиями. Водоносность пород связана с экзогенной трещиноватостью и прослеживается до глубины 50-120 м.

Воды, в основном, безнапорные, уровни воды устанавливаются на глубине от 3,0 до 44,0 м. Пьезометрическая поверхность подземных вод зоны экзогенной трещиноватости имеет общий уклон с севера на юг. При наличии водоупорной кровли в четверичном покрове воды приобретают напор. Величина напора в понижениях рельефа фундамента достигает 30-99 м., местами имеет самоизлив +4,8 м (оз. Вуокса, п. Колокольцево.).

Водообильность пород низкая. Удельные дебиты скважин зоны трещиноватости до глубины 114–120 м составляют сотые доли л/с. На водораздельных пространствах и на участках развития четверичных глин скважины практически безводны.

В условиях неглубокого залегания подземные воды по химическому составу гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные, пресные с минерализацией 0,1-0,8 г/дм³. В зоне затрудненного водообмена - хлоридные натриево-кальциевые, либо натриевые с минерализацией 1,0-2,4 г/дм³ и более, на глубине 600-650 м переходящие в рассолы с минерализацией 122,4 г/дм³ (скважина глубиной 1008 м на Средней Рогатке в Санкт-Петербурге). Как правило, в водах повышено содержание брома и радионуклидов.

4 Условия формирования ресурсов вендского водоносного комплекса

Ресурсы вендского водоносного комплекса зависят от ёмкостных параметров слагающих его пород и от объёмов поступающего питания (Боревский, Язвин, 2010). Для хозяйственно-бытового водоснабжения важным является качество и состав подземных вод. Характерной особенностью ВВК на исследуемой территории является существенное пространственное изменение химического состава (от гидрокарбонатного до хлоридного) и минерализации (от пресной до 10 г/л) его вод (рис. 7).

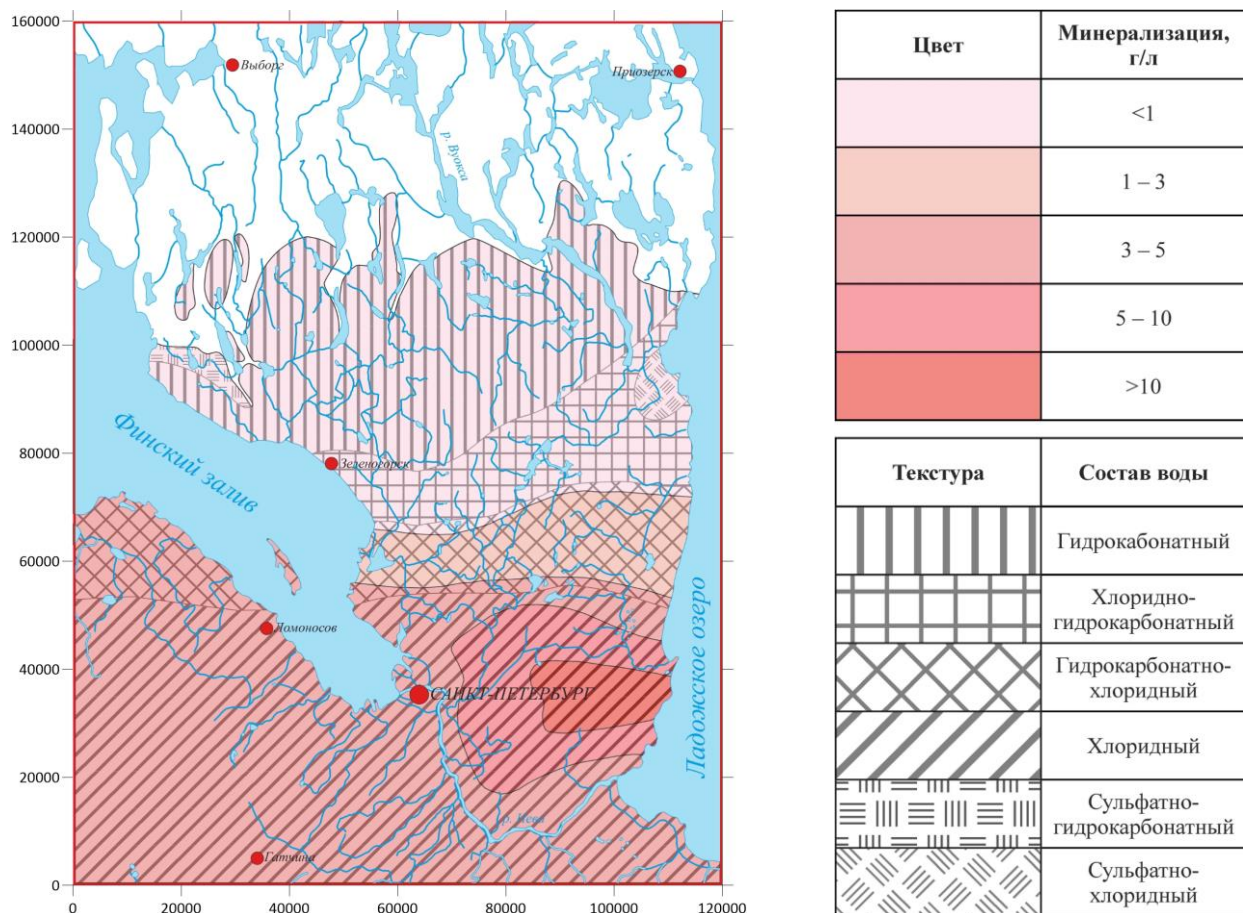


Рисунок 7. Карта химической зональности вод вендского водоносного комплекса.

Составлена автором по данным Отчёта «Региональная переоценка...», 2005

В данной работе, перед проведением оценки ресурсного потенциала методом численного моделирования, была изучена литература и проведены исследования, позволяющие установить условия формирования ресурсов вендского водоносного комплекса. За основу взяты работы «Водообмен в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек» (Воронюк и др., 2016) и «Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater

stable isotopes (^2H , ^{18}O)» (Tokarev et al., 2019). В них рассматривается палеореконструкция условий формирования подземных вод исследуемого региона по изотопным данным.

Автором также проводились самостоятельные исследования изотопного состава подземных и поверхностных вод исследуемого региона на дейтерий ($\delta^2\text{H}$) – кислород ($\delta^{18}\text{O}$) на инфракрасном лазерном спектрометре Picarro L–2120i на базе Ресурсного центра Рентгенодифракционные методы исследования Научного парка СПбГУ (<https://researchpark.spbu.ru/equipment-xrd-rus/3015-xrd-picarro-l-2120-i-rus>).

4.1 Методы оценки: интерпретация изотопных данных

Система дейтерий ($\delta^2\text{H}$) – кислород ($\delta^{18}\text{O}$)

По данным об изотопном составе воды можно делать выводы о её возрасте, происхождении и истории развития, по ним можно проводить палеореконструкции климата и направления миграции подземных вод (Ферронский, Поляков, 2009; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Изотопный состав атмосферных осадков коррелирует с температурой воздуха (Dansgaard, 1964) $\delta^{18}\text{O}=0,69\times t-13,6\text{‰}$; $\delta^2\text{H}=5,6\times t-100\text{‰}$, где t – среднегодовая температура воздуха в точке наблюдения, °C. Эти уравнения сводятся к единому уравнению: $\delta^2\text{H}=8,06\times\delta^{18}\text{O}+9,6$ с исключением параметра температуры. Они являются декомпозицией уравнения глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) $\delta^2\text{H}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$ (рис. 8) (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Уравнения Дансгаарда (Dansgaard, 1964) должны использоваться для расчёта палеотемпературы только в том случае, если вторичные процессы (т.е. испарение и замораживание) не влияли на изотопный состав воды (Васильчук, 1991; Буданцева, Васильчук, 2017). Из этого уравнения и из глобальной базы данных изотопов в осадках МАГАТЭ (GNIP database of IAEA <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>) следует, что в тёплых климатических условиях (при годовой температуре $t>0^\circ\text{C}$) изотопный состав осадков должен быть $\delta^2\text{H}\geq-90\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}\geq-12\text{‰}$; и в холодном климате (при годовой температуре $t<0^\circ\text{C}$) – $\delta^2\text{H}\leq-110\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}\leq-14\text{‰}$ (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Как правило, осадки конкретной местности имеют несколько отличающиеся от ГЛМВ коэффициенты уравнения $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$. Поэтому для региональных построений правильнее оценивать локальную линию метеорных вод (ЛЛМВ) на основании достаточно продолжительных наблюдений за атмосферными осадками (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

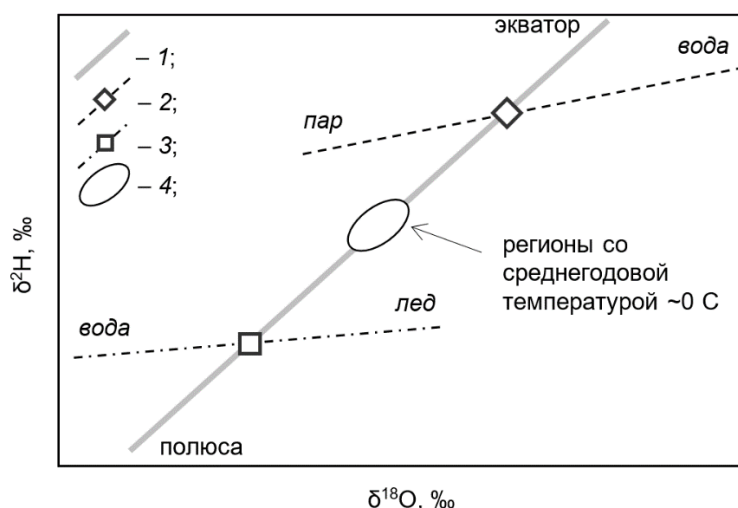


Рисунок 8. Использование системы дейтерий (δ^2H) – кислород ($\delta^{18}O$) для изучения условий формирования водных объектов, включая палеоклиматические реконструкции и диагностику вторичных процессов – испарения и замерзания: 1 – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ); 2 – линия испарения и начальный изотопный состав воды; 3 – линия замерзания и начальный изотопный состав воды; 4 – изотопный состав осадков в регионах со среднегодовой температурой около 0 °С $\delta^{18}O = -12..-14 ‰$ и $\delta^2H = -90..-110 ‰$.

Источник: Tokarev et al., 2019 с адаптацией

Тритий (3H)

Тритий является наилучшей меткой современного питания, так как в значительных количествах он стал поступать в атмосферу после начала термоядерных испытаний в 1952 г. Тритий может быть использован для датирования молодых подземных вод (возраст до 100 лет) (Ферронский, Поляков, 2009; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

4.2 История развития Беломоро-Балтийского региона в позднечетвертичное время

Особенностью Беломоро-Балтийского региона, включающего юго-восточную часть Балтийского гидрогеологического массива, а также Ленинградский артезианский бассейн, являются значительные климатические вариации и резкая смена конфигурации и уровней палеоводоемов в позднем плейстоцене и голоцене (Рис. 9).

Морской бассейн, существовавший в период микулинского межледниковья (115–130 тыс. лет назад, Рис. 9а), простирался от Балтики до Белого моря (Climate..., 2010). Микулинское море, также как современные Балтийское и часть Белого моря, было опреснено за счёт речного стока. Само межледниковье было примерно на 1,2 °С более тёплым, чем современное (Kaspar et al., 2005). Ледниковый покров, возникавший неоднократно в период валдайского оледенения, имел максимумы около 18, 60 и 85 тыс. лет назад. (Рис. 9б). В пиках

похолоданий среднегодовая температура была на 4–6 °С ниже современной, происходило периодическое осушение водоёмов и заполнение их ванн льдом, а также промораживание пород на территориях, не занятых ледником (Wohlfarth et al., 2007; Оледенение..., 2007; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

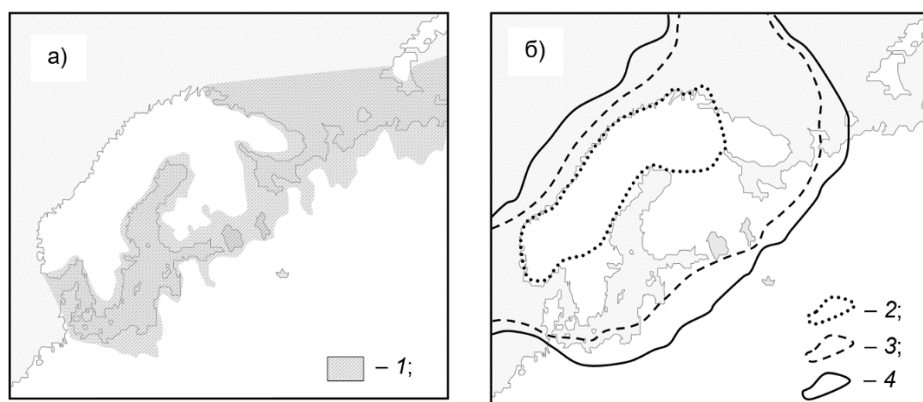


Рисунок 9. География Беломорско-Балтийский бассейна в позднем плейстоцене и голоцене: а) Микулинское море в период около 115–130 тыс. лет назад и б) границы ледовых щитов в период валдайского оледенения. 1 – Микулинское море; основные максимумы похолодания: 2 – 85, 3 – 60, 4 – 18 тыс. лет назад. Источник: *Climate...*, 2010 с адаптацией Токарева И.В.

При отступлении ледника образовывались приледниковые водоёмы, развитие которых определялось стадиями отступления ледника, уровнями стока и тектоникой. Так Ладожское озеро на разных этапах являлось заливом Балтики или самостоятельным водоемом (Björck, 1995; Субетто, 2007; Ладога..., 2013). В начале голоценового потепления (11 тыс. лет назад) Балтийское ледниковое озеро, сформированное талыми ледниковыми водами, могло достигать отметок +100...+120 м (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

В ходе деградации последнего оледенения в котловине Онежского озера образовался водоём, продвигающийся на северо-запад вслед за отступающим ледником. Быстрые и масштабные регрессии Онежского приледникового озера происходили 11,3 и 10,3 тыс. лет назад, в ходе которых водоём получал сток сначала в Белое море, затем в Ладогу и уровень падал на 20–25 м в течение нескольких лет (Демидов, 2005; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Около 8,5 тыс. лет назад наступил и продолжался примерно 3 тыс. лет голоценовый климатический оптимум, характеризовавшийся несколько более тёплым, чем настоящее время, климатом. Современная система озёр Северо-Запада начала формироваться примерно 5 тыс. лет назад. Окончательный разрыв Ладожско-Балтийского соединения произошёл около 3,7 тыс. лет назад. В это время уровень Ладожского озера упал почти до современных отметок. Современная р. Нева является относительно молодым образованием и имеет оценочный возраст 3,5 тыс. лет (Александровский и др. 2009; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Подземные воды в описываемое время испытывали существенное воздействие географо-климатических изменений. В периоды затопления ванн Балтийского и Белого морей и прилегающих территорий водами приледниковых бассейнов в прибрежной зоне создавались условия для инъекции вод этих водоёмов в подземную гидросферу под избыточным давлением, достигавшим нескольких атмосфер. При похолодании уровень приледниковых бассейнов понижался в связи с осушением акваторий из-за понижения уровня океана, а вследствие общей аридизации климата, уменьшалось количество атмосферных осадков. В этот период временно (до промерзания разреза) могли создаваться условия для интенсификации разгрузки подземных вод, в том числе и из относительно глубоких горизонтов (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Кроме изменения границ водоёмов и ледников, на состояние водоносных горизонтов существенное влияние должно было оказывать появление и исчезновение ледниковых покровов. В перигляциальной зоне похолодание вызывало возникновение мерзлоты и её таяние – в периоды потепления. Промерзание геологического разреза приводило к возникновению зоны относительно более пресных подземных льдов у поверхности и к отжатию остаточных, более солёных, вод вниз по разрезу. При последующем таянии подземных льдов образовывалась зона «возрождённых» пресных подземных вод. На участках, где мощность гляциального покрова превышала 500–700 м, возникал поток талых подземных вод от подошвы ледника и тающей мерзлоты (Goeller et al., 2013; Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Наконец, в голоцене, вследствие компенсации гляциодеформаций земной коры, происходит воздымание территории (Koshechkin et al., 1975), которое должно способствовать разгрузке глубинных солёных вод на поверхность (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

4.3 Изотопные данные и их интерпретация

Определения изотопного состава воды (содержаний дейтерия и кислорода-18) выполнены в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ, данные по тритию получены из открытых источников.

Грунтовые горизонты с современным атмосферным питанием.

Опробовались четвертичный и вендский комплексы в тех случаях, когда они представляют собой грунтовые (первые от поверхности) водоносные горизонты (рис. 10). В пределах Балтийского щита современное питание имеют подземные воды, как четвертичных отложений, так и верхней трещиноватой зоны кристаллических пород. Во всех случаях изотопный состав воды грунтовых горизонтов соответствует современным атмосферным

осадкам. Современное питание грунтовых горизонтов подтверждается также присутствием трития, который определялся, примерно, в 1/3 проб (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

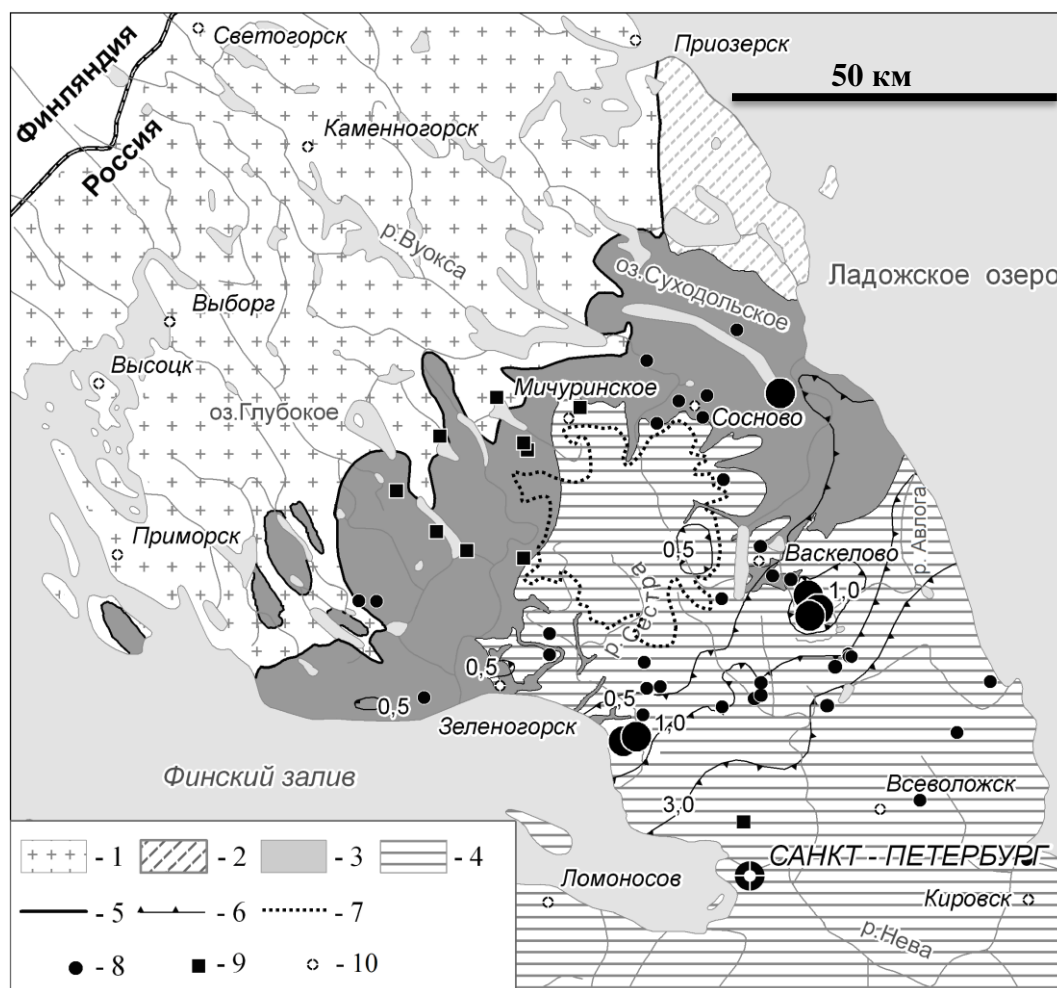


Рисунок 10. Схема площади работ на Карельском перешейке (со снятым чехлом четвертичных отложений): 1 – кристаллические архей-протерозойские породы; 2 – рифейский водоносный комплекс (Ладожский грабен); 3 – вендский водоносный комплекс; 4 – верхневендский (котлинский) региональный водоупор; 5 – граница между Ленинградским артезианским бассейном и Балтийским гидрогеологическим массивом; 6 – изолинии минерализации вод вендского водоносного комплекса (г/л); 7 – изолиния рельефа 100 м (предполагаемая область питания – Лемболовские высоты с отметками до 120 м); 8, 9 – точки опробования подземных вод на дейтерий и кислород-18, а также на дейтерий, кислород-18 и тритий, соответственно (крупными значками выделены точки, обсуждаемые в тексте); 10 – населенные пункты. Источник: Воронюк и др., 2016

Взвешенный среднегодовой изотопный состав атмосферных осадков региона $\delta^{18}\text{O} = -11,8 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -84 \text{ ‰}$. По содержаниям дейтерия и кислорода-18, запасы подземных вод ВВК вблизи области питания восполняются преимущественно за счёт осадков холодного периода года и во время весеннего половодья (точки с белой заливкой на рис. 11), что

подтверждается наблюдениями по режимным скважинам (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019; Отчёт «Региональная переоценка...», 2005).

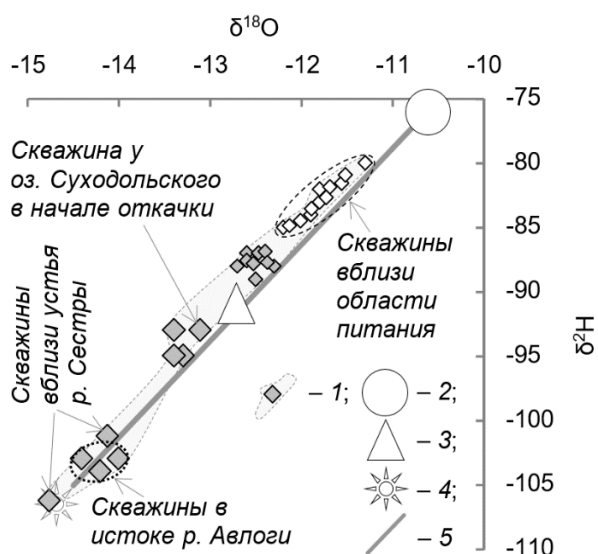


Рисунок 11. Изотопный состав подземных вод вендского водоносного комплекса на Карельском перешейке: 1 – точки опробования (точки увеличенного размера с подписями обсуждаются в тексте, на рис. 10 они также показаны значками увеличенного размера); 2 – среднегодовой состав атмосферных осадков; 3 – средний состав осадков холодного периода года; 4 – средний состав снега по данным съёмок 2011–2013 г.; 5 – локальная линия метеорных вод, оцененная по результатам мониторинга атмосферных осадков в 2012–2015 г. на станциях «Петродворец» и «Ламмин-Суо». Источник: Tokarev et al., 2019 с адаптацией

Опробование на тритий, проведённое в окрестностях Лемболовской возвышенности, а также в зоне выхода ВВК на земную поверхность (рис. 10) обнаруживают содержания трития на уровне 4–15 ТЕ при фоне в атмосферных осадках 9–17 ТЕ (Kortelainen, 2009), что указывает на относительно малый возраст воды ВВК в этом районе (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

Вендский водоносный комплекс.

В зоне распространения котлинских глин инфильтрационное питание ВВК за счёт перетекания невелико, вследствие чего поток приобретает латеральный характер. Современная область питания приурочена к Лемболовским высотам. Предполагается, что разгрузка ВВК происходит в Ладожское озеро и, в меньшей степени, в Финский залив. Роль р. Невы, как дрены для ВВК, вероятно всего, незначительна в силу большой мощности перекрывающего водоупора (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017).

По мере движения подземных вод ВВК от области питания к югу и юго-востоку наблюдается заметный рост минерализации воды от 0,5 до 3 г/л (рис. 10). Как правило, при

минерализации более 0,4 г/л гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды меняют состав на хлоридный натриевый. В юго-восточной части Карельского перешейка увеличение минерализации наблюдается и с глубиной (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

На Карельском перешейке обнаруживаются воды, поступивших в ВВК в конце плейстоцена и начале голоцена, когда ещё сохранялось влияние предыдущего похолодания (на рис. 10 и 11 показаны значками увеличенного размера). В одних случаях вода ВВК оказывается несколько легче средних осадков за холодный период года (группа из четырёх точек, включая скважину около оз. Суходольского), а в других – приближается к среднему изотопному составу снегового покрова (рис. 11). Скважины, в которых обнаружены воды наиболее лёгкого изотопного состава, расположены в области повышения минерализации вод ВВК на левом берегу р. Авлоги в её истоках и вблизи устья р. Сестры. Пространственно все точки располагаются вблизи изолинии минерализации 1 г/л (рис. 10) (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

В некоторых случаях обнаруживается вертикальная зональность гидрохимического разреза, которая наиболее чётко видна по результатам опробования вод вендского и рифейского комплексов самоизливающей скважиной около юго-восточной оконечности оз. Суходольского. Минерализация воды в верхней части разреза рифейских песчаников составляет около 140 мг/дм³, в нижней – 640 мг/дм³ при смене химического состава с гидрокарбонатного кальциево-магневого на хлоридно-гидрокарбонатный натриевый (рис. 12). Значительно и разнонаправлено изменялись также содержания микроэлементов (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

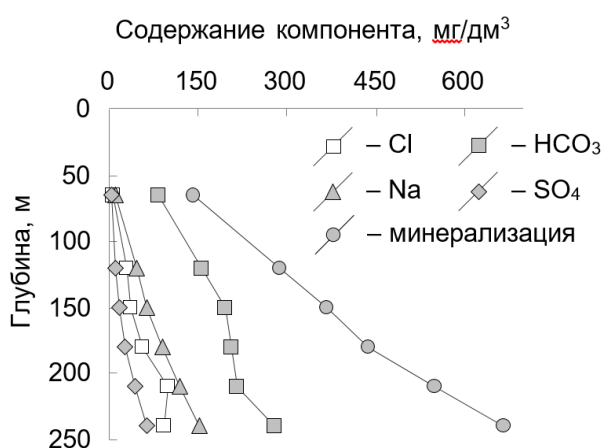


Рисунок 12. Изменение химического состава воды с глубиной в скважине из района юго-восточной оконечности оз. Суходольского. Источник: Tokarev et al., 2019 с адаптацией

Одновременно с изменением химического облика происходило значительное облегчение изотопного состава подземных вод (рис. 13). Это облегчение настолько велико, что воды рифейского комплекса в конце опробования оказываются существенно изотопически

легче, чем современный снег, что определенно указывает на формирование подземных вод в более холодную климатическую эпоху (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).

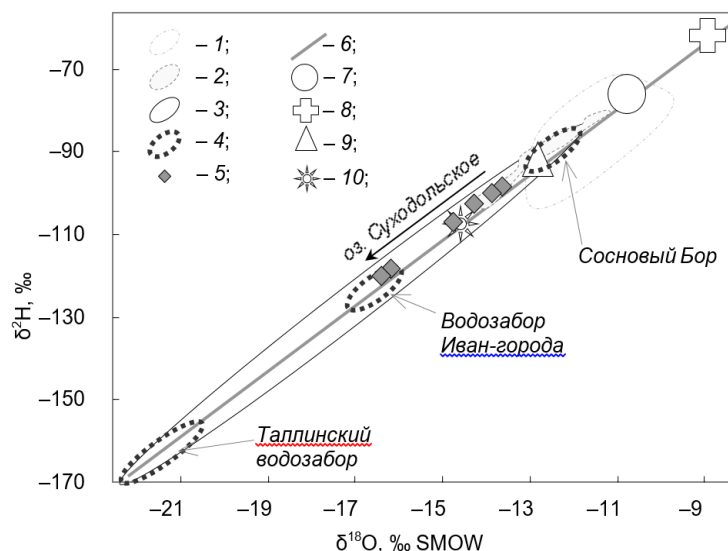
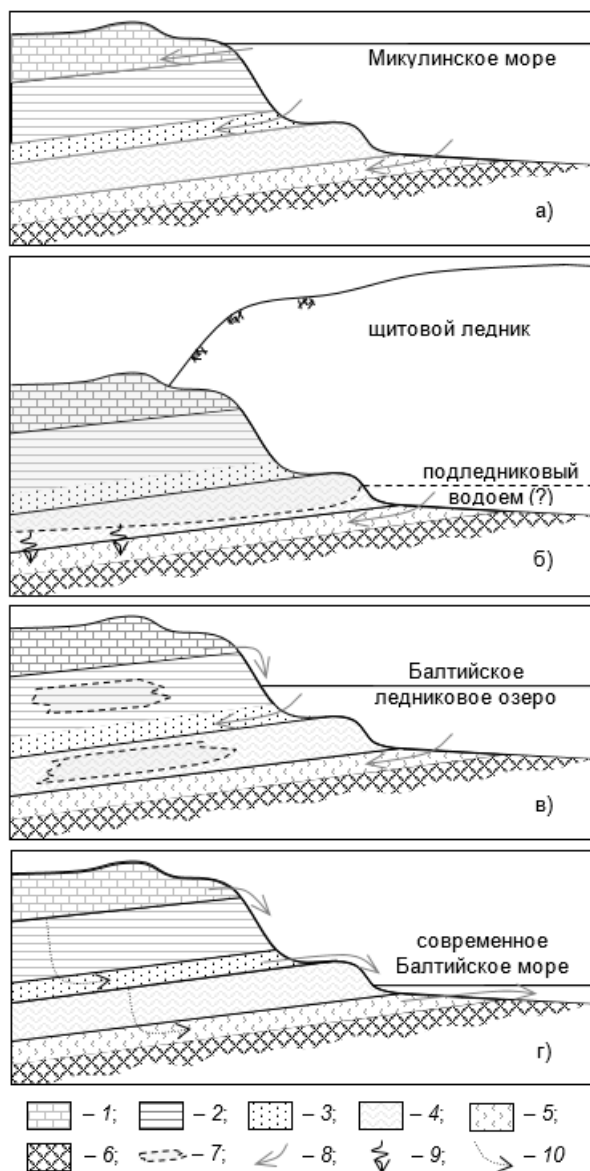


Рисунок 13. Изотопный состав воды различных горизонтов в Ленинградской области и Эстонии: 1 – грунтовые воды (первый от поверхности водоносный горизонт); 2 – вендский водоносный комплекс на Карельском перешейке (соответствует закрашенной области на рис. 11); 3 – ломоносовский горизонт в целом; 4 – водозаборы на ломоносовский горизонт (географическая локализация указана подписями на рисунке, данные для Таллинского водозабора взяты из (Raidla et al., 2009)); 5 – скважина на рифей около юго-восточной оконечности оз, Суходольского (стрелкой показан тренд изменения состава по мере углубления скважины, а положение скважины – на рис. 10); 6, 7 – локальная линия метеорных вод и среднегодовой изотопный состав атмосферных осадков для района Санкт-Петербурга; 8 – средние осадки теплого периода года; 9 – средние осадки холодного периода года; 10 – средний состав снега в 2011–2013 г.. Источник: Tokarev et al., 2019 с адаптацией

Вышеприведенные материалы позволяют сформулировать концептуальную модель влияния географо-климатических вариаций в Беломоро-Балтийском регионе на формирование подземных вод, которая иллюстрируется схемой для района современного Финского залива (рис. 14) (Воронюк и др., 2016; Tokarev et al., 2019).



Условные обозначения:

- 1 – ордовикский и кембро-ордовикский водоносные комплексы;
- 2 – кембрийские глины;
- 3 – ломоносовский водоносный горизонт песчаников;
- 4 – верхнекотлинские глины;
- 5 – вендский водоносный комплекс;
- 6 – зона трещиноватости кристаллического фундамента;
- 7 – зона мерзлых пород;
- 8 – поступление поверхностных вод в водоносные горизонты и их разгрузка;
- 9 – отжатие воды в период промерзания;
- 10 – перетекание через водоупоры

Рисунок 14. Концептуальная схема влияния смены географо-климатических условий в плейстоцене и голоцене на гидрогеологический режим прибрежных территорий Беломоро-Балтийского региона: а) Микулинское межледниковье – внедрение интрузий морской воды при повышении уровня моря; б) Валдайское оледенение – промораживание геологического разреза на участках, не занятых льдом, отжатие остаточных вод вниз по разрезу с одновременной криогенной метаморфизацией химического и изотопного состава, внедрение пресной воды при таянии подошвы покровного ледника, возникновение окислительных условий; в) окончание оледенения – питание прибрежных горизонтов пресной водой при образовании Балтийского ледникового озера, появление «возрожденных вод» при таянии мерзлоты; г) голоцен – разгрузка подземных вод в современное Балтийское море. Источник:

Tokarev et al., 2019 с адаптацией

4.4 Формирование палеодолин

Расположение и характеристики палеодолин играют существенную роль в формировании ресурсов и напорного режима вендского и межморенных водоносных комплексов. Причины их формирования и особенности строения на территории г. Санкт-Петербург описаны в работе «Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга» (Дашко и др., 2011).

Рельеф кровли дочетвертичных отложений сформировался в позднеогеновое и четвертичное время (от 2 млн. до 11 тыс. лет назад) за счёт эрозионной деятельности древней речной системы, которая прорезала породы нижней толщи на различную глубину. В четвертичное время древние речные долины, представлявшие собой пониженные участки рельефа, были полностью заполнены ледниковыми и межледниковыми отложениями, в результате чего в современном рельефе такие долины обычно не выражены. Исключение составляют некоторые районы в южной и юго-западной частях Санкт-Петербурга, где мощность четвертичных образований небольшая (менее 10 м) и в современном рельефе прослеживаются понижения дневной поверхности, совпадающие по ширине и протяженности с очертаниями эрозионных врезов (Дашко и др., 2011).

Формирование древних речных систем связано с особенностями структурно-тектонических и палеогеографических условий территории. По данным геологоразведочных работ, геофизических и геохимических исследований установлено, что кристаллический фундамент в пределах города и прилегающих районов разбит системой региональных тектонических разломов северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания, а также сетью более мелких разрывных нарушений на отдельные блоки, которые образуют в плане структуру типа «битой тарелки» (Дашко и др., 2011).

Разломы фундамента в некоторой степени пролонгируются в породах осадочной дочетвертичной толщи (глины и песчаники), приводя к их дезинтеграции. Наличие тектонической трещиноватости в коренных глинах подтверждают наблюдения за обнажениями верхнекотлинских глин в подземных выработках Петербургского метрополитена (данные Ю.А. Лиманова, Р.Н. Кремневой, Р.Э. Дашко и др.) и исследования интенсивности трещиноватости в карьерах нижнекембрийских «синих» глин в Ленинградской области (Дашко и др., 2011).

Наиболее глубокие погребенные долины в пределах города приурочены к разломам субширотного направления. Меньшая часть палеодолин, а также межморенные палеодолины четвертичного возраста контролируются северо-восточными и северо-западными разломами. Глубина тальвегов палеодолин может достигать 100-105 м. Крутизна склонов большинства палеодолин обычно изменяется в пределах 12-15°, реже 18°, в верхней части – менее 10°. При

этом ширина погребенной долины в плане может достигать нескольких километров (Дашко и др., 2011). В таблице 2 приведена типизация погребенных долин по глубине эрозионного вреза на территории г. Санкт-Петербург.

Таблица 2. Типизация погребенных долин по глубине эрозионного вреза на территории г. Санкт-Петербург. Источник: (Дашко и др., 2011)

Тип палеодолины	Глубина эрозионного вреза в коренные породы, м	Мощность четвертичных отложений в тальвеговой части, считая от дневной поверхности, м
Глубокие	60-90	До 120
Средней глубины	30-60	До 90
С малым эрозионным врезом	Менее 30	До 40

Глубина вреза палеодолин в коренные глины определяет остаточную мощность верхнекотлинского водоупора над вендским водоносным комплексом. В тальвегах глубоких долин водоупорные слои могут быть минимальными. По мере уменьшения глубины эрозионного вреза палеодолин возможность восходящего перетекания минерализованных вод (Дашко и др., 2011).

5 Численная геофильтрационная модель

Численная геофильтрационная модель вендского водоносного комплекса в пределах Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург создавалась на базе программного обеспечения Processing Modflow 8 издательства Simcore Software (<https://www.simcore.com/wp/products/>; Processing Modflow, 2012), лицензия на которое была предоставлена преподавателем кафедры гидрогеологии СПбГУ Л.Н. Синдаловским. Программа Processing Modflow 8 является прямым усовершенствованием открытого программного обеспечения Processing Modflow 5.3 того же издательства (<http://www.pmwin.net/pmwin5.htm>) с небольшими улучшениями функционала и дизайна, поэтому любые руководства пользователя (например, Chiang, Kinzelbach, 1998) к ней также применимы. Расчёты проводились в программе Modflow-98, встроенной в программное обеспечение Processing Modflow.

Для создания численной геофильтрационной модели необходимо определить граничные и начальные условия, величину питания и параметры пород (горизонтальные и вертикальные коэффициенты фильтрации, пористость, гравитационную и упругую водоотдачу). Важным является выбор пространственной разбивки в плане и разрезе, а также выбор типа модели – стационарной или нестационарной. В первом случае расчёт ведётся до стабилизации уровней при постоянных параметрах. Во втором – решение происходит последовательно по заданным временным периодам, с возможностью изменять в них модельные параметры. Такой подход к решению задачи позволяет моделировать реальное изменение гидродинамической картины во времени и осуществлять прогнозные расчёты (Лукнер, Шестаков, 1976). Калибровка модели может быть выполнена по наблюдаемому распределению напоров (уровней) и расходам на границах (Коносавский, Соловейчик, 2001).

Границы модельной области и пространственная разбивка

Для моделирования выбран участок размером 120×160 км, включающий в себя всю эксплуатируемую площадь вендского водоносного комплекса на территории Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург, а также имеющую гидравлическую связь с породами венда область распространения архей-протерозойских пород фундамента (рис. 15). Модельная область повёрнута на 28° по часовой стрелке относительно направления на север для более удобного задания геологических и гидрогеологических структур. Размер одной модельной ячейки принят 1×1 км. Количество модельных слоёв равно 8.

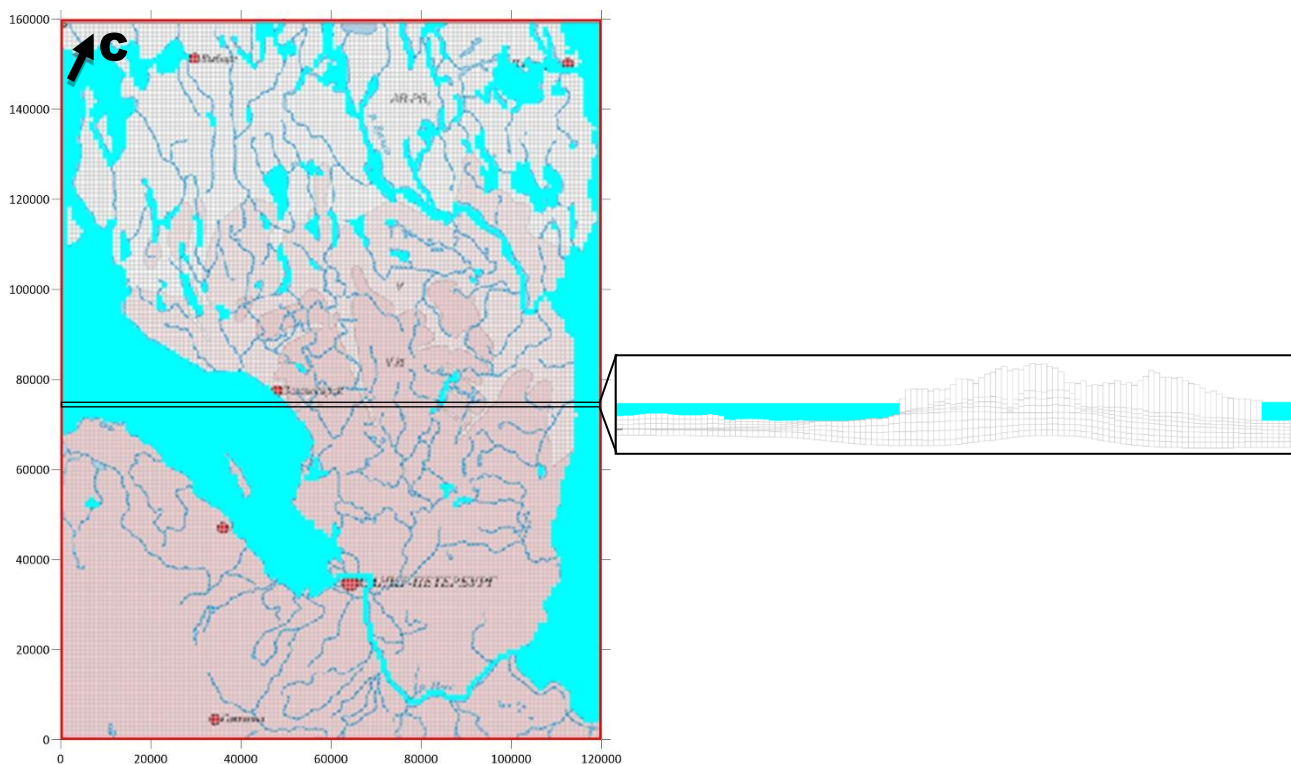


Рисунок 15. Пространственная разбивка модельной области ячейками 1×1 км. Выноской показан вид модели в разрезе по строке №86, вертикальный масштаб увеличен в 50 раз. Здесь и далее по левому и нижнему краю отражён масштаб в метрах. Схема составлена автором

Задание кровли и подошвы расчётных слоёв

Первый слой соответствует перекрывающим четвертичным и дочетвертичным осадочным (на юге моделируемой области) отложениям. Кровля первого расчётного слоя соответствует отметкам рельефа (рис. 17). Данные о рельефе территории получены из цифровой модели рельефа (рис. 16), предоставленной в формате GIS-файла сотрудниками Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Г.С. Бородулиной и М.Л. Левичевым.

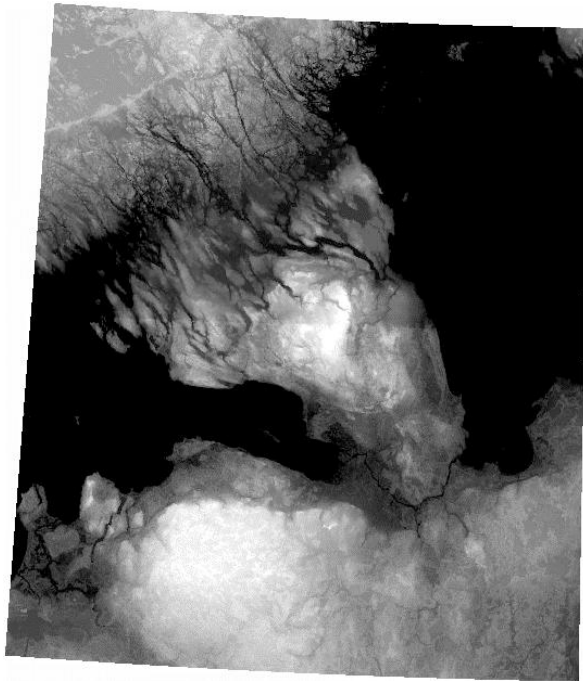


Рисунок 16. Цифровая модель рельефа района работ. Источник: Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

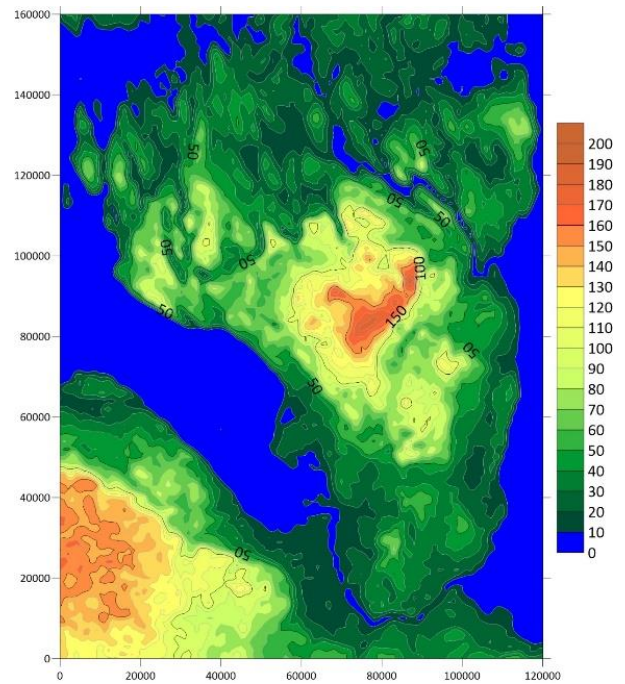


Рисунок 17. Цифровая карта высотных отметок рельефа в пределах модельной области. Составлена автором

Подосва первого слоя (рис. 19) задавалась в соответствии с картой мощности перекрывающих отложений из Отчёта «Создание ПДМ...», 2017 (рис. 18).

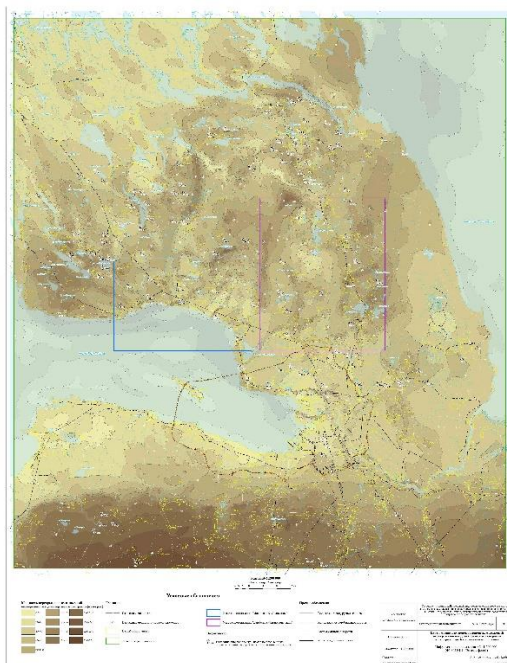


Рисунок 18. Карта мощности перекрывающих отложений. Источник: Отчёт «Создание ПДМ...», 2017

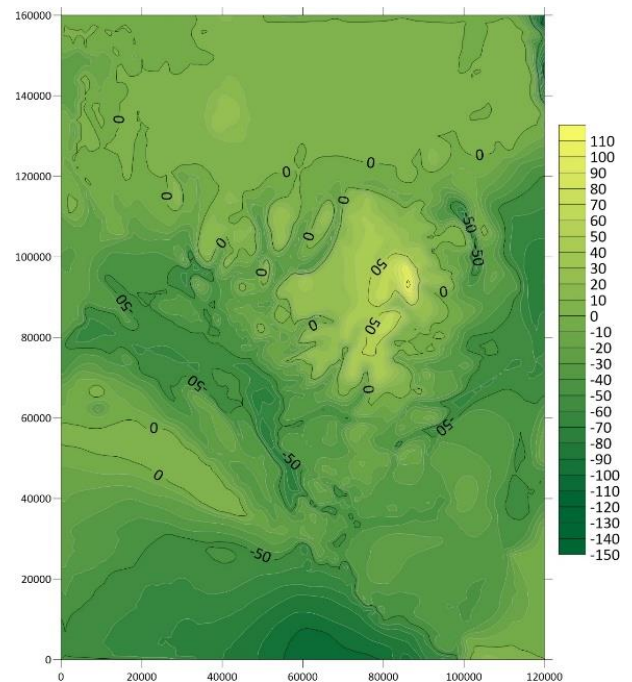


Рисунок 19. Цифровая карта кровли перекрывающих вендские породы отложений. Составлена автором

Слой со 2 по 4 соответствуют котлинским глинам – региональному водоупору. Горизонт был разделён на 3 равновеликих слоя, чтобы лучше отражать ёмкостные свойства

мощного слабопроницаемого пласта. Подошва глин (рис. 21) задавалась по карте изогипс кровли вендского водоносного комплекса, взятой из Отчёта «Региональная переоценка...», 2005 (рис. 20). В северной части, где глины отсутствуют, горизонт аппроксимирован слоями с минимальной мощностью.

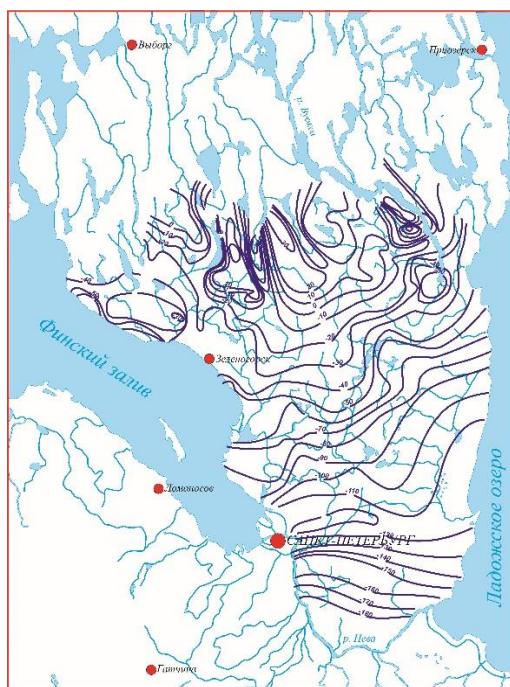


Рисунок 20. Карта изогипс кровли ВВК.

Источник: Отчёт «Региональная переоценка...», 2005 (переработанна автором)

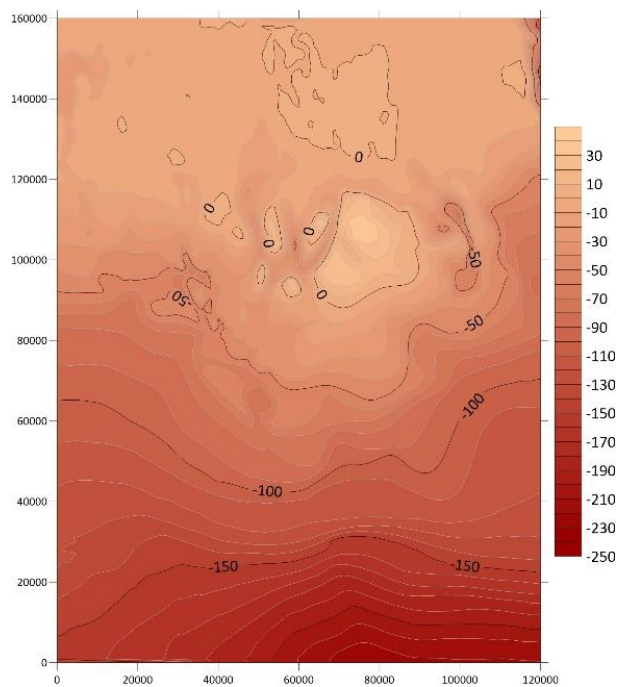


Рисунок 21. Цифровая карта кровли ВВК.

Составлена автором

Слои с 5 по 7 соответствуют непосредственно вендскому водоносному комплексу. Он также разбит на 3 равновеликих слоя для улучшения модельных расчётов. Подошва ВВК (рис. 23) задавалась по карте изогипс кровли фундамента, взятой из Отчёта «Региональная переоценка...», 2005 (рис. 22). В северной части, где горизонт отсутствует, модельные слои приведены к минимальной мощности.

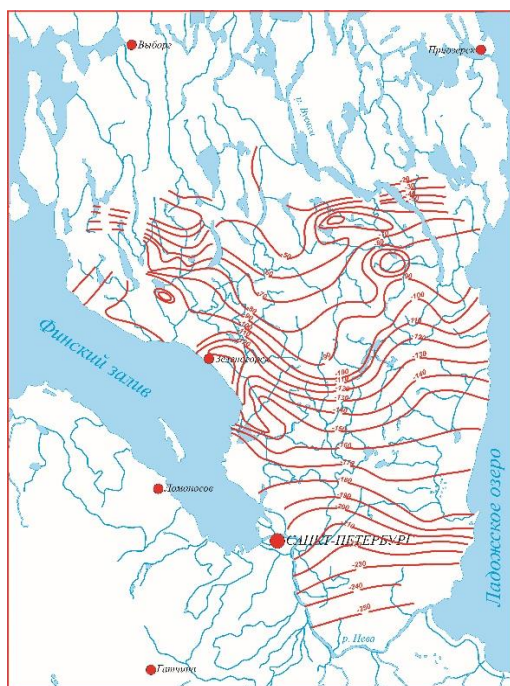


Рисунок 22. Карта изогипс подошвы ВВК.

Источник: Отчёт «Региональная переоценка...», 2005 (переработанна автором)

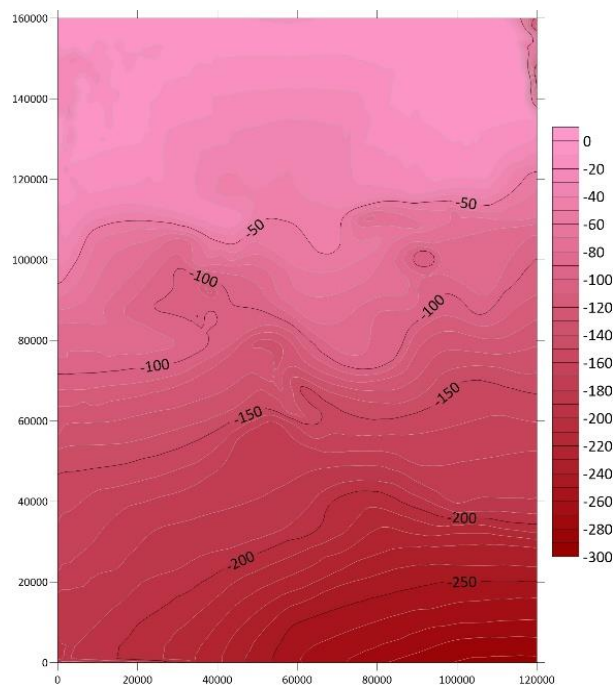


Рисунок 23. Цифровая карта изогипс подошвы ВВК. Составлена автором

Восьмой слой соответствует верхней трещиноватой зоне фундамента. Её мощность принята равной 20 м по всей площади модели.

Задание типов расчётных слоёв

Во всех расчётных слоях кроме первого задан напорный режим. Верхний слой задан напорно-безнапорным, так как гидродинамические условия питания/разгрузки четвертичных отложений крайне изменчивы.

Задание граничных условий

Основными внешними границами являются Финский залив, Ладожское озеро, река Нева, а также реки и озёра Карельского перешейка (рис. 24).

Финский залив. Отметки поверхности дна Финского залива были взяты с карты государственной геодезической сети, полученной с сайта <https://nakarte.me/>. Уровень воды при моделировании современной ситуации принят равным ± 0 абс.м (здесь и далее в Балтийской системе высот). Высотные отметки водной поверхности всех водных объектов взяты по данным GIS-системы Google Earth Pro (<https://www.google.com/earth/>).

Ладожское озеро. Отметки глубин Ладожского озера брались с карты, полученной с сайта <https://fishermap.org/depth-map/ladoghskoe-ozero/>. Уровень воды при моделировании современной ситуации принят равным 4 абс.м.

Реки и озёра. В модели заданы только крупные реки и озёра, отображение которых имеет значение при пространственной разбивке 1×1 км. Глубины рек и озёр Карельского перешейка задавались в соответствии с данными, размещёнными на интернет-ресурсах: <https://fishtouring.com/47/lakes/>, <http://www.fishingpiter.ru/maps/index.php>, <https://russiaregions.ru/vyborgskij-rajon/vyborgskyrivers/>.

Все указанные выше поверхностные объекты моделировались граничным условием III рода через модуль River.

На южной границе ВВК по линии равных напоров 15 м (взятой по данным Отчёта «Создание ПДМ...», 2017) задано граничное условие третьего рода для моделирования гидравлической связи моделируемой части вендского водоносного комплекса с остальной частью Ленинградского артезианского бассейна (рис. 25).

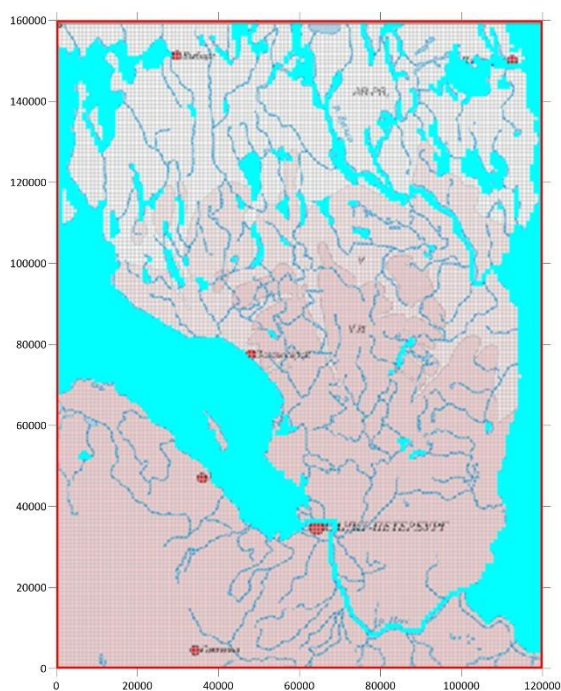


Рисунок 24. Границы 3 рода в первом расчётном слое (перекрывающие вендские породы отложения). Скриншот из модели

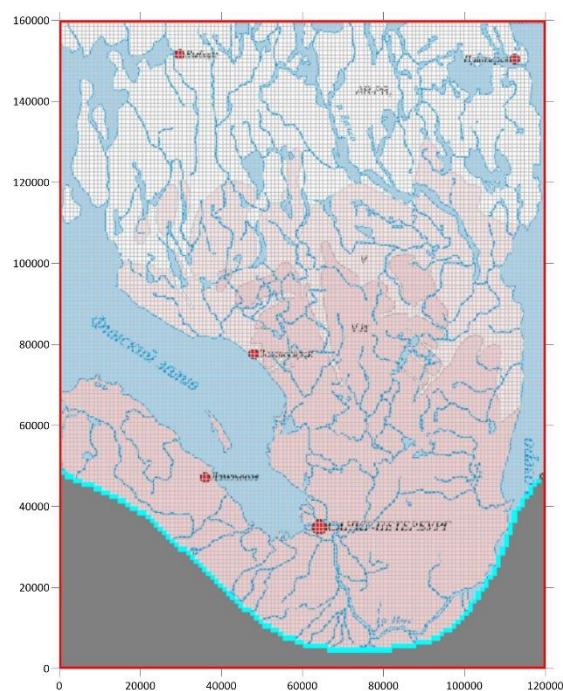


Рисунок 25. Границы 3 рода в 5-7 расчётных слоях (вендский водоносный комплекс). Скриншот из модели

Коэффициенты фильтрации

Одним из основных параметров, влияющих на распределение уровней в модели, являются вертикальные (K_z) и горизонтальные ($K_{x,y}$) коэффициенты фильтрации. Изначальные коэффициенты фильтрации задавались в соответствии с картами из Отчёта «Создание ПДМ...», 2017 (рис. 26, 27). В ходе калибровки модели пространственное распределение и величина коэффициентов фильтрации были откорректированы. Полученные зоны неоднородности отражены на рисунках 28 и 29 для вертикальных и 30 и 31 для горизонтальных коэффициентов фильтрации. В слое перекрывающих отложений были

приняты однородные коэффициенты фильтрации $K_{x,y}=5 \text{ м/сут}$ и $K_z=0,1 \text{ м/сут}$. В зоне трещиноватости фундамента коэффициенты фильтрации задавались также однородными $K_{x,y}=0,0001 \text{ м/сут}$ и $K_z=0,000003 \text{ м/сут}$.

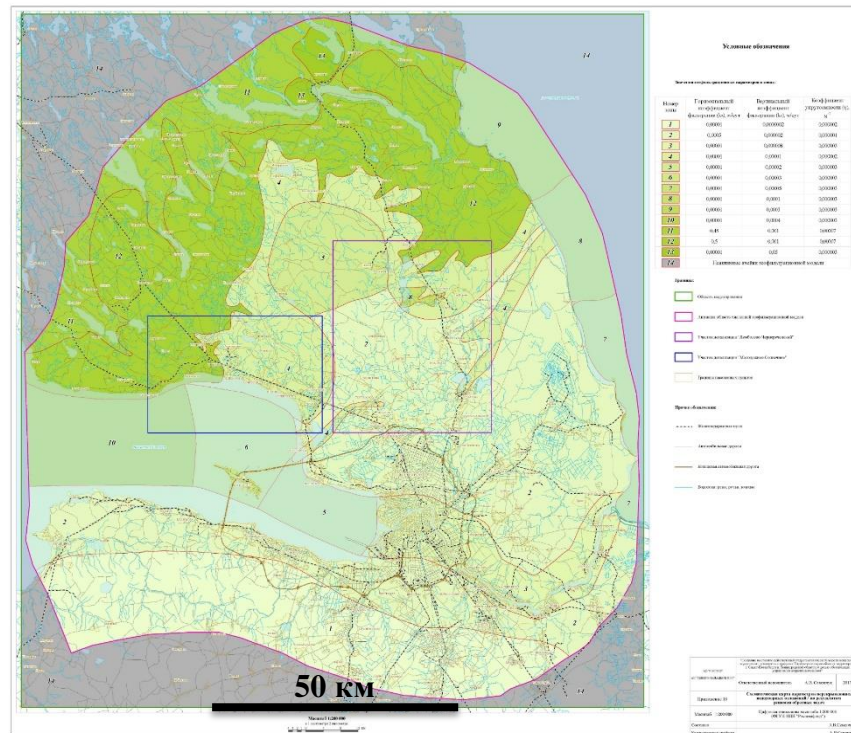
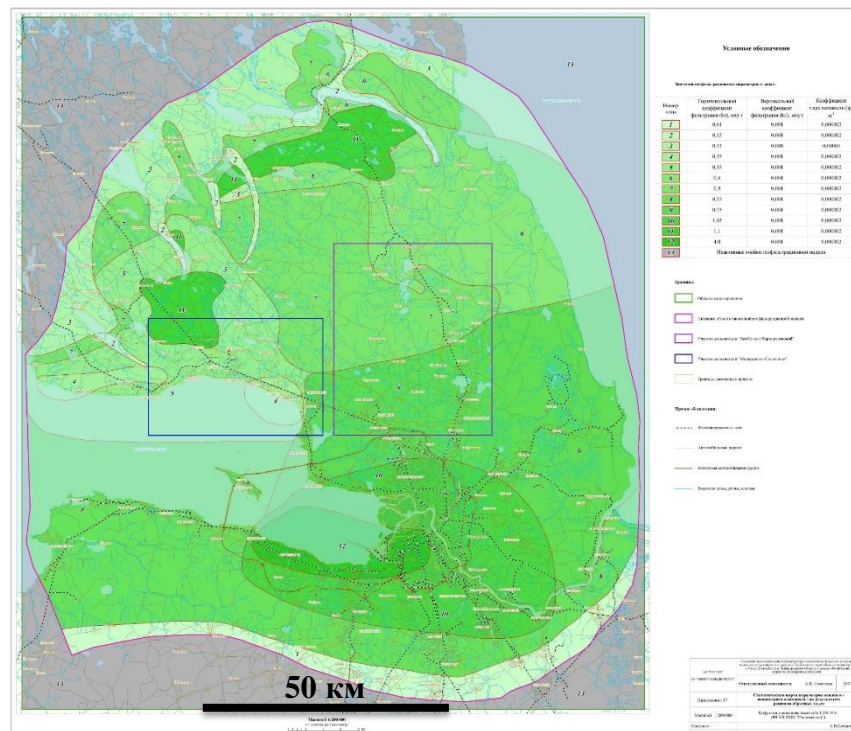


Рисунок 26. Карта распределения фильтрационных параметров котлинских глин.

Источник: Отчёт «Создание ПДМ...», 2017



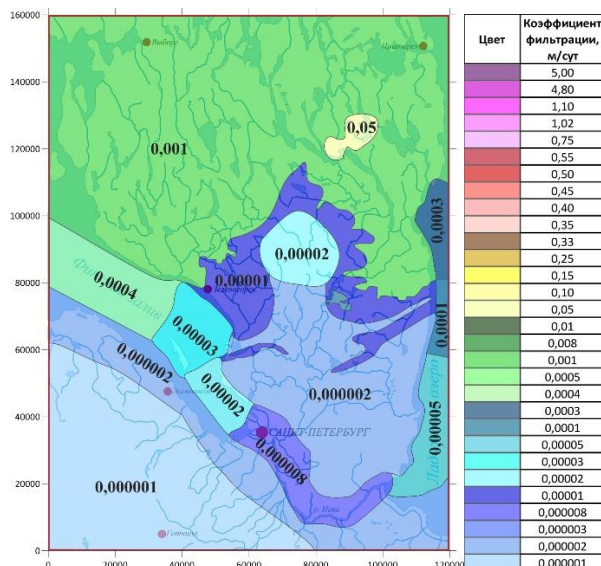


Рисунок 28. Схема неоднородности вертикальных коэффициентов фильтрации (K_z) в котлинских глинах. Составлена автором

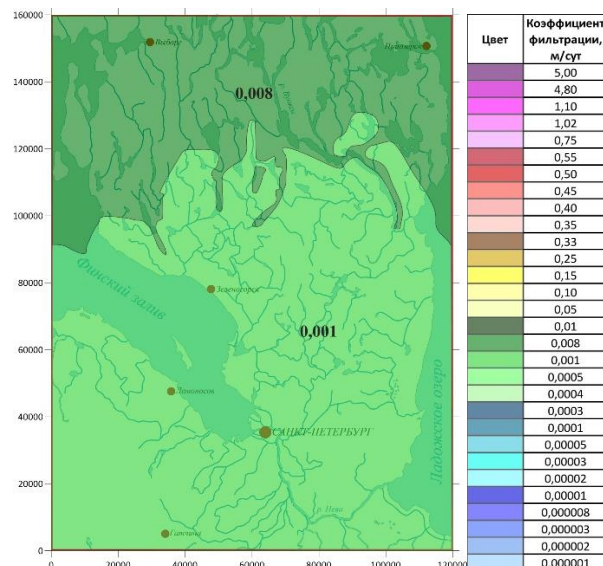


Рисунок 29. Схема неоднородности вертикальных коэффициентов фильтрации (K_z) в вендском водоносном комплексе. Составлена автором

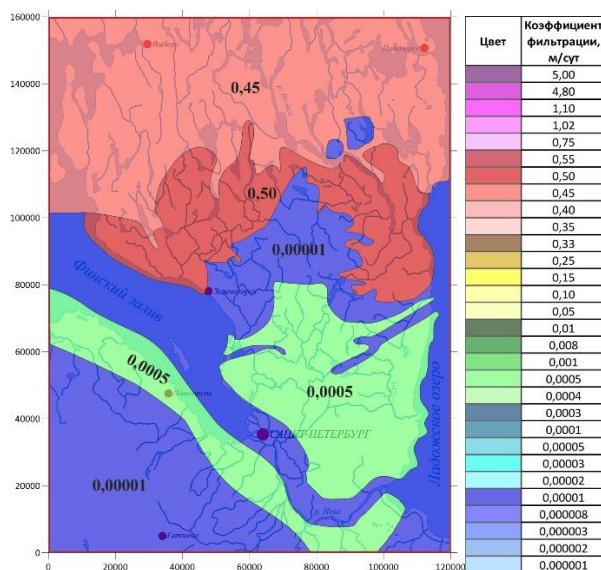


Рисунок 30. Схема неоднородности горизонтальных коэффициентов фильтрации ($K_{x,y}$) в котлинских глинах. Составлена автором

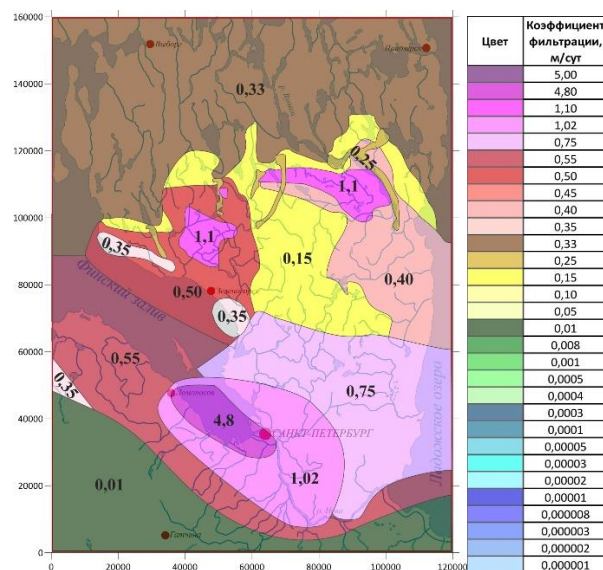


Рисунок 31. Схема неоднородности горизонтальных коэффициентов фильтрации ($K_{x,y}$) в вендском водоносном комплексе. Составлена автором

Ёмкостные параметры

Для стационарной задачи ёмкостные параметры пород не имеют значения, но для перехода к нестационарной постановке задачи необходимо задать упругую и гравитационную водоотдачи. Так как исследуемые водоносные горизонты на большей площади своего распространения характеризуются напорным режимом, то определяющее значение имеет упругая водоотдача этих слоёв. Первичные данные были взяты из Отчёта «Создание ПДМ...»,

2017 (рис. 26, 27). После этапа калибровки были получено распределение зон неоднородности упругой водоотдачи, приведённое на рисунках 32 и 33 для котлинских глин и ВВК соответственно. В слое перекрывающих отложений упругая водоотдача задана 0,005 1/м, в зоне трещиноватости фундамента – 0,000001 1/м.

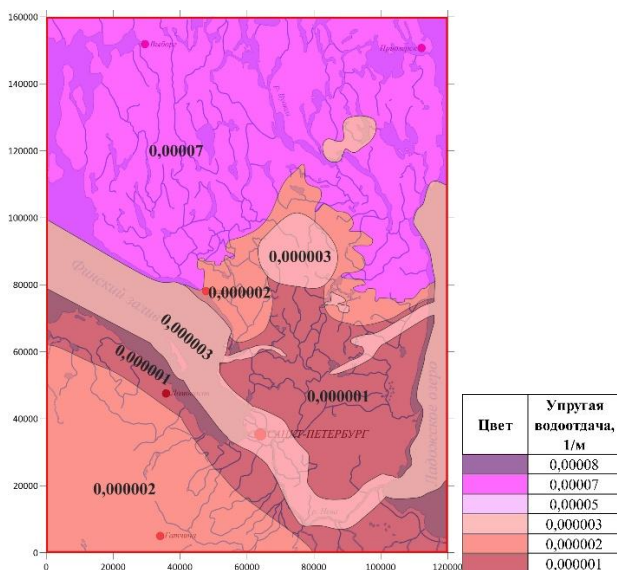


Рисунок 32. Схема неоднородности упругой водоотдачи в котлинских глинах.

Составлена автором

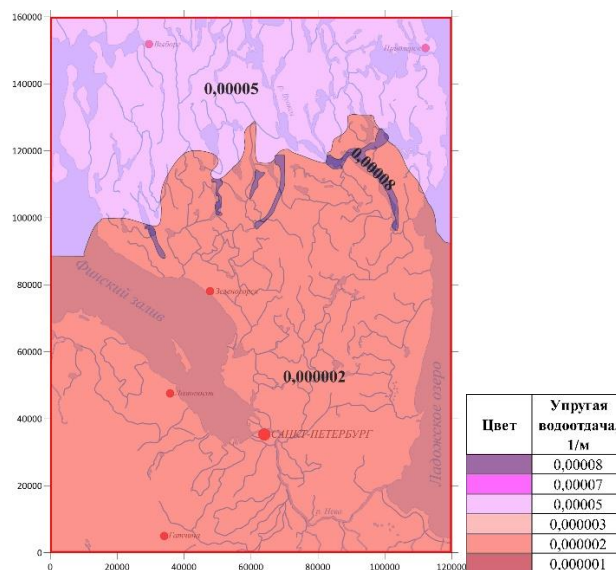


Рисунок 33. Схема неоднородности упругой водоотдачи в ВВК. Составлена автором

Гравитационная водоотдача была задана равной 0,12 для перекрывающих отложений, упругая – 0,000008 для котлинских глин, 0,000033 для вендского водоносного комплекса и 0,000005 для зоны трещиноватости фундамента.

Инфильтрационное питание

Инфильтрационное питание атмосферными осадками – основной современный источник восполнения ресурсов вендского водоносного комплекса. Пространственное распределение объёма питания связано с количеством осадков, выпадающих в области питания. Можно предположить, что чем выше расположена область питания, тем больше осадков идёт на инфильтрацию, а не на поверхностный сток (что обусловлено увеличением доли мелкодисперсного материала в осадках, заполняющих долины).

Распределение среднемноголетнего количества осадков приведено на рисунке 34 по данным Отчёта о создании современной гидрогеологической карты ЛАБ, 2007. Осадки расходуются на инфильтрационное питание не полностью: часть из них испаряется, часть уходит на питание растений, часть идёт на поверхностный сток и лишь 10–15% пополняют запасы подземных вод (СКИОВО, 2005). Поэтому численное распределение осадков по модельной области приведено на рисунке 35.

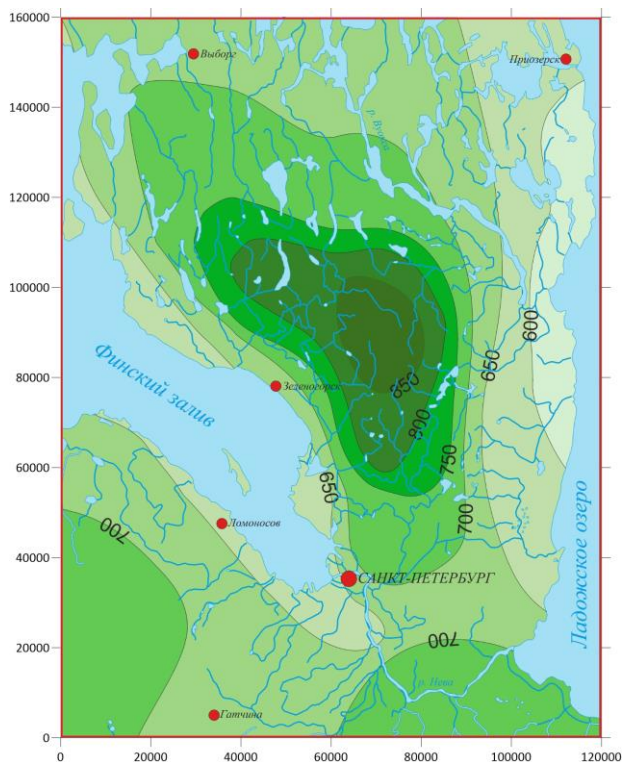


Рисунок 34. Среднемноголетнее (за 1960 – 1980 гг.) распределение количества осадков на моделируемой территории в мм/год.

Источник: составлена автором по данным

Отчёта о создании современной гидрогеологической карты ЛАБ., 2007

Решение стационарной задачи

После задания перечисленных выше параметров, была решена стационарная задача, моделирующая распределение напоров при ненарушенном гидродинамическом режиме. Первично заданные модельные параметры были откорректированы в ходе калибровки для получения удовлетворительной сходимости с распределением естественных напоров (модель Рошалья А.А., Отчёт по разработке ПДМ..., 1986). На рисунке 36 синим цветом показано распределение стационарных напоров после всех этапов калибровки разрабатываемой модели, серыми кривыми – пьезоизогипсы естественного режима по Отчёту по разработке ПДМ..., 1986.

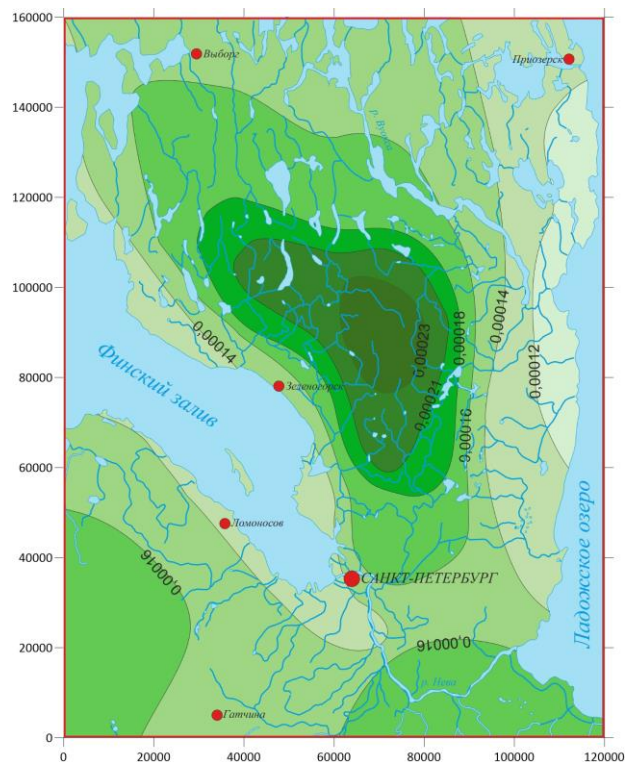


Рисунок 35. Распределение инфильтрационного питания по площади модельной области. Источник: составлена автором

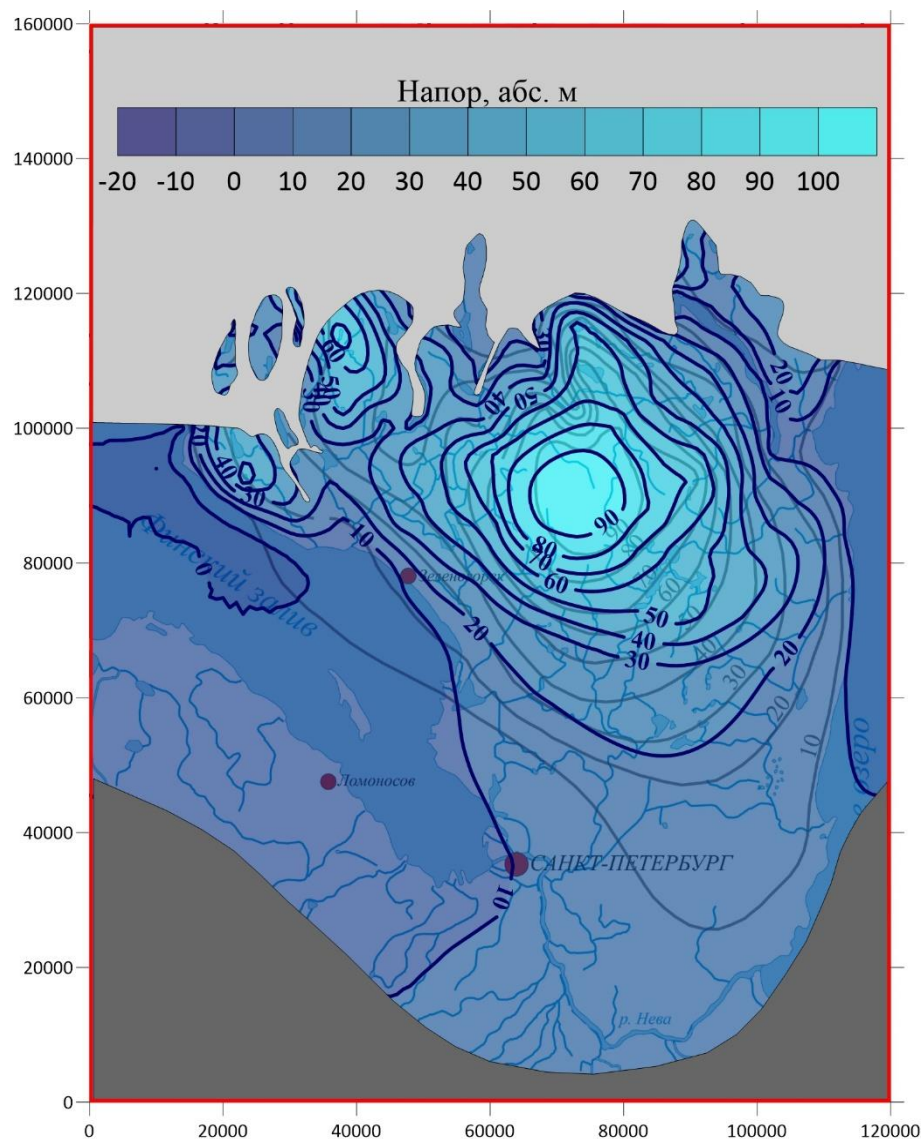


Рисунок 36. Карта модельного распределения напоров ВВК в естественном режиме (синие кривые – стационарное решение для разрабатываемой модели, серые кривые – естественное распределение напоров (Отчёт по разработке ПДМ..., 1986).

Здесь и далее: Светло-серая заливка – область отсутствия распространения ВВК. Тёмно-серая заливка – южная граница счётной области. Составлена автором

Полученные напоры использовались в качестве начальных для первого временного шага при решении нестационарной задачи.

Кроме распределения напоров, были получены балансовые характеристики модели (таблица 3). Всего в ненарушенных условиях вендский водоносный комплекс пропускает через себя и разгружает в Финский залив и Ладожское озеро около 44 тыс. м³/сутки. Почти весь этот объём поступает за счёт перетекания из верхних слоёв (в основном, в северной части территории). Незначительное количество воды (невязка 0,5 % от суммарного баланса модели), поступающей через южную границу является, вероятнее всего, следствием несовершенства

калибровки модели, так как в этой области должен наблюдаться застойный гидродинамический режим.

Таблица 3. Балансовые составляющие стационарной модели

Составляющая баланса	В модель, м ³ /сутки	Из модели, м ³ /сутки	Баланс, м ³ /сутки
Водообмен с верхними слоями	44109	44357	-248
Питание через южную границу	248	0	248
Всего	44357	44357	0

Для перехода к нестационарной постановке задачи необходимо определить временную разбивку и задать изменяющуюся во времени эксплуатационную нагрузку.

Временная разбивка

Эксплуатации вендского водоносного комплекса ведется более 100 лет, а наблюдения за уровнем имеются с 1946 г. В модели принята разбивка на 71 стресс-период длительностью по 1 году (365,25 дня) с 1946 по 2016 год.

Задание эксплуатационной нагрузки

Для каждого стресс-периода задана индивидуальная картина водозаборных узлов в соответствии с данными Отчёта «Региональная переоценка...», 2005 и Отчёта «Создание ПДМ...», 2017. Данный этап работы был унаследован из модели автора, выполненной в рамках бакалаврской выпускной квалификационной работы (Котова, 2018). Всего на территории Карельского перешейка и Санкт-Петербурга за всю историю наблюдений официально эксплуатировались 524 водозабора, их пространственное распределение представлено на рисунке 37. График изменения суммарного водоотбора вод вендского водоносного комплекса приведён на рисунке 38. Объёмы водоотбора наращивались до конца 1970-ых г., затем начали сокращаться. В последние десятилетия основной водоотбор перераспределён с территории Санкт-Петербурга на локальные водозаборы на Карельском перешейке.

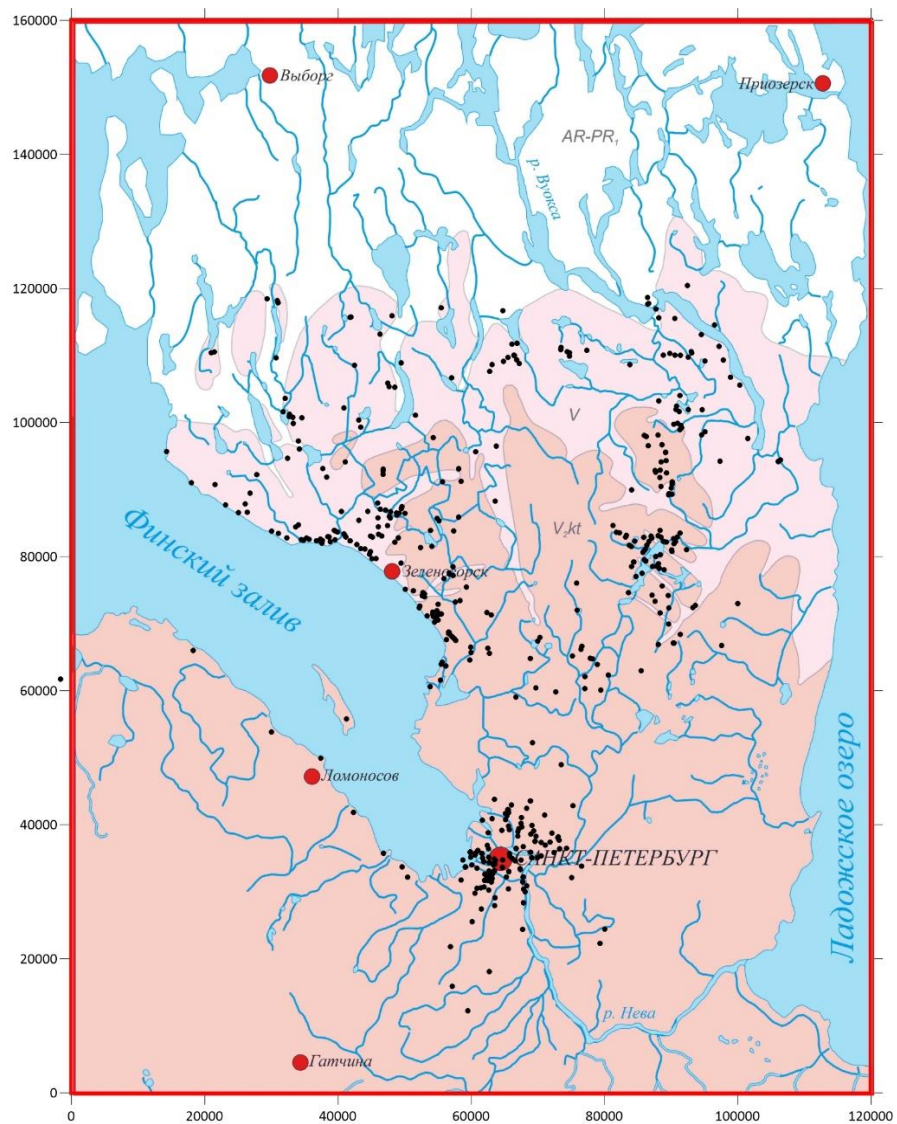


Рисунок 37. Схема расположения водозаборов ВВК (действующих и ликвидированных).
 Составлена автором по данным Отчёта «Создание ПДМ...», 2017

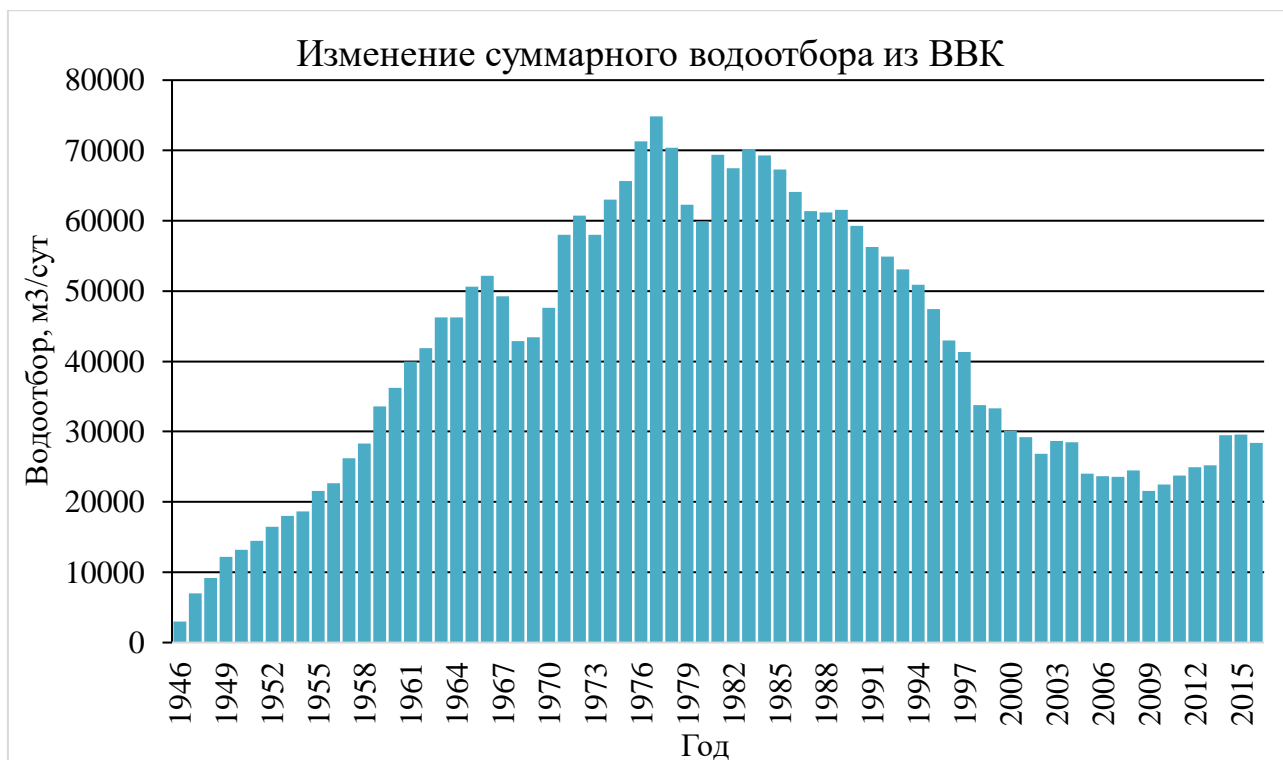


Рисунок 38. График изменения объёмов суммарного суточного водоотбора из вендского водоносного комплекса на территории Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург (по данным Отчёта «Региональная переоценка...», 2005 и Отчёта «Создание ПДМ...», 2017)

Наблюдательные скважины

Всего, по данным АО «Росгеология» (ранее АО «Севзапгеология»), на территории модельной области располагается 272 наблюдательных скважины на вендский водоносный комплекс (гдовский и редкинский горизонты). Многие из них наблюдались непродолжительное время или режимные наблюдения на них не велись вовсе. В итоге выбрано 14 скважин с длительным рядом наблюдений, равномерно расположенных в пределах моделируемой области (рис. 39). Путём подбора коэффициентов фильтрации и упругой водоотдачи была проведена калибровка модели в нестационарной постановке и решена эпигнозная задача (рис. 40-53).

По всем скважинам видна тенденция падения уровня при увеличении водоотбора и восстановления уровня при ослаблении режима эксплуатации водозаборов. Лучше всего общие тенденции прослеживаются на скважинах № 11200346, 11200272 и 11200201, расположенных на территории Санкт-Петербурга. По скважинам, расположенным вне защищённой региональным водоупором области ВВК, особенно вблизи его границы выклинивания (скважины № 12100422, 12100492, 12100627), модельное и наблюдаемое распределение уровней может довольно сильно отличаться, что связано с наличием локальных неоднородностей, учёт которых невозможен при составлении региональной модели. Конечное распределение напоров в ВВК на 2016 год приведено на рисунке 54.

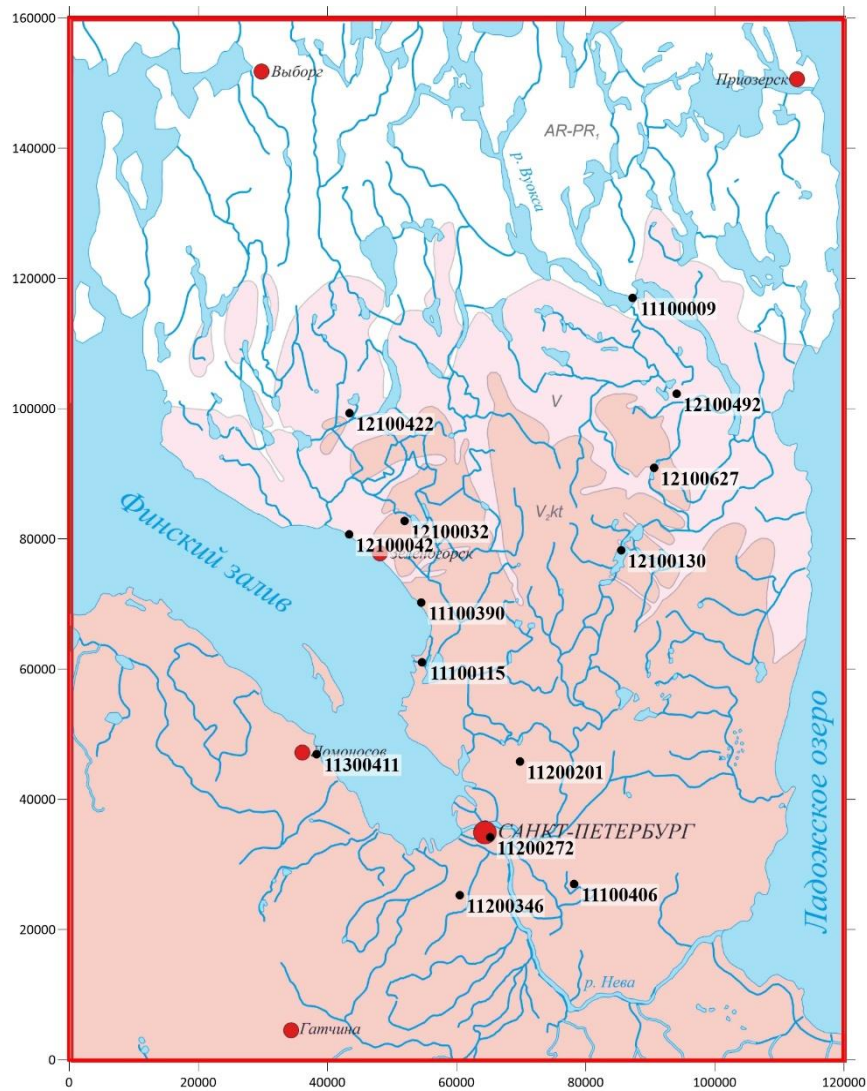


Рисунок 39. Схема расположения наблюдательных скважин для калибровки модели.

Составлена автором по данным АО «Севзапгеология»

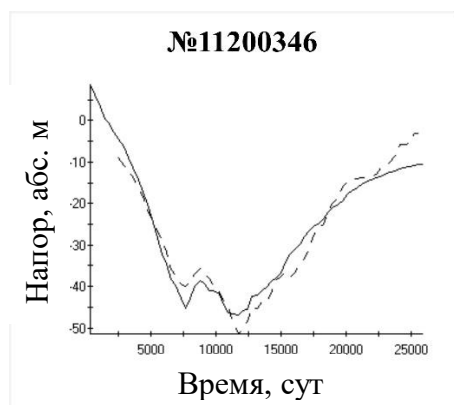


Рисунок 40. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11200346

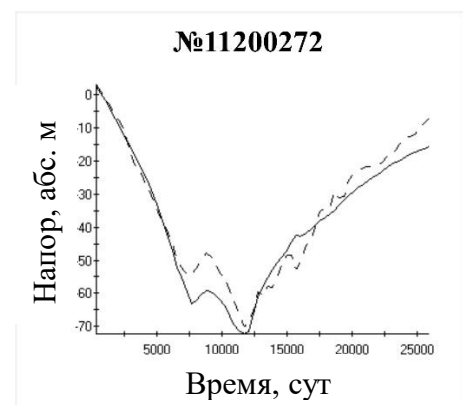


Рисунок 41. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11200272

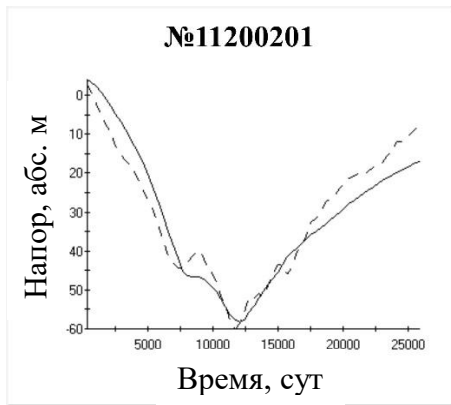


Рисунок 42. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11200201

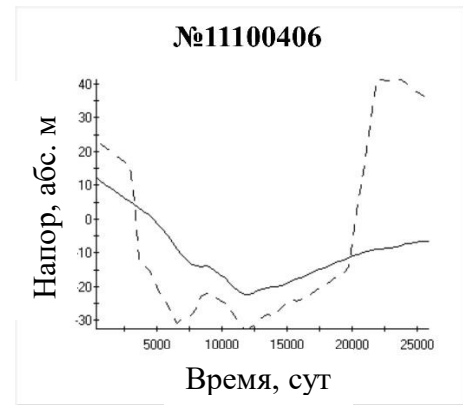


Рисунок 45. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11100406

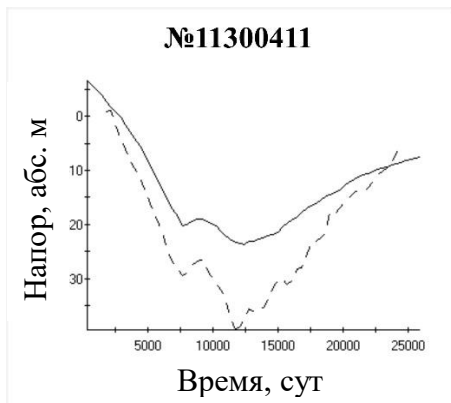


Рисунок 43. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11300411

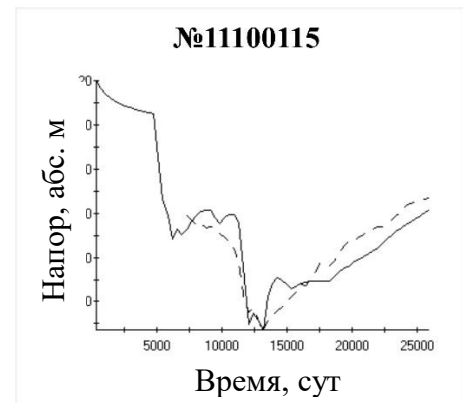


Рисунок 46. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11100115

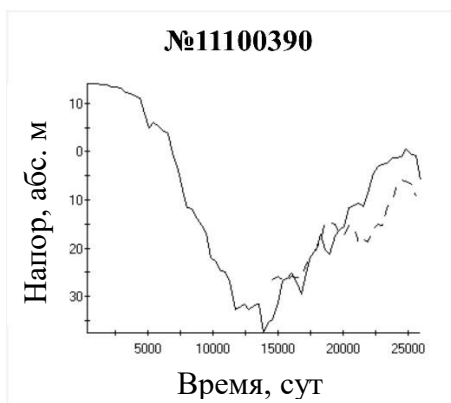


Рисунок 44. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11100390

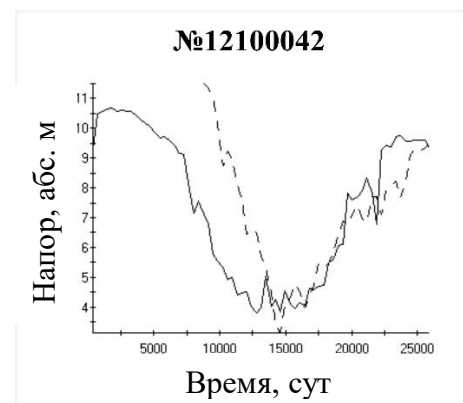


Рисунок 47. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100042

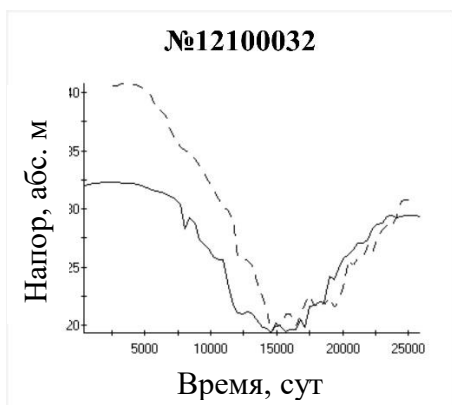


Рисунок 48. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100032

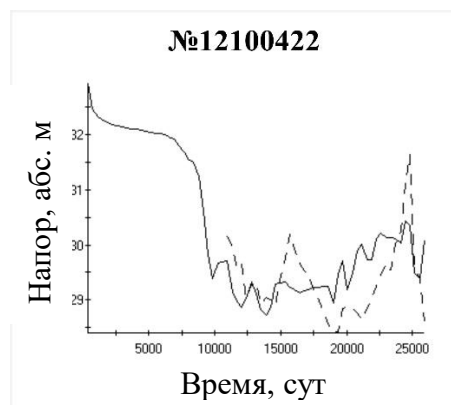


Рисунок 51. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100422

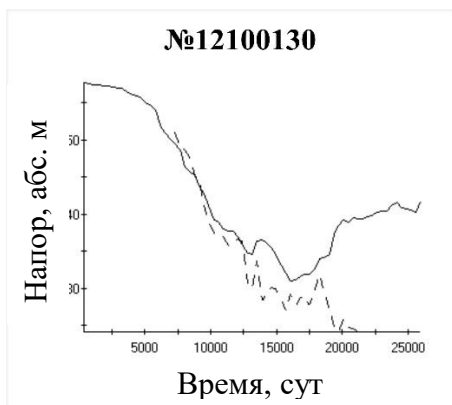


Рисунок 49. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100130

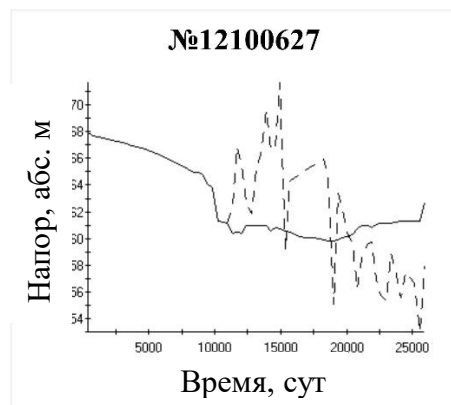


Рисунок 52. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100627

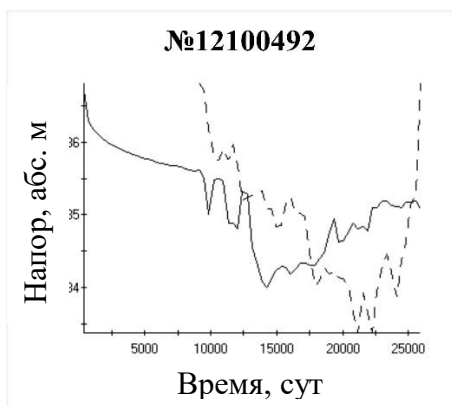


Рисунок 50. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №12100492

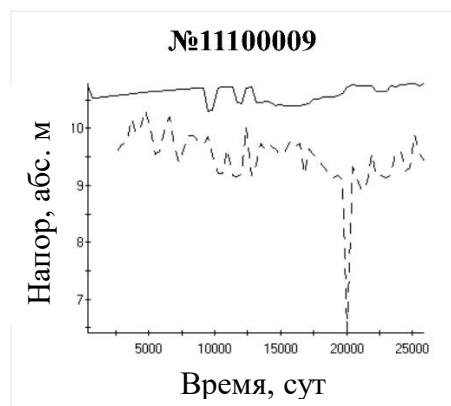


Рисунок 53. График изменения модельных (сплошная линия) и наблюдаемых (пунктирная линия) уровней в скважине №11100009

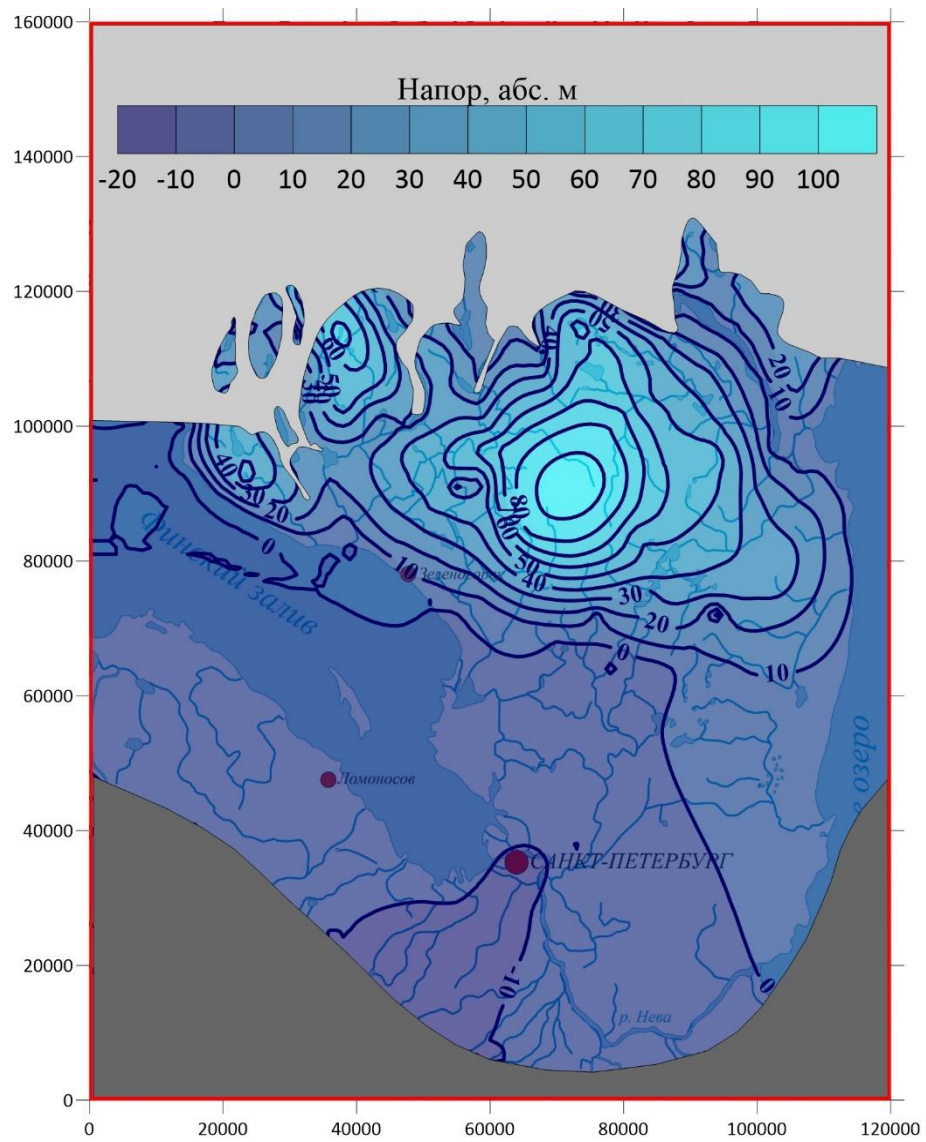


Рисунок 54. Карта модельного распределения напоров на 2016 год. Составлена автором

6 Прогноз влияния техногенной нагрузки

6.1 Современное состояние

Техногенная нагрузка на вендский водоносный комплекс значительно влияет на его уровень режим. В конце 1970^{-ых} г. наблюдалось критическое падение напоров, которое могло привести к просадкам и разрушению зданий в центральной части Санкт-Петербурга, а последующее восстановление уровней угрожает подземным конструкциям за счёт гидростатического давления (Бахарев и др., 2009).

В результате решения эпигнозной задачи на нестационарной модели, воспроизводящей эксплуатацию ВВК с 1946 по 2016 год, были составлены карты понижений уровня ВВК относительно стационара. На рисунке 55 показана карта понижений уровня на момент максимальной эксплуатации ВВК – на 1978 г.

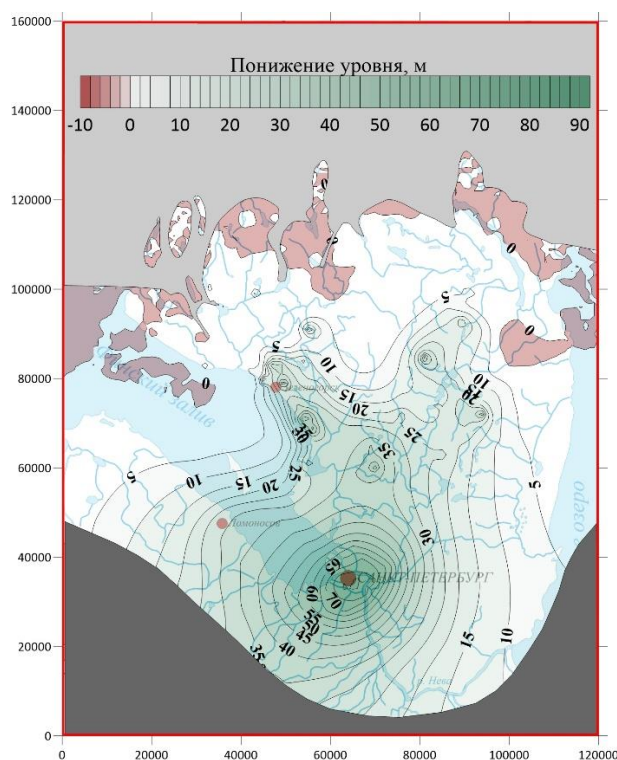


Рисунок 55. Карта модельных понижений уровня ВВК относительно естественного распределения на 1978 год. Здесь и далее: отрицательные понижения – увеличение уровня. Составлена автором

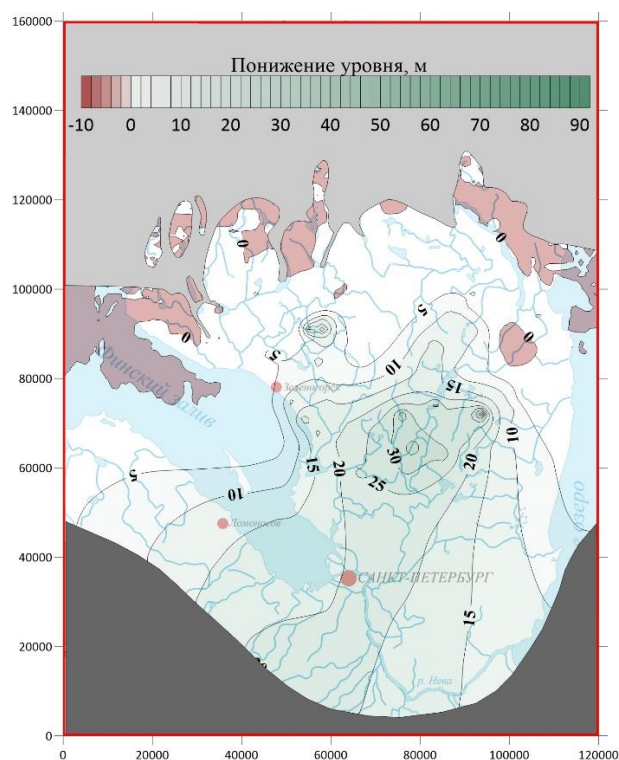


Рисунок 56. Карта модельных понижений уровня ВВК относительно естественного распределения на 2016 год. Составлена автором

Хорошо видно, что была сформирована депрессионная воронка с максимумами понижений в центре Петербурга. На рисунке 56 приведена карта понижений уровня на 2016 г., из которой следует, что на данный момент воронка депрессии от периода 1946–1978 г.

практически нивелирована, а наибольшие понижения сместились на север и тяготеют к Карельскому перешейку, как это и следует из наблюдений за уровнем режимом.

Оценка объёмов восполнения ресурсов вендского водоносного комплекса выполнена с помощью задания расчётной зоны в слоях 5–7, соответствующей площади распространения ВВК на Карельском перешейке (таблица 4). Отрицательные балансовые показатели упругой водоотдачи характеризуют восполнение упругих запасов вендского водоносного комплекса на 342 м³/сутки и котлинских глин на 3820 м³/сутки. За счёт перетекания из верхних слоёв (в основном, из четвертичных отложений) в ВВК поступает 62,1 тыс. м³/сутки. Приток из расположенной вне модели южной части ВВК составляет 779 м³/сутки. На разгрузку в Финский залив и Ладожское озеро идёт 32,3 тыс. м³/сутки.

Таблица 4. Балансовые составляющие модели на 2016 год

Составляющая баланса	В модель, м ³ /сутки	Из модели, м ³ /сутки	Баланс, м ³ /сутки
Водообмен с верхними слоями	62144	32329	29815
Питание через южную границу	779	0	779
Упругая водоотдача пород ВВК	248	590	-342
Упругая водоотдача котлинских глин	995	4815	-3820
Всего	64166	37734	26432
Водоотбор	0	26431	-26431

На базе откалиброванной модели можно моделировать различные сценарии техногенной нагрузки и делать выводы о ресурсах вендского водоносного комплекса.

В рамках прогнозных расчётов были просчитаны три сценария техногенной нагрузки: 1) сохранение текущего режима водоотбора в течении 25 лет (стандартный прогноз), 2) увеличение водоотбора в 2 раза при сохранении современной эксплуатационной сети (прогноз на 25 лет); 3) прогноз максимально допустимого водоотбора в области наиболее интенсивной эксплуатации ВВК.

6.2 Сохранение текущего водоотбора (прогноз на 25 лет)

Прогноз понижений на 25-летний период эксплуатации при сохранении текущего водоотбора является стандартным прогнозом при лицензировании запасов подземных вод (статья 10 закона «О недрах» № 2395-1 от 28.02.1992). При составлении этого прогноза была создана новая нестационарная модель, состоящая из 1 стресс-периода продолжительностью 25 лет, разбитого на 25 временных шагов длительностью по 1 году. Все фильтрационные

параметры, схема размещения водозаборов и объёмы водоотбора унаследованы из последнего (71-ого) стресс-периода откалиброванной модели.

В результате решения этой модели было получено распределение понижений напоров, приведённое на рисунке 57. Понижения, по большей части, имеют отрицательные значения, что означает, что при современном уровне эксплуатационной нагрузки напоры ВВК сохраняют тенденцию к восстановлению и стремятся вернуться к естественному распределению. В области наиболее активной эксплуатации ВВК (центральная часть Карельского перешейка) наблюдается небольшое снижение напоров (до 1,5 м), что говорит о том, что ресурсы в этой области на данный момент используются активнее, чем происходит их восполнение.

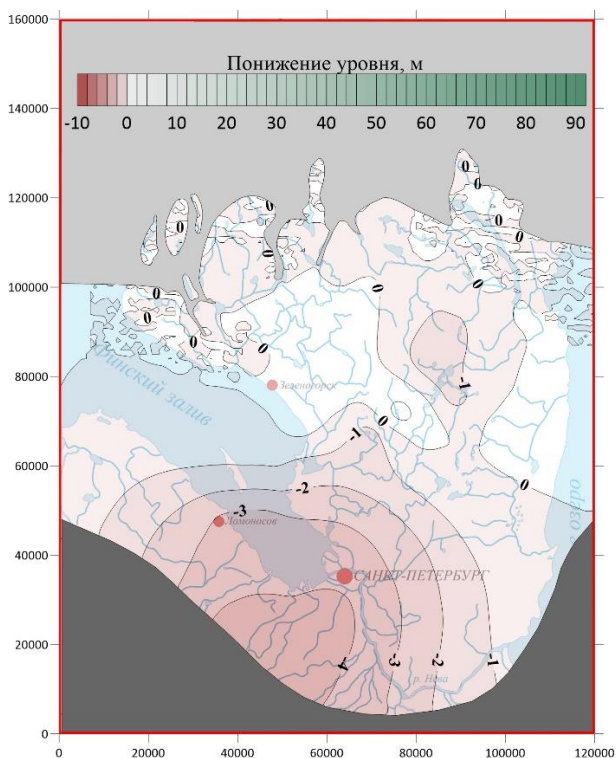


Рисунок 57. Карта прогнозных понижений уровня ВВК на 2041 год относительно 2016 года при сохранении современной схемы размещения водозаборов и объёмов водоотбора.

Составлена автором

Численные оценки балансовых показателей (таблица 5) говорят о сохранении тенденции постепенного восполнения запасов. Стоит отметить, что интенсивность восполнения по ВВК снизилась на 45% (с 342 м³/сутки до 188 м³/сутки), а по котлинским глинам на 27% (с 3820 м³/сутки до 2803 м³/сутки). Незначительно уменьшились объёмы питания ВВК, как за счёт перетекания, так и за счёт притока с южной границы. Объёмы разгрузки вод ВВК не изменились.

Таблица 5. Балансовые составляющие модели на 2041 год при сохранении современной схемы и объёмов водоотбора

Составляющая баланса	В модель, м ³ /сутки	Из модели, м ³ /сутки	Баланс, м ³ /сутки
Водообмен с верхними слоями	61072	32355	28717
Питание через южную границу	704	0	704
Упругая водоотдача пород ВВК	1	189	-188
Упругая водоотдача котлинских глин	141	2944	-2803
Всего	61918	35488	26430
Водоотбор	0	26431	-26431

6.3 Увеличение водоотбора в 2 раза (прогноз на 25 лет)

Второй прогнозный сценарий был просчитан с учетом увеличения объёмов водоотбора по каждому водозабору в 2 раза. Распределение понижений представлено на рисунке 58.

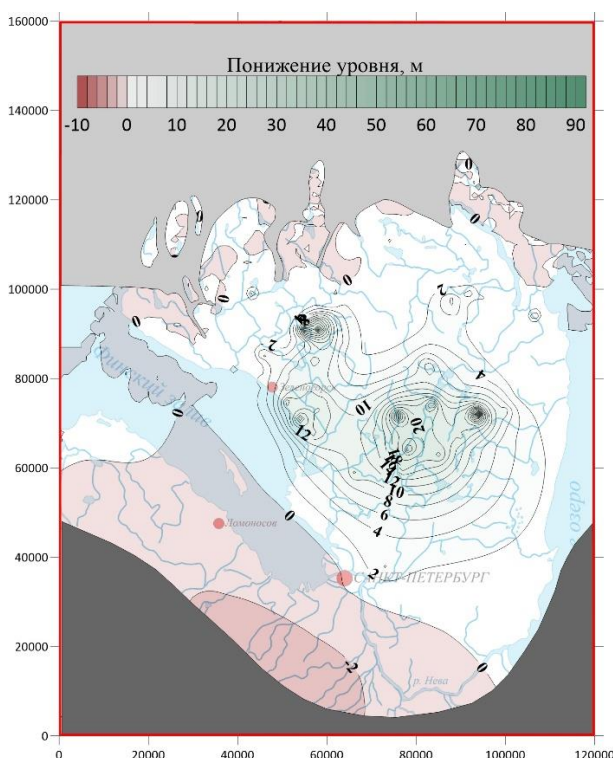


Рисунок 58. Карта прогнозных понижений уровня ВВК на 2041 год относительно 2016 года при сохранении современной схемы размещения водозаборов и увеличении объёмов водоотбора в 2 раза. Составлена автором

При повышенных объёмах водоотбора в рамках современной эксплуатационной сети наблюдается формирование депрессионной воронки сложной формы с центром в районе посёлка Агалатово Всеволожского района Ленинградской области. Она осложнена локальными понижениями около крупных водозаборов в п Керро, п. Елизаветинка,

п. Агалатово, п. Гарболово, п. Осельки, п. Стекланный, п. Песочный, п. Репино, п. Комарово, п. Рощино, п. Молодёжное, п. Симагино, п. Первомайское, п. Победа, п. Сосново, п. Запорожское. В южной части модели сохраняется тенденция восстановления напоров.

Балансовые характеристики модели (таблица 6) говорят, что увеличение водоотбора в 2 раза приведёт к истощению запасов ВВК. Через 25 лет эксплуатации в таком режиме они будут уменьшаться на 49 м³/сутки непосредственно по водоносному комплексу и на 1117 м³/сутки по котлинским глинам. При этом увеличится переток из вышележащих слоёв до 80,4 тыс. м³/сутки (на 31% по сравнению со сценарием 1) и уменьшатся объёмы разгрузки ВВК до 29,4 тыс. м³/сутки (на 9% по сравнению со сценарием 1).

Таблица 6. Балансовые составляющие модели на 2041 год при сохранении современной схемы и увеличении объёмов водоотбора в 2 раза

Составляющая баланса	В модель, м³/сутки	Из модели, м³/сутки	Баланс, м³/сутки
Водообмен с верхними слоями	80403	29439	50964
Питание через южную границу	730	0	730
Упругая водоотдача пород ВВК	114	65	49
Упругая водоотдача котлинских глин	2431	1314	1117
<i>Всего</i>	<i>83678</i>	<i>30818</i>	<i>52860</i>
<i>Водоотбор</i>	<i>0</i>	<i>52862</i>	<i>-52862</i>

6.4 Прогноз максимально допустимого водоотбора

Для оценки максимально допустимого водоотбора из ВВК необходимо задать максимально допустимые понижения, равные кровле комплекса, просчитать стационарную задачу, оценить балансовые составляющие. Область задания максимальных понижений выбрана из следующих соображений:

- 1) в южной части модельной области воды имеют повышенную минерализацию, в связи с чем их эксплуатация происходит в малых объёмах;
- 2) на территории Санкт-Петербурга критические понижения напоров ВВК невозможны в связи с геомеханическим влиянием на тоннели метрополитена, канализационные коллекторы глубокого заложения и здания;
- 3) в северной части территории, где ВВК не перекрыт водоупором возможно нанесение ущерба речному стоку.

В связи с перечисленными обстоятельствами, для задания максимальных понижений была выбрана центральная область модели, где имеют распространение защищённые региональным водоупором пресные воды и ведётся активная эксплуатация ВВК. Технически

в модели понижения задавались через введение по выбранной площади в верхний слой ВВК ячеек с модулем Drain и отметкой дренирования равной его кровле. Не вошедшие в область дренирования, действующие на 2016 г., водозаборы были сохранены.

Карта распределения понижений напоров в результате решения стационарной задачи приведена на рисунке 59. Жёлтым закрашена область задания дренирующих ячеек (максимально допустимых понижений).

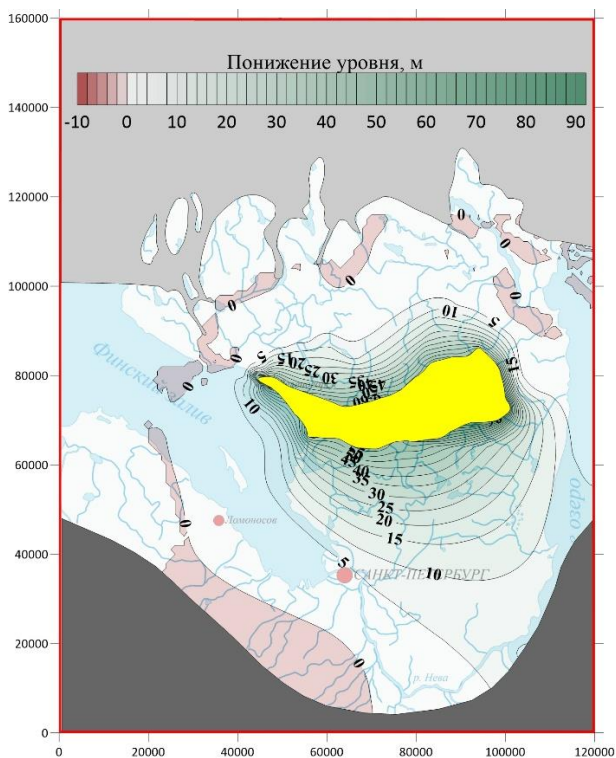


Рисунок 59. Карта прогнозных понижений уровня ВВК относительно 2016 года при максимальном водоотборе в центральной области. Жёлтая заливка – область максимального водоотбора. Составлена автором

Вокруг области с максимальным водоотбором сформирована чётко выраженная депрессионная воронка, влияние которой распространяется почти по всей площади модели. В южном направлении понижения распространяются дальше, чем в северном, что связано с расположением области питания ВВК на севере. Балансовые характеристики стационарной модели представлены в таблице 7. Максимально допустимый водоотбор по заданной площади составил 70,6 тыс. м³/сут. (современный водоотбор 5,7 тыс. м³/сут.). Водозаборами на остальной площади модели откачивается 20,7 тыс. м³/сутки. Итого, суммарный водоотбор составит 91,3 тыс. м³/сутки при современном 26,4 тыс. м³/сутки (в 3,5 раза больше).

Таблица 7. Балансовые составляющие стационарной модели при максимальном водоотборе в центральной области

Составляющая баланса	В модель, м ³ /сутки	Из модели, м ³ /сутки	Баланс, м ³ /сутки
Водообмен с верхними слоями	120466	29925	90541
Питание через южную границу	762	0	762
Всего	121228	29925	91303
Водоотбор скважинами	0	20736	-20736
Приток к дрене	0	70567	-70567

6.5 Прогноз максимально допустимого водоотбора с учётом климатических вариаций

В настоящее время происходит изменение условий питания ВВК, в основном, за счёт более глубоких зимних оттепелей и более сухих весен. Поэтому, для оценки максимально допустимого водоотбора из вендского водоносного комплекса с учётом влияния климатических изменений, было задано уменьшение инфильтрационного питания на 15% для моделирования потепления и увеличения доли испарения. В результате решения стационарной задачи было получено распределение понижений, представленное на рисунке 60.

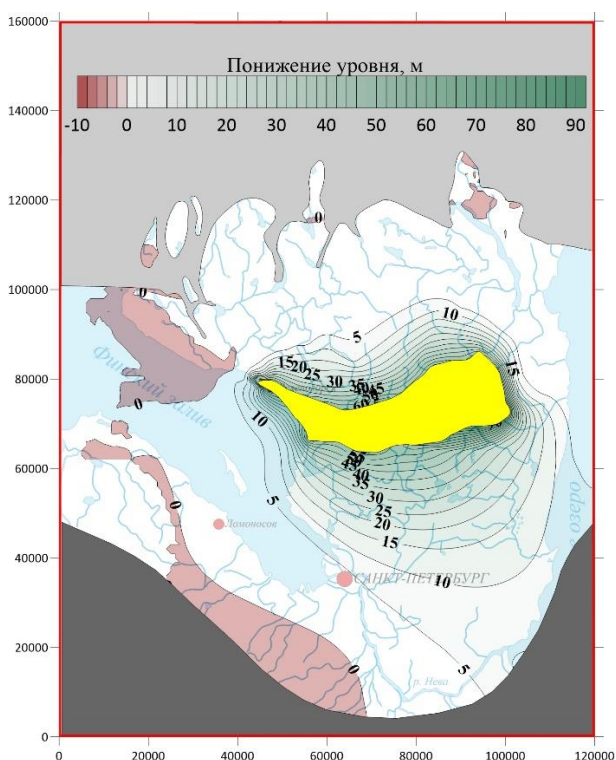


Рисунок 60. Карта прогнозных понижений уровня ВВК относительно 2016 года при максимальном водоотборе в центральной области и снижении инфильтрационного питания на 15%. Жёлтая заливка – область максимального водоотбора. Составлена автором

В сравнении с аналогичной задачей при современной инфильтрации изменений практически не произошло. Однако отмечено крайне незначительное (до 1 км) смещение изолиний от области водоотбора, то есть расширение депрессионной воронки.

Балансовые составляющие (таблица 8) изменились также незначительно: на 1% уменьшился объём питания и на 4% – объём разгрузки ВВК. Максимально допустимый водоотбор по заданной площади составил 70,2 тыс. м³/сутки, это на 0,6% меньше рассчитанного при полноценной инфильтрации, а с учётом остальных площадей ресурсный потенциал уменьшился всего лишь на 0,4%. Из этого можно сделать вывод о том, что изменение инфильтрационного питания очень незначительно влияет на максимально допустимый объём водоотбора из вендского водоносного комплекса в центральной части Карельского перешейка.

Таблица 8. Балансовые составляющие стационарной модели при максимальном водоотборе в центральной области и снижении инфильтрационного питания на 15%

Составляющая баланса	В модель, м³/сутки	Из модели, м³/сутки	Баланс, м³/сутки
Водообмен с верхними слоями	118999	28855	90144
Питание через южную границу	768	0	768
<i>Всего</i>	<i>119767</i>	<i>28855</i>	<i>90912</i>
<i>Водоотбор скважинами</i>	<i>0</i>	<i>20736</i>	<i>-20736</i>
<i>Приток к дрене</i>	<i>0</i>	<i>70175</i>	<i>-70175</i>

7 Оценка влияния палеоклиматических условий

Для оценки влияния изменения климатических условий на питание ВВК в прошлом, было просчитано два сценария.

Сценарий 1 – похолодание. За основу взята обстановка, существовавшая на исследуемой территории во время валдайского оледенения около 100–18 тыс. лет назад (Climate..., 2010). В результате оледенения произошло понижение уровня океана и соответствующее снижение базисов эрозии, что выразилось в проработке рельефа и формировании сети переуглублённых долин в исследуемом районе. Региональным базисом дренажа выступала палео-Нева, отметки уровня воды в которой составляли около -45 абс.м относительно современного ординара. Вероятно, как у рек современной области распространения многолетнемерзлых горных пород, под ней находился талик. Существовавшие ранее водоёмы и водотоки пересохли или были выморожены (их ванны заполнены «мёртвым» льдом).

Вследствие промораживания разреза подземные воды разделились на два этажа.

Верхний (зона активного водообмена) был представлен деятельным слоем мощностью от десятков сантиметров до первых метров, водообмен в котором осуществлялся только в тёплое время года (с мая-июня до августа-сентября, в зависимости от интенсивности похолодания).

Нижний (зона замедленного водообмена подмерзлотных вод) – вендский водоносный комплекс на участках, где глубина залегания его кровли превышала 70–100 м.

Одновременно произошло уменьшение объёма осадков, вероятно, до величин 250–300 мм/год, что составляет треть от современного количества. С учётом сброса снеготалого стока во время весеннего половодья по руслам перемерзающих на зиму водотоков, испарения и транспирации в летний период, а также наличия мерзлоты, инфильтрационное питание ВВК должно было резко сократиться. Учитывая продолжительность этого этапа, задача решалась в стационарной постановке.

Сценарий 2 – потепление. За основу взята обстановка, развивавшаяся на исследуемой территории во время формирования Балтийского ледникового озера около 12 тыс. лет назад (Climate..., 2010). В связи с таянием Скандинавского ледника к востоку от него происходило постепенное затопление земной поверхности талыми водами, что привело к формированию Балтийского ледникового озера с отметками до +40 абс.м относительно современного ординара. Продолжительность этого этапа, ориентировочно, 1,3 тыс.лет, что позволяет решать задачу в стационарной постановке. Окончательный спуск воды из озера произошел при прорыве каменно-ледяной плотины в районе проливов Категатт и Скагеррак (Climate..., 2010).

Последующие затопления морскими и пресноводными водоёмами с меньшими отметками (Climate..., 2010) не учитывались.

7.1 Похолодание

При моделировании описанного выше сценария похолодания современные реки и озёра (1-й модельный слой) были удалены из модели. Проработка рельефа реками до обновлённого базиса эрозии моделировалась путём задания повышенных коэффициентов фильтрации ($K_{x,y} = K_z = 1000$ м/сут.) в первом расчётном слое в границах переуглублённых долин. Единой карты их расположения для всей моделируемой области автором в опубликованной литературе не обнаружено. В связи с этим схема предполагаемого расположения переуглублённых долин (рис. 61) составлена автором по материалам карты мощности перекрывающих отложений (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017).

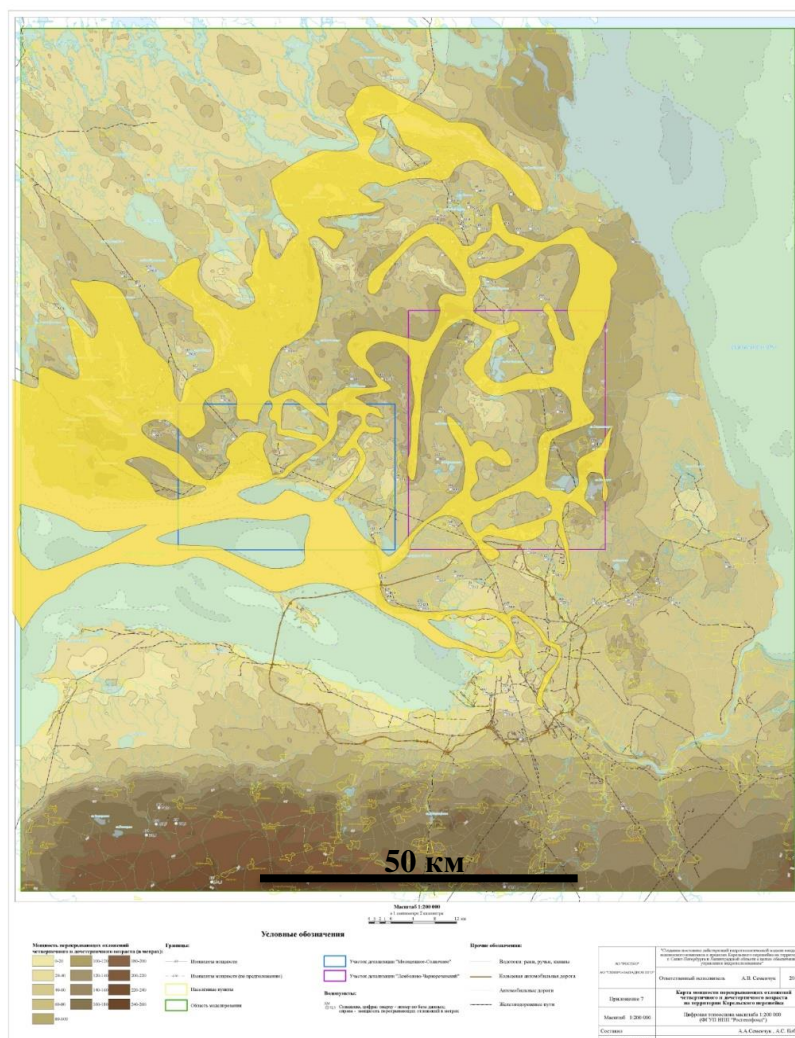


Рисунок 61. Схема предполагаемого расположения переуглублённых долин (жёлтые полигоны). Составлена автором по материалам карты мощности перекрывающих отложений (Отчёт «Создание ПДМ...», 2017)

По наимизшим отметкам подошвы перекрывающих отложений в пределах переуглублённых долин на площади современного Финского залива (в среднем, отметки -50...-60 абс.м) задано граничное условие 1 рода (постоянные напоры) для упрощённого моделирования базиса дренирования (рис. 62). С учётом опыта исследований в современной Гренландии и в рассматриваемом районе задан сток из северной ванны Ладожского озера в виде подлёдной реки (также для упрощения 1 родом) по траектории р. Бурная→оз. Суходольское→поворот на юго-запад с напором -45 абс.м (рис. 62).

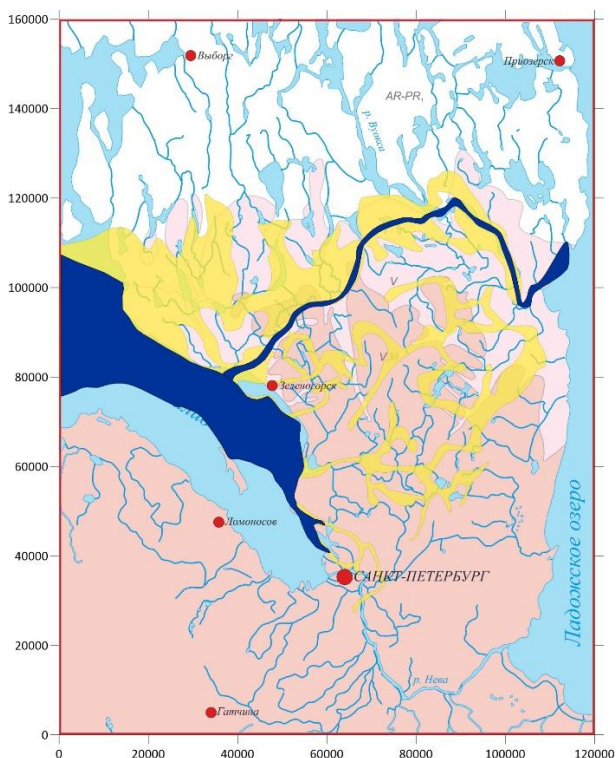


Рисунок 62. Схема расположения базиса дренирования, полёдной реки и переуглублённых долин при моделировании оледенения территории. Синий полигон – граничное условие 1 рода. Жёлтые полигоны – переуглублённые долины. Составлена автором

Уменьшение осадков, а соответственно и инфильтрационного питания ВВК, было задано двумя вариантами: сниженное в 3 раза относительно современного и нулевое. В качестве начального приближения взято естественное современное распределение уровней в ВВК (рисунок 36). Полученные в результате решения стационарной задачи распределения напоров и понижений относительно современного стационара приведены на рисунках 63, 65 и 64, 66 соответственно.

При оледенении территории уровенно-напорный режим ВВК существенно меняется. При сниженной в 3 раза инфильтрации пьезоизогипсы приобретают субмеридианальное направление. Влияние современной области питания на Лемболовской возвышенности существенно снижается. Уменьшение напоров происходит, по мере приближения к области дренирования, при этом в восточной части наблюдается повышение уровней относительно

современного режима. При нулевом инфильтрационном питании, напоры вендского водоносного комплекса стабилизируются на отметках -40...-50 абс.м почти по всей его площади. Влияние современной области питания полностью исчезает. Напоры постепенно увеличиваются в юго-западном направлении.

Балансовые оценки объёмов питания ВВК при оледенении представлены в таблице 9. Даже при значительном уменьшении инфильтрационного питания, за счёт перетекания из вышележащих слоёв вендский водоносный комплекс получает значительные объёмы питания. Однако при полном отсутствии инфильтрации (осушении или промораживании верхних слоёв) объёмы пополнения его запасов резко уменьшаются.

Таблица 9. Объёмы питания вендского водоносного комплекса при оледенении территории

Оледенение: инфильтрация	Современная	1/3 современной	Нулевая
Питание, м ³ /сутки	44357	41740	9304

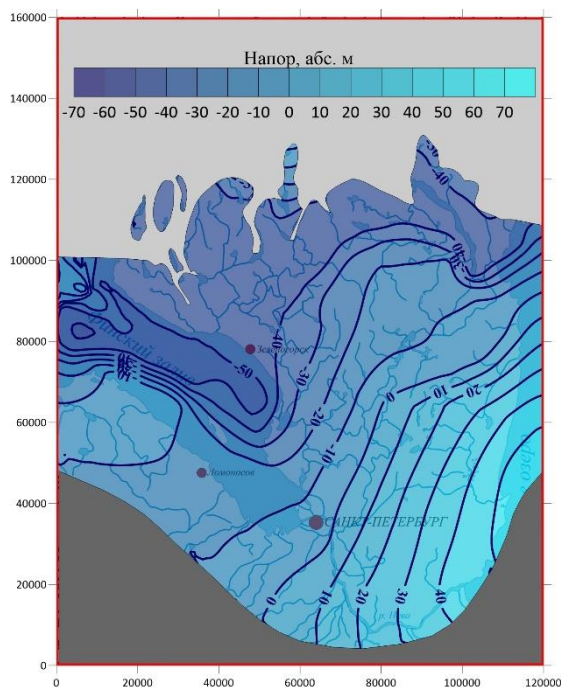


Рисунок 63. Карта модельного распределения напоров ВВК при оледенении и уменьшении инфильтрации в 3 раза.

Составлена автором

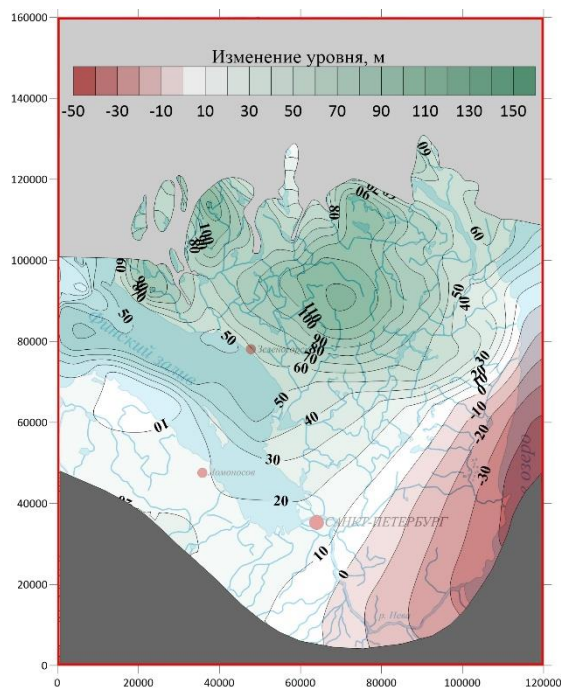


Рисунок 64. Карта понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при оледенении и уменьшении инфильтрации в 3 раза.

Составлена автором

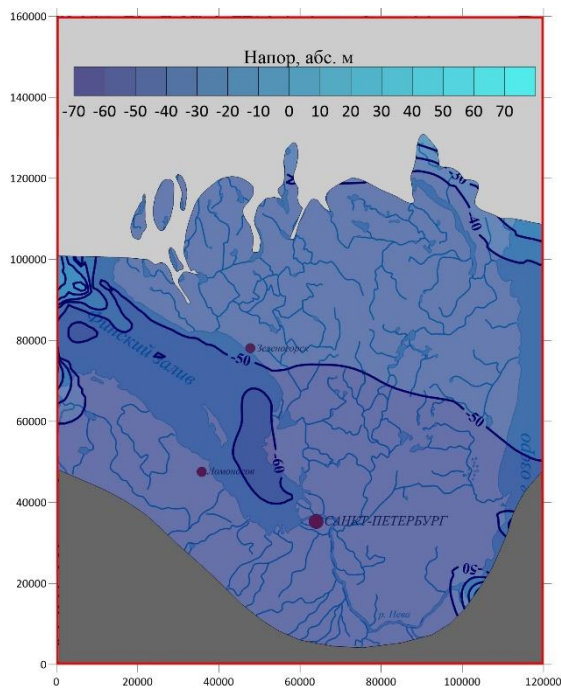


Рисунок 65. Карта модельного распределения напоров ВВК при оледенении и отсутствии инфильтрации. Составлена автором

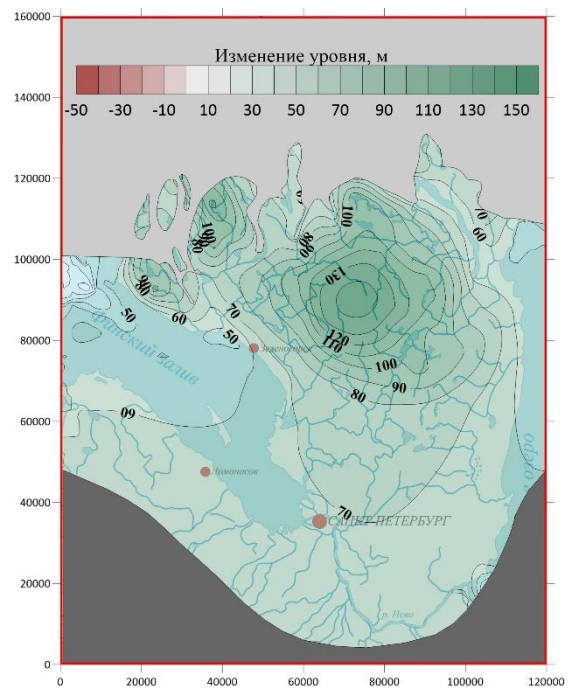


Рисунок 66. Карта прогнозных понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при оледенении и отсутствии инфильтрации. Составлена автором

7.2 Потепление

Затопление территории при повышении уровня приледникового водоема моделировалось в стационарной постановке от современного уровня моря до отметок +40 абс.м поэтапно, с шагом по 10 м. В качестве начального приближения было использовано современное естественное распределение уровней в ВВК. Инфильтрационное питание было принято равным современному. Было создано 4 дополнительных модели для каждого шага. Распределение затопленных площадей представлено на рисунках 67, 69, 71 и 73. Соответствующее им изменение напоров в вендском водоносном комплексе относительно современного естественного распределения (рис. 36), полученное в результате решения стационарной задачи показано на рисунках 68, 70, 72 и 74, отрицательные значения говорят о повышении уровня.

При потеплении в области современного питания ВВК, где сейчас наблюдаются наибольшие напоры, они остаются практически неизменными. В северной части комплекса, имеющей непосредственную гидравлическую связь с четвертичными отложениями, уровень повышается синхронно с затоплением и стабилизируется по его очертаниям. В остальной части комплекса наблюдается постепенное равномерное повышение уровня.

Оценка балансовых составляющих показала (табл. 10), что при затоплении территории объёмы питания вендского водоносного комплекса снижаются пропорционально затопленной площади, однако при этом возрастают гравитационные и упругие запасы пресной воды.

Таблица 10. Объёмы питания вендского водоносного комплекса при затоплении территории

Затопление	0 м	10 м	20 м	30 м	40 м
Питание, м ³ /сутки	44357	43382	40429	39559	34715

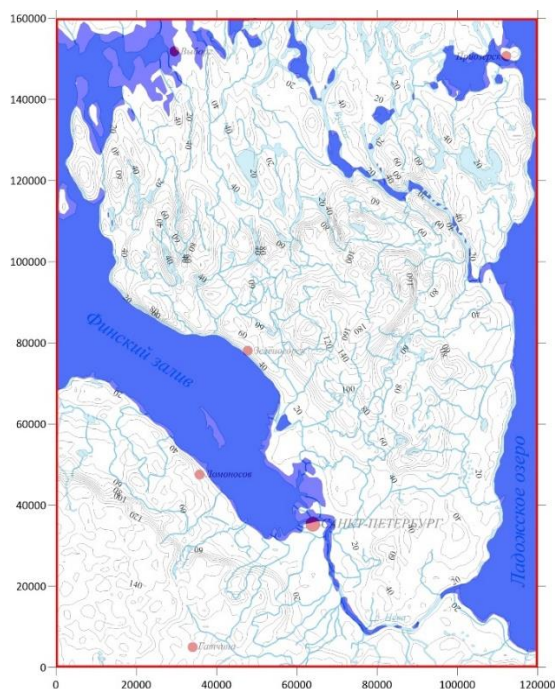


Рисунок 67. Карта затопления территории до отметок +10 абс.м. Составлена автором

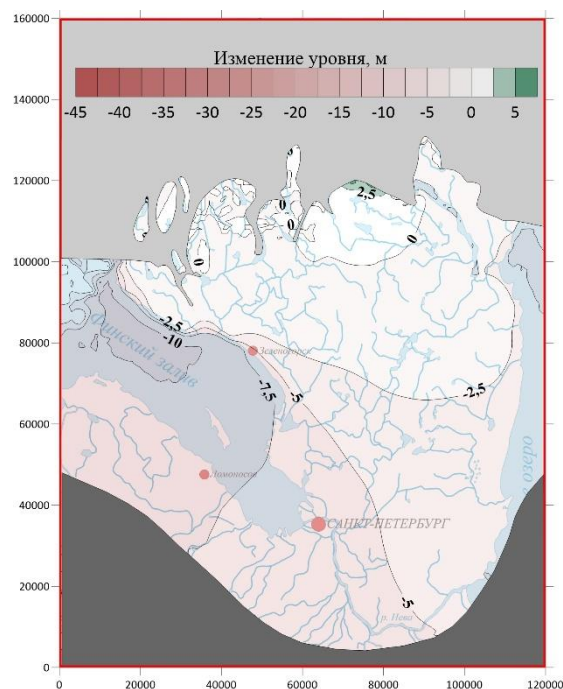


Рисунок 68. Карта прогнозных понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при затоплении территории на 10 абс.м.

Составлена автором

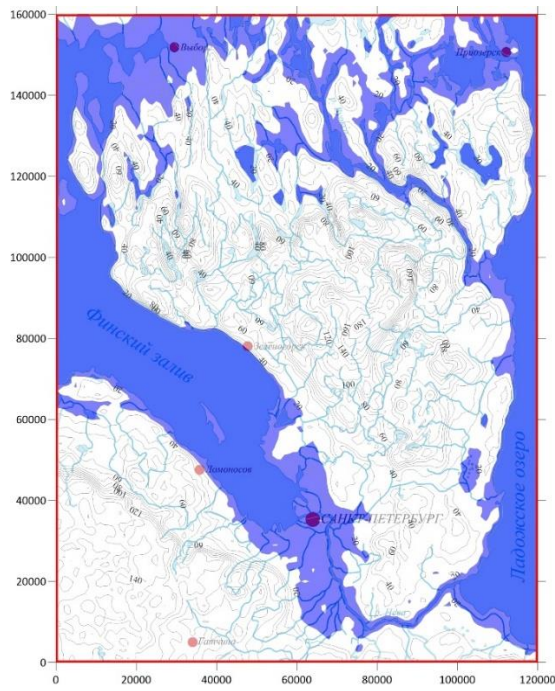


Рисунок 69. Карта затопления территории до отметок +20 абс.м. Составлена автором

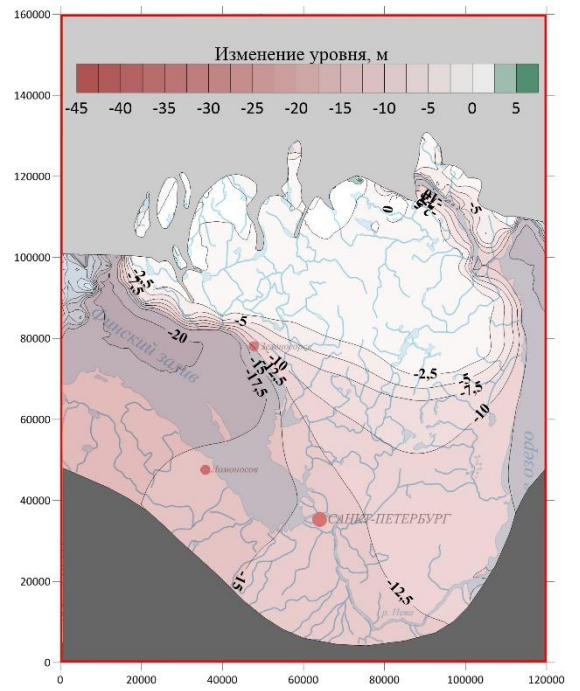


Рисунок 70. Карта прогнозных понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при затоплении территории на 20 абс.м. Составлена автором

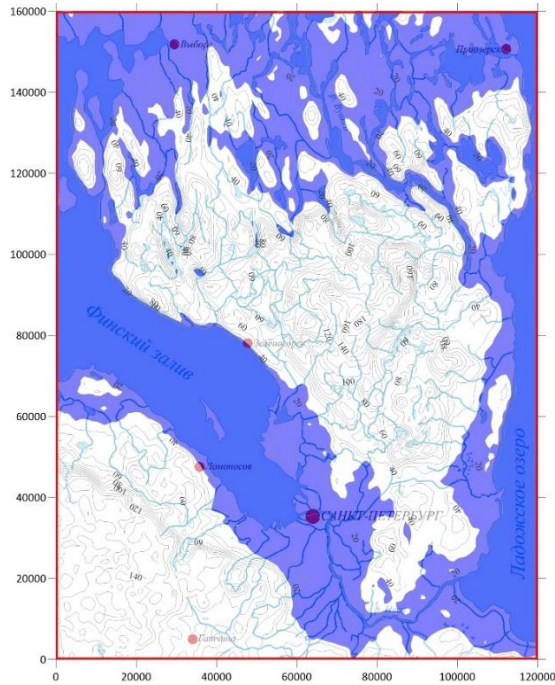


Рисунок 71. Карта затопления территории до отметок +30 абс.м. Составлена автором

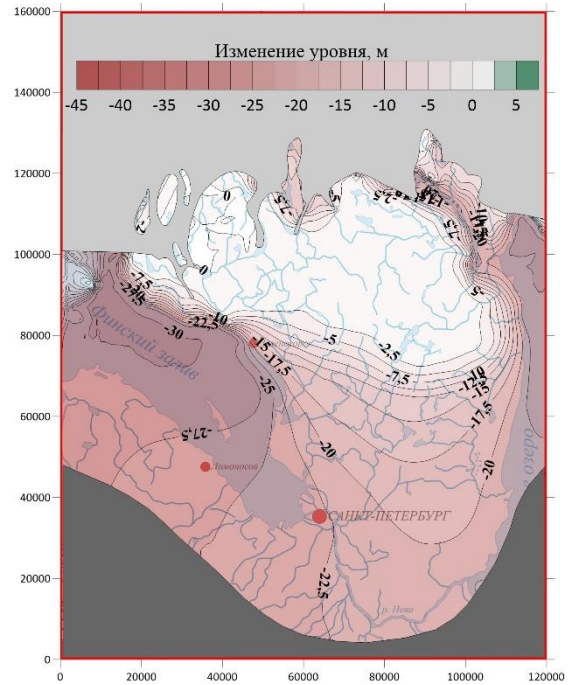


Рисунок 72. Карта прогнозных понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при затоплении территории на 30 абс.м. Составлена автором

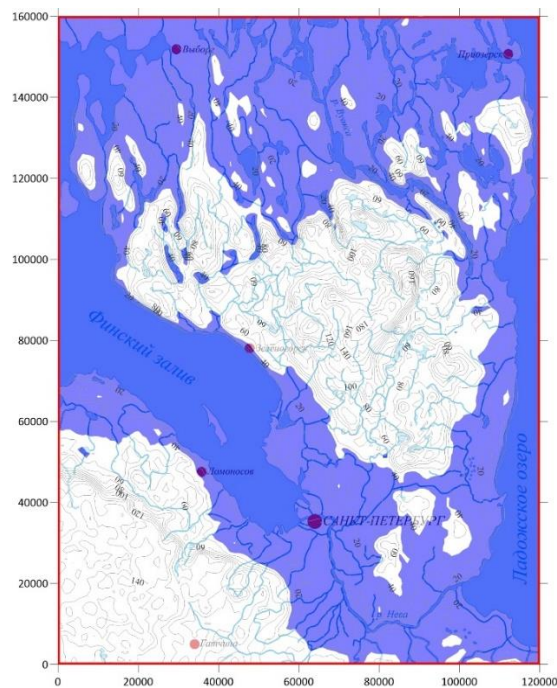


Рисунок 73. Карта затопления территории до отметок +40 абс.м. Составлена автором

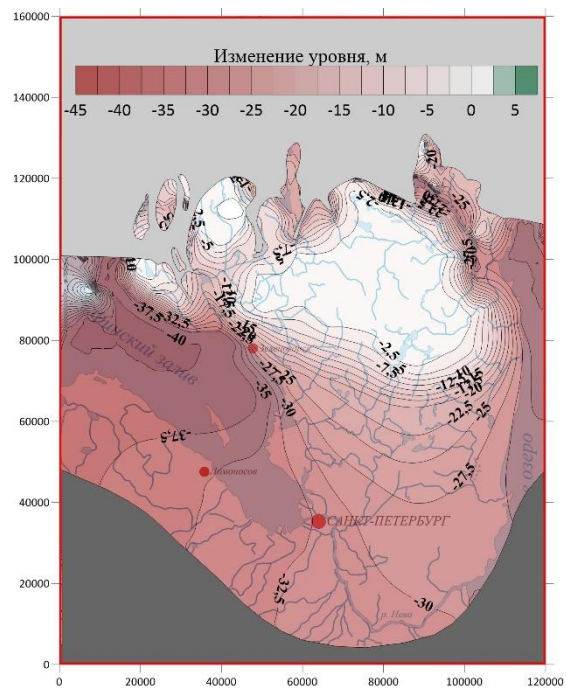


Рисунок 74. Карта прогнозных понижений (изменений) уровня ВВК относительно современного естественного режима при затоплении территории на 40 абс.м. Составлена автором

Заключение

В ходе выполнения магистерской выпускной квалификационной работы изучены опубликованные и фондовые материалы по физико-географическим условиям, геологическому строению и гидрогеологическим условиям Карельского перешейка и г. Санкт-Петербург с упором на анализ условий формирования и оценку запасов вендского водоносного комплекса, в том числе с применением численного моделирования. Была составлена и откалибрована численная геофильтрационная модель территории Карельского перешейка, учитывающая взаимодействие вендского водоносного комплекса с зоной трещиноватости фундамента, а также перекрывающим региональным водоупором котлинских глин и четвертичными отложениями. На нормативные 25 лет просчитано 2 прогнозных сценария влияния различной техногенной нагрузки на ресурсы ВВК, осуществлена оценка максимально допустимого водоотбора, а также проведена прогнозная оценка изменения ресурсного потенциала вследствие потепления и уменьшения инфильтрационного питания. На базе анализа палеореконструкций Северо-Западного региона Российской Федерации рассмотрены 2 сценария влияния долговременных климатических изменений в прошлом на условия формирования ресурсов и качество воды ВВК.

Выводы:

1. Ресурсы вендского водоносного комплекса испытывают техногенное влияние, неравномерно распределённое по площади его распространения и изменяющееся во времени. Эксплуатационная нагрузка последних десятилетий смещается из центральной части Санкт-Петербурга на Карельский перешеек, что приводит к нивелированию сформировавшейся в 1946–1978 гг. региональной депрессии и смещению геометрического центра воронки депрессии в северном направлении с возникновением локальных понижений вблизи крупных водозаборов.
2. Прогноз на 25 лет: сохранение существующей эксплуатационной нагрузки (26,4 тыс. м³/сут) способствует сохранению тенденции постепенного восстановления запасов вендского водоносного комплекса в пределах Санкт-Петербурга в сторону естественного распределения напоров и с формированием незначительного снижения уровней/напоров в центральной части Карельского перешейка.
3. Прогноз на 25 лет: увеличение объёмов водоотбора в 2 раза при сохранении современного пространственного расположения водозаборов повлечёт за собой формирование депрессионной воронки сложной формы с центром на Карельском перешейке и постепенное истощение запасов вендского водоносного комплекса.

4. Модельная оценка максимально допустимых объёмов водоотбора пресных защищённых региональным водоупором вод ВВК в центральной части Карельского перешейка составила 70,6 тыс. м³/сут, ещё 20,7 тыс. м³/сут можно добывать на площадях распространения ВВК в виде грунтового горизонта. Таким образом, ресурсный потенциал пресных вод вендского водоносного комплекса составляет около 91,3 тыс. м³/сут (что в 3,5 раза больше современного водоотбора 26,4 тыс. м³/сут).

5. Ожидаемое потепление климата, приводящее к 15 % сокращению инфильтрационного питания, практически не скажется на ресурсном потенциале ВВК, снизив его лишь на 0,4%, что объясняется наличием связи с поверхностными водоёмами и водотоками.

6. Ресурсный потенциал вендского водоносного комплекса на территории Карельского перешейка (Ленинградская область) позволяет без дополнительных детальных исследований осуществлять его эксплуатацию распределёнными по площади водозаборами с суммарным дебитом до 90 тыс. м³/сут.

7. Анализ палеореконструкций указывает на то, что запасы вендского водоносного комплекса могли формироваться в позднем плейстоцене и голоцене за счёт солёных вод Микулинского моря (~120 тыс. лет назад), пресных талых вод Скандинавского ледника (100–18 тыс. лет назад) и Балтийского ледникового озера (~12 тыс. лет назад).

8. Оценки по сценариям похолодания и потепления, проведённые на базе разработанной модели, демонстрируют что: а) оледенение территории с сопутствующим снижением объёмов питания ведёт к существенному перераспределению напоров и запасов пресных вод ВВК; б) затопление территории при потеплении ведёт полному восстановлению запасов пресных вод ВВК, при некотором снижении темпов водообмена.

Список использованных источников и информационных материалов

Публикации в открытой печати:

1. Александровский А.Л., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Долуханов П.М., Зайцева Г.И., Кирпичников А.Н., Кузнецов Д.Д., Лавенто М., Лудикова А.В., Носов Е.Н., Савельева Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения Северо-Запада России. Доклады Академии наук, 2009, т. 424, № 5, с. 1–5.
2. Бахарев Т.С., Жамойда В.А., Зубарев С.Э. и др. Геологический атлас г. Санкт-Петербург. СПб: Комильфо, 2009.
3. Боровский Б.В., Язвин А.Л. Оценка ресурсного потенциала подземных вод. Современные проблемы изучения и использования. Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования: Материалы международной научной конференции. Москва 13-14 мая 2010 г.: К 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010, 552 с.
4. Буданцева, Н. А., Васильчук, Ю.К. Обогащение изотопного состава ледяного клина в Центральной Якутии обусловленное активным испарением поверхностных вод. Арктика–Антарктика, 2017.
5. Васильчук, Ю.К. Реконструкция палеоклимата позднего плейстоцена и голоцена на основе изотопных исследований подповерхностного льда и вод зоны вечной мерзлоты. Водные ресурсы, сентябрь 1991. с. 640–646.
6. Воронюк Г.Ю., Бородулина Г.С., Крайнюкова И.А., Токарев И.В. Водообмен в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек. Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология, 2016. No 9. с. 46-56.
7. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск №1/2011.
8. Демидов И.Н., Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера. Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск, 2005, с. 134-142.
9. Коносовский П.К., Соловейчик К.А. Математическое моделирование геофильтрационных процессов: Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2001, 96 с.
10. Ладога. Монография под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб: Нестор-История, 2013. 468 с.
11. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1976.

12. Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем. Ред. академик В. М. Котляков. М.: Наука, 2007. 366 с.
13. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Нева, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов Невско-Ладожское бассейновое водное управление, 2015.
14. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) рек и озер бассейна Финского залива (от границы Российской Федерации с Финляндией до северной границы бассейна реки Нева), Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов Невско-Ладожское бассейновое водное управление, 2015.
15. Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем. Общество. Среда. Развитие (Тerra Humana). Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург: Астерион, 2007, № 1, с. 111–120.
16. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009, 632 с.
17. Björck S. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 ka BP. *Quaternary International*, 1995, v. 27, p. 19–40.
18. Chiang W-H., Kinzelbach W. Processing Modflow. A simulation system for modeling groundwater flow and pollution. 1998, 344 p.
19. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-10-49, 2010. 322 p.
20. Goeller S., Thoma M., Grosfeld K., and Miller H. A balanced water layer concept for subglacial hydrology in large-scale ice sheet models. *The Cryosphere*, 2013, v. 7, p. 1095–1106.
21. Kaspar F., Kuhl N., Cubasch U. and Litt T. A model-data comparison of European temperatures in the Eemian interglacial. *Geophysical Research Letters*, 2005, v. 32, L11703 (5 p.).
22. Kortelainen N. Isotopic composition of atmospheric precipitation and shallow groundwater in Olkiluoto: O-18, H-2 and H-3. Geological Survey of Finland and POSIVA OY. Olkiluoto-Eurajoki, Finland, 2009. 23 p.
23. Koshechkin B.I., Markov G.A., Nikonov A.A., Panasenko G.D., Strelkov S.A. Postglacial and recent crustal movements in the northeast of the Baltic shield. *Tectonophysics*, 1975, v. 29, Issues 1–4, p. 339–344.

24. Processing Modflow. An Integrated Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow, Transport and Reactive Processes. Simcore Software, 2005, 462 p.
25. Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe, R., Jõelett A., Karro E., Marandi A., Savitskaja L. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin. Chemical Geology, 2009, v. 258, p. 219–231.
26. Tokarev, I. V., Borodulina, G. S., Subetto, D. A., Voronyuk, G. Y., & Zobkov, M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O). Quaternary International. 524, 2019, p. 76-85.
27. Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O., Subetto D., Tarasov P., Demidov I., Filimonova L., Sapelko T. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review. Quaternary Science Reviews, 26, 2007, p. 1871–1883.

Нормативные документы:

28. Закон РФ "О недрах" от 21.02.1992 N 2395-1 (ред. от 27.12.2019)
29. Перечень и классификатор объектов гидрогеологического районирования территории Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Протокол № 18/83-пр от 07.02.2012

Фондовые материалы:

30. Андреева Н.Г., Журавлева О.Ю. Информационный отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Составление легенд Ильменской и Онежской серии листов Государственной гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 в соответствии с новыми принципами гидрогеологической стратификации (1998 г.)» ФГУП ПКГЭ, СПб, 2002 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№27160.
31. Баскова И.В. и др. Отчёт о выполнении работ по объекту: «Гидрогеологическое доизучение масштаба 1:200000 листа Р-35-XXXVI (Северо-Петербургская площадь)», государственный контракт № К-41.2011.003 от 11.07.2011г., ОАО «ПКГЭ», Санкт-Петербург, 2013 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№ 28319.
32. Квашнина А.А., Ермак Ю.А. Отчёт «Региональная переоценка эксплуатационных запасов подземных вод на территории Карельского перешейка» в 2 книгах. Комитет по природным ресурсам и охране окружающей среды Ленинградской области Ленинградское областное учреждение «Региональное агентство природопользования и охраны окружающей среды» Северо-Западное государственное геологическое предприятие «Севзапгеология» Санкт-Петербургское отделение института геоэкологии РАН, СПб, 2005 – Санкт-Петербургский филиал ФБУ «ГКЗ».

33. Котова О.М., Бакалаврская выпускная квалификационная работа «Составление численной геофильтрационной модели вендского водоносного комплекса с целью уточнения его области питания», СПбГУ, 2018.
34. Селадына В.В., Кальм В.А., Рошаль А.А. Отчёт по разработке постоянно действующих математических моделей геофильтрации Ленинградского промышленного района. ТКЭ СЗПГО, Ленинград, 1986 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№ 25106.
35. Семенчук А.В. Создание постоянно действующей гидрогеологической модели вендского водоносного комплекса в пределах Карельского перешейка на территориях г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области с целью обеспечения управления недропользованием (гос.к. К.41.2015.014). АО «Росгео», Москва, 2017 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№28815
36. Шебеста Е.А., Андреева Н.Г., Яновский А.С., и др. Отчёт о проведении работ по объекту «Создание современной гидрогеологической карты Ленинградского артезианского бассейна масштаба 1:500000 с выявлением условий локализации питьевых подземных вод, различных по защищённости водоносных горизонтов и качеству вод». ФГУП ПКГЭ, СПб, 2007 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№ 27592

Ресурсы сети Интернет:

37. ГИС-Атлас «Недра России» // Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) – режим доступа: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (дата обращения 12.03.2019).
38. Департамент по недропользованию по Северо-Западному федеральному округу, на континентальном шельфе и в мировом океане (Севзапнедра) // Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) – режим доступа: <http://sevzapnedra.nw.ru/> (дата обращения 12.03.2019).
39. ИАС «Серийные легенды Госгеолкарт 1000/3 РФ» // Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) – режим доступа: <http://slegenda.vsegei.ru/serlegenda/index.html> (дата обращения 20.05.2019).
40. ИС «Серийные легенды Госгеолкарт 200/2 РФ» // Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) – режим доступа: <http://slegenda.vsegei.ru/ser-200/index.html> (дата обращения 20.05.2019).
41. Карты глубин водоёмов Ленинградской области // Сервис Fishingpiter – режим доступа: <http://www.fishingpiter.ru/maps/index.php> (дата обращения 16.10.2019).
42. Карта глубин водоёмов Ленинградской области // Сервис Fishtouring – режим доступа: <https://fishtouring.com/47/lakes/> (дата обращения 16.10.2019).

43. Карта глубин Ладожского озера // Сервис Fisherman – режим доступа: <https://fisherman.org/depth-map/ladoghskoe-ozero/> (дата обращения 16.10.2019).
44. Карта государственной геодезической сети 2 км (GSM 2km) // Сайт картографической информации – режим доступа: <https://nakarte.me/> (дата обращения 16.10.2019).
45. Карта «Карельский перешеек. Санкт-Петербург и его окрестности» // Сайт География России – режим доступа: <https://geographyofrussia.com/karta-karelskij-peresheek-sankt-peterburg-i-okrestnosti/> (дата обращения 16.10.2019).
46. Климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области // ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» – режим доступа: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2> (дата обращения 20.11.2019).
47. Лазерно-спектрометрический измеритель изотопного состава водорода и кислорода Picarro L-2120 i // Ресурсный центр Рентгенодифракционные методы исследования Научного парка СПбГУ – режим доступа: <https://researchpark.spbu.ru/equipment-xrd-rus/3015-xrd-picarro-l-2120-i-rus> (дата обращения 03.10.2019).
48. Программное обеспечение Google Earth – режим доступа: <https://www.google.com/earth/> (дата обращения 18.02.2019).
49. Программное обеспечение Processing Modflow for Windows (PMWIN 5.3) – режим доступа: <http://www.pmwin.net/pmwin5.htm> (дата обращения 28.09.2018).
50. Программное обеспечение Processing Modflow 8 // Программные продукты Simcore Software – режим доступа: <https://www.simcore.com/wp/products/> (дата обращения 05.10.2019).
51. Реки и озёра Выборгского района Ленинградской области // Сервис Russiaregions – режим доступа: <https://russiaregions.ru/vyborgskij-rajon/vyborgskyrivers/> (дата обращения 16.10.2019).
52. Сводный государственный реестр работ по геологическому изучению недр // Российский федеральный геологический фонд – режим доступа: <https://rfgf.ru/gin/> (дата обращения 18.02.2020).
53. GNIP database // IAEA – режим доступа: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip> (дата обращения 18.11.2019).