

Санкт-Петербургский государственный университет

КОТОВА Ольга Михайловна

Выпускная квалификационная работа

**СОСТАВЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ВЕНДСКОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА
С ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ ЕГО ОБЛАСТИ ПИТАНИЯ**

Основная образовательная программа бакалавриата
«Геология»

Научный руководитель: к. г.-м. н.,
доцент КОНОСАВСКИЙ Павел
Константинович

Рецензент: к. т. н. НАЗИМА Вячеслав
Викторович

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

1	Введение	3
2	Физико-географическая характеристика района	5
3	Геологическое строение района.....	12
4	Гидрогеологическое строение района.....	17
5	Анализ существующей модели, её актуализация и калибровка.....	26
6	Верификация модели с учётом актуализированных данных.....	33
7	Выделение области питания вендского водоносного комплекса.....	39
8	Заключение.....	43

1 Введение

Вендский водоносный комплекс (ВВК) – это крупнейший водоносный комплекс Ленинградской области, эксплуатация и изучение которого ведётся на протяжении уже более 70 лет.

Для количественного обоснования расположения области питания ВВК использовалось численное геофильтрационное моделирование на базе открытого программного обеспечения Processing Modflow (PM5) (Chiang W-H. и др., 1998; <http://www.pmwin.net/pmwin5.htm>). Численное моделирование является наиболее современным, комплексным и точным методом изучения свойств водоносных горизонтов.

Перед исследованием были поставлены следующие **цели**: актуализация (с учетом современных данных) существующей численной геофильтрационной модели вендского водоносного комплекса, установление его современной области питания и количественная оценка объёмов этого питания.

Для реализации цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Изучение физико-географических условий, геологического и гидрогеологического строения района исследования на базе опубликованных и фондовых материалов;
2. Анализ существующей численной геофильтрационной модели вендского водоносного комплекса (Коносавский, Переверзева, 2005);
3. Актуализация данных о водоотборе и изменениях уровня в вендском водоносном комплексе за период с 2005 по 2016 год;
4. Перекалибровка модели в связи с новыми данными;
5. Выделение основной области питания вендского водоносного комплекса и численная оценка величины этого питания.

Актуальность данного исследования заключается в том, что вендский водоносный комплекс является крупнейшим водоносным комплексом Ленинградской области и служит резервным источником водоснабжения Санкт-Петербурга на период чрезвычайных ситуаций, поэтому крайне важно

знание основной области питания ВВК и численная оценка величины этого питания.

Новизна работы заключается в том, что ранее оценка области питания вендского водоносного комплекса производилась только на качественном уровне. Данное исследование позволит не только уточнить области питания на карте, но и провести количественную оценку объёмов этого питания в пределах выделенной области.

2 Физико-географическая характеристика района

Моделируемая территория располагается в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Она охватывает территорию от южной границы города Санкт-Петербург на юге до реки Вуокса на севере и от города Сосновый Бор на западе до побережья Ладожского озера на востоке (рисунок 1).

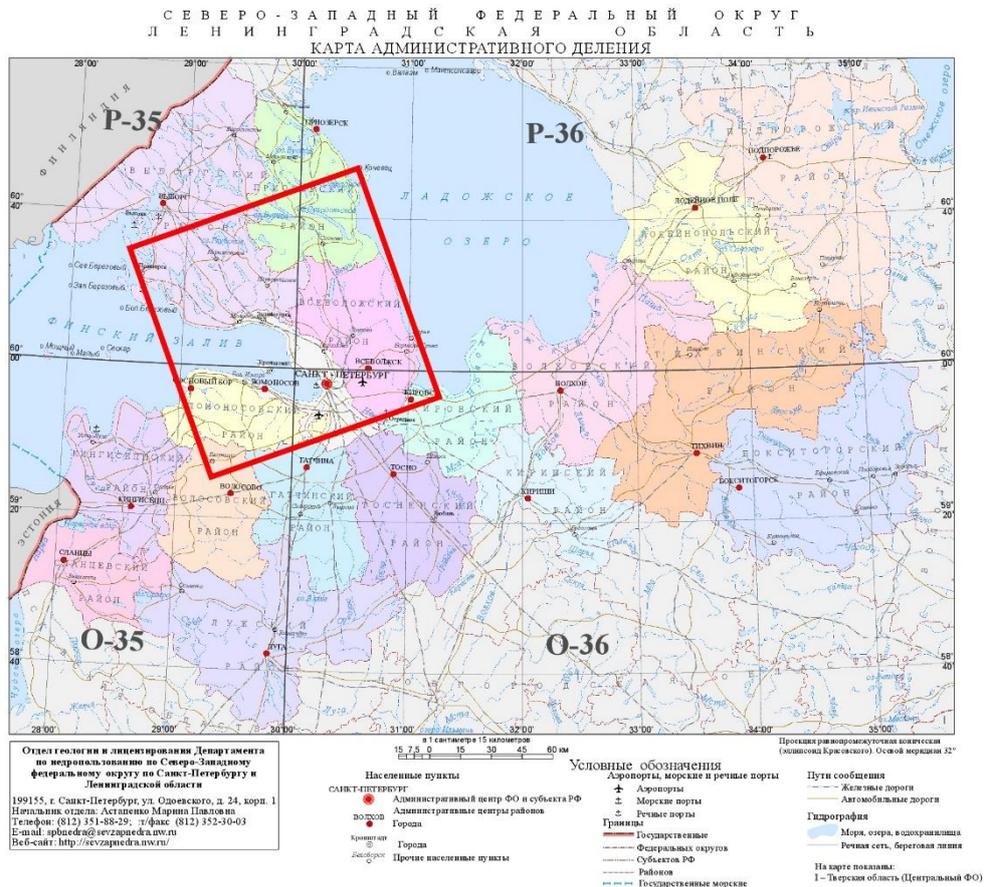


Рисунок 1. Административная карта Ленинградской области с выделением моделируемого участка (Источник: ГИС-Атлас «Недра России» <http://atlaspacket.vsegei.ru/#09cd946d9d09edac30>)

Рельеф

Изучаемая территория расположена на северо-западе Восточно-Европейской равнины, в северной части Прибалтийской низменности. Она представляет собой полого наклонённую на север волнистую равнину с абсолютными высотами преимущественно от 50 до 100 м, пересечённую густой сетью рек. На общем фоне низменной равнины выступает ряд изолированных

возвышенностей, достигающих абсолютных отметок 200-300 м, и наблюдаются обширные пониженные пространства с абсолютными высотами от нуля до 50 м. Прибалтийская низменность подразделяется на следующие орографические районы (рисунок 2): 1) Вуоксинская низина, 2) центральная возвышенность Карельского перешейка, 3) Предглинтовая низменность, 4) Балтийско-Ладожский глинт, 5) Ордовикское плато, 6) Девонская равнина.

(Геология СССР. Том I..., 1971)

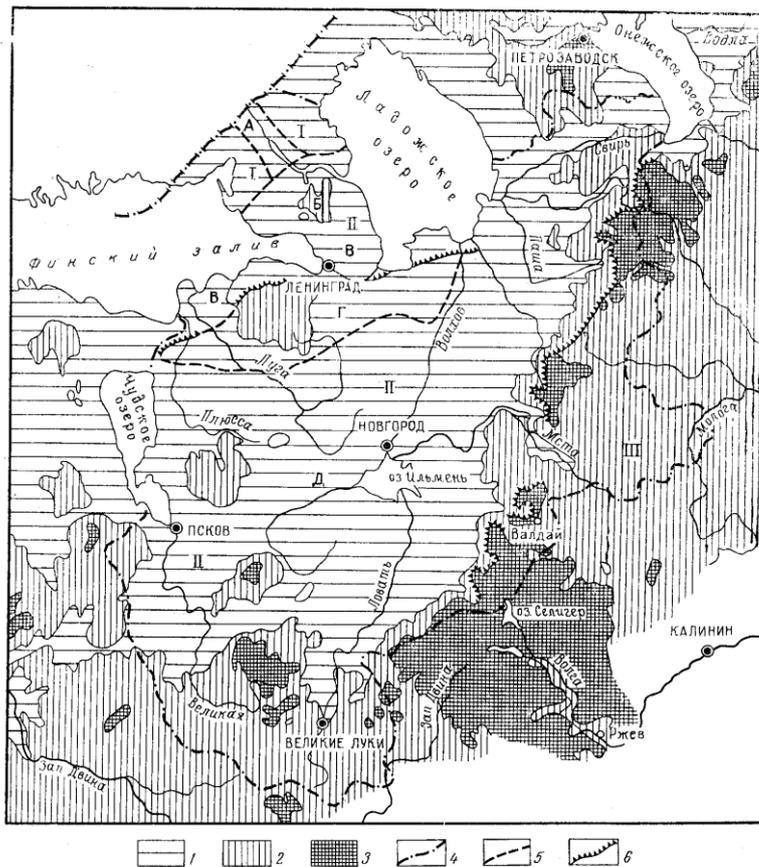


Рис. 3. Схематическая гипсометрическая карта Ленинградской, Новгородской и Псковской областей (из книги «Гидрогеология СССР», том III, ч. 1, 1967 г.)
 Абсолютные высоты: 1 — 0—100 м; 2 — 100—200 м; 3 — 200—300 м; 4 — границы региона; 5 — границы орографических районов: I — Север Карельского перешейка, II — Прибалтийская низменность, III — Валдайская возвышенность, А — Вуоксинская низина, Б — Центральная возвышенность Карельского перешейка, В — Предглинтовая низменность, Г — Ордовикское плато, Д — Девонская равнина; 6 — Балтийско-Ладожский (Ордовикский глинт) и Валдайско-Онежский (Карбоновый) уступ

Рисунок 2. Схематическая гипсометрическая карта Ленинградской, Новгородской и Псковской областей (Источник: «Геология СССР. Том I..., 1971»)

Вуоксинская низина разделяет север Карельского перешейка на две части, вклиниваясь в центральную его часть в виде заливообразного понижения. Поверхность низины слабоволнистая, почти равнинная, наклоненная на юго-

восток к Ладожскому озеру, с изменением абсолютных отметок примерно от 50 до 5 м на побережье. Центральная возвышенность Карельского перешейка, включающая Котовскую возвышенность, Лемболовские и Токсовские высоты, представляет собой аккумулятивное моренное плато высотой 60-80 м. Поверхность плато неровная, местами волнистая. Относительные колебания высот в центральной части плато составляют 5-10 м, на окраинах и в пределах участков камового рельефа – до 30-50 м. Максимальные абсолютные высоты в 170-205 м наблюдаются в центральной части возвышенности, к периферии они понижаются до 120 м.

(Геология СССР. Том I..., 1971)

Предглинтовая низменность расположена к югу от центральной возвышенности Карельского перешейка и отграничена Балтийско-Ладожским уступом от Ордовикского плато. Низменность представляет собой комплекс аккумулятивных террасовых поверхностей (с абсолютными высотами от нуля до 100 м), наклоненных в сторону Финского залива и Ладожского озера. Изолированные камовые массивы, нарушающие равнинный рельеф террас, возвышаются на 40-100 м, их высота достигает 50-137 м. Склоны возвышенностей крутые - до 20°, обычно террасированные. Балтийско-Ладожский глинт протягивается в 3-15 км от побережий Финского залива и Ладожского озера от р. Нарва на западе до р. Сясь на востоке, ограничивая с севера Ордовикское плато. Он представляет собой хорошо выраженный в рельефе уступ, сложенный ордовикскими известняками. Максимальные отметки бровки уступа 100-120 м абсолютной высоты (относительная высота до 30-40 м) приурочены к широтной части его между с. Копорье и г. Красное Село. Почти на всем протяжении глинт рассечен оврагами и каньонообразными речными долинами с порожистыми руслами рек в местах пересечения ими уступа.

(Геология СССР. Том I..., 1971)

Ордовикское плато представляет собой плоскую возвышенную равнину с отметками поверхности от 50 до 150 м абсолютной высоты. Плато разделяется

на два обособленных участка: западный, наиболее приподнятый и обширный, называемый Ижорской возвышенностью, и восточный - Волховское плато (между реками Мга и Волхов). Ижорская возвышенность имеет преимущественно плоскую поверхность, полого наклоненную к юго-западу от глинта. Абсолютные высоты на большей части возвышенности превышают 100 м и лишь в восточной части уменьшаются до 25-30 м; относительные колебания высот обычно не более 5 м.

(Геология СССР. Том I..., 1971)

Волховское плато и Девонская равнина не входят в моделируемую территорию, поэтому их описание не приводится.

Гидрография

Реки. Гидрографическая сеть принадлежит региональным бассейнам подземного стока, входящим в состав Балтийского бассейна континентального подземного стока: Ижорскому - реки Нева, Сестра, Охта; Ладожскому – реки Морье, Авлога, Вьюн, Волочаевка, Волчья, Черная. Небольшие реки Вьюн, Авлога, Сестра, Рощинка, Перовка и др., берущие начало со склонов Лемболовской возвышенности, имеют ширину в среднем течении 25-30 м, глубину 1,5-2,5 м.

(Квашнина, Ермак, 2005)

Самой многоводной рекой является Нева. Она вытекает из Ладожского озера и впадает в Финский залив, протекая по Приневской низине. Её протяженность 74 км, падение 5 м. Площадь водосбора самой реки всего 6000 км., но, транспортируя в Финский залив воды Ладожского озера, Нева получает питание с более обширного водосбора площадью около 300 км². Пойма не выражена и намечается лишь в мелких излучинах; высота берегов изменяется от 5 до 12 м. Ширина реки изменяется от 200 м до 1,3 км. В пределах Санкт-Петербурга глубина реки от 12-16 до 23 м. Ниже устья р. Охта начинается дельта Невы. Режим Невы обусловлен влиянием, с одной стороны, Ладожского озера, с другой - Финского залива. Характерной особенностью Невы являются подьёмы воды, обусловленные действием сильных западных

ветров, нагоняющих в реку воду из Финского залива, что приводит к наводнениям. В последние годы наводнений не происходит в связи с сооружением защитной дамбы в акватории Финского залива. Ледовый режим её очень неустойчив: начало ледостава — от первой половины октября до января, вскрытие — с конца марта до конца апреля. Расход воды колеблется от 355 до 4460 м³/сек, при среднем значении около 2500 м³/сек. Основными притоками Невы являются Мга, Тосна, Ижора, Славянка (левые), Черная и Охта (правые).

(Бахарев и др., 2009)

Озёра. На рассматриваемой территории они многочисленны, разнообразны по размерам и форме. Все озёра имеют, в основном ледниковое происхождение. Они приурочены обычно к холмистым участкам последнего оледенения. Площадь большинства таких озёр не превышает 5-10 га, глубина обычно меньше 4-5 м. Котловины этих озёр имеют округлую или неправильную лопастную форму, неровное дно. Встречаются также удлинённые ложбинные озера. Крупными являются: Вуокса, Суходольское (проточные озёра); Глубокое, Нахимовское, Пионерское, Красноармейское и др. (ложбинные озёра) преимущественно северо-западной ориентировки. Питание рек и озёр происходит, в основном, за счёт весеннего снеготаяния (более 50%), обуславливающего максимальные расходы и уровни (подъём уровня в реках весной до 5-6 м выше среднего); дождей (20-30%); подземных вод (15-20%). Характерна низкая продолжительная межень и осенние «дождевые паводки». Ледовый режим озёр определяется температурой воздуха, характером осадков, ветровым режимом. Имеет влияние также глубина озера, площадь его, наличие грунтового питания и т.д. В среднем ледостав на озёрах наступает в конце ноября. Наибольшая толщина льда (1-1,25 м) наблюдается в марте.

(Квашнина, Ермак, 2005)

Ладожское озеро - самое крупное в Европе, имеет площадь 18400 км², длину свыше 200 км, наибольшую ширину около 125 км. Озеро занимает

обширную котловину структурно-тектонического происхождения, строение которой в различных частях неоднородно. Скалистые северные берега вдаются в озеро многочисленными мысами. Южные берега низкие, заболоченные, прямолинейные. Глубина озера возрастает от южного побережья к северному и достигает 225 м. Общий объём воды в озере около 900 км³. Колебания уровня менее 2 м, чаще даже менее 1 м. Годовой ход уровня озера очень плавный, что объясняется не только его значительными размерами, но и огромной площадью его бассейна, составляющей около 280000 км². В Ладожском озере имеется более 500 небольших островов общей площадью свыше 300 км², большая часть их находится около северного побережья. Посреди озера располагаются две группы (два архипелага) островов: Валаамская (свыше 50 островов) и Мантсин-Сари (около 40 островов).

(Квашнина, Ермак, 2005)

Финский залив Балтийского моря имеет протяженность около 420 км, ширину в восточной части 15 км, в средней – 130 км, в западной – 75 км. Площадь залива около 29 500 км². Северный берег сильно изрезан заливами - фьордами, с множеством мелких островков. Благодаря притоку большого количества пресной воды, которую несут впадающие в него реки, вода в Финском заливе отличается слабой солёностью. Приливы и отливы в Финском заливе не заметны, но часты волнения, вызываемые циклонами. Замерзает лишь восточная часть залива. Окончательное освобождение от льда происходит в конце апреля - начале мая.

(Квашнина, Ермак, 2005)

Болота. Болота и заболоченности распространены преимущественно в Предглинтовой низменности и занимают незначительные участки на Выборгско-Ладожской равнине. Большая часть болот – верхового типа. Мощность торфа достигает нескольких метров. Аккумулируя поверхностный сток в паводковые периоды, болота постепенно расходуют его на пополнение ресурсов поверхностных и подземных вод.

(Квашнина, Ермак, 2005)

Климат

Климат на территории переходный от морского к континентальному с умеренно тёплым летом и продолжительной умеренно холодной зимой. Многолетняя среднегодовая температура составляет $+4,3^{\circ}\text{C}$, в январе $-7,7^{\circ}\text{C}$, в июле $+17,8^{\circ}\text{C}$, при абсолютном максимуме и минимуме температур соответственно $+34^{\circ}\text{C}$ и -50°C .

Среднегодовое количество осадков составляет 570-800 мм, более 70% из них выпадает в тёплое время. Наибольшее количество осадков выпадает на возвышенностях, наименьшее - на побережьях Финского залива и Ладожского озера. Число дней с осадками – около 200 в году.

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 запас воды в снежном покрове составляет 120-140 мм. Преобладание осадков над испарением создает благоприятные условия для питания поверхностных и подземных вод. Основное пополнение ресурсов подземных вод происходит осенью, в меньшей степени весной. Преобладающие ветры юго-западные и западные с довольно продолжительными периодами северо-восточных ветров.

(Бахрев и др., 2009; Квашнина, Ермак, 2005)

3 Геологическое строение района

Изучаемая территория находится на сочленении двух крупных структурно-геологических районов (рисунок 3): Балтийского кристаллического щита, где сложно дислоцированные метаморфизованные породы архея, нижнего и среднего протерозоя обнажены с поверхности, и северо-западной части Русской плиты, представляющей собой область погружения фундамента под осадочным чехлом.

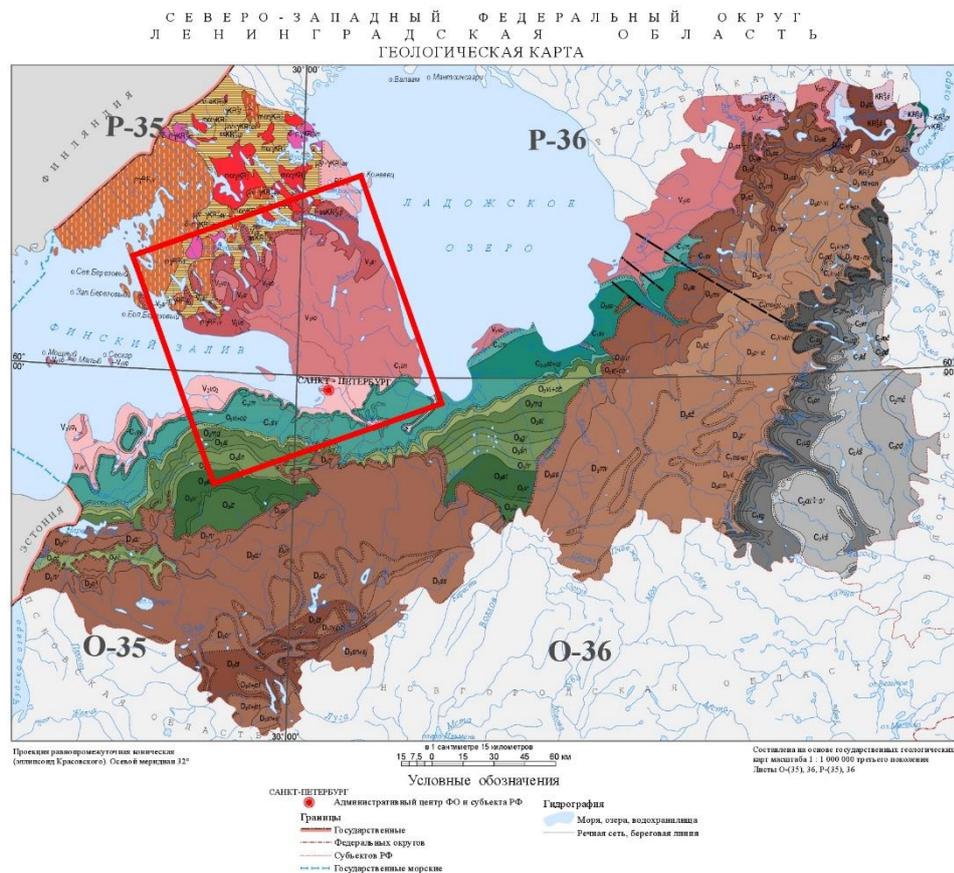


Рисунок 3. Геологическая карта Ленинградской области с выделением моделируемого участка (Источник: ГИС-Атлас «Недра России» <http://atlaspacket.vsegei.ru/#09cd946d9d09edac30>)

Нижний структурный этаж. Архей - нижний протерозой (AR-PR).

Породы нижнего архей-протерозойского структурного этажа представлены на Балтийском щите и его южном и юго-восточном склонах, перекрытых чехлом осадочных пород Русской плиты.

Балтийский кристаллический щит входит в пределы рассматриваемой территории своей самой южной окраиной. Это сравнительно небольшой участок моделируемой области, расположенный на севере Карельского перешейка, имеющий свои характерные геологические и структурные особенности, резко отличные от остальной территории Русской платформы. Здесь с поверхности развиты древние метаморфизованные толщи, представленные биотитовыми, амфибол-биотитовыми и слюдяными гнейсами и кристаллическими сланцами архейского и нижнепротерозойского возраста с интрузиями кислых и основных пород. В западной половине Карельского перешейка - у побережья Финского залива широко развиты верхнепротерозойские граниты-рапакиви, слагающие мощное плитообразное интрузивное тело. Простираются древние толщи с северо-запада на юго-восток и погружаются к югу под осадочные образования.

Характер структуры и вещественный состав погружённой части фундамента в пределах Русской плиты устанавливается в основном по геофизическим данным (плотности и намагниченности пород). Интерпретация их и материалы бурения показали, что кристаллические образования, слагающие фундамент в этом районе, являются непосредственным продолжением региональных складчатых структур осадочно-эффузивных и интрузивных комплексов, развитых в южной части Балтийского кристаллического щита. Здесь выделяются массивы, сложенные гранито-гнейсами и гнейсо-гранитами архейского возраста, и окаймляющие их подвижные зоны свекофенид и карелид, имеющие субмеридиональную и северо-западную ориентировку складчатых структур. Это сложно дислоцированная (с многочисленными разломами со смещениями блоков фундамента) толща гнейсов различного состава с подчинёнными амфиболитами, кварцитами архейско-нижнепротерозойского возраста (складчатые сооружения свекофенид) и ладожская серия нижне-среднепротерозойского возраста, представленная биотитовыми и амфибол-

биотитовыми гнейсами с пропластками сланцев, амфиболитов и скарнированных карбонатных пород.

(Геология СССР. Том I..., 1971)

Верхний структурный этаж. Рифей - ордовик (R-O).

Породы верхнепротерозойско-палеозойского структурного этажа (на моделируемой территории охватывающего отложения с рифея по ордовик) являются отложениями осадочного чехла северо-западной части Русской плиты. Они залегают на древних кристаллических породах, имеющих северо-западное простирание, с резким угловым несогласием.

Основной особенностью геологической структуры этой области является пологое моноклинальное залегание слагающих её образований, с очень слабым падением их к югу и юго-востоку. Соответственно, в этом же направлении происходит последовательная смена древних осадочных толщ более молодыми, выходящими на поверхность по восстанию слоёв. Всю территорию, сложенную осадочными образованиями, следует рассматривать как единый регион с относительным однообразием и постоянством фациального состава разновозрастных отложений, как в области выхода их на поверхность, так и в более или менее погруженных частях. Наблюдающиеся слабые изменения фаций, а также довольно значительное увеличение мощности отдельных горизонтов вполне закономерны; они связаны в основном с особенностями палеогеографических условий осадконакопления в мелководной или глубоководной частях бассейна, в разной степени удаленных от области сноса.

Характерной особенностью геологического строения осадочного чехла, кроме его моноклинального залегания, является широкое развитие структурно-денудационных форм дочетвертичного рельефа, представляющих собой плато, сложенные палеозойскими породами, и глинты-уступы, ограничивающие эти плато. Формирование куэстового рельефа связано здесь прежде всего с древней эрозией, а также, возможно, с проявлением эндогенных процессов и новейших тектонических движений. Моделируемая область охватывает Предглинтовую

низменность и Ордовикское плато, обрывающееся к северу Балтийско-Ладожским глинтам.

(Геология СССР. Том I..., 1971; Киселёв и др., 2002)

Вендский (редкинский-нижнекотлинский) терригенный комплекс (V_2rd-kt). Непосредственно на фундаменте залегают отложения валдайской серии вендского комплекса. Нижнюю часть разреза (старорусская свита редкинского горизонта) слагают чередующиеся пачки гравелитов, песчаников, алевролитов, аргеллитоподобных глин и аргиллитов мощностью до 45 м, верхнюю (нижнекотлинскую подсвиту) - переслаивающиеся песчаники, алевролиты и алевролитистые глины мощностью 60-70 м. Общая максимальная мощность комплекса не более 130 м.

Верхнекотлинский терригенный комплекс (Vkt_2). Залегают выше по разрезу и представлен так называемыми "ляминаритовыми" тонкослоистыми алевролитами, плотными сланцевидными глинами, с включением линз сидерита и алевролитов. Изредка в толще встречаются песчаные линзы. Мощность комплекса 60 – 160 м.

Ломоносовский терригенный комплекс ($V_2-Є_1lm$). Объединяет отложения воронковской и ломоносовской свит нижнего кембрия выделяется в виде узкой извилистой полосы в южной части Всеволожского района. Отложения представлены песками, песчаниками с прослоями алевролитов и глин, которые местами преобладают в разрезе. Общая мощность комплекса не более 26 м.

Сиверский терригенный комплекс ($Є_1sv$). Комплекс залегают на породах ломоносовского комплекса в юго-восточной части Всеволожского района. Разрез представлен плотными алевролитистыми "синими" нижнекембрийскими глинами, в толще которых изредка встречаются маломощные прослои песчаников, алевролитов. Глины являются выдержанным региональным водоупором. Мощность кембрийских синих глин, относимых ранее стратиграфически к лонтоваскому горизонту нижнего кембрия, изменяется от 3-10 м в зоне его выклинивания до 20-90 м на Предглинтавой низменности.

Ордовикский комплекс (O). Замыкают верхний структурный ярус ордовикские отложения, слагающие Ордовикское плато, которое протягивается в широтном направлении от р. Сясь на востоке до западной границы Ленинградской области и далее на территорию Эстонии. К северу Ордовикское плато круто обрывается уступом - глинтом различной высоты и крутизны. Глинт сложен нижнеордовикскими известняками (волховскими и кундскими) с подстилающими их леэтским (песчано-глинистая глауконитовая толща) и пакерортским (оболовые песчаники и диктионемове сланцы) горизонтами, залегающими с незначительным несогласием на более древних породах. Само Ордовикское плато сложено известняками и доломитами нижнего, среднего и на отдельных участках верхнего отделов ордовика, перекрытых на большей части площади четвертичными образованиями мощностью от 0,5 до 20 м.

(Геология СССР. Том I..., 1971; Квашнина, Ермак, 2005)

Четвертичная система (Q).

С поверхности вся территория с незначительным региональным несогласием покрыта четвертичными отложениями различной мощности и разного генезиса. Мощность их варьирует от 2-10 м на отдельных участках Ордовикского плато и Предглинтовой низменности до 150-226 м в древних дочетвертичных депрессиях и долинах. Здесь развиты среднечетвертичные (московский ледниковый горизонт), верхнечетвертичные (микулинский межледниковый горизонт и валдайский надгоризонт) и современные отложения.

(Киселёв и др., 2002)

4 Гидрогеологическое строение района

Моделируемая территория располагается на границе Ленинградского артезианского бассейна и Восточно-Балтийского гидрогеологического массива (рисунок 4).

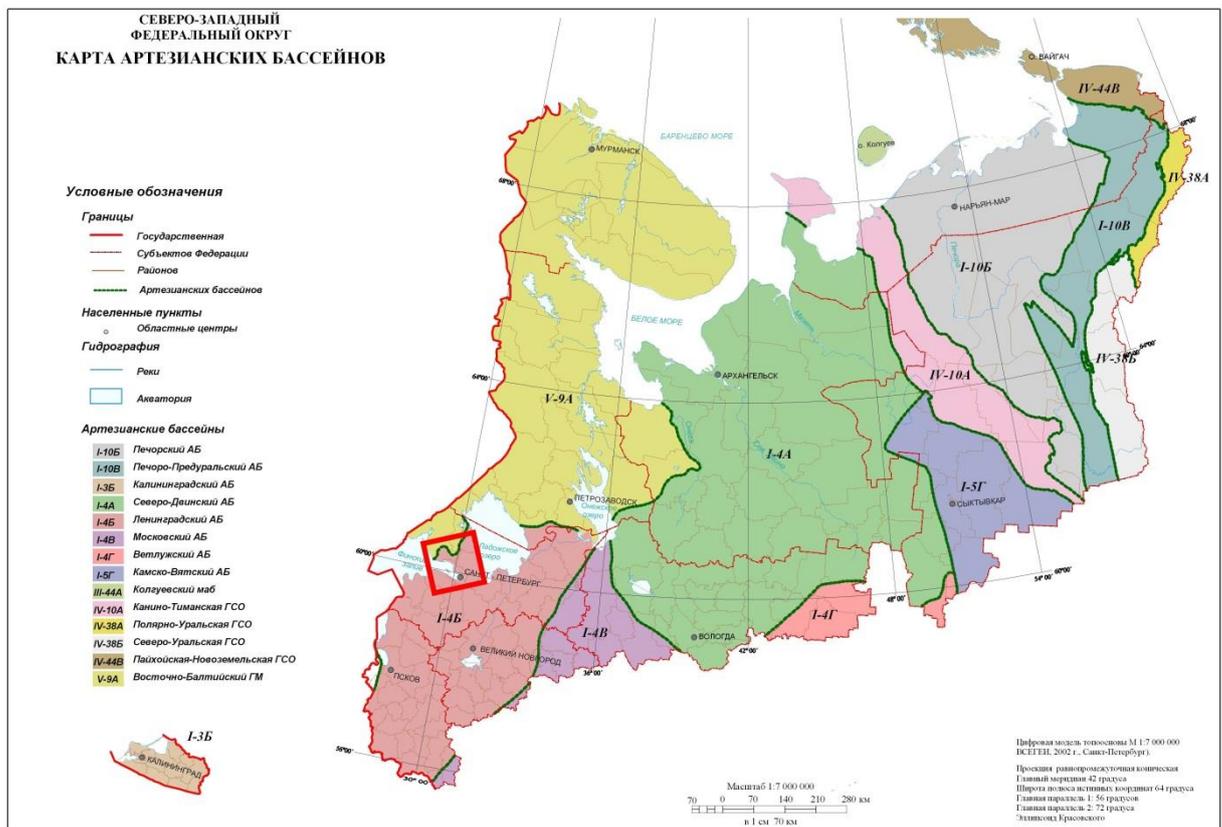


Рисунок 4. Карта артезианских бассейнов Северо-Западного федерального округа с выделением моделируемого участка (Источник: <http://sevzapnedra.nw.ru/Maps/SZFO/VG.jpg>)

Исходя, из литологического состава пород и структурных особенностей строения территории, в ее пределах выделяются следующие водоносные и водоупорные горизонты и комплексы.

Подземные воды четвертичных отложений

Четвертичные отложения развиты повсеместно и характеризуются большой литолого-генетической неоднородностью и колебаниями мощности осадков - от первых метров до 110-170 м. Представлены отложения преимущественно образованиями ледникового, озерно-ледникового

(лимногляциального) и водно-ледникового (флювиогляциального) генезиса: песками различной зернистости, глинами, супесями и суглинками. Согласно гидрогеологической стратификации четвертичных отложений в районе выделяются два комплекса: верхненеоплейстоцен-голоценовый водоносный комплекс (Q_{III-IV}) и неоплейстоценовый водоносный комплекс (Q_{I-III}), в которых выделение гидрогеологических подразделений осуществлено по литолого-генетическому принципу, характеру проницаемости, обводнённости, залеганию отложений.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Верхненеоплейстоцен-голоценовый водоносный комплекс (Q_{III-IV}) объединяет надморенные отложения 12 гидрогеологических подразделений: современные техногенные, биогенные, морские, аллювиально-озерные, эоловые образования мощностью 1-7 м до 15-20 м (распространенные крайне ограничено и практически для хозяйственно-питьевого водоснабжения не используемые) и верхнечетвертичные - озёрно-ледниковые, водно-ледниковые, флювиогляциальные отложения, мощностью 1-40 м, иногда до 90 м, слагающие озо-камовые формы рельефа. Для этого комплекса характерно развитие грунтовых (безнапорных) вод, приуроченных к соответствующим образованиям: торфам, пескам различной зернистости, гравийно-галечниковым разностям, супесям. Водообильность комплекса неравномерная. По данным опытных работ, обобщенные коэффициенты фильтрации изменяются от 0,0025 до 25 м/сут. Низкие значения характерны для торфа и глинистых разностей, высокие значения для крупнозернистых песков, галечников.

Подземные воды верхнечетвертичных отложений широко используются садоводческими товариществами, мелкими хозяйствами для питьевых и бытовых нужд. Восполнение запасов грунтовых вод происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков на всей их площади распространения.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Средне-верхненеоплейстоценовый водоносный комплекс (Q_{II-III}) распространен практически повсеместно и на большей части площади перекрыт

отложениями верхнеплейстоцен-голоценового водоносного комплекса. В строении комплекса выделяются водоупорные моренные отложения осташковского (ранее валдайского), московского и днепровского оледенения: плотные валунные суглинки и глины, супеси с прослоями и линзами песков и водоносные межморенные озёрно-ледниковые и водно-ледниковые отложения - тонко- и мелкозернистые пески, реже средне- и крупнозернистые с гравием, галькой, переходящие в супеси, гумусированные супеси с прослоями торфяников (часто газоносными), суглинки, глины. В комплексе стратифицируется до 7 горизонтов по тем же признакам, что и в надморенном комплексе. Условно на территории Карельского перешейка выделено 3 основных горизонта - верхний московско-осташковский межморенный горизонт, нижний днепровско-московский межморенный горизонт и днепровский подморенный горизонт.

Подземные воды межморенных отложений из-за частой фациально-литологической изменчивости распространены локально. Мощность горизонтов колеблется от первых метров до 30-40 м, иногда до 65-70 м. Наибольшая мощность отмечается в зонах переуглубления долин, наименьшая - на участках размыва. Водообильность пород очень пёстрая. Удельные дебиты скважин в зависимости от литологического состава варьируют от 0,003 л/с до 10,5 л/с, коэффициенты фильтрации - от 0,03 м/сут до 81,3 м/сут. Воды межморенных горизонтов напорные. Величина напора составляет 18-78 м. По химическому составу воды, в основном, гидрокарбонатные или хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые либо натриевые с минерализацией до 1,0 г/дм³. На отдельных локальных участках в переуглубленных долинах фиксируется минерализация до 1,2-3,2 г/дм³. Для водоносного комплекса характерно повышенное содержание двухвалентного железа.

Подземные воды широко используются для водоснабжения. Питание межморенных водоносных горизонтов осуществляется, в основном, на водораздельных пространствах за счет перетекания грунтовых вод через

гидравлические окна в морене. Разгрузка подземных вод четвертичных отложений происходит в долины рек, озёра и в Финский залив.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Водоупорный лонтоваский терригенный горизонт (Є1ln).

Горизонт распространен в южной части территории и залегает под четвертичными отложениями на глубине от нескольких метров до 30-50 м. Горизонт сложен плотными тонкоплитчатыми глинами мощностью от 3-10 м в зоне выклинивания до 20-90 м на Предглинтовой низменности. В нижней части толщи встречаются редкие тонкие прослойки песчаников и алевролитов (1-10 см). Коэффициент фильтрации глин составляет $1,6 \times 10^{-6}$ - $6,5 \times 10^{-5}$ м/сут. Лонтоваский горизонт "синих" глин является региональным водоупором Ленинградского артезианского бассейна.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Водоносный воронковско-ломоносовский терригенный комплекс (V2vr-Є1lm).

Водоносный комплекс узкой извилистой полосой 0,5-3,0 км оконтуривает площадь выхода лонтоваских глин на юго-востоке Карельского перешейка. В составе комплекса преобладают слабосцементированные тонко- и мелкозернистые песчаники, с прослоями алевролитов и глин. Мощность увеличивается в юго-восточном направлении от 8 м до 42 м. Комплекс содержит напорные воды. Величина напора увеличивается по падению пластов комплекса. Абсолютные отметки уровней составляют 20-40 м. Водообильность комплекса невелика. Удельные дебиты скважин составляют сотые доли л/с, реже 0,1-0,5 л/с, коэффициент фильтрации 0.2-3,0 м/сут. Водопроницаемость менее 50 м²/сут. Подземные воды гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатно-хлоридные натриево-кальциевые и натриевые с минерализацией до 3,5 г/дм³.

В пределах рассматриваемой территории практического эксплуатационного значения не имеет.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Водоупорный верхнекотлинский терригенный горизонт (Vkt₂).

Горизонт развит в центральной и южной части территории Карельского перешейка и залегает под четвертичными отложениями на глубине от первых метров до 120 м. В юго-восточном направлении горизонт погружается под более молодые отложения на глубину до 200 м. Мощность горизонта изменяется в широких пределах от 1-10 м в северо-западной части до 110-115 м в юго-восточной. Горизонт сложен плотными тонкослоистыми зеленовато-серыми глинами. Изредка встречаются тонкие прослойки песчаников или песчаных алевролитов мощностью 0,1- 0,5 м, реже 1-3 м. Закономерностей в распространении прослоев песчаников не выявлено. Удельные дебиты скважин составляют тысячные и реже сотые доли л/с. Воды песчаных линз и прослоев напорные до 25,4 м. По химическому составу воды гидрокарбонатно-хлоридные натриевые с минерализацией до 1,6 г/дм³.

Верхнекотлинский горизонт является региональным водоупором Ленинградского артезианского бассейна, разделяющим воронковско-ломоносовский и вендский терригенные комплексы.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Водоносный вендский терригенный комплекс (V) (ВВК)

Название комплекса, а также дробных стратонов, выделяемых в данном комплексе разными авторами, неоднократно изменялось. До 1953 г. вся терригенная толща, залегающая между мощным котлинским водоупором и кристаллическими породами фундамента, называлась гдовским водоносным горизонтом. Это привычное название и сейчас широко используется в специальной и популярной литературе.

При проведении разведочных работ в 1970-е годы в толще выделили 3 пачки: I – нижняя – алевроито-песчаная, мощностью 25-30 м; II – средняя – алевроито-глинистая, мощностью 8-40 м; III – верхняя – песчано-глинистая мощностью 10-60 м.

Позднее, в гидрогеологическом расчленении разреза, гдовский водоносный горизонт соответствует вендскому водоносному комплексу, в

составе которого выделен водоносный нижнекотлинский терригенный горизонт и водоносный стрельненский терригенный горизонт, объединяющий отложения старорусской свиты. Выделенные гидрогеологические горизонты в составе венда не нашли отражения в последующей составленной региональной гидрогеологической карте масштаба 1:200000 на данную территорию, которая и положена в основу гидрогеологической стратификации изучаемой площади.

В рамках составляемой модели вся водоносная толща вендских отложений принималась за единую гидрогеологическую структуру, так как, во-первых, недостаточно данных для достоверного разделения её на несколько слоёв, а во-вторых, ведётся совместная эксплуатация всей толщи, без разделения её на горизонты.

В северной и северо-западной части Карельского перешейка комплекс залегает под четвертичными отложениями на глубине 30-60 м, в погребённых долинах на 80-120 м, в южной части до 200 м. Общее падение кровли комплекса происходит в юго-восточном направлении. Отложения ВВК представлены зачастую невыдержанными по простиранию переслаивающимися пачками мелко- и разномерных песчаников и песков, алевролитов и глин, а также аргиллитов (в нижней части комплекса). Мощность песчаных прослоев изменяется от первых см до 2-7 м в верхней части разреза, и от 1,5-6,0 м до 17-30 м в нижней его части. В целом, для ВВК характерно присутствие песчаников и песков в нижней его части от 25-50% до 75%, увеличение крупнозернистых фракций вниз по разрезу и преобладание глин и алевролитов в верхней части разреза. Общая мощность комплекса на участках залегания под четвертичными отложениями, вследствие его размыва, изменчива и составляет 10-80 м. Под верхнекотлинскими глинами мощность ВВК довольно постоянна от 80-95 м до 120 м.

Напор увеличивается в направлении падения пластов от 70-80 м до 110-130 м. В естественных условиях величина напора в Санкт-Петербурге составляла 140-160 м, в настоящее время она не превышает 70-100 м. Пьезометрические уровни вендского комплекса в ненарушенных условиях на

водоразделах залегают на глубине 70-80 м, а на побережье Финского залива, Ладожского озера, в долине р. Вуокса выше поверхности земли на 6-11 м.

Водообильность ВВК не выдержана по площади и в разрезе. Минимальные удельные дебиты скважин характерны для верхней наиболее глинистой части комплекса в северной части территории: от тысячных долей л/с до 0,1-0,2 л/с; максимальные значения - 1-3 л/с для нижних слоев песчаника водоносного комплекса на побережье Финского залива и в районе поселков Сосново и Роцино. Коэффициенты водопроницаемости на большей части менее $100 \text{ м}^2/\text{сут}$. Максимальные значения водопроницаемости 200-250 $\text{м}^2/\text{сут}$ тяготеют к Петербургу и его окрестностям. Коэффициенты пьезопроводности составляют $5,8 \times 10^5$ - $2,6 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Химический состав подземных вод изменяется с севера на юг в соответствии с погружением комплекса. Пресные гидрокарбонатные натриевые воды развиты в северной части территории. На юг по падению кровли минерализация увеличивается до 3-5 г/дм³, достигая в районе п. Разметелево 6,27 г/дм³. В соответствии с увеличением минерализации изменяется анионный состав подземных вод от хлоридно-гидрокарбонатного до хлоридного.

В северной части территории в зоне развития пресных вод, ВВК является основным для водоснабжения населения. Он эксплуатируется многочисленными одиночными скважинами. На территории Петербурга солоноватые воды вендского комплекса используются для технического водоснабжения, кроме того, они применяются в качестве минеральных лечебно-столовых вод в ряде санаториев, и являются источником водоснабжения населения на время чрезвычайных ситуаций и особый период.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Слабоводоносный рифейско-нижневендский терригенный комплекс (R-V₁)

Комплекс выходит на дневную поверхность на северо-востоке Карельского перешейка в пределах Ладожско-Пашского грабена и охватывает терригенные, сходные по литологическому составу и положению в разрезе

отложения яблоньской свиты нижнего венда, а также приозерской и приладожской свит рифея. Под четвертичными отложениями комплекс залегает на небольшом участке вдоль северной границы территории, южнее перекрыт вендским терригенным комплексом.

Комплекс сложен грубозернистыми плотноцементированными песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов с гравием и галькой гранитов и гранито-гнейсов. Вскрытая мощность комплекса колеблется от 20 м до 350 м. Полная мощность не вскрыта, ориентировочно она достигает в пределах суши 500-600 м. Глубина залегания кровли 70-145 м.

Воды напорные. Величина напора составляет 90-107 м. Уровень воды на водораздельных участках устанавливается на глубине 17-26 м. в устье р. Бурная и на побережье озера Суходольское +1 м, +11,7 м. Удельный дебит скважин 0,02-0,06 л/с, коэффициент фильтрации пород 0,04-0,11 м/сут.

Химический состав вод изменяется в зависимости от глубины залегания комплекса. До глубины 130-140 м развиты гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды с минерализацией 1,2-1,3 г/дм³.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

Водоносная зона трещиноватости архейско-нижнепротерозойских кристаллических пород (AR-PR₁)

Породы интрузивно-метаморфогенного фундамента Восточно-Балтийского гидрогеологического массива обрамляют отложения венда, рифея с севера и погружаются под терригенные образования на глубину 220-300 м у южной границы Карельского перешейка, а в восточном направлении, на побережье Ладожского озера фундамент залегает на глубинах 500-700 м. Породы фундамента представлены, в основном: гранито-гнейсами, гнейсами, в меньшей степени интрузиями (гнейсо-гранитовыми, грандиоритовыми, гранитов-рапакиви). Площадная водоносность пород связана с экзогенной трещиноватостью, прослеживающей до глубины 50-120 м.

Воды по характеру циркуляции трещинные, безнапорные. При наличии водоупорной кровли в четверичном покрове воды приобретают напор. Величина напора в понижениях рельефа фундамента достигает 30-50 м.

Водообильность пород низкая. Удельные дебиты скважин зоны трещиноватости до глубины 114–120 м составляют сотые доли л/с, коэффициенты фильтрации - 0,004-0,5 м/сут с преобладанием 0,02-0,06 м/сут. Водоносность пород фундамента, как правило, приурочена к тектоническим зонам. На водораздельных пространствах и на участках развития четверичных глин скважины практически безводны. Водоносность пород фундамента, перекрытых мощным чехлом осадочных отложений (200-300 м) практически не изучена.

В условиях неглубокого залегания подземные воды по химическому составу гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные, весьма пресные с минерализацией 0,1-0,4 г/дм³, в зоне затрудненного водообмена хлоридные натриево-кальциевые, либо натриевые с минерализацией 1,0-2,4 г/дм³. С глубиной минерализация, содержание йода и брома увеличивается, воды становятся хлоридными натриево-кальциевыми с минерализацией 122,4 г/дм³, содержанием I - 0,3 мг/дм³, Br - 341 мг/дм³, F - 0,21 мг/дм³. Наиболее характерной чертой микрокомпонентного состава трещиноватой зоны архей-нижнепротерозойского водоносного комплекса является большая концентрация фтора (1,6-3,1 мг/дм³) в скважинах, расположенных в пределах Выборгского массива гранитов рапакиви.

При отсутствии или малой мощности четверичных отложений подземные воды архей-нижнепротерозойской водоносной зоны плохо защищены от поверхностных загрязнений. С этим обстоятельством связано может быть наличие в водах рассматриваемой водоносной зоны нитратов.

(Гидрогеология СССР. Том III..., 1967; Квашнина, Ермак, 2005)

5 Анализ существующей модели, её актуализация и калибровка

Моделирование геофильтрационных процессов является необходимым методом изучения сложных процессов, протекающих в толщах горных пород в ходе фильтрации через них воды. (Лукнер, Шестаков, 1967) В настоящее время численное моделирование осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения (Chiang W-Н., 1998) и является наиболее современным и комплексным методом изучения гидрогеологических структур. (Коносавский, Соловейчик, 2001)

Численная геофильтрационная модель ВВК, которая была взята за основу для создания новой модели вендского водоносного комплекса, составлена в 2005 году к.г.-м.н. Переверзевой С.А. под руководством к.г.-м.н. Коносавского П.К. в рамках выполнения работ по оценке прогнозных ресурсов подземных вод гдовского водоносного горизонта Карельского перешейка в пределах территории Ленинградской области (Коносавский, Переверзева, 2005). Эта модель, в свою очередь, основывалась на данных проекта по разработке постоянно действующей математической модели геофильтрации Ленинградского промышленного района, выполненного в 1982-1986 гг. под руководством Рошаля А.А. Для актуализации данных этих разработок были использованы данные о водоотборе и изменении уровней вендского водоносного комплекса в период с 2005 по 2016 год, предоставленные к.г.-м.н. Хархординым Иваном Леонидовичем, сбором которых занималось АО «Петербургская комплексная геологическая экспедиция».

5.1 Общие положения

Трёхмерная модель представляет собой двухслойную систему, в которой первым (верхним) слоем являются четвертичные отложения, перекрывающие вендский водоносный комплекс, а вторым (нижним) слоем является единая толща вендского водоносного комплекса. Котлинские глины отражены в вертикальных коэффициентах фильтрации 1-го расчетного слоя. Слои имеют

гидравлическую связь, верхний слой – безнапорный, нижний – напорный. (Коносавский, Переверзева, 2005)

До актуализации модель охватывала временной период с 1946 по 2005 годы, после была продлена по 2016 год.

При составлении модели были использованы материалы, представленные АО «Севзапгеология», в частности – результаты режимных наблюдений по рассматриваемым горизонтам. Отдельно были изучены предыдущие научно-производственные и исследовательские работы, проведенные на данной территории различными организациями. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Исходной базой для моделирования послужила карта пьезоизогипс, построенная по данным наблюдений за уровнями подземных вод (на 1944–1948 гг.) в вендском водоносном комплексе (рисунок 5). Следует отметить небольшие годовые изменения уровня подземных вод в естественных условиях, поэтому при решении задаются среднегодовые значения уровней. (Коносавский, Переверзева, 2005)

В южной части рассматриваемой области наблюдается заметное превышение отметок поверхности зеркала грунтовых вод над напорами вендского водоносного комплекса, что объясняется наличием слабопроницаемых отложений котлинских глин. По мере приближения к зоне выклинивания котлинских глин в северной части рассматриваемой территории, различия в напорах вод двух горизонтов сглаживаются. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Первый этап решения фильтрационной задачи при составлении модели в 2005 году заключался в модельном воспроизведении карты пьезоизогипс вендского водоносного комплекса при естественном режиме (на начало наблюдений). В результате этой первичной калибровки модель довольно чётко воспроизводила картину фактического распределения напоров при ненарушенном режиме.

На втором этапе, для дополнительной калибровки и верификации модели, использовалась история наблюдений за формированием нестационарного

режима фильтрации, обусловленного эксплуатацией водозаборных скважин. Однако в ходе выполнения данной работы в результате добавления в модель новых данных, было выявлено, что при составлении модели 2005 года второй этап калибровки не был доведён до конца, поэтому он был проведён заново.

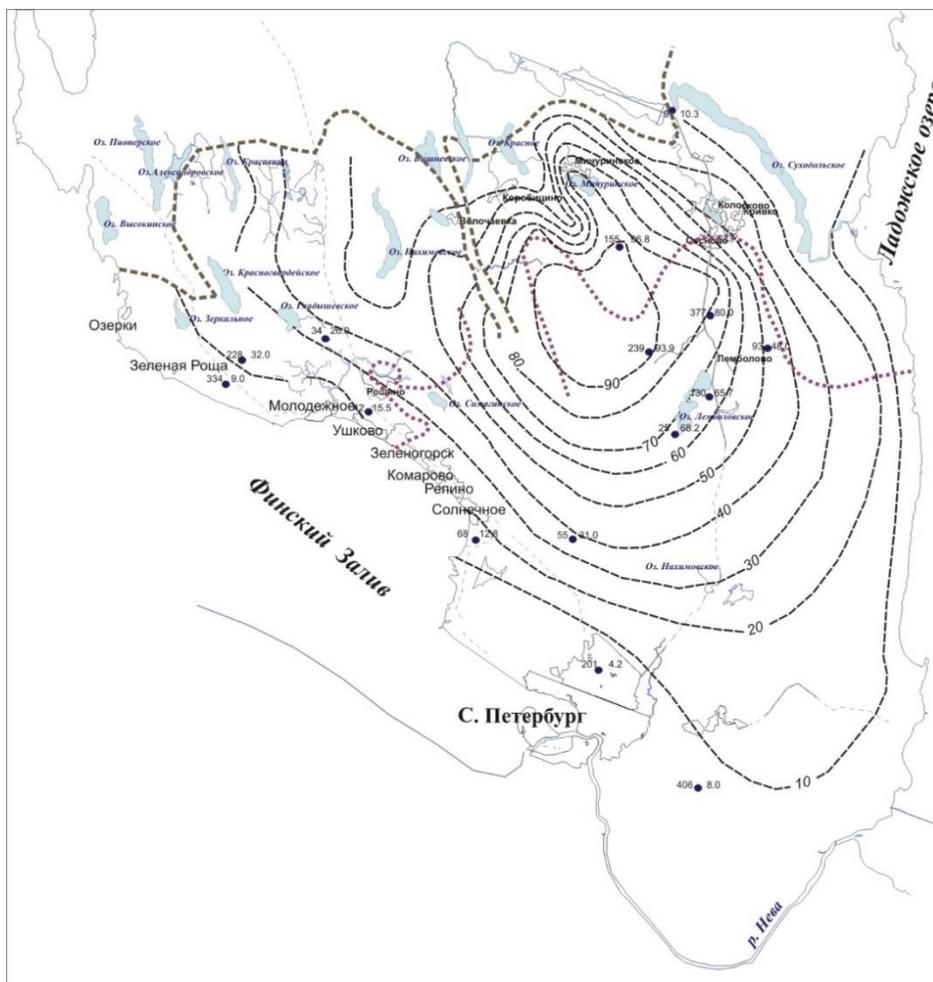


Рисунок 5. Схематическая карта пьезоизогипс вендского водоносного комплекса. Чёрным пунктиром показаны пьезоизогипсы ВВК; мелким фиолетовым пунктиром – граница распространения водоупорных глин; крупным фиолетовым пунктиром – граница распространения ВВК; точками - скважины, данные по которым использовались для построения карты.

(Источник: «Коносавский, Переверзева, 2005»)

5.2 Пространственная разбивка модели

Вся моделируемая область фильтрации была равномерно разбита в плане на 3599 расчетных блока размером 2×2 км (59 блоков по оси X и 61 блок по оси Y).

5.3 Границы модели и граничные условия

Гидродинамические границы и их физико-математическое представление в численной схеме выбирались исходя из общей гидродинамической ситуации, имеющейся информации о водоносных горизонтах, а также руководствуясь общими принципами по схематизации гидрогеологических условий. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Внешние границы. Для водоносного горизонта четвертичных отложений и вендского водоносного комплекса восточный край модели был ограничен контуром Ладожского озера, куда осуществляется разгрузка подземных вод обоих моделируемых слоёв. По уточнённым на настоящий момент данным, абсолютная отметка уровня в озере равна +4 м. Таким образом, на Ладожском озере было реализовано граничное условие III-го рода. На западе граница водоносных горизонтов проводится вдоль береговой линии Финского залива, где также реализовано граничное условие III-го рода с абсолютной отметкой уровня в заливе равной 0 м. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Северная граница для четвертичного горизонта вынесена за пределы распространения вендского водоносного комплекса и реализована граничным условием I-го рода ($H=\text{const}$). Напоры в данном случае задавались равными напору подземных вод четвертичного комплекса. Для вендского водоносного комплекса северной границей является линия выклинивания вендских отложений, которая реализована как непроницаемая граница II-го рода. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Южная граница модели принимается параллельной крайним линиям тока и задаётся непроницаемой границей II-го рода ($Q=0$). (Коносавский, Переверзева, 2005)

Внутренними гидродинамическими границами модели являются озёра, расположенные на Карельском перешейке и р. Нева. Для более точной аппроксимации скрытой разгрузки подземных вод в озера, использовалось граничное условие III-го рода, позволяющее учитывать фильтрационное сопротивление подрусловых отложений. (Коносавский, Переверзева, 2005) В

результате актуализации модели 2005 года, была задана более полная картина распространения значимых для модели озёр Карельского перешейка, а также были заданы корректные значения отметок их уровня и дна.

Дренажные скважины моделировались путем задания в соответствующих элементах разбивки граничного условия II-го рода ($Q = Q_{\text{скв}}(t)$). (Коносавский, Переверзева, 2005)

Профильные границы задавались через построение матриц абсолютных отметок подошвы и кровли вендского водоносного комплекса по соответствующим картам. (Коносавский, Переверзева, 2005)

5.4 Фильтрационные параметры

Фильтрационные параметры четвертичного комплекса, характеризующие фильтрацию подземных вод по напластованию пород, принимались исходя из имеющейся гидрогеологической информации, а именно: в пределах четвертичных отложений как первое приближение были приняты эффективные значения проницаемости, полученные по следующей методике: коэффициенты фильтрации для всей толщи четвертичных отложений (по профилю) задавались как средневзвешенные по мощности отдельных прослоев (использовались геологические колонки по скважинам). Для построения карты пространственной изменчивости k_f использовались карты гидрогеологических параметров межморенных горизонтов и перекрывающего слоя. (Коносавский, Переверзева, 2005) В процессе калибровки было установлено, что коэффициент фильтрации четвертичных отложений меняется от 2 до 25 м/сут, в среднем составляя 4 м/сут в южной и 10 м/сут в северной части модельной области.

Для определения коэффициентов фильтрации вендского водоносного комплекса использовалась карта проводимости и карта мощности вендского водоносного комплекса (Коносавский, Переверзева, 2005). В процессе перекалибровки модели 2005 года матрица горизонтального коэффициента фильтрации второго слоя была значительно изменена, чтобы добиться лучшего соответствия модельных и реальных уровней в условиях нарушенного режима. Установленные методом подбора коэффициенты фильтрации имеют тенденцию

к субширотному простиранию и, в среднем, небольшие численные значения, изменяющиеся в пределах от 0,1 до 1 м/сут. Однако в южной части моделируемой области установлено увеличение k_f до 4 м/сут. Также на севере в районе р. Вуокса выявлена локальная неоднородность с k_f до 10 м/сут.

5.5 Гидравлическая взаимосвязь

Взаимодействие между водоносными горизонтами учитывалось на модели посредством задания коэффициента вертикальной фильтрации (по оси Z , k_z) пород верхнего модельного слоя. (Коносавский, Переверзева, 2005) В процессе перекалибровки модели 2005 года матрица вертикального коэффициента фильтрации была значительно изменена. При построении матрицы вертикального коэффициента фильтрации использовалась карта распространения котлинских глин (рисунок 5), однако точные границы распространения данного водоупора были впоследствии немного подкорректированы в процессе калибровки модели. Наиболее высокие численные значения ($k_z = 0,0005$ м/сут) задавались в северной части модели, в области, где заканчивается распространение котлинских водоупорных глин, и гидравлическая взаимосвязь между водами четвертичных отложений и вендским водоносным комплексом становится прямой. На участках распространения котлинских глин вертикальная проницаемость верхнего слоя задавалась резко пониженной ($k_z = 0,000001$ м/сут), чтобы получить в модели наблюдаемый на практике разрыв напоров подземных вод.

5.6 Инфильтрационное питание

Матрица инфильтрационного питания задавалась единой на весь период наблюдений исходя из значений интенсивности инфильтрации, рассчитанных путем балансовых построений с использованием данных гидрологических наблюдений на конкретных водосборах рек. Впоследствии матрица инфильтрации была скорректирована по результатам решения обратной фильтрационной задачи. (Коносавский, Переверзева, 2005)

Численные эксперименты, направленные на корректировку величины инфильтрационного питания показали, что приемлемые результаты в

распределении напоров могут быть получены при инфильтрационном питании в области распространения водоносных горизонтов (ε) в диапазоне от 0,00006 м/сут до 0,0004 м/сут. Дифференциация инфильтрационного питания по площади хорошо коррелируется с гипсометрией поверхности четвертичных отложений. (Коносавский, Переверзева, 2005)

5.7 Дополнительные гидродинамические условия и параметры

Водоотдача водовмещающих пород (μ) является гидродинамическим параметром, необходимым для решения геофильтрационной задачи в нестационарной постановке (моделирование водозаборных скважин). Для четвертичных отложений, представленных супесчаными отложениями, гравитационную водоотдачу можно принять равной $\mu \approx 0.08$. Величина упругой водоотдачи (μ^*) вендского водоносного комплекса подбиралась в ходе модельного решения нестационарной фильтрационной задачи, в результате калибровки значения упругоёмкости (η^*) оказались заключены в пределах от 0,000027 до 0,0000001 ($\eta^* = \mu^*/m$). (Коносавский, Переверзева, 2005)

6 Верификация модели с учётом актуализированных данных

Первой целью проводимой работы была актуализация модели 2005 года с учётом данных режимных наблюдений за уровнем и водоотбором с 2005 по 2016 год. Для осуществления этого этапа работы, Иваном Леонидовичем Хархординым были предоставлены данные наблюдений «Петербургской комплексной геологической экспедиции» за этот период.

Учитывать при составлении модели подобного рода нарушенный режим вендского водоносного комплекса крайне важно, так как в связи с активной эксплуатацией водоносного комплекса водозаборными сооружениями Санкт-Петербурга и Карельского перешейка, распределение напоров в нём заметно отличается от естественного.

В актуализированной модели учитывается работа водозаборных скважин с 1946 по 2016 год. Этот временной ряд разбит на 71 стресс-период длительностью по одному году. Водозаборные узлы задавались на модели с использованием граничных условий II-го рода ($Q = Q_{\text{скв}}(t)$) в соответствующих блоках. На каждом стресс-периоде было задано до 70 водозаборных узлов (рисунок 6), работающих с дебитом более $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ (более мелкие водозаборы не учитывались). Суммарный дебит всех водозаборов в зависимости от года составляет от $75668 \text{ м}^3/\text{сут}$ в 1978 году до $22066 \text{ м}^3/\text{сут}$ в 2016 году. Таким образом определялось модельное положение уровня вендского водоносного комплекса при работе водозаборных скважин, затем эти уровни сравнивались с данными по наблюдательным скважинам.



Рисунок 6. Карта расположения водозаборных узлов, работавших в период с 2005 по 2016 год. Составлена автором

Как уже было сказано ранее, в связи с актуализированными данными, многие параметры модели 2005 года были заменены для получения лучшего соответствия модельных уровней реальным наблюдениям за нестационарным режимом. Это было сделано, так как в старой модели учитывались данные только по трём скважинам, к тому же по одной из них сходимости уровней не наблюдалось, что было объяснено наличием некой локальной неоднородности. Для получения более полной и точной картины было выбрано 10 скважин, режимные наблюдения по которым ведутся достаточно долго, и расположение которых максимально полно охватывает моделируемую область (рисунок 7). Когда данные по этим скважинам были добавлены в модель, оказалось, что

разброс реальных и модельных уровней достигает 30 метров, что является абсолютно недопустимым при общем перепаде напоров около 100 метров.

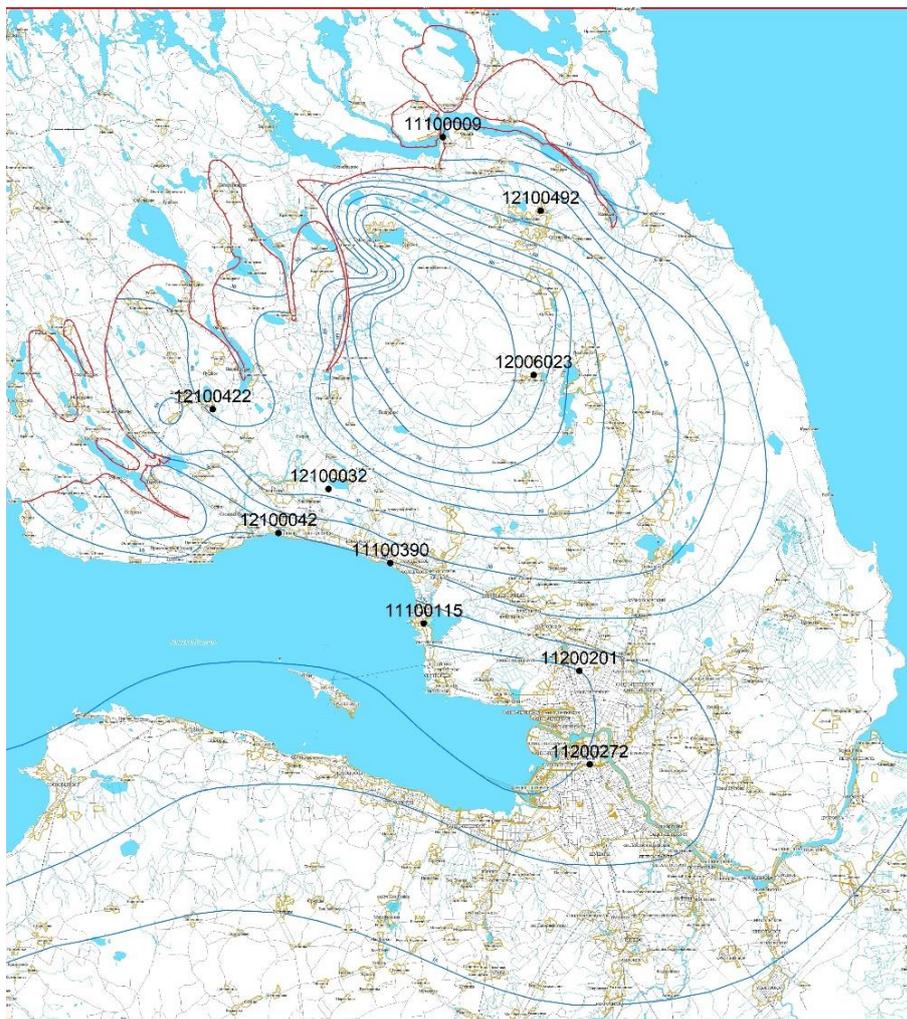


Рисунок 7. Карта расположения наблюдательных скважин, задействованных в актуализированной модели. Составлена автором

В результате замены матриц горизонтального коэффициента фильтрации во втором слое, вертикального коэффициента фильтрации в первом слое, а также корректировки граничных условий III-го рода, удалось добиться хорошей сходимости реальных и модельных уровней по всем скважинам (рисунки 8–17, толстой линией показан модельный уровень, тонкой – реальный).

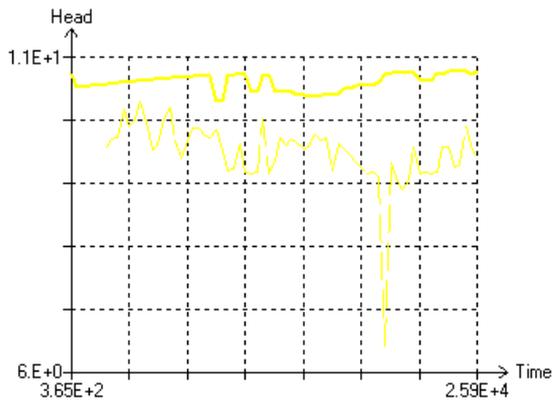


Рисунок 8. Модельные и реальные уровни в скважине №11100009.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 1 метр

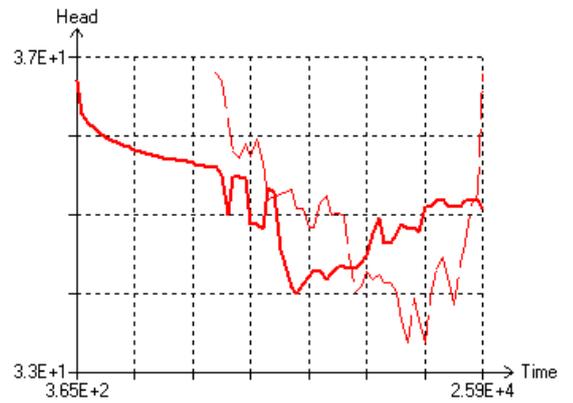


Рисунок 9. Модельные и реальные уровни в скважине №12100492.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 1 метр

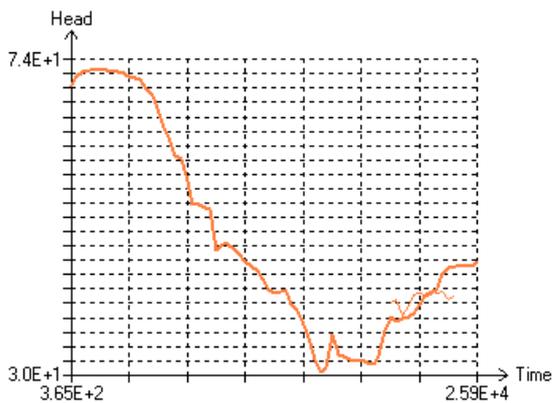


Рисунок 10. Модельные и реальные уровни в скважине №12006023.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 2 метра

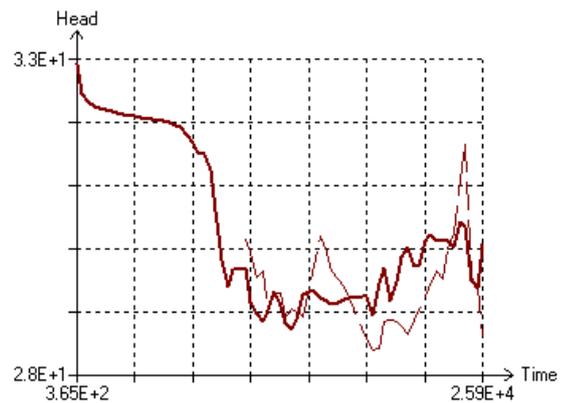


Рисунок 11. Модельные и реальные уровни в скважине №12100422.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 1 метр

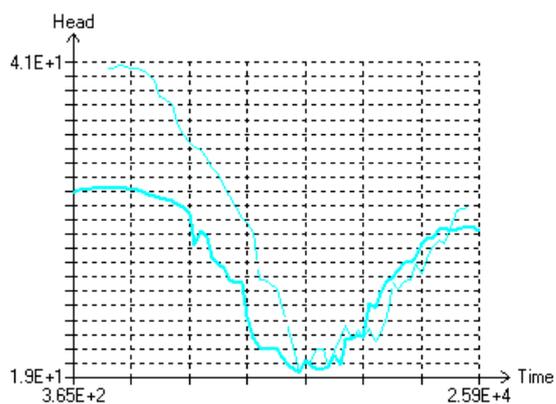


Рисунок 12. Модельные и реальные уровни в скважине №12100032.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 1 метр

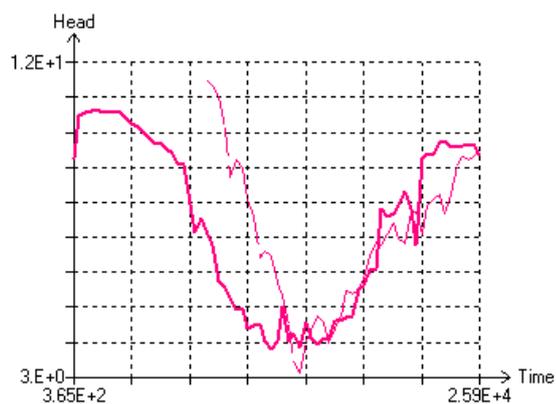


Рисунок 13. Модельные и реальные уровни в скважине №12100042.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 1 метр

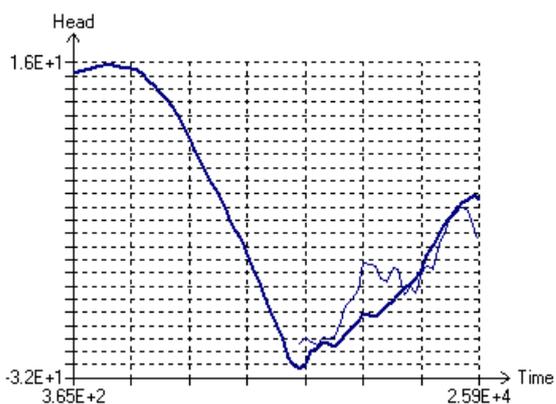


Рисунок 14. Модельные и реальные уровни в скважине №11100390.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 2 метра



Рисунок 15. Модельные и реальные уровни в скважине №11100115.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 2 метра



Рисунок 16. Модельные и реальные уровни в скважине №11200201.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 2 метра

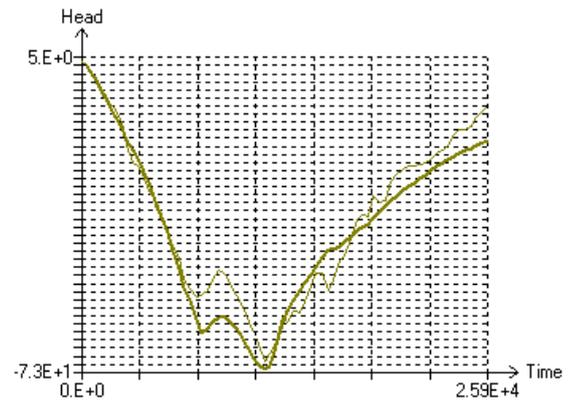


Рисунок 17. Модельные и реальные уровни в скважине №11200272.

Масштаб:

1 деление по горизонтали – 10 лет

1 деление по вертикали – 2 метра

Как видно из приведённых выше графиков, почти по всем скважинам среднее расхождение уровней составляет не более метра. Лишь на некоторые периоды по нескольким скважинам достигая 10 метров (что всё равно является допустимым отклонением при доверительной вероятности 90%).

7 Выделение области питания вендского водоносного комплекса

Как видно из предыдущей главы, почти по всем графикам наблюдается явное падение уровня до конца 1970-ых годов, а затем уверенная тенденция к его восстановлению. Это объясняется тем, что вендский водоносный комплекс активно эксплуатировался промышленными объектами Санкт-Петербурга и его окрестностей до конца 1970-ых годов, что привело к образованию обширной депрессионной воронки, осложнённой локальными дополнительными понижениями у крупных водозаборов (рисунок 18). В частности, это явилось одной из причин просадок зданий и сооружений исторического центра города (Дашко и др., 2011), в связи с чем объёмы водоотбора были резко сокращены и началось постепенное восстановление уровней вендского водоносного комплекса, которое продолжается и сейчас (рисунок 19).

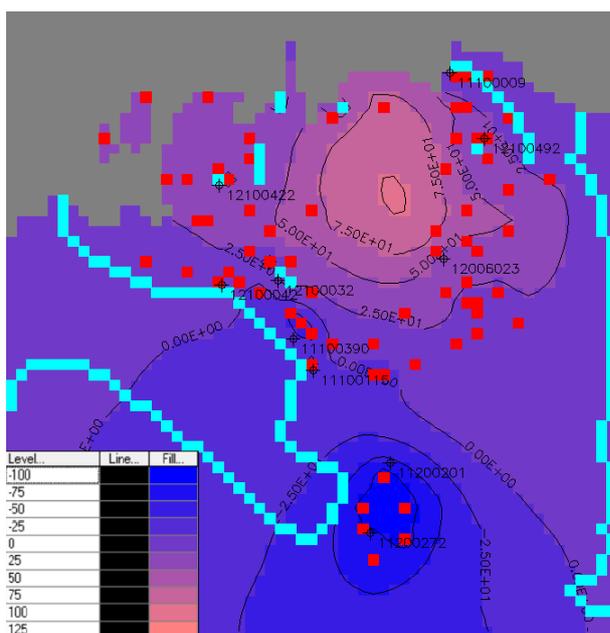


Рисунок 18. Модельное распределение уровней вендского водоносного комплекса на 1978 год с легендой градиента цвета (PM5). Составлена автором

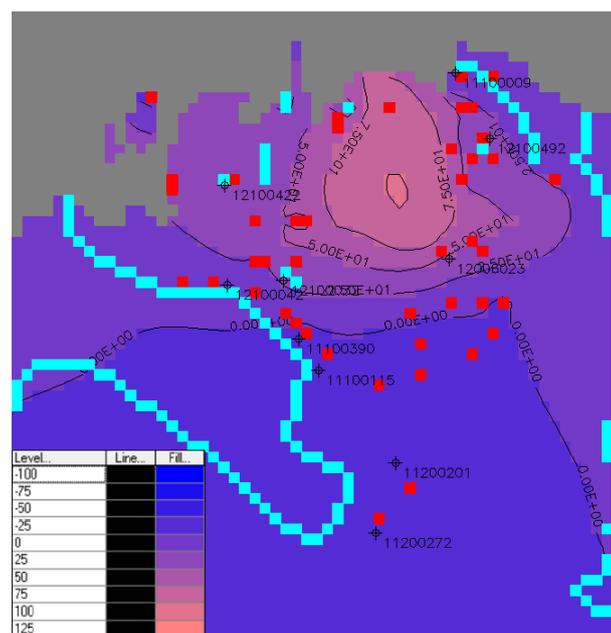


Рисунок 19. Модельное распределение уровней вендского водоносного комплекса на 2016 год с легендой градиента цвета (PM5). Составлена автором

Восстановление уровней вендского водоносного комплекса происходит за счёт его ресурсов, то есть поступления в него воды в областях его питания

(Боревский, Язвин, 2010). Второй целью проводимой работы было выяснение расположения современной области питания вендского водоносного комплекса и, что более важно, вычисление объёмов его питания, так как раньше подобных исследований не проводилось.

По водному балансу модели суммарный вертикальный переток в вендский водоносный комплекс составляет $77642 \text{ м}^3/\text{сут}$. Исходя из распределения напоров вендского водоносного комплекса и общих гидрогеологических закономерностей (Всеволожский, 2007), логично предположить, что основная область питания расположена севернее границы распространения котлинских водоупорных глин. Задавая две модельные зоны (рисунок 20, зона 1 южнее границы выклинивания глин и зона 2 севернее неё) для подсчёта водного баланса, получаем, что переток через северную зону составляет $73840 \text{ м}^3/\text{сут}$ (95,1% общего перетока) и соответственно $3802 \text{ м}^3/\text{сут}$ (4,9% общего перетока) через южную зону. Это говорит о том, что предположение верно и почти всё питание вендского водоносного комплекса сосредоточено в зоне, где отсутствуют водоупорные котлинские глины.

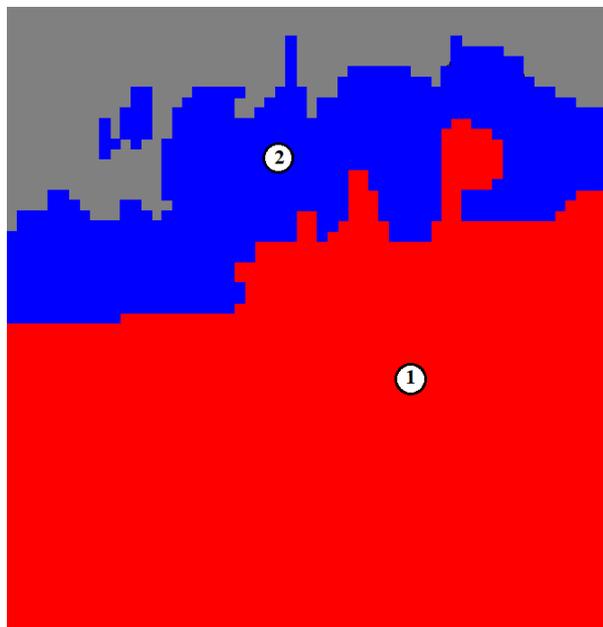


Рисунок 20. Схема первичного разделения на южную (1) и северную (2) зоны перетока. Составлена автором

Следующим этапом исследование стало выяснение более локальных, концентрированных областей питания в рамках северной части модели. Была построена карта областей перетоков в вендский водоносный комплекс (рисунок 21). Белым обозначены области, в которых величина перетока не превышает $100 \text{ м}^3/\text{сут}$. Градиентным цветом показана интенсивность перетока (в соответствии с легендой). Он составляет до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

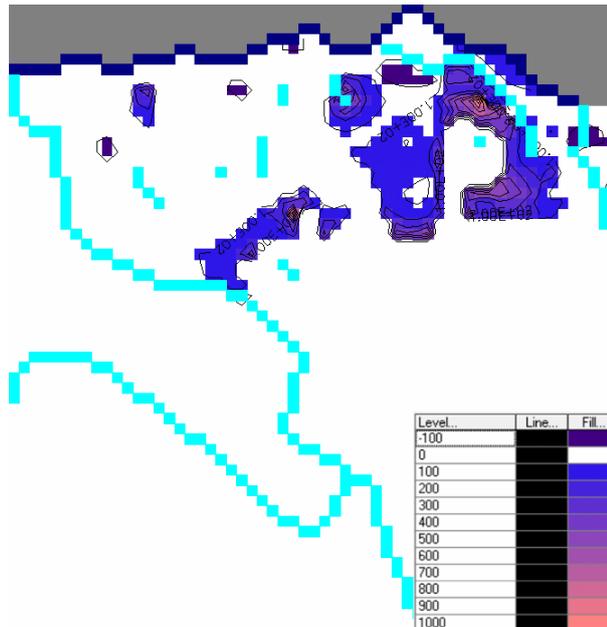


Рисунок 21. Карта областей перетоков в вендский водоносный комплекс и легенда к градиенту цвета. Составлена автором

В соответствии с этой картой было выделено несколько локальных зон (рисунок 22) для которых были подсчитаны объемы перетоков. Границы зоны 1 не изменялись, поэтому объем перетока в ней сохранился прежним, а именно $3802 \text{ м}^3/\text{сут}$ (4,9% общего перетока). Зона 2 включает всю площадь, расположенную севернее границы глин, но не попавшую в области интенсивного перетока (более $100 \text{ м}^3/\text{сут}$). Объем питания через эту зону составляет $19921 \text{ м}^3/\text{сут}$ (25,7% общего перетока). Зона 3 оконтуривает выступ глин, находящийся под восточной частью Лемболовской возвышенности. Здесь отмечены максимальные значения объемов перетока. Суммарный переток через эту зону составляет $38610 \text{ м}^3/\text{сут}$ (49,7% общего перетока). Зона 4 выделена в западной части Карельского перешейка, также вокруг некоторого выступа

котлинских глин. Переток через зону составляет 9090 м³/сут (11,7% общего перетока). Зона 5 располагается у северной границы распространения вендских пород, в северной части Лемболовской возвышенности, переток через неё составляет 4621 м³/сут (6,0% общего перетока). И, наконец, последняя 6 зона приурочена к локальному участку распространения вендских пород, окружённому условно непроницаемыми породами фундамента. Питание в этой области не имеет влияния на основной массив вендского водоносного комплекса. Объём питания здесь составляет 1598 м³/сут (2,1% общего перетока).

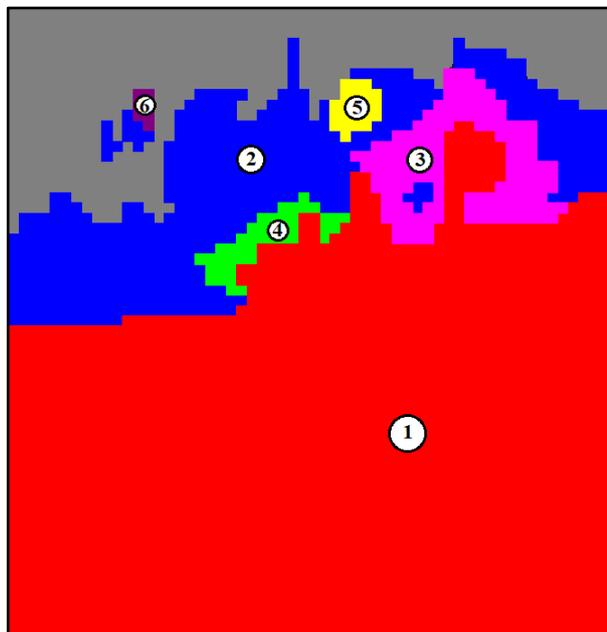


Рисунок 22. Схема разделения на локальные зоны перетока. Составлена автором

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что около 60% питания вендского водоносного комплекса (зоны 3 и 4) сконцентрированы вблизи контура распространения водоупорных глин. Это может быть объяснено региональными гидрогеологическими особенностями, заключающимися в том, что по мере погружения водоносного комплекса под региональный водоупор, появляется разница в напорах между вендским водоносным комплексом и водоносным горизонтом четвертичных отложений.

8 Заключение

В результате проведённой работы были выполнены все поставленные задачи. На основании представленных в работе исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Численная геофильтрационная модель вендского водоносного комплекса актуализирована по состоянию на 2016, проведенное эпигнозное моделирование дает основание для выполнения в будущем прогнозных расчетов;

2. Область питания вендского водоносного комплекса расположена севернее распространения регионального водоупора котлинских глин, в ней сосредоточено 95% всего питания водоносного комплекса;

3. Около 60% питания вендского водоносного комплекса сосредоточено вблизи контура распространения регионального водоупора котлинских глин.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. Коносавскому Павлу Константиновичу за общее руководство работой, ценные советы и объяснения, а также к.г.-м.н. Хархордину Ивану Леонидовичу за предоставленные данные.

Список источников

Публикации в открытой печати:

1. Бахарев Т.С., Жамойда В.А., Зубарев С.Э. и др. Геологический атлас г. Санкт-Петербург. СПб: Комильфо, 2009;
2. Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2007, 448 с.;
3. Геология СССР. Том I. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание. Под ред. В.А. Селиванова. М.: «Недра», 1971, 504 с.;
4. Гидрогеология СССР. Том III. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Под ред. И.К. Зайцева. М.: «Недра», 1967, 328 с.;
5. Киселёв И.И., Проскуряков В.В., Саванин В.В. Геология и полезные ископаемые Ленинградской области. СПб, 2002, 240 с.;
6. Коносавский П.К., Соловейчик К.А. Математическое моделирование геофильтрационных процессов: Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2001, 96 с.;
7. Лкунер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. М.: «Недра», 1967;
8. Chiang W-H., Kinzelbach W. Processing Modflow. A simulation system for modeling groundwater flow and pollution. 1998, 344 P.

Статьи в сборниках:

1. 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.

Статьи в журналах:

1. 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

Фондовые материалы:

1. Квашнина А.А., Ермак Ю.А. Отчёт «Региональная переоценка эксплуатационных запасов подземных вод на территории Карельского перешейка» Книга 1, 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»);
2. Коносавский П.К., Переверзева С.А. Отчёт о научно-исследовательской работе «Оценка прогнозных ресурсов подземных вод вендского водоносного комплекса Карельского перешейка в пределах территории Ленинградской области», Российская академия наук Институт геоэкологии Санкт-Петербургское отделение (СПБО ИГЭ РАН), СПб, 2005 (Санкт-Петербургский филиал ФБУ «ГКЗ»)

Ресурсы сети Интернет:

1. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#09cd946d9d09edac30> - ГИС-Атлас «Недра России»;
2. <http://sevzapnedra.nw.ru/> - Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) - Департамент по недропользованию по Северо-Западному федеральному округу, на континентальном шельфе и в мировом океане (Севзапнедра);
3. <http://www.pmwin.net/pmwin5.htm> - Программное обеспечение Processing Modflow for Windows (PMWIN)