

Санкт-Петербургский государственный университет

НАГОРНОВА Мария Максимовна

Выпускная квалификационная работа

**Оценка защищенности водозаборов Ижорского месторождения
подземных вод от аварийных выбросов Ленинградской АЭС**

Уровень образования: магистратура

Направление: 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа: ВМ.5798 «Гидрогеология и
инженерная геология»

Научный руководитель:
старший преподаватель,
кафедра гидрогеологии и
инженерной геологии,
канд. геогр. наук, доцент,
Вивенцова Е.А.

Рецензент:
ведущий научный сотрудник,
СПБО ИГЭ РАН,
канд. геол.-минерал. наук,
Синдаловский Л.Н.

Санкт-Петербург

2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	4
1.1 Факторы, влияющие на скорость растворения карбонатных пород.....	4
1.2 Моделирование карста.....	6
1.3 Исследования, связанные с Ижорским месторождением подземных вод	7
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИЖОРСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ	10
2.1 Физико-географическая характеристика.....	10
2.2 Геологическое строение Ижорской возвышенности	16
2.1 Дочетвертичные образования	16
2.2 Четвертичные образования	19
2.3 Гидрогеологическая характеристика.....	23
3 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КАРСТООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ИЖОРСКОГО ПЛАТО.....	31
3.1 Характеристика химического состава	31
3.2 Методика оценки карбонатного равновесия	34
3.3 Результаты расчётов	36
4 РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ	40
4.1 Границы модели. Обоснование границ в плане и разрезе	40
4.2 Начальные условия и параметрическое обоснование модели.....	42
4.2.1 Начальные уровни подземных вод.....	42
4.2.2 Модуль подземного стока и инфильтрационное питание	42
4.2.3 Фильтрационные параметры.....	45
4.3 Водозаборы подземных вод и дренаж.....	45
4.4 Калибровка и валидация модели	46
4.5 Водный баланс	51
5 ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ВОДОЗАБОРОВ	53
5.1 Факторы, сдерживающие загрязнение подземных вод.....	53
5.2 Оценка последствий загрязнения подземных вод радионуклидами при тяжелой запроектной аварии.....	55
5.3 Результаты расчета на миграционной модели	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	67
Список литературы	69
Приложение 1.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Самым крупным в Ленинградской области месторождением подземных вод является Ижорское (ИМПВ), приуроченное к одноименной возвышенности. Площадь месторождения 2300 км². Эксплуатационные запасы подземных вод ордовикского водоносного горизонта составляют 400 тыс. м³/сут. На территории Ижорской возвышенности располагаются множество водозаборных скважин, каптажей источников и одиночных скважин. Подземные воды являются источником водоснабжения сельскохозяйственных объектов и населенных пунктов, а также транспортируются за пределы Ижорской возвышенности для водоснабжения южных пригородов Ленинграда. Водоотбор составляет порядка 200 тыс. м³/сут. Подземные воды верхнего водоносного горизонта сильно уязвимы к загрязнениям, которые поступают с поверхности. Одним из потенциальных загрязнителей подземных вод в случае запроектной аварии является Ленинградская АЭС, расположенная на побережье Финского залива.

В связи с этим, особо важно оценить защищенность водозаборов Ижорского месторождения подземных вод от аварийных выбросов Ленинградской АЭС в случае запроектной аварии.

Целью данной работы является оценка защищенности водозаборов Ижорского месторождения подземных вод от аварийных выбросов Ленинградской АЭС в случае запроектной аварии.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий трещинно-карстового массива Ижорского плато;
2. Исследование карстовых процессов, речного стока и водного баланса на данной территории;
3. Разработка геофильтрационной модели и её калибрация;
4. Разработка геомиграционной модели и прогнозирование потенциального радиоактивного загрязнения подземных вод.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Факторы, влияющие на скорость растворения карбонатных пород

Карстующиеся породы широко распространены на территории нашей страны, и Ленинградская область не является исключением. Трудов, посвященных вопросам карста, великое множество как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Особенно важным представляется вопрос изучения влияния различных факторов на характер и интенсивность растворения известняка.

В работе [Wallin, Bjerle, 1989] авторы проводили эксперименты по растворению известняка в различных рН-условиях, при температуре 25°C. В своей работе они использовали известняковый цилиндр, изготовленный из почти чистого CaCO_3 , который вращался в водном растворе с различной скоростью. Согласно полученным результатам, при уменьшении водородного показателя (с 5,3 до 3,3) скорость растворения логарифмически увеличивается (с 6 до 80 $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) при скорости вращения цилиндра 400 оборотов в минуту (рисунок 1.1).

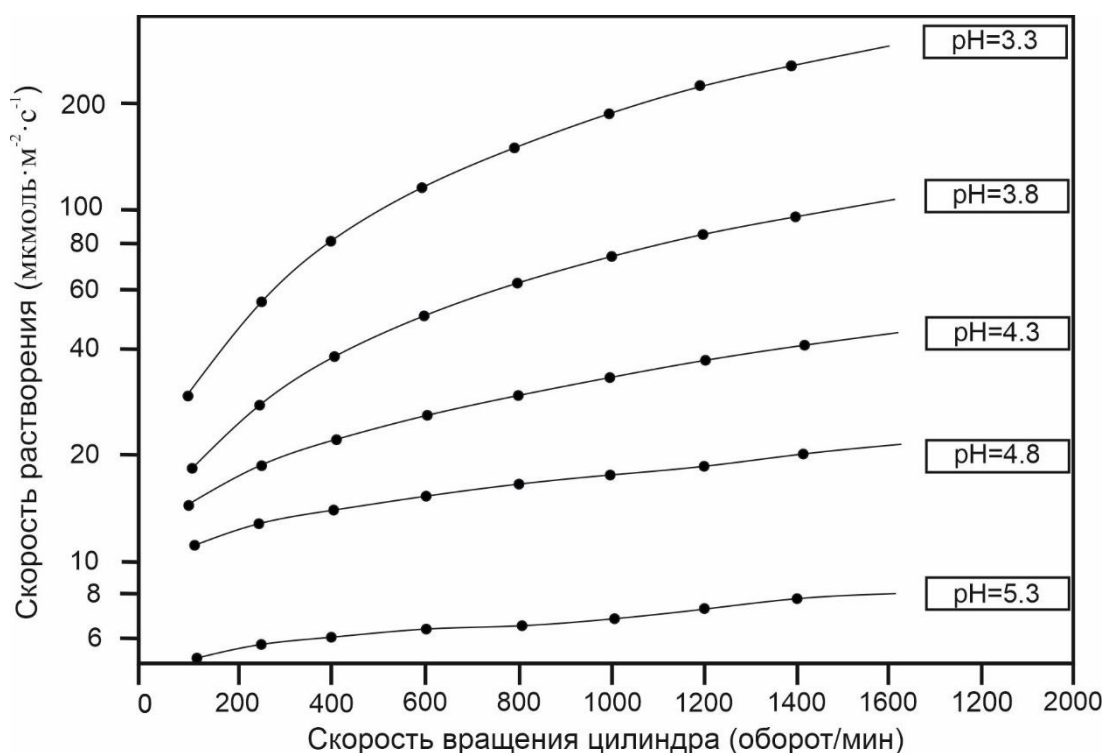


Рисунок 1.1. – Зависимость скорости растворения от скорости вращения цилиндра при различных показателях рН и температуре 25°[Wallin, Bjerle, 1989]

В работе [García-Ríos и др., 2015] изучались особенности растворения и осаждения кальцита при фильтрации растворов, насыщенных CO_2 и сульфатами, через трещиноватые образцы известняка. Было показано, что закачка растворов, богатых CO_2 , через трещиноватые керны известняка приводила к увеличению проницаемости породы и объема трещин. Растворимость кальцита была существенней в экспериментах с раствором, не содержащим сульфатов. Авторы указали, что необходимо учитывать начальную шероховатость поверхности, поскольку она играет решающую роль в растворении трещиноватых пород. Было также обнаружено, что изменение проницаемости трещин сильно зависит от скорости потока и характера растворения.

[Hattanjí и др., 2014] выполнили полевые и лабораторные эксперименты для того, чтобы оценить скорость растворения известняка. Результаты исследований показали, что основным факторами, влияющими на скорость растворения известняка, является химический состав воды, а также интенсивность фильтрации. Известняк растворялся интенсивнее в тех участках, где скорость фильтрации воды, ненасыщенной по отношению к кальциту, была выше. Приток воды из источников, агрессивных по отношению к карбонатным породам, оказывает сильное влияние на локальную денудацию известняка и эволюцию карстовых ландшафтов.

[Ćirić, Senić, 1985] экспериментально оценили интенсивность растворения карбонатов в различных почвах. Растворение карбонатов существенно выше в горизонтах стратозем (Стратоземы – почвы с насыпным слоем более 40 см, присутствуют остатки погребенных почв), чем в гуминовом горизонте слаборазвитой скелетной почвы (литосол), в котором более выражена сухость. Таким образом, более интенсивную скорость растворения вызывает высокое содержание органического вещества, и, следовательно, значительное количество CO_2 и органических кислот.

[Plan, 2005] указывает на то, что растворение породы зависит от таких факторов, как морфология, площадь поверхности образца, содержание CO_2 . Увеличение количества осадков и снижение температуры с увеличением высоты коррелирует с уменьшением содержания растворенного CO_2 , и скорость растворения, соответственно, снижается. Влажность почвы оказывает также значительное влияние на скорость растворения. Влияние типов растительности (например, произрастание травянистой растительности и карликовых горных сосен) на интенсивность растворения известняка незначительно.

1.2 Моделирование карста

В современных гидрогеологических исследованиях широко применяются разнообразные методы моделирования. Для наглядного представления протекания карстовых процессов широко используют математическое моделирование.

В отчете [Kuniansky, 2016] приведена информация о различных типах математических моделей, которые могут быть применены к карстовым областям. Авторы также приводят пример применения модели на карстовой равнине Вудвилл во Флориде, сравнивая различные модельные концепции (рисунок 1.2).

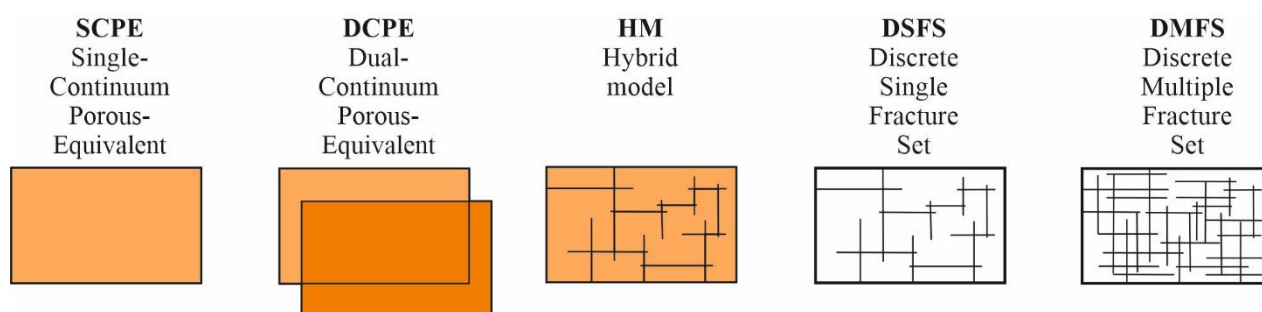


Рисунок. 1.2 – Подходы к моделированию карста [Kuniansky, 2016]

- SCPE – В довольно большом объеме трещиноватой породы фильтрация/миграция описывается параметрами пористой среды (K_f , n , D , R) – «чисто» трещиноватые породы
- DCPE – Две вложенные друг в друга системы: одна характеризуется свойствами трещин, а вторая – пористых блоков (K_{fm} , n_m , D_m , R_m) – трещиновато-пористые породы
- HM – гибрид DSFS и SCPE.
- DSFS – Описание потоков в масштабе отдельной трещины. Позволяет имитировать среды, в которых не выполняется предпосылка сплошности среды. Быстрая фильтрация по отдельным каналам и трещинам.
- DMFS - Описание потоков в масштабе систем трещин.

В книге [Antonio Pulido-Bosch, 2020] раскрываются понятия пористости и проводимости в карбонатных породах, форм и процессов «карстификации». Приводится описание концептуальных и математических моделей карстовых областей, а также раскрыт вопрос о гидрогеохимии и качестве воды.

Работы ряда российских ученых также затронули тему моделирования карстовых процессов. Так в журнале «Молодой исследователь Дона» [Кравченко Г.М., Матвейкин А.М., 2019] предприняли попытку рассчитать вертикальную осадку фундаментной плиты многоэтажного здания, учитывая возможность образования карстового провала. Численное

моделирование карстового процесса было выполнено методом конечных элементов в объемной постановке.

В работе [Вахрушев Б.А., Вахрушев И.Б., 2017] были проанализированы различные методы моделирования в карстоведении. Так, по мнению авторов, все существующие методы мысленного (логические, знаковые, математические модели) и материального моделирования (натурное, лабораторное моделирование) следует применять в различных сочетаниях в зависимости от целей и задач исследований.

1.3 Исследования, связанные с Ижорским месторождением подземных вод

Исследования подземных вод, карстовых процессов и особенностей территории Ижорской возвышенности проводились разными специалистами. Хотя было проведено значительное число исследований по Ижорскому плато, по-прежнему существует настоятельная необходимость в дальнейших исследованиях в этой области, особенно с уделением особого внимания решению некоторых проблем, связанных с защищенностью водозаборов Ижорского месторождения подземных вод.

В работе [Никифоровский А.А., Абрамов Д.В., 2018] исследовали процессы формирования водообмена на карстовом массиве Ижорское плато. Авторы подчеркивают, что для определения величины стока важно учитывать особенности взаимодействия влаги с пористой средой в зоне неполного насыщения. Их подход заключается в выявлении структур стока разной степени проявленности, а также в описании движения влаги в пористой среде. Результат их работы является карта стоковых структур на Ижорском плато.

Картированием модуля минимального речного стока для оценки прогнозных ресурсов подземных вод при помощи гидрологических и изотопных методов занимались Воронюк Г.Ю., Марков М.Л. и Токарев И.В. Была выявлена изменчивость подземного стока реки в пределах одного водосбора, обусловленная гидрогеологическим строением.

Исследование карстовых процессов Ижорского плато проводили Рыжкова С.С. и Челнокова А.Н. По данным исследований была выпущена статья: «Карстовые явления Ижорского плато как уникальные ландшафтные объекты». В статье [Рыжкова С.С., Челнокова А.Н., 2017] рассматриваются вопросы влияния химического состава известняков, мощности и направления залегания слоев, трещиноватости пород, а также гидрологических и гидрогеологических особенностей на специфику ландшафта закарстованных территорий.

Характеристикой природных условий, оказывающих воздействие на развитие карстовых процессов на территории Ленинградской области, занималась Минина И.В. В сборнике научных трудов «Геология в развивающемся мире» [Минина И. В., 2020] приведен

анализ поверхностной закарстованности, указано количество карстопроявлений, плотность поверхностных карстовых форм и выявлены наиболее характерные карстовые формы.

[Годин В.Ю., 2016] изучил свойства невской воды и провел ее сравнительный анализ с подземными водами Санкт-Петербурга и Ленинградской области, выявил региональные геохимические особенности и ресурсы подземных питьевых вод.

В статье [Никифоровский А.А., Абрамов Д.В., 2019] разработали алгоритм, который позволяет скорректировать поверхность рельефа, путем сглаживания уклонов поверхности лесных массивов, и получить поверхность, приближенную к естественной. Полученный результат приближает возможность определения трещиноватых структур на Ижорском плато.

Проблемой химического состава подземных вод занимались Воронюк Г., Питулько В.М. и Кулибаба В.В. В своей работе [Пространственно-временная изменчивость...,2015] исследователи определили фоновые содержания макрокомпонентов подземных вод, а также выявили основные факторы, влияющие на формирования химического состава.

В статье [Куриленко В.В., Жданов С.В., 2013] представлена информация о современном состоянии ордовикского водоносного горизонта Ижорского плато. Авторами определен темп роста антропогенной нагрузки, а также даны рекомендации по организации рационального водоснабжения.

В 2013 году была защищена диссертация [Жданов, 2013], посвященная изучению гидрогеологических особенностей и совершенствованию научно-методических основ прогноза развития карстовых процессов на территории Ижорской возвышенности, основанной на подсчете рисков.

Под редакцией доктора геолого-минералогических наук В.Г. Румынина вышла книга [Оценка влияния..., 2002]. В работе приводится общая характеристика основных источников радиоактивного загрязнения подземных вод, анализируются гидродинамические и гидрохимические условия миграции радионуклидов, прогнозируются процессы миграции радионуклидов при помощи численных моделей, а также приводятся рекомендации по контролю радиоактивного загрязнения подземных вод.

Разведкой подземных вод для водоснабжения гг. Кронштадт, Ломоносов и Петродворец занимались Грейсер Е.Л., Павлова Н.А., Саар Я.К. и Кабаков Л.Г. [Отчёт...,1979; Формирование ресурсов...,1991]. В их работах приводится информация об общих условиях формирования подземного стока, гидрологической изученности, взаимодействии подземных и речных вод, а также производится расчет характеристик низкого стока и подземного стока.

Благодаря обзору вышеперечисленной литературы накоплен обширный материал по особенностям территории Ижорской возвышенности. Изучение факторов, влияющих на скорость растворения карстующихся пород, позволило более детально взглянуть на протекание карстовых процессов на территории Ижорского плато. Моделирование карстовых процессов является до конца неизученным вопросом. Обзор работ, связанных с данной тематикой, позволил уточнить некоторые нюансы неоднозначности моделирования.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИЖОРСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

2.1 Физико-географическая характеристика

Территориально Ижорская возвышенность расположена на западе Ленинградской области, южнее Копорской губы Финского залива и затрагивает административную территорию Ломоносовского, Кингисеппского, Гатчинского и Волосовского районов. Границей на севере и северо-западе является Балтийско-Ладожский глинт (Ордовикский глинт), южная и юго-восточная граница плато - контакт пород ордовика и среднего девона (рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1- Физическая карта Ленинградской области
(<https://hgepro.ru/mappgis/subekt/spb/fizmap.pdf>)

В геоморфологическом отношении Ижорское плато представляет повышенную структурную плоскую равнину, сложенную карбонатными породами ордовика, перекрытыми маломощными отложениями морены и на небольших участках –

отложениями девона. Почти вся территория плато имеет довольно ровную поверхность, с колебаниями абсолютных отметок от 120 до 150 м. От центральной части плато (абс. отметки 140-150 м) прослеживается слабый пологий уклон к периферической его части (во все стороны) до 120-110 м. На северо-западной и восточной частях наблюдается более значительное понижение (до 65-70 м). Наиболее полого понижается плато в южном, западном и восточном направлениях. К северу оно круто обрывается глинтом.

Довольно широкое развитие на плато имеют мелкие формы рельефа, образованные в результате выщелачивания известняков и доломитов – долины, лога, пещеры и воронки древнего и современного карста. Участки древнего карстопроявления располагаются почти на всей площади Ижорского плато, за исключением южной и юго-восточной его части. Некоторые карстовые воронки имеют хорошо выраженную долину, куда происходит сток поверхностных вод (д. Карстолово).

Климат Ижорского плато умеренно-континентальный, переходный от морского к континентальному, с умеренно мягкой зимой и теплым летом. Главной особенностью климата является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс. Большая часть Ижорского плато расположена в непосредственной близости от залива и традиционно собирает с него конвективные осадки, зимой большей частью в виде снега. В результате климат плато более прохладный, влажный, многоснежный и облачный, чем на побережье.

В течение года температура обычно колеблется от -11°C до 22°C и редко бывает ниже -24°C или выше 28° . Теплый сезон длится с мая по сентябрь, с максимальной среднесуточной температурой $17,3^{\circ}\text{C}$. Самый жаркий месяц в году – июль, со средним температурным максимумом 22°C и минимумом 12°C . Холодный сезон длится с ноября по март, с минимальной среднесуточной температурой $-5,4^{\circ}\text{C}$. Самый холодный месяц в году – январь, со средним температурным максимумом -10°C и минимумом -4°C . Продолжительность теплого периода – 214 дней, холодного периода – 151 день.

Согласно климатической карте Ленинградской области (рисунок 2.1.2) годовое количество осадков варьируется в пределах 700 – 750 мм в год. Большая часть осадков (до 75% от годовой суммы) приходится на летне-осенний период; в августе их количество достигает 80-100 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в центральной части плато, уменьшаясь по мере снижения отметок поверхности к периферии [Грейсер.Э.Л. и др., 1979]. Наименьшее же количество осадков приходится на март (30-40 мм).

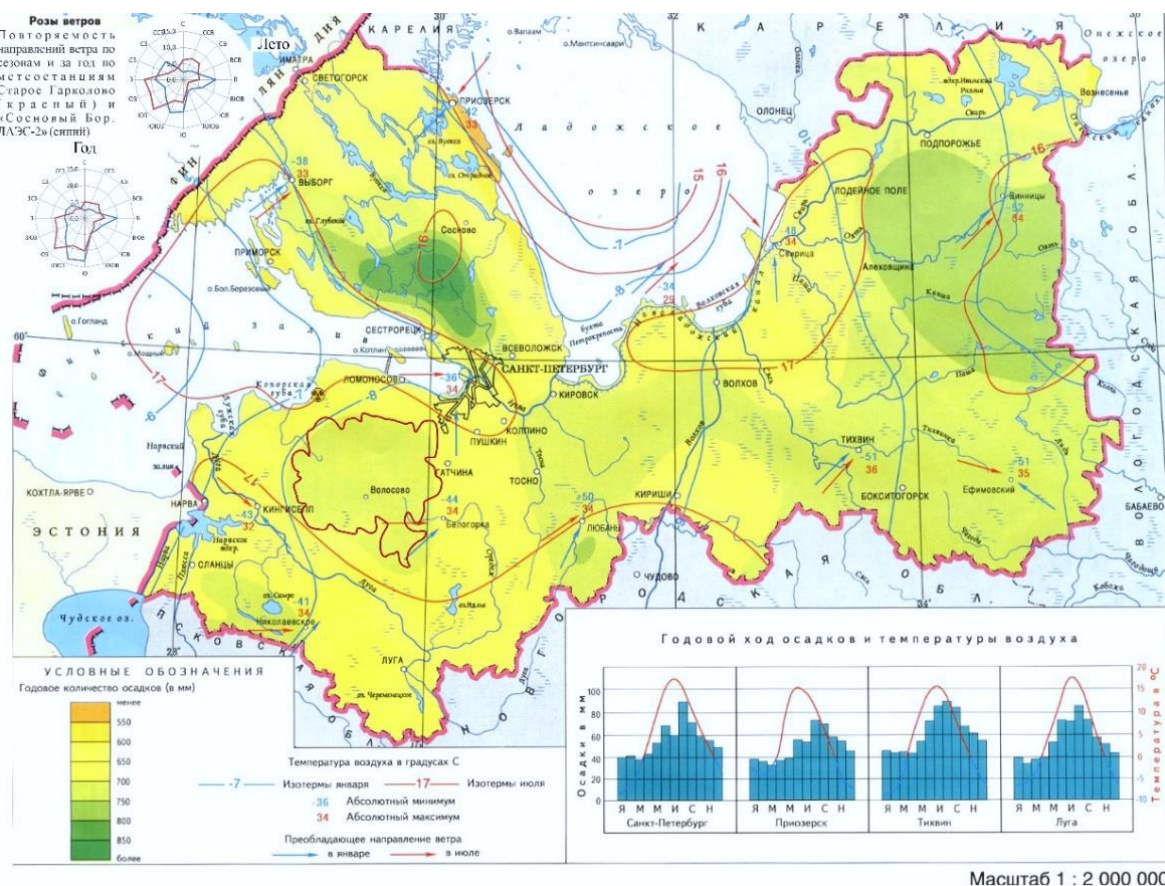


Рисунок 2.1.2- Климатическая карта Ленинградской области

(<https://hgepro.ru/mapgis/subekt/spb/climet.pdf>)

В летнее время дуют преимущественно ветры западного и юго-западного направления. В зимнее время возрастает участие ветров южного и юго-западного направления. Такое распределение ветров по сезонам способствует смягчению климата и препятствует установлению жаркой погоды летом и сильных продолжительных холодов зимой. Средняя скорость ветра по отдельным месяцам колеблется от 2,5 до 8,0 м/с. Наибольшей силы ветры достигают в зимнее время. Кратковременно может возникать шквальный ураганный ветер до 20-30 м/с.

Район Ордовикского плато беден поверхностными водами. В центральной части Ижорского плато, гидрографическая сеть почти отсутствует ввиду сильной трещиноватости и закарстованности известняков и малой мощности четвертичного покрова создались условия, особенно благоприятные для инфильтрации атмосферных осадков. Значительная часть талых и дождевых вод инфильтруется в толщу известняков, пополняя запасы подземных вод. Питание рек, озер и болот происходит в основном за счет талых снеговых вод, а также дождей и подземных вод, которые нередко играют существенную роль.

Реки северной окраины плато, текут в глубоко врезуемых долинах и имеют полугорный характер, а проходя по низменности, постоянно извилисты и заболочены. В строении продольных профилей рек видны резкие переломы, соответствующие Силируйскому глинту.

Несмотря на более северный климат на Ижорском плато располагаются дерново-подзолистые и плодородные дерново-карбонатные почвы, которые образуются на отложениях известняка (рисунок 2.1.3). По запасам питательных веществ их относят к одним из лучших в области, на этих почвах располагаются ценные сельскохозяйственные угодья, в их число входят пашни, пастбища, сенокосы. Почвы ордовикского плато большей частью распаханы, однако недостаточное внесение удобрений, и особенно органических, на протяжении длительного периода интенсивной эксплуатации почв привело к значительной потере ими гумуса как важнейшего фактора их плодородия. [Пестряков В.К., 1973]

Влагонасыщенность почв за теплый период сначала уменьшается и в июле – августе (реже в июле) падает до минимума. Затем начинается повышение влажности почвы вследствие увеличения количества осадков и одновременно уменьшение потерь влаги на испарение и транспирацию. Влагозапасы в почве в зимнее время зависят от промерзания почвы.

Основными процессами почвообразования являются подзолообразование и заболачивание, что обусловлено положением территории в зоне с холодным, влажным климатом, а также преобладанием лесной, преимущественно хвойной растительности.

Неосвоенную территорию Ижорского плато покрывают еловые сложные, зеленомошные и долгомошные леса (рисунок 2.1.4). Широко распространены заболоченные еловые леса (сфагновые ельники). На дне долин, на заболоченных почвах встречаются травяные ельники с густым и высоким травяным покровом.

Нередко лес приобретает характер смешанного елово-соснового, с некоторой примесью березы. Состав лиственных лесов представлен главным образом мелколиственными породами (березой, осинкой, ольхой). На юго-западе значительна примесь широколиственных пород (липы, клена, дуба, ясеня, вяза). [Гринев Я.А., 2016].



КАРТА ПОЧВ

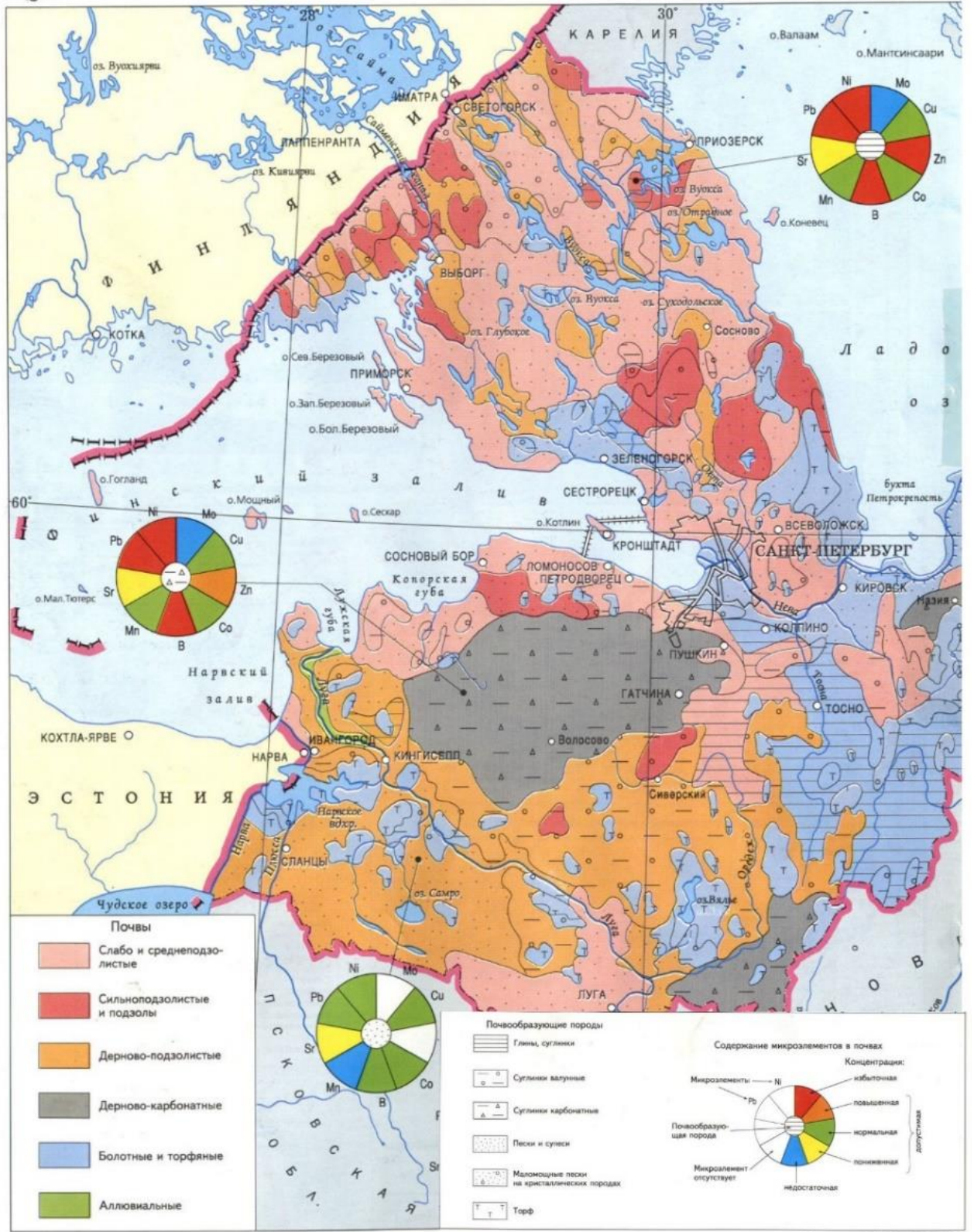
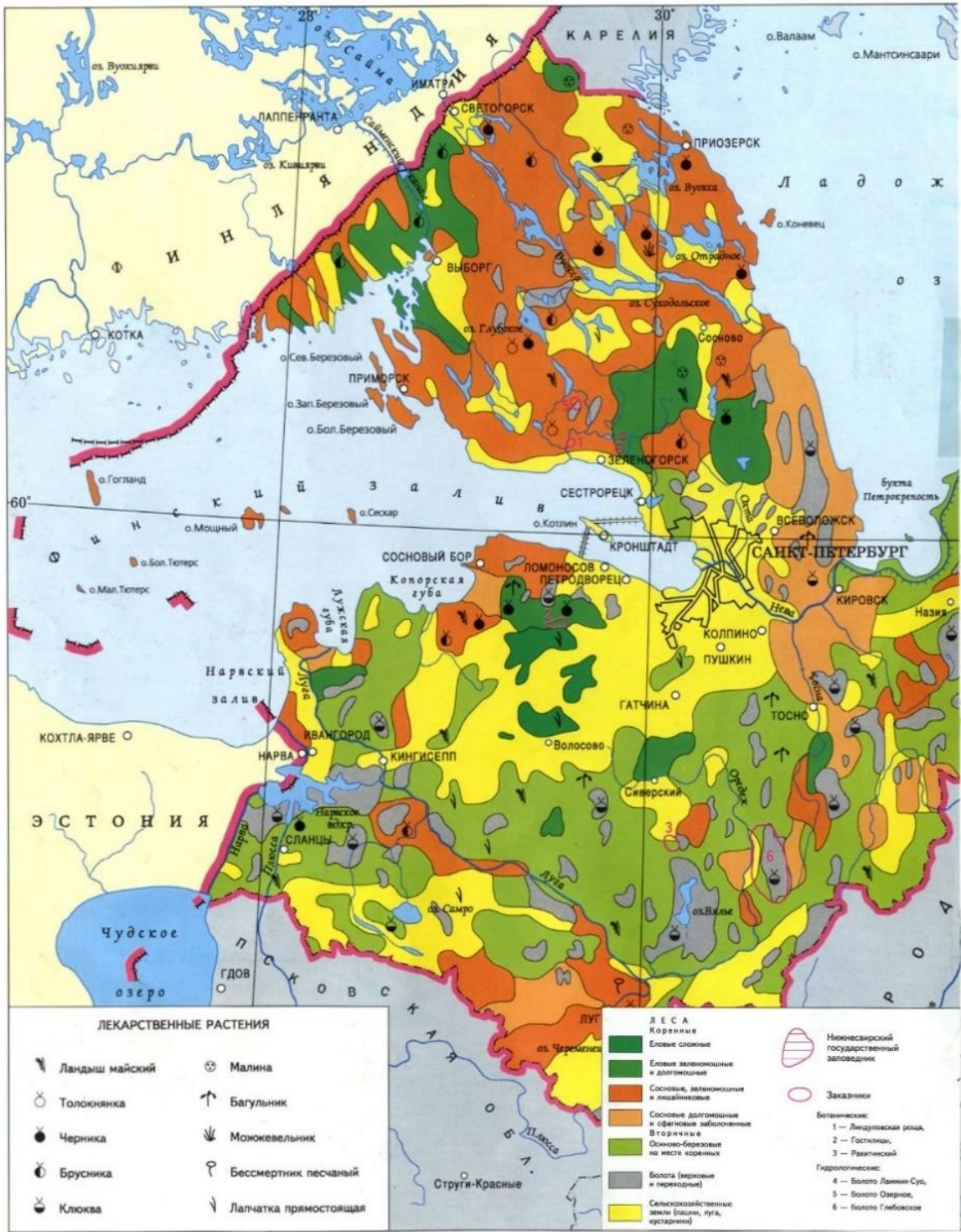


Рисунок 2.1.3- Карта почв Ленинградской области (<https://hgepro.ru/mapgis/subekt/spb/po4va.pdf>)



КАРТА РАСТИТЕЛЬНОСТИ



Масштаб 1:1 500 000

Рисунок 2.1.4- Карта растительности Ленинградской области (<https://hgepro.ru/mapgis/subekt/spb/rastiteln.pdf>)

2.2 Геологическое строение Ижорской возвышенности

Территория Ижорской возвышенности расположена на сочленении Балтийского щита и Русской плиты, в пределах северо-западной части Восточно-Европейской платформы.

В геологическом строении территории выделяются образования архея-нижнего протерозоя кристаллического фундамента, верхнепротерозойские-верхневендские, нижне-среднепалеозойские (от кембрия до девона включительно) и повсеместно распространенные четвертичные отложения платформенного чехла (рисунок 2.2.1 – 2.2.2).

Описание геологического строения Ижорской возвышенности приводится на основании исследований, проведенных в отчете Басковой И.В и др.[Отчет о проведении...,2010].

2.1 Дочетвертичные образования

Породы кристаллического фундамента архейско-протерозойского возраста представлены гнейсами, гнейсо-гранитами, гранитами, гранодиоритами. Глубина залегания от 180-200 м и более.

Непосредственно на породах фундамента залегают верхневендские, нижнекембрийские и ордовикские отложения осадочного чехла. В области предглинтовой полосы вдоль побережья Финского залива залегают верхневендские и нижнекембрийские отложения которые далее распространяются под глинтом.

Старорусская свита (V_{2sr}) отвечает редкинскому горизонту. Она сложена двумя пачками пород: нижней гравелито-песчаной и верхней глинистой, мощность пачки колеблется в значительных пределах от 3-6 до 15-20 м.

Василеостровская свита (V_{2vo}) подразделяется на две подсвиты: нижнюю и верхнюю. *Нижняя подсвита* (V_{2vo1}) сложена чередованием песчаников, в основании разнозернистых, до грубозернистых гравелитистых, палевошпатово-кварцевых, слюдистых, алевролитов слюдисто-кварцевых, и в меньшем количестве глин. Мощность нижней подсвиты колеблется от 22 до 40 м. *Верхняя подсвита* (V_{2vo2}) распространена на территории повсеместно. Свита сложена довольно однородной до 120 метровой толщей зеленовато-серых тонкослоистых (типа ленточных) уплотнённых глин с неравномерно распределёнными в разрезе буроватыми маломощными (1-5 мм) линзовидными

прослойками сидерита. В самом низу свиты нередко присутствует пласт песчаников (до 5 м).

Воронковская свита (V_{2vr2}), завершающая котлинский седиментационный цикл, отражает его регрессивную стадию. Она сложена двумя пачками пород: нижней пестроцветной песчано-глинистой (5-7 м) и верхней – песчаной (2-3) стратотип свиты.

Кембрийская система представлена лонтоваским (ломаносовская (E_{1lm}) и сиверская свиты (E_{1sv})) и доминопольским горизонтами (люкатиская и тискерская свиты (E_{1lk+ts})).

Ломаносовская свита (E_{1lm}) сложена пачкой переслаивания светло-серых кварцевых мелко-среднезернистых, с крупными зёрнами в основании песчаников и алевролитов с маломощными (5-15 см) прослоями голубовато-серых глин вверху. Мощность свиты изменяется от 3-4 до 12 м.

Сиверская свита (E_{1sv}) представлена сравнительно однообразной толщей глин голубовато-серых, на отдельных участках с сиренево-фиолетовыми, красноватыми и коричневыми полосами, алевролитистыми, неравномерно слоистыми, гидрослюдистыми. Мощность свиты по разрезам большого количества скважин колеблется в пределах 110 – 125 м.

Люкатиская и тискерская свиты представлены глинами, переслаивающимися с алевролитами, песками и песчаниками, и выходят на поверхность под четвертичными отложениями на юго-западе (р-н. п.Копорье) рассматриваемой территории. Мощность свит колеблется от 1 до 10 м.

Ордовикские отложения залегают с размывом на кембрийских отложениях, ограничены с севера эрозионно-абразионным уступом, с дочетвертичной поверхности слагают всю Ижорскую возвышенность, будучи перекрытыми девонскими отложениями на крайнем востоке и юго-востоке. В пределах рассматриваемой территории представлены десять горизонтами: пакерортским (тосненская (O_{1ts}) и копорская свиты (O_{1kp})); латорпским (леэтсеская свита (O_{1lt})); волховским (волховская свита (O_{2vl})); кундаским (обуховская свита (O_{2ob})); азерским, ласнамягским и ухакусским (медниковскую свиту (O_{2md})); кукрузеским (вийвиконнаская свита (O_{2vv})); идавереским (грязновская свита (O_{3gr}) и шундоровская свита (O_{3sn})); йыхвиским (хревицкая свита (O_{3hr})) и кейласким (елизаветинская свита (O_{3el})).

Тосненская свита (O_{1ts}) сложена оболочками, кварцевыми песчаниками и песками серо-бурой окраски, в основании грубозернистыми насыщенными обломками раковин беззамковых брахиопод (оболит), выше – разномерными мелко-среднезернистыми песками и песчаниками с обильным мелко раковинным детритом светлой серо-бурой окраски. Мощность тосненской свиты изменяется от 1,5 м до 6 м.

Копорская свита (O_{1kr}) – пачка керогенистых аргиллитов, «диктионемовых сланцев» буровато-коричневой, почти чёрной, окраски, местами с линзовидными песчаными прослойками и включениями пирита, гипса, галенита и конкреций антраконита.

Лезтсеская свита (O_{1lt}) представлена кварцево-глауконитовыми песками и песчаникам ярко зелёной окраски, доломитистыми. Мощность свиты непостоянна и меняется от 0,1 до 0,4 м.

Волховская свита (O_{2vl}) отвечает объёму волховского горизонта. Свита сложена тремя пачками-подсвитами: «дикарями» - доломитами глауконитовыми (1,6-2,3 м), «желтяками» - мергелями и известняками охристо-жёлтыми (1-1,6 м) и «фризами» - известняками доломитизированными с глауконитом, прослоенными глинами и мергелями (2,0 - 3,3 м). Мощность свиты в целом колеблется в пределах 3,5-5,5 м.

Обуховская свита (O_{2ob}) в основном сложена глинистыми известняками с тонкими прослойками мергеля и глины, или глинами с тонкими прослоями доломита и мергеля. Мощность обуховской свиты в пределах листа колеблется от 4,0 до 11 м.

Нижняя подсвита медниковской свиты (O_{2md₁}) соответствует азерискому и ласнамягискому горизонтам, сложена доломитизированными известняками и доломитами с тонкими прослойками глиен. Мощность подсвиты колеблется от 4 до 6 м. *Верхняя подсвита (O_{2md₂})* представляет ухакусский горизонт. Сложена известняками доломитизированными толстоплитчатыми и тонкослоистыми, известняками и мергелями с линзовидными прослойками кукерситов. Мощность свиты от 14 до 20 м.

Вийвиконнаская свита (O_{2vv}) под четвертичными отложениями распространена на Ордовикском (Ижорском) плато в полосе, протягивающейся от верховьев рек Сума и Систа на востоке до верховьев рек Стрелки и Ижоры на западе в субширотной полосе, расчлененной дочетвертичной эрозией и разрывными тектоническими нарушениями. Свита представлена известняками в различной степени доломитизированными, доломитами пористыми и кавернозными. Мощность свиты на площади составляет 10-13 м на площади.

Грязновская свита (O_{3gr}) выходит полосой шириной от 0,5 до 2 км в северной части Ордовикского плато, погружаясь к югу под вышележащие карбонатные отложения ордовика. Сложена известняками, доломитизированными известняками с прослоями в нижней части глиен (0,1-0,3 м) и кукерситов (0,1 м). Южнее ее мощность изменяется от 11 до 16 м.

Шундоровская свита (O_{3п}) распространена достаточно широко в южной части листа, в краевой северной части выходит на дочетвертичную поверхность. Мощность свиты изменяется от 10 до 18 м к югу. Шундоровская свита сложена доломитами глинистыми, с прослоями глинистого известняка, мергеля, глины.

Хревицкая свита (O_{3hr}) сложена известняками доломитизированными, глинистыми с редкими прослоями глин и мергелей. Мощность свиты может достигать 24 м.

Елизаветинская свита (O_{3el}) сложена доломитами мелкозернистыми и сильно доломитизированными мелко-тонкозернистыми известняками, вверху сильно разрушенными и закарстованными.

2.2 Четвертичные образования

Образования четвертичной системы распространены повсеместно. Они перекрывают венд-палеозойские породы покровом неравномерной мощности от 0,2 м (Ижорское плато) и от 10-40 м до 80-120 м в пределах Предглинтовой низменности. Мощность отложений в большой степени зависит от характера подстилающего рельефа дочетвертичных пород.

Ледниковые отложения (gIIms) (морена) представлены зеленовато-серыми суглинками с гравием, галькой и валунами кристаллических пород, с включением глыб синих глин и обломков кембрийского серого кварцевого песчаника.

Ледниковые отложения (gIIIos) распространены почти повсеместно на всей территории. На Ижорском плато морена слагается, в основном, валунными суглинками, известковыми, с незначительным количеством гравия, гальки и валунов кристаллических пород и большим количеством обломков карбонатных пород. Местами отмечаются гнёзда и линзы среднезернистого песка.

Флювиогляциальные надморенные отложения (fIII_{4os}) на территории характеризуются ограниченным фрагментарным распространением. Флювиогляциальные отложения слагают волнистые равнины зандрового типа, а так же выделяются небольшие поля на Ижорском плато. Мощность отложений колеблется от 0,5 до 5,5 м. Повсеместно они представлены песками преимущественно мелкозернистыми, коричневатого-серыми, включающими гальку и гравий от 2-3 до 30-40% кристаллических пород, иногда с примесью осадочных.

Озёрно-ледниковые отложения (lgIIIos) распространены вдоль северного склона Ижорского плато и в Ропшинском “заливе” – восточнее д.д. Ропша-Кипень. Мощность колеблется в пределах 2-7 м, но иногда достигает 18-22 м (д. Вохоново). Литологический состав - разнообразный – от средне-крупнозернистых песков до ленточных и тонкослоистых глин. Кроме песков, в составе отложений, отмечаются ещё супеси, суглинки и глины, а так же переслаивание песков с глиной.

Озёрно-ледниковые отложения (lgIIIbl) Балтийского ледникового озера широко развиты в Предглинтовой низменности и имеют площадное распространение. Мощность отложений колеблется от 0,5 до 30,8 м. Они представлены песками, супесями, суглинками и глинами, нередко ленточного типа.

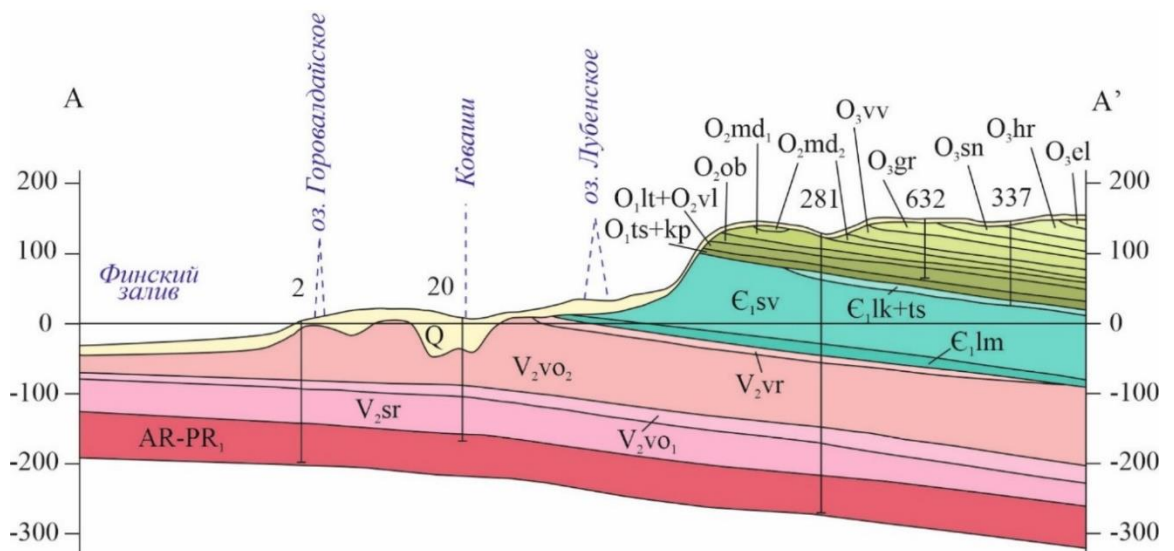
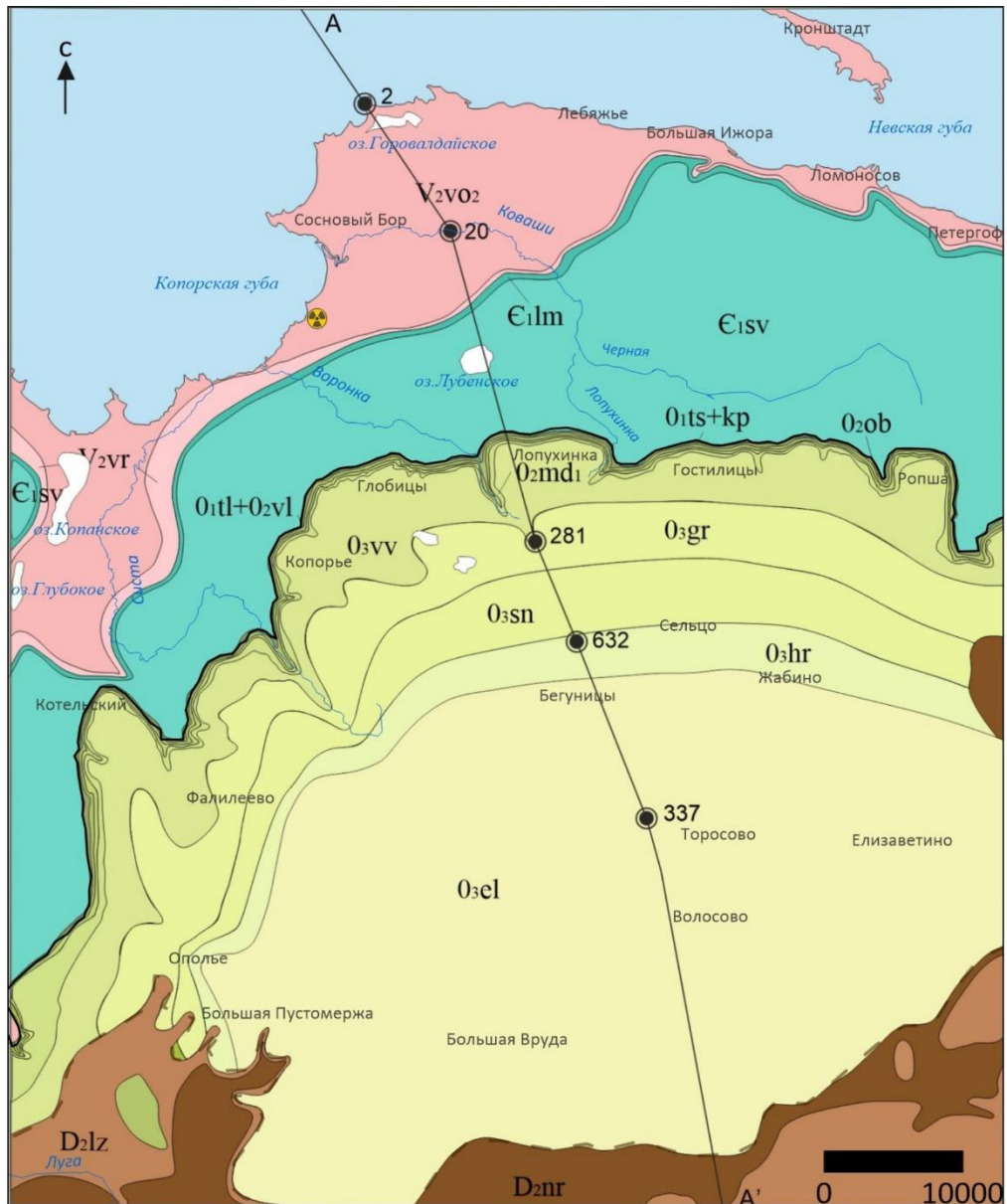
Морские отложения лимниевой и мидиевой стадий Балтийского моря (mH³lm) представлены мелко-, средне- и крупнозернистыми песками жёлто-бурого и грязно-серого цвета, слабо сортированными, с маломощными частыми прослоями хорошо окатанного гравия, гальки и валунов изверженных пород.

Озёрные отложения (IH³ld) (ладожской трансгрессии) залегают с поверхности небольшими площадями в восточной части Ижорского плато на абсолютных отметках 100,0-140,0 м. Представлен горизонт пылеватыми суглинками плотными, с редким включением гравия и мелкой гальки, а так же суглинками и песками. Мощность - 0,3-6,0 м.

Хемогенные отложения (chH) представлены гажой с прослоями и включениями известкового туфа. Отложения развиты у подножья глинта и на юго-востоке ордовикского плато. Мощность хемогенных отложений изменяется от 0,1 до 12,4 м. Гажа представляет собой тонкую, рыхлую, сыпучую породу светло-серого и желтовато-белого цвета, участками уплотнённую, иногда с линзами известкового туфа.

Биогенные (болотные) отложения (pH) встречаются как на водоразделах, так и в долинах рек и ручьёв на всех абсолютных высотах (от 3-5 м в Предглинтовой низменности, до 140-145 м на Ижорском плато). Представлены торфом светло- и тёмно-коричневого, местами почти чёрного цвета.

Аллювиальные отложения (alH) - пески разнозернистые со значительным количеством гравийно-галечного материала, а так же суглинки и супеси со значительным количеством галечного материала и пески мелкозернистыми.



Условные обозначения см. на рисунке 2.2.2

Рисунок 2.2.1 – Геологическая карта района работ

		Условные обозначения		
О Р Д О В И К С К А Я С И С Т Е М А	Верхний отдел	Карадокский ярус	 Q Четвертичные отложения (на разрезе)	
			 O ₃ el Кейлаский горизонт, елизаветинская свита: известняки доломитизированные	
			 O ₃ hr Йыхвиский горизонт, хревицкая свита: доломиты, известняки доломитизированные	
	Средний отдел	Лланвирирский ярус	Идавэреский горизонт	 O ₃ sn Шандуровская свита: известняки доломитизированные
				 O ₃ gr Грязновская свита: известняки, известняки доломитизированные
				 O ₃ vv Кукрузеский горизонт, вийвиконнаская свита: известняки и доломиты
				 O ₂ md ₂ Ухакусский горизонт, медниковская свита: известняки, доломиты, мергели
				 O ₂ md ₁ Азериский и ласнамягиский горизонты, медниковская свита: известняки, мергели, глины
				 O ₂ ob Кундаский горизонт, обуховская свита: известняки и доломиты
	Нижний отдел	Лланвирирский ярус	Идавэреский горизонт	 O ₁ lt+O ₂ vl Латорпский и волховский горизонты, леэтсеская и волховская свиты: пески и песчаники глауконитовые, глины; в верхней части мергели, доломиты и известняки глауконитовые
				 O ₁ ts+kp Пакерортский горизонт, тосненская и копорская свиты: диктионемовые сланцы, пески и песчаники, прослой глины
				 C ₁ lk+ts Доминопольский горизонт, люкатинская и тискерская свиты: люкатинская - глины алевролитовые, переслаивающиеся с алевролитами и песчаниками; тискерская - алевролиты и пески, редкие прослой глины
	КЕМБРИЙСКАЯ СИСТЕМА	Нижний отдел	Агдабанский ярус	 C ₁ sv Сиверская свита: глины алевроитовые с прослоями песчаников и алевролитов
				 C ₁ lm Ломоносовская свита: песчаники, переслаивающиеся сверху с алевролитами и глинами
				 V ₂ vr Воронковская свита: глины с переслаиванием алевролитов, сверху пески и алевролиты
 V ₂ vo ₂ Василеостровская свита: глины с прослоями алевролитов, реже песчаников				
ВЕНДСКАЯ СИСТЕМА	Нижний отдел	Котлинский горизонт	 V ₂ vo ₁ Василеостровская свита: песчаники, алевролиты, прослой глины (на разрезе)	
			 V ₂ sr Редкинский горизонт, старорусская свита: песчаники, алевролиты, сверху глины	
			 AR-PR ₁ Образования нерасчлененные. Метаморфические, ультраметаморфические и магматические породы кристаллического фундамента (на разрезе)	
АРХЕЙ-НИЖНИЙ ПРОТЕРОЗОЙ				
		 632	Структурные скважины и их номера	
		 A A'	Линия геологического разреза	
		 Копорье	Населенный пункт и его название	
			Местоположение ЛАЭС-2	

Рисунок 2.2.2 – Условные обозначения к гидрогеологической карте (рисунок 2.2.1)

2.3 Гидрогеологическая характеристика

В пределах рассматриваемой территории выделяются водоносные комплексы, приуроченные как к четвертичным отложениям, так и к дочетвертичным породам (рисунок 2.2.3 – 2.2.4).

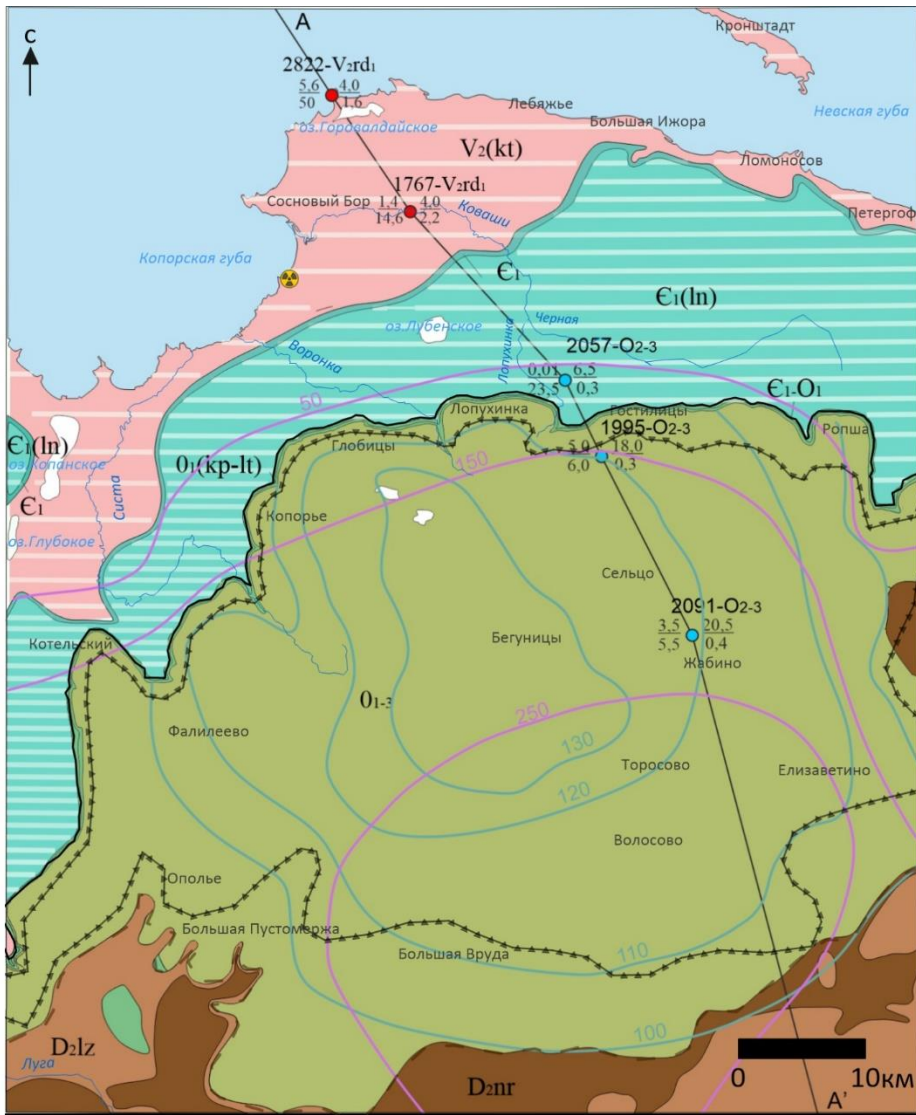
По условиям циркуляции подземные воды, приуроченные к четвертичным отложениям и к дочетвертичным породам, классифицируются как порово-пластовые (пески), трещинно-карстовые (известняки), трещинно-пластовые (песчаники) и трещинные (гнейсы, гнейсо-граниты, граниты).

Питание водоносных горизонтов происходит, в основном, за счет атмосферных осадков, а также за счет перетока воды из других горизонтов. Область питания водоносных горизонтов совпадает с областью их распространения и приурочена к участкам, где водосодержащие породы залегают близко к поверхности земли. Дренаж водоносных горизонтов осуществляется источниками в долинах рек, прорезающих как четвертичные, так и дочетвертичные породы.

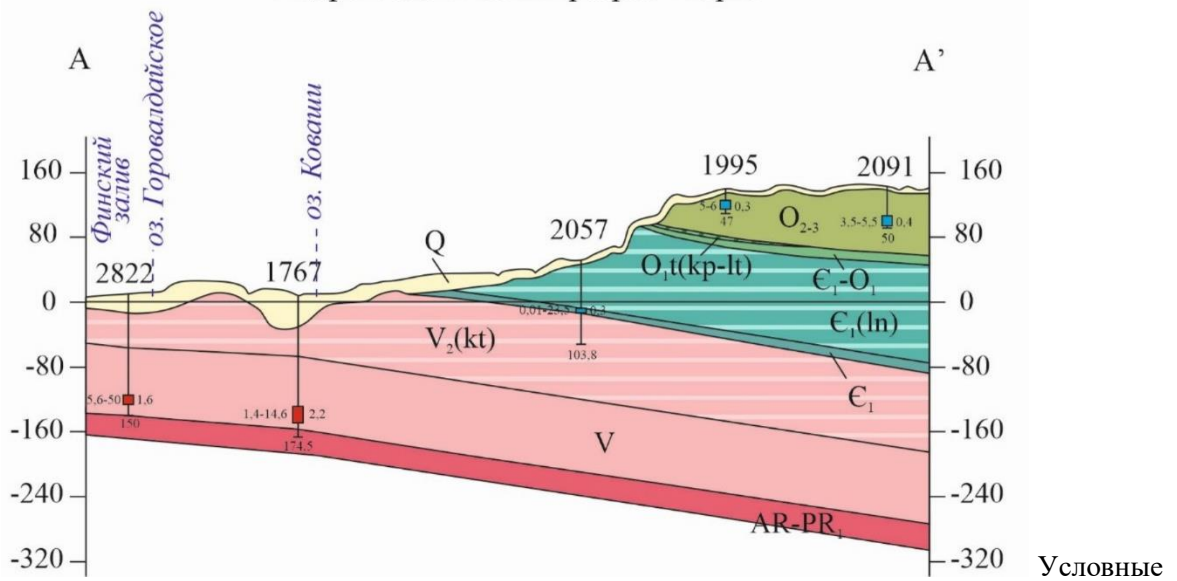
Все генетические разности четвертичных отложений в различной степени обводнены и представляют водоносные комплексы и горизонты. Сложены они эоловыми, морскими, аллювиальными и торфяно-болотными, озерно-ледниковыми отложениями. По химическому составу воды четвертичных отложений гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, пресные с общей минерализацией от 51 до 272 мг/л. Подземные воды четвертичных отложений частично используются местным населением, но не могут служить в качестве надежного источника водоснабжения.

В соответствии с геологическим строением и гидродинамическими условиями в гидрогеологическом разрезе в дочетвертичных отложениях выделяются следующие водоносные и водоупорные горизонты и комплексы: *вендский водоносный комплекс (V)*, *котлинский водоупорный горизонт ($V_2(kt)$)*, *нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт (C_1)*, *нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт ($C_1(ln)$)*, *кембро-ордовикский водоносный горизонт (C_1-O_1)*, *тремадокский (копорсколеэтский) относительный водоупорный горизонт ($O_{1t}(kp-lt)$)* и *ордовикский водоносный комплекс (O_{1-3})*.

Описание гидрогеологического строения Ижорской возвышенности приводится на основании исследований, проведенных в отчете Басковой И.В. [Отчёт о проведении..., 2010]



Гидрогеологический разрез к карте



условные обозначения см. на рисунке 2.2.4


Рисунок 2.2.3 – Гидрогеологическая карта района работ


Условные обозначения

Q	Четвертичный водоносный горизонт (на разрезе)
O ₁₋₃	Ордовикский водоносный горизонт. Известняки, доломиты, прослои глин
O _{1(кп-л)}	Тремaddockский (копорско-леэцкий) относительный водоупорный горизонт. Диктионемовые сланцы, песчаники, глины
C ₁ -O ₁	Кембро-ордовикский водоносный горизонт. Пески, песчаники
C ₁ (ln)	Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт. Глины с редкими прослоями песчаников и алевролитов
C ₁	Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт. Песчаники, алевролиты, глины
V ₂ (kt)	Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт. Глины с редкими прослоями песчаников
V	Вендский водоносный комплекс. Переслаивание песчаников, алевролитов, глин
AR-PR	Архей-нижнепротерозойская водоносная зона экзогенной трещиноватости. Граниты, гнейсы, магматиты, кварцито-песчаники

а) б) Химический тип водопункта: а - гидрокарбонатный (HCO₃);
б - хлоридный (Cl)

1995-O₂₋₃ Гидрогеологическая скважина. Слева: в числителе - дебит, л/с;
в знаменателе - понижение, м. Справа: в числителе - глубина ПВ, м;
в знаменателе - минерализация, г/л.

 Глубина залегания подошвы зоны пресных вод, м

 Гидроизогипсы первых от поверхности водоносных горизонтов, в абс.м

 Площадь интенсивного развития карста

A A' Линия гидрогеологического разреза

Копорье Населенный пункт и его название




Местоположение ЛАЭС-2

На разрезе

2822
5,6-50 1,6
150

Цифры: вверху - номер скважины; внизу - глубина, м;
слева - дебит, л/с и понижение, м;
справа - минерализация, г/л.

Закраска соответствует анионному составу вод в опробованном интервале глубины:

 гидрокарбонатному

 хлоридному

Рисунок 2.2.4 – Условные обозначения к гидрогеологической карте (рисунок 2.2.3)

Ордовикский водоносный горизонт (O₁₋₃)

Водоносный горизонт широко распространён на Ижорском плато южнее Ладожско-Балтийского уступа.

На большей части территории водоносный горизонт залегает непосредственно под четвертичными образованиями на глубине 1,5-3,0 м, редко 10 м и лишь на небольших площадях в восточной и юго-восточной частях территории погружается под средневерхнедевонские образования на глубину 25-60 м. От нижележащего кембро-ордовикского водоносного горизонта он отделён тремадокским (копорско-леэтсеским) относительным водоупором.

Мощность горизонта увеличивается по падению от 5-10 м в приглинтовой полосе до 120 м в южной части территории за счёт наращивания более молодых слоёв ордовика.

Водовмещающие породы представлены известняками и доломитами в различной степени трещиноватыми и закарстованными с редкими прослоями мергелей и глин.

На гидрогеологической карте показана площадь интенсивного развития карста. На территории Ижорского плато карст распространён широко и представлен различными поверхностными формами: воронки, впадины, долины и ложбины. Степень закарстованности карбонатных пород как по площади, так и в вертикальном разрезе неравномерная.

Ордовикский горизонт содержит, как правило, безнапорные воды. Движение потока подземных вод на территории плато происходит от его центральной части к периферии. В юго-восточной части территории, где ордовикский водоносный горизонт погружается под среднедевонские образования, подземные воды приобретают напор до 40 м.

Питание водоносного горизонта происходит на всей площади его распространения за счёт инфильтрации атмосферных осадков. Дренаживание осуществляется вдоль глинта, о чём свидетельствуют многочисленные родники и пластовые выходы подземных вод.

Неравномерная трещиноватость и закарстованность карбонатных пород обуславливает изменения их фильтрационных свойств. Удельный дебит скважин колеблется от 0,2 до 20,0 л/с, чаще 0,3-0,5 л/с, величина водопроницаемости по площади изменяется от 100 до 5000 и более м²/сут.

Подземные воды горизонта имеют большое практическое значение. На территории Ижорского плато он является основным горизонтом для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения. В большинстве населённых пунктов, сельскохозяйственных объектов, птицефабрик подземные воды эксплуатируются с помощью скважин глубиной 30-45 м.

Кроме того, от крупных родниковых каптажей на склоне глинта подземные воды горизонта по водоводам, проложенным по территории Предглинтовой низменности, подаются в г.г. Кронштадт, Ломоносов, Петродворец. Каптажи созданы на базе Варваринских, Гостилицких, Вильповицких и Леволовских источников.

Тремадокский относительно водоупорный горизонт O_2t (кр-lt)

Горизонт не имеет повсеместного распространения, он развит только в приглинтовой полосе шириной 10-20 км. Горизонт сложен глауконитовыми песчано-глинистыми отложениями и диктионемовыми сланцами, общей мощностью 5 – 7 м.

Кембро-ордовикский водоносный горизонт (C_1-O_1)

Водоносный горизонт распространен южнее Балтийско-Ладожского уступа повсеместно. На большей части территории он залегает под ордовикским горизонтом, в приглинтовой зоне – под копорско-леэтсеским водоупорным горизонтом, а вдоль уступа в виде узкой полосы выходит под четвертичные образования. Подстиляется горизонт водоупорными лонтоваскими глинами.

Водовмещающие породы представлены мелкозернистыми песками и песчаниками с редкими прослоями глин. Мощность горизонта увеличивается от уступа на юг и юго-восток от 3-5 м до 20 м. Глубина залегания кровли закономерно возрастает по падению пород от 5-20 м до 150 м у южной границы листа.

Водоносный горизонт на большей части территории содержит напорные воды и только в пределах узкой полосы вдоль глинта вскрываются безнапорные воды. Величина напора изменяется от 5-25 м. до 130 м. в юго-восточной части территории.

Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков и поступления вод из вышележащего ордовикского горизонта.

Водообильность горизонта достаточно выдержанная. Удельный дебит скважин изменяется от 0,2 до 0,4 л/с, чаще составляя 0,5-0,8 л/с. Коэффициент фильтрации песков 1,5-10 м/сут. Водопроницаемость горизонта изменяется от 25 до 200 м²/сут. района. Среднегодовой уровень в 2009 г составил 45,19 м, что на 0,45 м выше прошлогоднего и на 1,1 м среднегодовалого.

Кембро-ордовикский горизонт имеет преимущество перед вышележащим ордовикским горизонтом благодаря защищённости от поверхностного загрязнения и содержанию напорных вод. Однако, в настоящее время, он не находит широкого применения. Подземные воды используются с помощью единичных скважин в таких населенных пунктах как Гостилицы, Терволово, Копорье, Волосово.

Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт C_1 (ln)

Горизонт распространен на всей территории, за исключением северной ее части в прибрежной полосе Финского залива. На Предлинтовой и Приневской низменности он залегает под четвертичными образованиями на глубине от нескольких метров до 30-50 м. Южнее Балтийско-Ладожского уступа горизонт погружается под кембро-ордовикский водоносный горизонт на глубину до 160 м.

Лонтоваский горизонт сложен плотными тонкоплитчатыми глинами, в толще которых встречаются маломощные (1-10 см) прослои тонко- и мелкозернистых песчаников. Мощность горизонта составляет 5-10 м в зоне выклинивания на Ижорской возвышенности и достигает 120 м.

Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт (С₁)

Водоносный горизонт распространен на подавляющей части исследуемой территории, отсутствуя лишь на севере, где развиты терригенные породы венда. Площадь выхода горизонта под четвертичные образования прослеживается в виде извилистой полосы шириной 0,5-2,5 м на Предглинтовой и Приневской низменности. На остальной части территории горизонт перекрыт лонтоваскими глинами.

Водовмещающими породами этого горизонта являются нижнекембрийские пески и слабосцементированные песчаники кварцевые, залегающие в виде прослоев в толще глин. Вскрытая мощность толщи 10-30 м. Глубина залегания водоносных прослоев в ней колеблется от 1 до 20 м.

Водоносный горизонт содержит напорные воды. Величина напора закономерно увеличивается по падению кровли на юг и юго-восток от 5-20 м до 100-200 м.

Движение подземных вод ломоносовского горизонта происходит в северном направлении от Ижорского плато к Предглинтовой низменности. Абсолютные отметки уровня уменьшаются от 50 до 10 м.

Водообильность горизонта слабая. Удельный дебит скважин составляет сотые и тысячные доли л/с, реже десятые доли л/с. Водопроницаемость менее 50 м²/сут.

Для целей водоснабжения подземные воды используются на территории Предглинтовой низменности одиночными скважинами глубиной 25-40 м.

Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт V₂(kt)

Горизонт распространен на всей рассматриваемой территории. В северной её части горизонт залегает непосредственно под четвертичными образованиями. В юго-восточном и южном направлении котлинский горизонт погружается под образования кембрия и ордовика на глубину до 320 м.

Горизонт сложен плотными тонкослоистыми глинами и является мощным региональным выдержанным водоупором. Мощность отложений изменяется от 15 (где

перекрыт четвертичными отложениями и в древних палеодолинах) до 120 м (под отложениями кембрия и ордовика).

Вендский водоносный комплекс (V)

Водоносный комплекс распространен на рассматриваемой территории повсеместно под верхневендским (котлинским) водоупорным горизонтом. Общая мощность водоносного комплекса составляет 60-80 м.

Движение подземных вод вендского комплекса происходит в северном и северо-восточном направлении от области высоких напоров – Ижорской возвышенности – в сторону Финского залива, области разгрузки.

Котлинский водоносный горизонт (V_{2kt})

Котлинский водоносный горизонт имеет на территории повсеместное распространение. Он приурочен к терригенным породам нижней подсвиты котлинской свиты котлинского горизонта и залегает под верхневендским (котлинским) водоупорным горизонтом.

Горизонт сложен песчаниками, алевролитами и глинами, причем увеличение содержания песчаников происходит вниз по разрезу. Мощность горизонта 30-40 м.

Подземные воды повсеместно напорные. Величина напора составляет 52-95 м.

Водообильность горизонта изменчива. Удельный дебит скважин изменяется от 0,01 до 0,4 л/с, водопроницаемость 3-70 м/сут.

Верхневендский (редкинский) относительно водоупорный горизонт V_{2(rd)}

Горизонт развит на территории повсеместно и разделяет котлинский и редкинский водоносные горизонты. Глубина залегания горизонта увеличивается по направлению падения пород от 50-100 м в прибрежной зоне до 460 м на Ижорском плато у южной границы территории.

Горизонт сложен глинами и аргиллитами с редкими прослоями песчаников. Общая мощность горизонта изменяется от 5-10 м на юге территории до 20-25 м в прибрежной части Финского залива.

Редкинский водоносный горизонт (V_{2rd})

Горизонт залегает в основании вендского комплекса на кристаллическом фундаменте и приурочен к породам нижней подсвиты старорусской свиты редкинского горизонта.

Водоносный горизонт сложен песчаниками мелко – и разнозернистыми с редкими прослоями глин и алевролитов. Мощность горизонта колеблется в значительных пределах от 3-6 до 20-40 м.

Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 120-180 м на Предглинтовой низменности до 460-480 м на юге территории.

Подземные воды высоконапорные. На Предглинтовой низменности величина напора составляет 115-200 м.

Водообильность горизонта неоднородна. Удельный дебит скважин на Предглинтовой низменности изменяется от 0,04 до 2,8 л/с, чаще 0,3-0,5 л/с. Водопроницаемость от 20 до 300 м²/сут. На Ижорской возвышенности откачка проведена в скважине №245 (д. Извара) из интервала 444,9-455,6 м. Статический уровень 35 м. Величина напора 410 м.

На рассматриваемой территории расположены два участка Петербургского месторождения минеральных вод: Петродворцовый и Ломоносовский, расположенные на южном побережье Финского залива.

3 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КАРСТООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ИЖОРСКОГО ПЛАТО

3.1 Характеристика химического состава

Материалом для дальнейших исследований послужили значения химического состава проб подземной воды ордовикского водоносного горизонта, взятых из скважин и родников. [Приложение 1]. Результаты анализа представлены в сводной таблице 1 ниже.

Таблица 1 – Показатели химического состава подземных вод ордовикского водоносного горизонта, [мг/л].

Показатель	Среднее	Мин	Макс	Размах
pH	7.29	4.92	8.45	3.53
HCO ₃	343	7.32	600	593
Ca	62.45	62.45	134	71.55
Cl	17.61	1.80	169	167
K	4.14	0.00	29.4	29.36
Mg	34.08	1.54	79.8	78.26
Na	16.32	0.50	103	103
SO ₄	27.57	14.13	160	146
NO ₃	14.13	0.001	93.0	93.00
Минерализация	507	74.77	887	802

По преобладающим компонентам вода гидрокарбонатная магниевно-кальциевая. Подземные воды ордовикского водоносного горизонта являются пресными, с минерализацией от 74 до 887 мг/л (при среднем значении 507 мг/л). По степени жесткости – умеренно жесткие, pH изменяется от 4,92 до 8,45 (средняя величина 7,29). В зависимости от значений водородного показателя (pH) вода на Ижорском плато классифицируется, как умеренно кислая (4,5-5,5), так и слабощелочная (8,0-8,5). По гидрохимической классификации Сулина воды относятся к сульфатно-натриевому типу.

По полученной минерализации была построена карта минерализации подземной воды (рисунок 3.1.1).

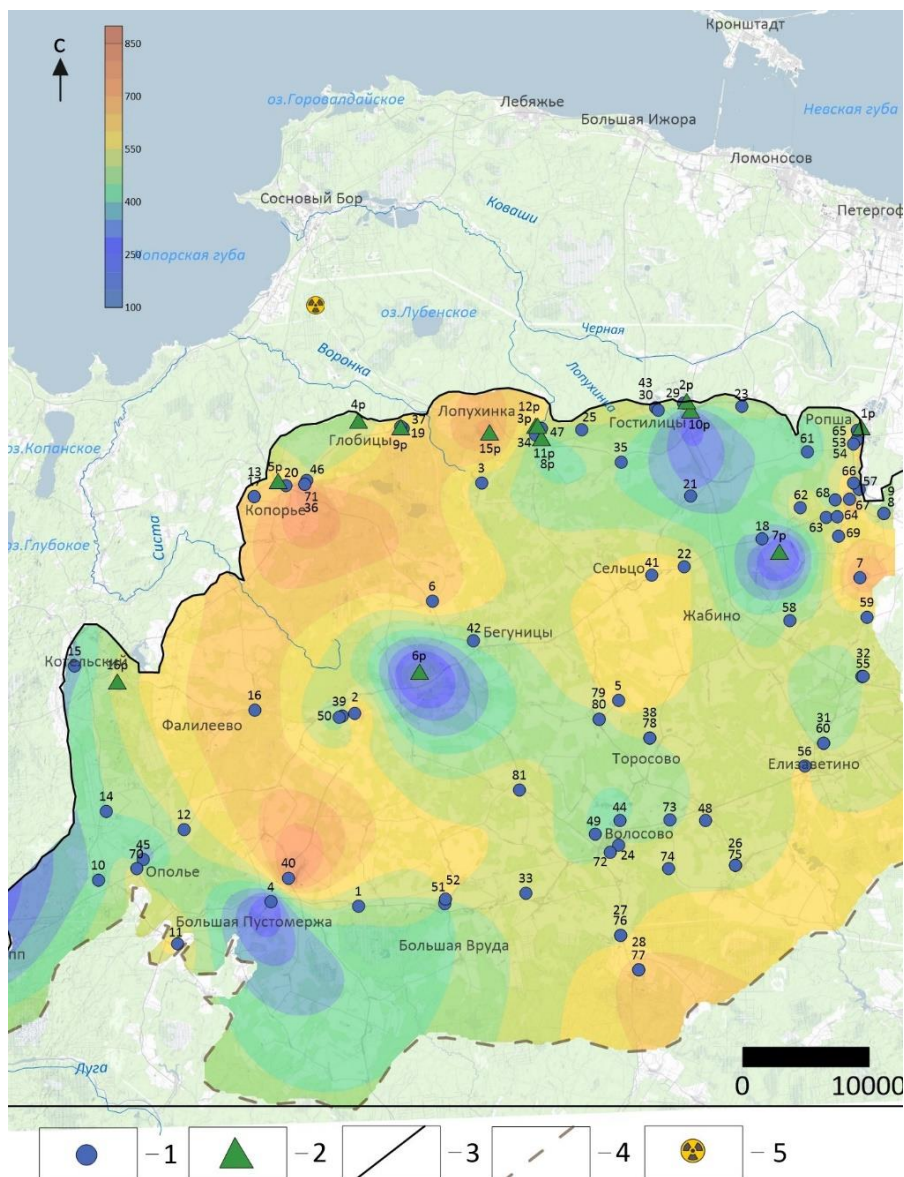


Рисунок 3.1.1 Карта минерализации подземной воды в мг/л

1 - отметка скважины с её номером, 2 - отметка родника с номером, 3- линия Балтийско-Ладожского (Ордовикского) глинта, 4 – граница Ордовикского плато, 5- местоположение ЛАЭС

Согласно карте участки с наибольшей минерализацией (700-850 мг/л) располагаются в пределах населенных пунктов Копорье, Коложицы (40 скв.), д.Извара (77 скв.) и Пеушалово (7 скв.), в то время как пробы воды с наименьшей минерализацией (100- 250 мг/л) были отобраны в районе Большой Пустомержи (4 скв.), Липово (6 р), Кирьямо (7 р) и Гостилиц (10 р).

Относительно состава подземных вод был произведен корреляционный анализ, который показал тесную связь индекса насыщения кальцита с водородным показателем (рН) и макрокомпонентами Mg, HCO₃ и Ca (0,93, 0,6, 0,74 и 0,51 соответственно). Согласно графикам (рисунок 3.1.2) а-г, чем ниже водородный показатель и меньше гидрокарбонатов

кальция и магния содержится в пробе воды, тем ниже индекс насыщения кальцитом, а следовательно, тем агрессивнее вода к карстующимся породам.

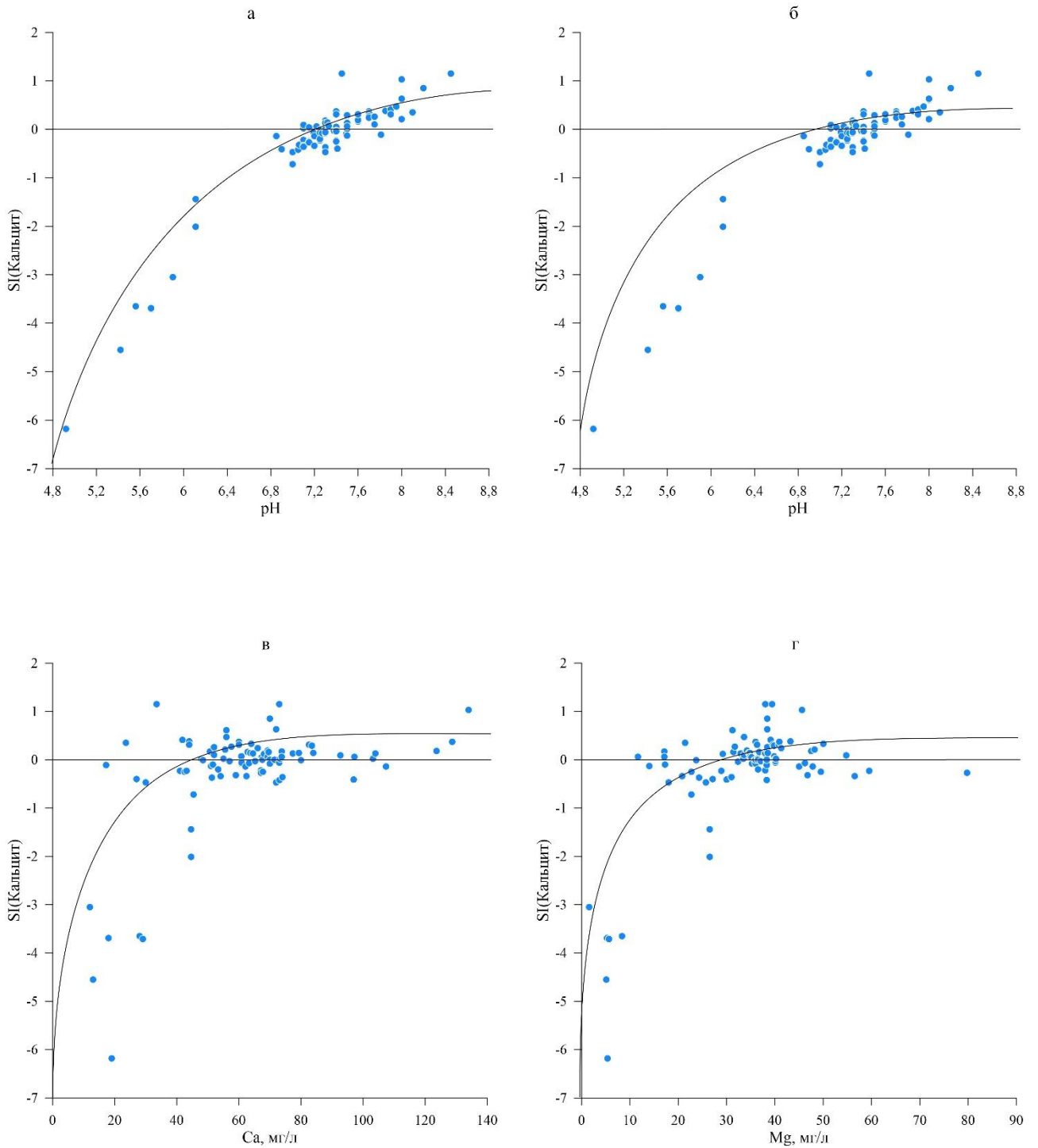


Рисунок 3.1.2 – Графики зависимости значения индекса насыщения по кальциту от (а)-рН, (б)-Mg, (в)-HCO₃, (г)-Ca. Точки соответствуют измеренным значениям.

3.2 Методика оценки карбонатного равновесия

Поскольку ордовикский водоносный горизонт сложен трещиноватыми и закарстованными известняками и доломитами было решено рассчитать карбонатное равновесие, чтобы оценить интенсивность карстообразования на территории Ижорского плато. Карбонатная система в подземных водах имеет исключительно важное значение поскольку состоянием карбонатно-кальциевого равновесия определяются условия растворения или осаждения карбонатов, в частности, CaCO_3 .

Из рисунка 3.2.1 видно, что основными компонентами, участвующими в химических реакциях, являются: CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , H^+ , H_2O . Количественные соотношения между компонентами системы зависят от величины pH и содержания CO_2 . Если количество растворенной углекислоты больше равновесной концентрации, то равновесие реакции сместится вправо, что приведет к растворению CaCO_3 , если меньше – влево, что означает образования и выпадение карбонатов кальция.

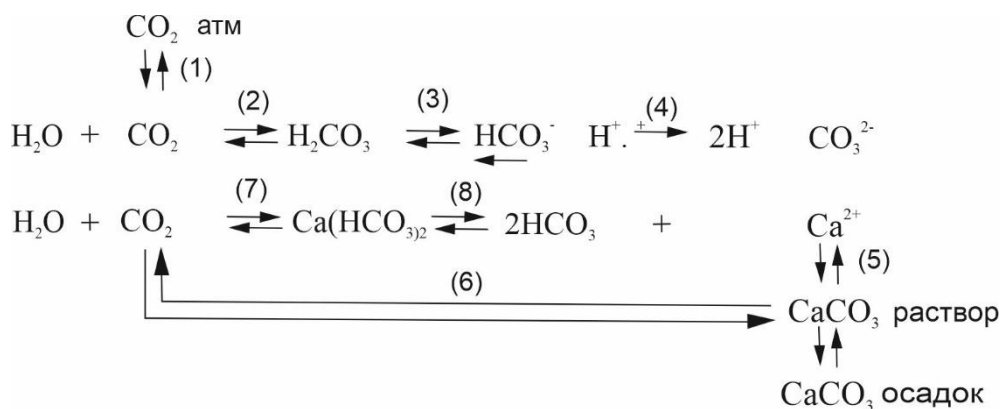


Рисунок 3.2.1 Карбонатно-кальциевая система равновесий в природных водах [Карюхина Т.А., Чурбанова И.Н., 1986]

В данной работе расчет карбонатно-кальциевых равновесий происходил при помощи программы PHREEQC [2] с подключённой базой термодинамических констант wateq4f.dat [3] PHREEQC представляет собой компьютерную программу для моделирования химических реакций и процессов переноса в природной или загрязненной воде, написанную на языке программирования C ++, который предназначен для выполнения широкого спектра водных геохимических расчетов. Программа основана на равновесной химии водных растворов, взаимодействующих с минералами, газами, твердыми растворами и сорбционными поверхностями. PHREEQC может использоваться в качестве программы видообразования для расчета индексов насыщения, распределения водных компонентов, а также плотности и удельной электропроводности определенного состава раствора.

По лабораторным данным химического анализа воды ордовикского водоносного горизонта (93 проб подземной воды), взятой из скважин и родников (*Прил.1*) были рассчитаны следующие показатели: индекс насыщения (1), рассчитанный для доломита и кальцита (2), индекс Ланжелье (3) и индекс Ризнера (4).

- Для оценки степени неравновесности подземных вод по отношению к минералам используется «индекс насыщения» (SI), который показывает вероятность осаждения твердой фазы из раствора.

$$SI \text{ (Saturation index)} = \log Pa/K = \log Pa - \log K, \quad (1)$$

где Pa - произведение активностей (концентраций) ионов в анализируемое пробе подземной воды; K - произведение растворимости карбонатного минерала;

Например, для кальцита, индекс насыщения рассчитывается как отношение произведения концентраций $[Ca^{2+}]_{\text{наблюдение}}$ и $[CO_3^{2-}]_{\text{наблюдение}}$ в подземной воде, к равновесному произведению растворимости кальцита $[Ca^{2+}]_{\text{равновесие}}$ и $[CO_3^{2-}]_{\text{равновесие}}$:

$$SI_{\text{кальцит}} = \log_{10} \frac{([Ca^{2+}]_{\text{наблюдение}} \cdot [CO_3^{2-}]_{\text{наблюдение}})}{([Ca^{2+}]_{\text{равновесие}} \cdot [CO_3^{2-}]_{\text{равновесие}})} \quad (2)$$

Отрицательное значение индекса насыщения говорит, что раствор недонасыщен, положительное значение, напротив, о перенасыщении раствора. Таким образом, индекс насыщения может быть использован для оценки степени неравновесности подземных вод по отношению к минералам.

- Индекс насыщения Ланжелье (LSI) [Langelier, 1936] является объективным показателем водного баланса и показывает насколько насыщена вода карбонатом кальция ($CaCO_3$). Отрицательное значение показателя указывает на то, что вода склонна к растворению карбонатных пород (агрессивна), положительный – склонна к образованию карбонатных отложений. При нулевом значении индекса насыщения Ланжелье вода является стабильной. Формула расчета индекса Ланжелье (LSI) имеет следующий вид:

$$LSI = pH - pH_s, \quad (3)$$

где pH и pH_s – измеренная (фактическая) величина и величина равновесного насыщения соответственно.

- Иная формула расчета индекса стабильности была предложена в 1944 г. Ризнером [Ryznar, 1944] и рассчитывается следующим образом:

$$RSI = 2pH_s - pH, \quad (4)$$

Значение индекса стабильности равное 6 обозначает то, что раствор стабилен. Если индекс стабильности Ризнера больше 6 раствор агрессивен, а меньше 6 – склонен к образованию осадка.

Впоследствии эти индексы были ранжированы по баллам, в конечном итоге образуя единую классификацию (таблица 2). Суммарная балльная оценка четырех показателей в пределах исследуемой территории образует следующую классификацию подземной воды:

- 5-8 баллов – вода не агрессивна (не растворяет карбонатную породу);
- 8-11 баллов – склонна к агрессии (вода склонна к растворению карбонатной породы);
- 11-14 баллов – агрессивная (вода интенсивно растворяет карбонатную породу).

Таблица 2 – Категории исследуемых показателей и соответствующие им баллы при экспертной оценке агрессивности подземной воды

SI (Кальцит)	SI (Доломит)	LSI	RSI	Баллы
SI>0.3	SI>0.3	SI>0.4	Ryzner <6	1
-0.3<SI<0.3	-0.3<SI<0.3	0.1<SI<0.4	6< Ryzner <7	2
SI<-0.3	SI<-0.3	-0.1<SI<0.1	Ryzner >7	3
		-0.1<SI<-0.5		4
		LSI<-0.5		5

3.3 Результаты расчётов

На основе полученных данных была построена карта агрессивности подземной воды по отношению к известняку (рисунок 3.3.1). Было выявлено, что:

1. Согласно карте на северной и южной частях Ижорского плато преобладают агрессивные воды, способные растворять кальцит и доломит.
2. Большая часть вод ордовикского горизонта Ижорской возвышенности склонны к растворению известняка.
3. Зелеными области обозначают районы, где подземная вода, согласно результатам моделирования, не должна растворять карбонатные породы.

Согласно созданной гидрогеологической модели [6], питание водоносного горизонта по всей площади осуществляется за счёт инфильтрационных осадков, а разгрузка осуществляется вдоль глинта. Соответственно, ожидается, что подземные воды проходя свой путь до места разгрузки находятся во взаимодействии с породой (насыщаются кальцием и теряют свою агрессивность по отношению к известнякам и доломитам).

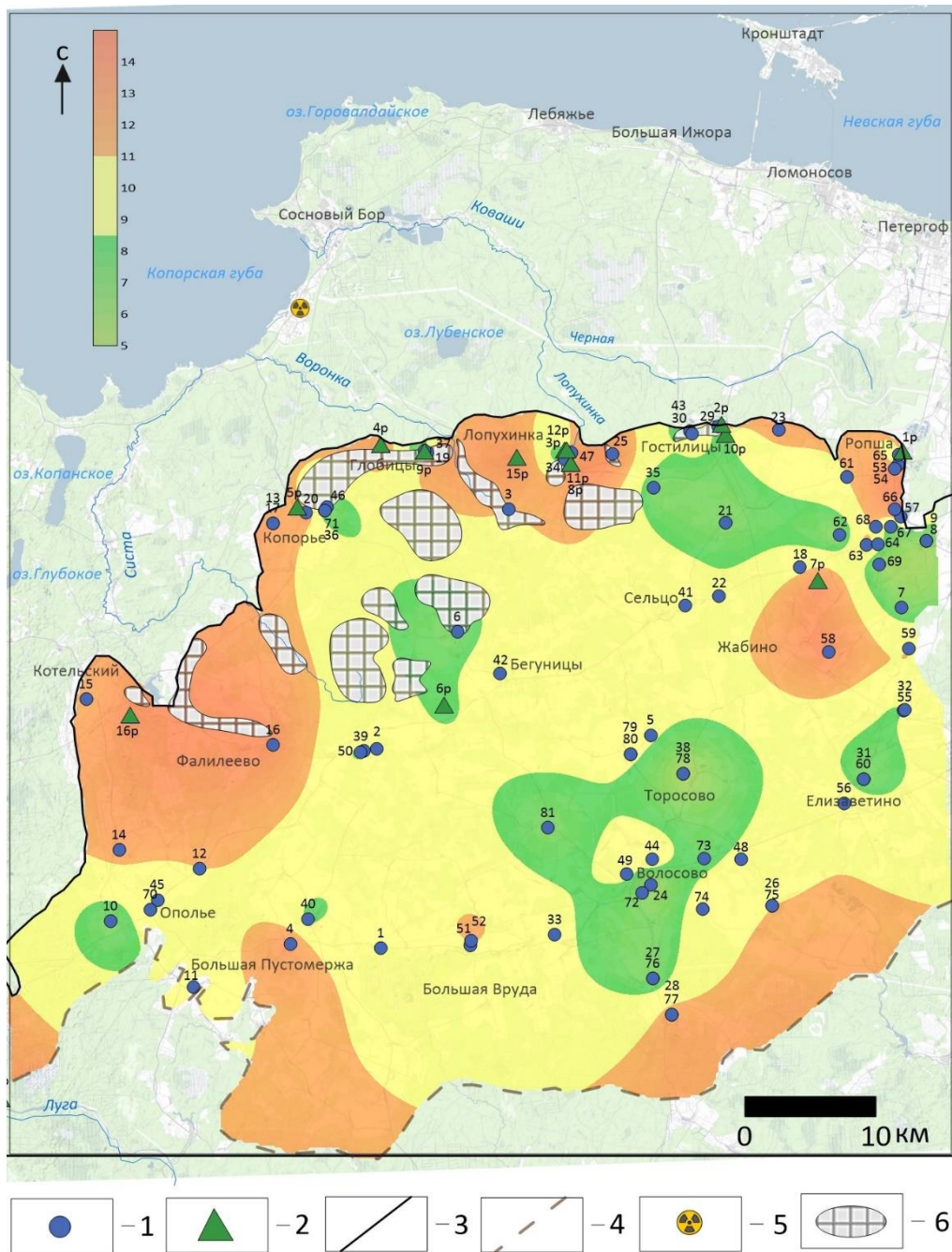


Рисунок 3.3.1 Карта агрессивности подземной воды по отношению к карстующимся породам

1 - отметка скважины с её номером, 2 - отметка родника с номером, 3- линия Балтийско-Ладожского (Ордовикского) глинта, 4 – граница Ордовикского плато, 5- местоположение ЛАЭС, 6- зона карстопроявлений (согласно Технический отчет...,2021)

Однако, как указано выше, результаты моделирования демонстрируют, что на краевых частях Ижорского плато (область разгрузки подземных вод) имеются обширные участки с подземной водой, способной к растворению карбонатных пород. Наличие агрессивных к известнякам и доломитам вод на севере и юге исследуемой области может быть обусловлено их приуроченностью к разломам, на севере плато огибает Ордовикский глинт, на юге – граница ордовикских пород с девонскими. Эти разломы являются маркером

того, что породы имеют высокую связь с дневной поверхностью. Повышенная трещиноватость пород в верхней части разреза и малая мощность на севере Ижорского плато также являются факторами приводящим к существенной агрессивности вод по отношению к карбонатам. Согласно Жданову С.В. [Жданов С.В., 2013] мощность горизонта увеличивается по падению от 5-10 м в приглинтовой полосе до 120 м в южной части территории за счет наращивания более молодых слоев ордовика.

Можно предположить, что воды, берущие начало в центральной части Ижорского плато, в месте их питания в районе деревни Бегуницы, проходят свой путь до места разгрузки, по пути насыщаясь кальцитом, но у границы глинта разбавляются атмосферными осадками и поверхностным стоком, и их агрессивность, в свою очередь, увеличивается.

Такой процесс подтверждается результатами термодинамического моделирования в ходе которого имитировалось смешение подземных вод пересыщенных по отношению к кальциту ($SI=1,15$) (не способных растворять известняк) и атмосферных осадков. Состав подземной воды и показатели температуры и рН представлены в таблице 3. Растворы смешивались в пропорциях 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30. Моделирование осуществлялась при помощи программы PHREEQC. Результаты представлены в виде графика ниже (рисунок 3.3.2).

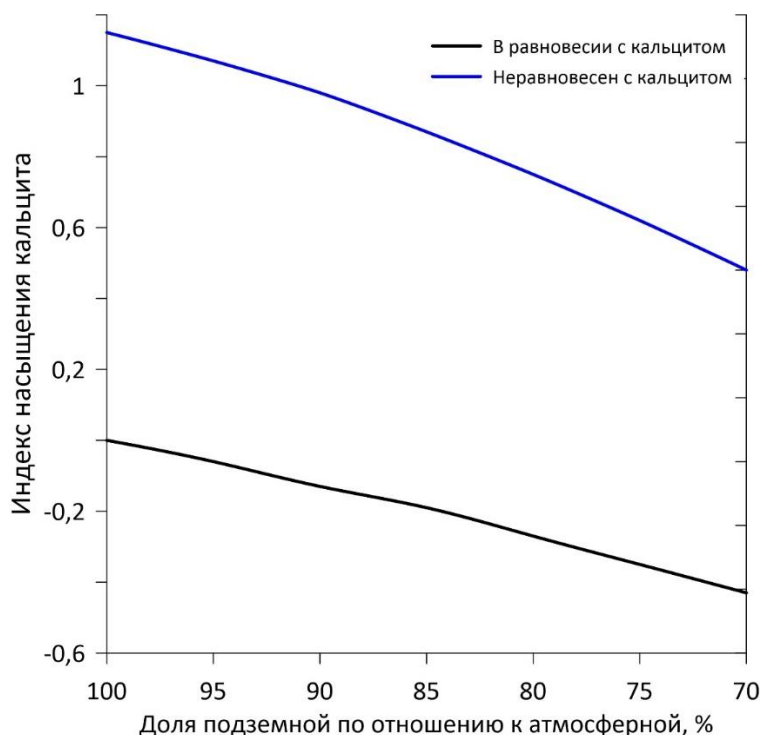


Рисунок 3.3.2 Зависимость пропорции подземных и атмосферных вод и результирующего индекса насыщения

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при смешении равновесного с кальцитом раствора с атмосферными осадками агрессивность воды, а соответственно и способность растворять породу, увеличивается.

Таблица 3 – Состав смешиваемых растворов

Показатель	Раствор 1 (подземная вода)	Раствор 2 (атмосферная вода)
Температура, °	6	7
pH	8.45	7
Рe	4	
HCO ₃ , мг/л	378.2	
Ca, мг/л	73	
Cl, мг/л	22.4	
K, мг/л	3	
Mg, мг/л	38	
Na, мг/л	7.4	
SO ₄ , мг/л	46.1	
NO ₃ , мг/л	0	
SI(Кальцит)	1.15	
SI(Доломит)	3.32	

4 РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

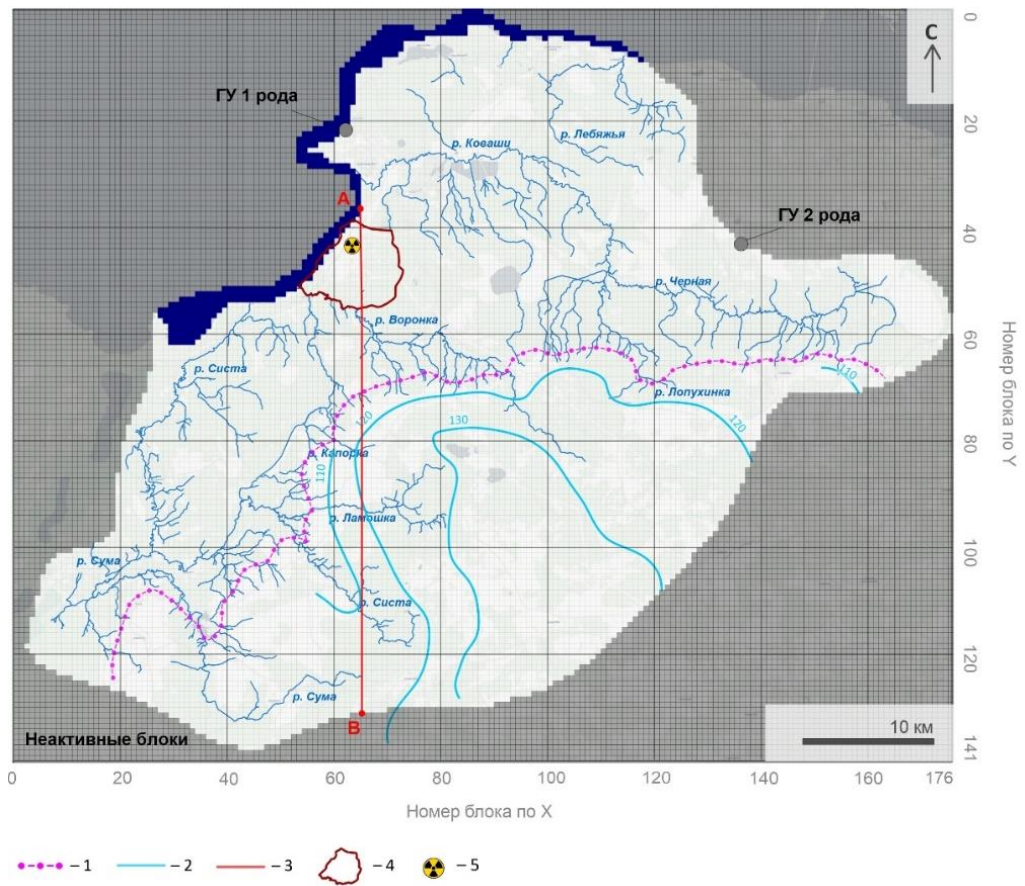
4.1 Границы модели. Обоснование границ в плане и разрезе

Модельная область включает территорию, находящуюся в пределах 30 км зоны от ЛАЭС-2. Общая площадь модели составляет 2105 км², протяженность с севера на юг около 70 км, с запада на восток около 56 км. Плановые границы региональной модели были установлены в соответствии с естественными границами фильтрационного потока первого от поверхности горизонта.

Так, северная граница модели отождествляется с побережьем Финского залива и задавалась граничным условием I рода ($H = \text{const}$, условие Дирихле [Окончательный технический отчет..., 2012]) Западная, южная и восточные границы проводились перпендикулярно линиям тока первого от поверхности водоносного комплекса (четвертичный и ОБГ) и задавались граничным условием II рода ($Q = 0$, условие Ньюмана [Окончательный технический отчет..., 2012]) (Рисунок 4.1).

К внутренним границам модели относятся многочисленные реки, дренирующие горизонты подземных вод. На модели они были воспроизведены с помощью граничного условия III рода (река). Положение рек в профиле контролировалось абсолютными отметками уреза воды.

Сверху региональная модель ограничена поверхностью рельефа. В качестве источника рельефа использовались данные радарной съемки SRTM [Грейсер Е.Л. и др., 1992]. Нижняя граница модели была проведена по подошве ломоносовского горизонта. Принимается, что толща вендских глин является регионально-выдержанной и выступает в роли непроницаемого водоупора. Конфигурация региональной гидродинамической модели представлена в плане регулярной сеткой с размером блока 400×400 м. По оси X модель разбита на 176 блоков, по оси Y на 141 В разрезе региональная модель состоит из 7 расчетных слоев. Соответствие модельных слоев и ГГЕ приведено в таблице 4.



1 – глинт Ижорского плато; 2 – фактические гидроизогипсы первого от поверхности водоносного горизонта; 3 – линия разреза; 4 – граница локальной модели; 5 – ЛАЭС-2

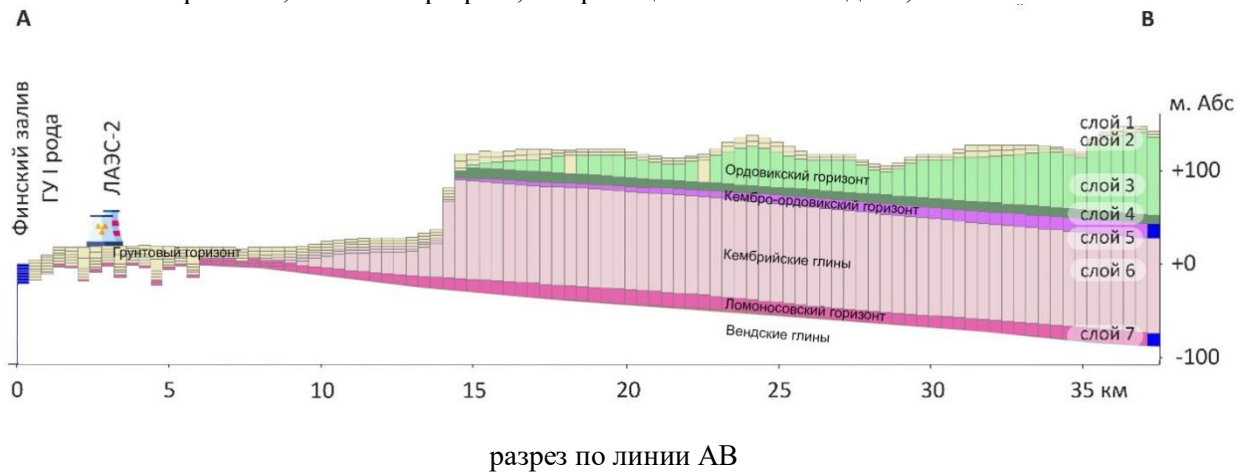


Рисунок 4.1 – Сеточная разбивка и граничные условия для региональной гидродинамической модели

Таблица 4 – Соответствие модельных слоев и ГГЕ

№ модельного слоя	№ГГЕ	Гидрогеологическая стратификация
1	1	Четвертичный водоносный горизонт
2		
3	2	Ордовикский водоносный горизонт (ОВГ)
4	3	Копорско-леэтсеский относительный водоупор
5	4	Кембро-ордовикский водоносный горизонт (КОВГ)
6	5	Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт
7	6	Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт

4.2 Начальные условия и параметрическое обоснование модели

В региональную гидродинамическую модель задавались следующие гидрогеологические параметры: начальные напоры, горизонтальный коэффициент фильтрации k_x , вертикальный коэффициент фильтрации k_z , величина инфильтрационного питания ϵ и параметр C , отвечающий за связь реки с подземными водами, водозаборы подземных вод, а также дрены от I очереди ЛАЭС-2. Значения задавались согласно литературным данным и корректировались во время калибровки модели [Карта...,1961], [Грейсер.Э.Л. и др., 1979], [Окончательный технический отчет..., 2012]

4.2.1 Начальные уровни подземных вод

Начальные уровни подземных вод в модель задавались для четвертичного, ордовикского, кембро-ордовикского и ломоносовского водоносных горизонтов на основании фактических карт гидроизогипс.

4.2.2 Модуль подземного стока и инфильтрационное питание

Модуль подземного стока является важной расходной характеристикой баланса, которая позволяет более качественно откалибровать гидрогеологическую модель. Область региональной модели включает в себя два контрастных с точки зрения гидрогеологии типа ландшафта. Около половины площади модели приурочено к предглинтовой низменности, а другая половина к карстовому Ижорскому плато. На Ижорском плато модуль подземного стока может составлять 50% и выше от суммы атмосферных осадков. В предглинтовой низменности, наоборот, преобладает поверхностный сток над подземным (доля подземного стока не превышает 20% от общего стока). Высокая доля подземного стока на Ижорском

плато свидетельствует о том, что в случае тяжелой запроектной аварии с осадением радионуклидов на земную поверхность, большая часть радиоактивных компонентов может проникнуть в водоносный горизонт.

На исследуемой части Ижорского плато, как и на всей его территории, под четвертичными отложениями залегают карстующиеся карбонатные породы ордовика. В местах распространения четвертичных отложений карст относится к типу закрытого известково-доломитового, т.к. мощность перекрывающей толщи в среднем составляет 1–7 м, местами достигая 15 м. На отдельных участках, где известняковые толщи перекрыты только почвенно-растительным слоем, тип карста близок к открытому/ задернованному известково-доломитовому.

По результатам полевых выездов, дешифрирования аэро- и космоснимков, изучения фондовых материалов [Карта...,1961] [Грейсер.Э.Л. и др., 1979], [P. Anderson Mary, W.Woessner William, J. Hunt Randall, 2015] была составлена карта карстопоявлений Ижорского плато (рисунок 4.2).

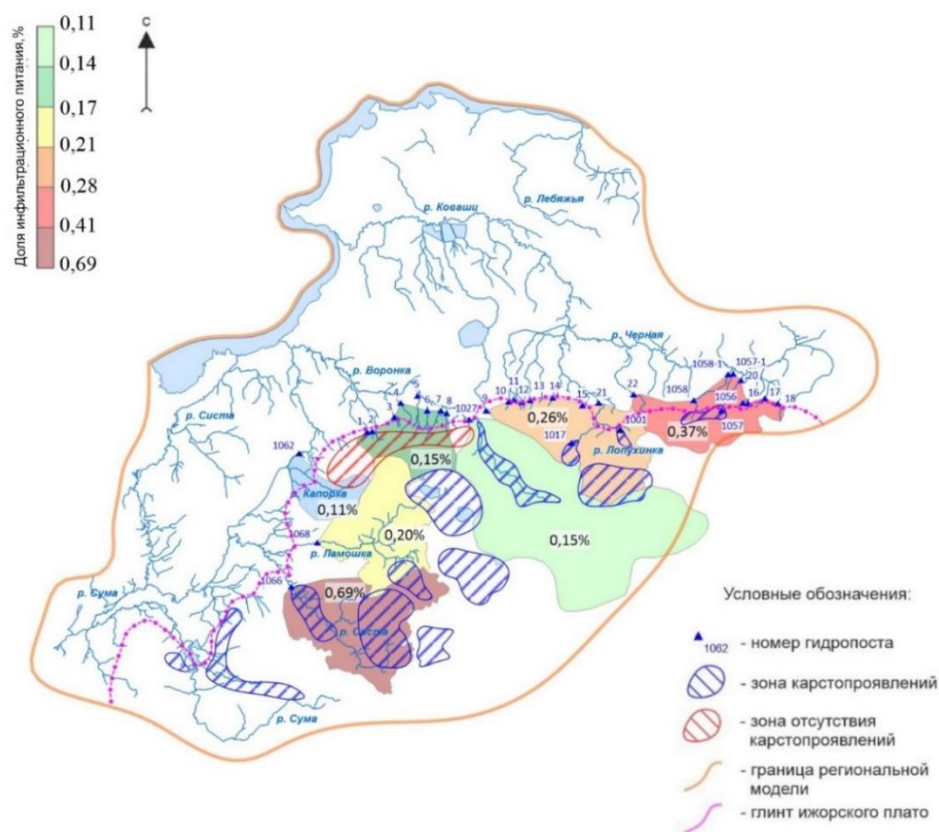


Рисунок 4.2 – Карта распределения величины модуля подземного стока и зон карстопоявлений

На основе топокарт и цифровой карты рельефа для каждого замыкающего гидропоста были оконтурены водосборные площади S . Для каждой площади, согласно формуле 5, была определена величина модуля подземного стока W (таблица 5):

$$W = \frac{Q \cdot 365}{S \cdot 10^3}, \quad (5)$$

где W – модуль подземного стока, мм/год; Q – подземный сток, м³/сут; S – площадь водосбора, км².

Таблица 5– Величина модуля подземного стока для выделенных водосборных площадей

Бассейн реки	№ гидропос та	Подземный сток, Q_{\min}		Площадь водосбора, S км ²	Модуль подземного стока, W	
		м ³ /сут	л/с		л/с/км ²	мм/год
Систа	1066	9.78E+04	1132	73.58	15.38	485
Ламошка	1068	2.25E+04	260	57.12	4.55	145
Притоки Воронки	1,2...8	8.71E+03	101	29	3.48	110
Верховье Воронки	1027	4.59E+04	531	157	3.38	105
Лопухинка	1017	1.60E+04	185			
	1001	1.12E+04	130			
	Σ	3.18E+04	368	61.4	6.00	190
Черная	1058	1.47E+04	170			
	1057	1.33E+04	154			
	1056	2.97E+03	34			
	Σ	3.10E+04	359	42	8.54	270

По данным [Сводный отчет...,1952] инфильтрационное питание для оставшейся части исследуемой территории было принято равным 79 мм/год (2,2E-4 м/сут).

На карте, приведенной на рисунок 4.2, прослеживается общая закономерность: области с повышенным модулем подземного стока (бассейны рек Систа, Черная) характеризуются зонами частых карстопроявлений. И, напротив, зоны с неактивным карстом или с его полным отсутствием (бассейн реки Воронка) характеризуются наименьшими значениями инфильтрации.

4.2.3 Фильтрационные параметры

Толщи, слагающие территорию исследования, имеют крайне контрастные фильтрационные характеристики. Сильная неоднородность проявляется как в плане, так и по глубине. В первую очередь, это связано с литологическим разнообразием пород: карбонаты, пески, глины, суглинки и пр. Значения горизонтального k_x и вертикального k_z коэффициентов фильтраций задавались в модель основываясь на литературных данных о регионе исследования и уточнялись в процессе калибровки (таблица 6).

Таблица 6 – Коэффициенты фильтрации k_x , k_z для модели

№ модельного слоя	ГГЕ	Четвертичный водоносный горизонт	k_x , м/сут	k_z , м/сут
1	1	Четвертичный водоносный горизонт	2	0,4
2	1	Четвертичный водоносный горизонт	2	0,4
3	2	Ордовикский водоносный горизонт (ОВГ)	20–330	
4	3	Копорско-леэтсеский относительный водоупор	1E-06 – 5E-02	
5	4	Кембро-ордовикский водоносный горизонт (КОВГ)	1	
6	5	Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт	1E-06	
7	6	Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт	1	0,2

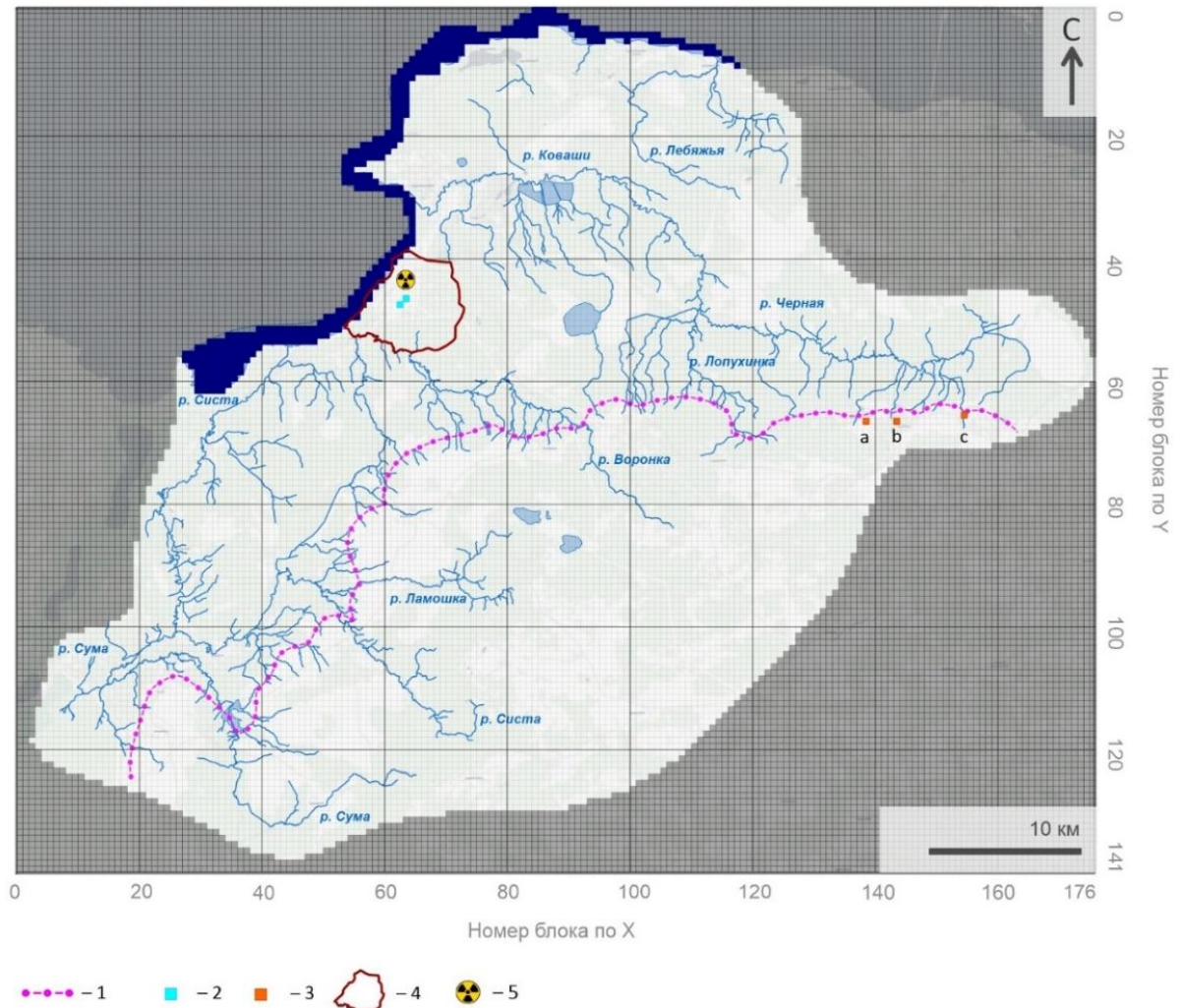
Особое внимание было уделено коэффициентам фильтрации третьего модельного слоя (ОВГ). Помимо трещиноватости, фильтрационные свойства ордовикских пород также контролируются их кавернозностью и закарстованностью.

4.3 Водозаборы подземных вод и дренаж

На Ижорском плато в качестве источников централизованного водоснабжения используются подземные воды. Большинство водозаборов оборудовано на ОВГ (ГГЕ 2), в меньшей степени на КОВГ (ГГЕ 4). Подземные воды используются для водоснабжения населения как в пределах Ижорского плато, так и для населённых пунктов предглинтовой местности. В пределах изучаемой местности расположены три крупных централизованных источника водоснабжения (рисунок 4.3):

1. Варваринский водозабор, $Q = 12\,000\text{ м}^3/\text{сут}$;
2. Гостилицкий водозабор, $Q = 4\,000\text{ м}^3/\text{сут}$;

3. Вильповицкий водозабор, $Q = 22\,000\text{ м}^3/\text{сут}$;



1 – глинт Ижорского плато; 2 – дрены котлована I очереди ЛАЭС-2; 3 – региональный водозабор (а - Варваринский, б – Гостилицкий, с – Вильповицкий); 4 – граница локальной модели; 5 – ЛАЭС-2

Рисунок 4.3 –Положение водозаборов и дрен на региональной модели

В модель задавались средние дебиты водозаборов за 1950–1990 г.г., т.к. этому периоду отвечают среднемноголетние величины расходов гидропостов [Грейсер.Э.Л. и др., 1979]. Также на исследуемой территории распространены децентрализованные источники водоснабжения, используемые частными домохозяйствами. Как правило, их водоотбор не превышает $100\text{ м}^3/\text{сут}$, и в региональной гидродинамической модели их расходы не учитывались. Также в региональной модели имитировалась работа дренажных сооружений от I очереди ЛАЭС-2. Абсолютная отметка дренирования составила 8 м.

4.4 Калибровка и валидация модели

Калибровка региональной гидродинамической модели проводилась в стационарном режиме путем приближения к наблюдаемым модельных значений уровней подземных вод и расходов в реках. Зафиксировав значение величины модуля подземного стока W (таблица 5), подбирались такие коэффициенты фильтрации k_x k_z , чтобы модельные значения напоров повторяли измеренные.

Калибровка уровней проводилась по трем водоносным горизонтам: ОВГ (ГГЕ 2), КОВГ (ГГЕ 4) и Ломоносовский (ГГЕ 6). Сопоставление расчетных и фактических [Applied Groundwater, 2015] напоров в трех горизонтах приведено на рисунках 4.4.1–4.4.3. Из представленных рисунков видно, что структура потока в каждом из них отлична. Это указывает на хорошую изолированность горизонтов. В качестве региональных водоупоров выступают Копорско-леэтские сланцы ордовикского возраста (ГГЕ 3), и кембрийские глины (ГГЕ5).

В процессе калибровки удалось довольно точно воспроизвести как структуру фильтрационного потока, так и абсолютные значения напоров. Сопоставление расходных характеристик приведено в таблице 7. Расчетные и фактические модули подземного стока для контрольных водосборных площадей находят хорошее соответствие. Различия не превышают 9 %.

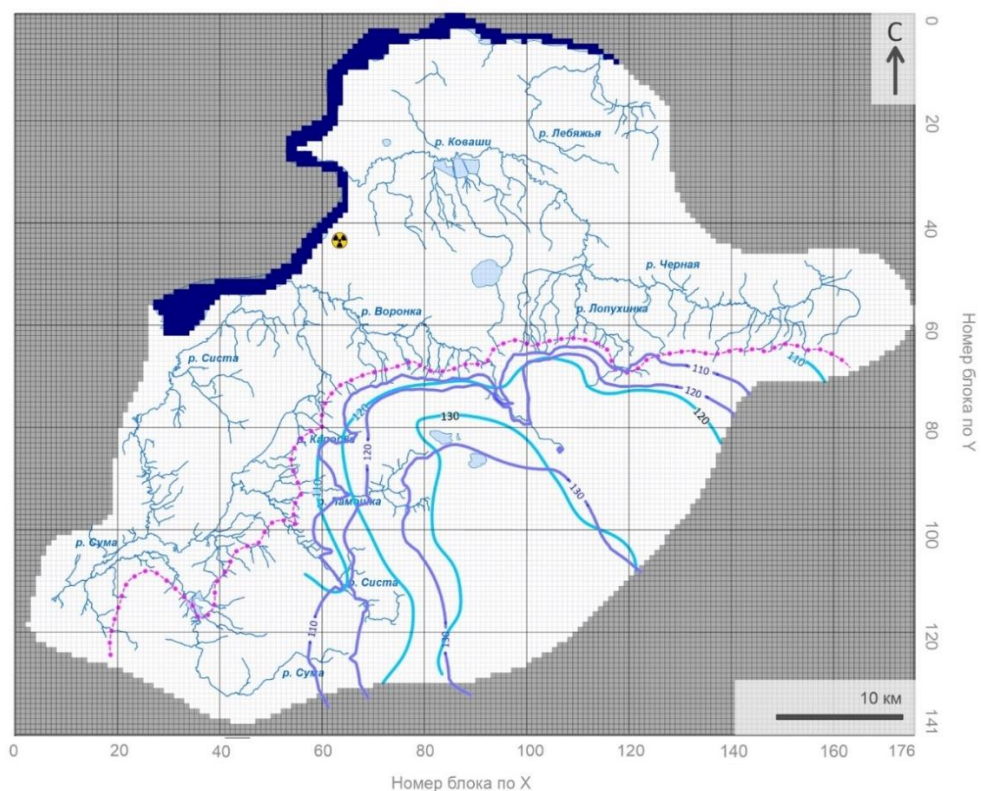
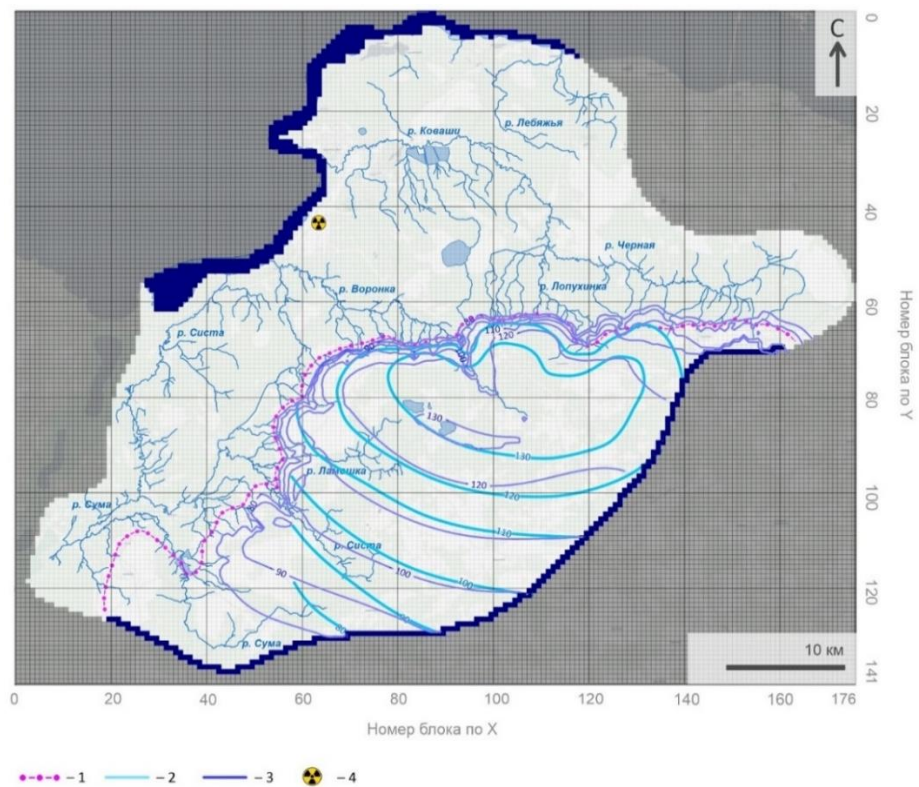
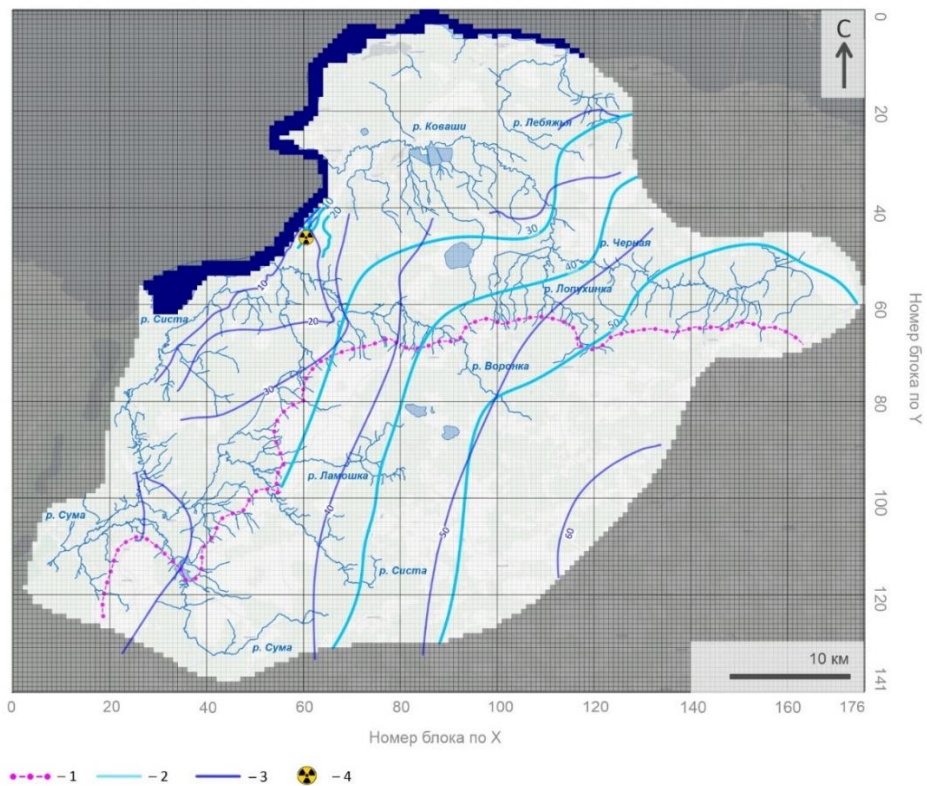


Рисунок 4.4.1 – Карта наблюдаемых и модельных напоров ОВГ (ГГЕ 2, 3-й слой)



1 – глинт Ижорского плато; 2 – наблюдаемые напоры; 3 – модельные напоры; 4 – ЛАЭС-2
 Рисунок 4.4.2 – Карта наблюдаемых и модельных напоров КОВГ (ГТЕ 4, 5-й слой)



1 – глинт Ижорского плато; 2 – наблюдаемые напоры; 3 – модельные напоры; 4 – ЛАЭС-2
 Рисунок 4.4.3 – Карта наблюдаемых и модельных напоров ломоносовского водоносного горизонта (ГТЕ 6, 7-й слой)

Таблица 7 – Соответствие расчетных и фактических величин подземного стока

Бассейн реки	Подземный сток, м ³ /сут*		Площадь водосбора км ²	Разница %
	Фактический [[Грейсер.Э.Л. и др., 1979]]	Расчетный		
Систа	9,78E+04	9,67E+04	73,58	1
Ламошка	2,25E+04	2,10E+04	57,12	7
Притоки Воронка	8,71E+03	9,31E+03	29	-7
Верховье Воронки	4,59E+04	4,16E+04	157	9
Лопухинка	4,07E+04	4,33E+04	61,4	-6
Черная	3,10E+04	2,82E+04	42	9
Среднее				6,5

Калибровка гидродинамической модели происходила в основном за счет подбора фильтрационных параметров в 3 и 4 модельных слоях (ГГЕ 2 и ГГЕ 3). Коэффициенты фильтрации 3 модельного слоя контролируют положение уровней в ОВГ (ГГЕ 2). На Рисунке 4.4.5 приведена структура фильтрационной неоднородности 3 слоя, принятая по итогу калибровки.

Коэффициенты фильтрации 4 модельного слоя (сланцы) контролируют положение напоров КОВГ. По данным фактических наблюдений, в районе озер Заозерское и Теглицкое величины напоров ОВГ и КОВГ принимают одинаковые абсолютные значения. Это может свидетельствовать о повышенном гидродинамическом обмене между двумя водоносными горизонтами, осуществляющемся через копорско-леэтсеский относительный водоупор – модельный слой 4. На этом основании в слой 4 была задана область, отвечающая повышенному вертикальному коэффициенту фильтрации 0,05 м/сут (рисунок 4.4.6). Результирующие значения k_x , k_z приведены в таблице 8.

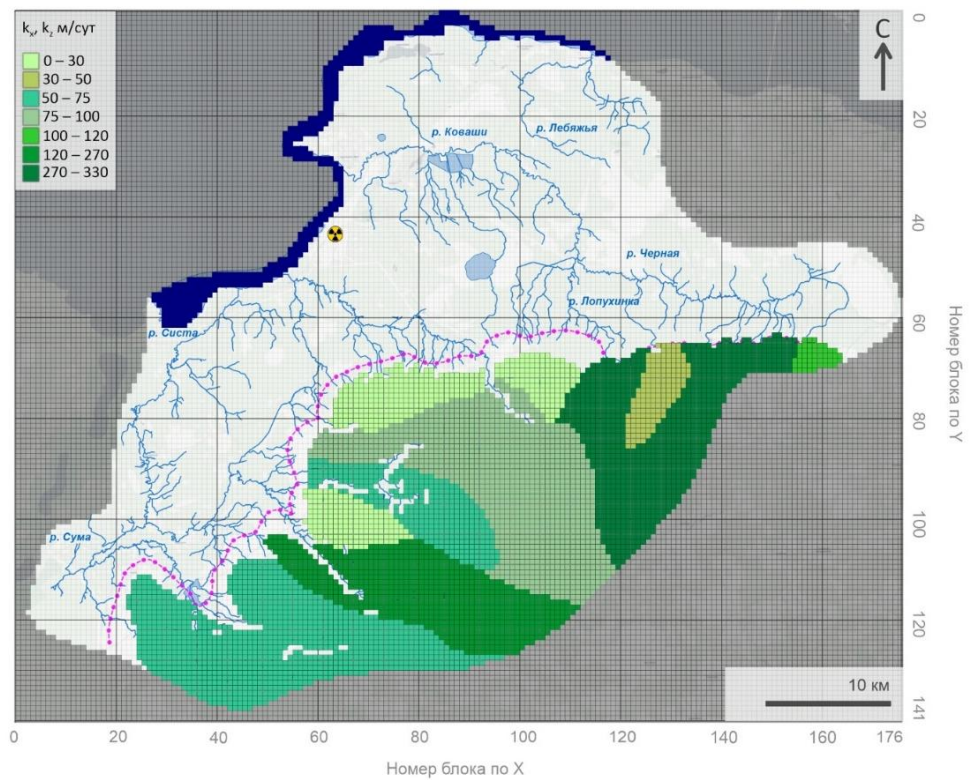


Рисунок 4.4.5 – Фильтрационная неоднородность карстующихся пород ОВГ, принятая по результатам калибровки, 3-й модельный слой

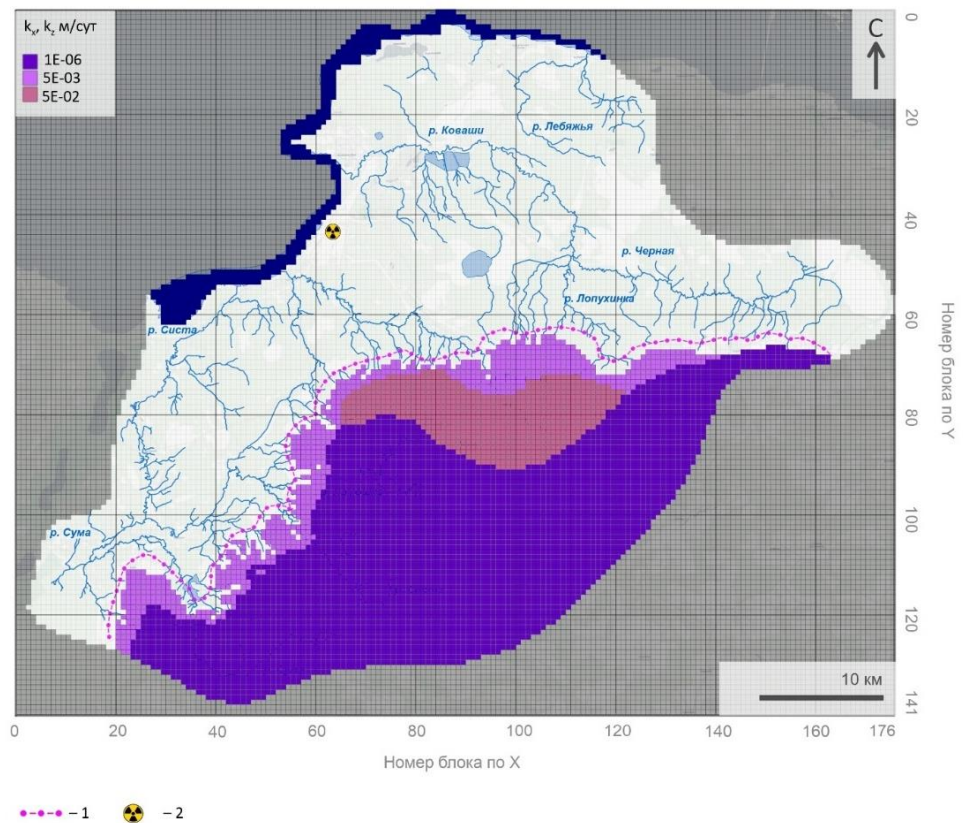


Рисунок 4.4.6 – Фильтрационная неоднородность копорско-летсеского относительного водоупора, принятая по результатам калибровки, 4-й модельный слой

Таблица 8 – Коэффициенты фильтрации k_x , k_z для гидродинамической модели принятые по результатам калибровки

№ модельного слоя	ГГЕ	Четвертичный водоносный горизонт	k_x , м/сут	k_z , м/сут
1	1	Четвертичный водоносный горизонт	2	0,4
2	1	Четвертичный водоносный горизонт	2	0,4
3	2	Ордовикский водоносный горизонт (ОВГ)	20–330	
4	3	Копорско-леэтсеский относительный водоупор	1E-06 – 5E-02	
5	4	Кембро-ордовикский водоносный горизонт (КОВГ)	1	
6	5	Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт	1E-06	
7	6	Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт	1	0,2

Диапазон значений кондактанса (C) для рек по итогам калибровки был принят в диапазоне от 200 до 6000 м²/сут.

4.5 Водный баланс

На откалиброванной модели был оценен водный баланс. Характеристика основных компонент водного баланса приведена в таблице 9. Так, согласно расчетам, главным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки (инфильтрационное питание) – на их долю приходится до 87 % всех поступлений в модельную область. Также, подземные воды на 13% восполняют свои запасы за счет речных вод. Несмотря на это, реки преимущественно выполняют роль дрен и собирают 93,3% объема воды, поступившего в пласт. В общем балансе модели расходы питьевых водозаборов и дрен играют подчиненную роль.

Таблица 9 – Концептуальная водно-балансовая характеристика исследуемой территории в стационарной постановке*

Компоненты водного баланса	Поступило в модель		Вышло из модели	
	м ³ /сут	%	м ³ /сут	%
Инфильтрация	5,5E+05	86,72	–	–
Реки	8,4E+04	13,16	5,9E+05	93,3
ГУ I рода	7,9E+02	0,12	1,9E+04	2,9
Водозабор	–	–	2,3E+04	3,6
Дрены	–	–	1,1E+03	0,2
Σ	6,3E+05	100	6,3E+05	100

5 ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ВОДОЗАБОРОВ

5.1 Факторы, сдерживающие загрязнение подземных вод

На созданной и откалиброванной модели рассматривался сценарий воздушного выброса и последующего газоаэрозольного осаждения радионуклидов на земную поверхность. В расчетах делалась предпосылка, что радионуклиды, осаждаясь на земную поверхность с дождем, напрямую поступают на первый от поверхности водоносный горизонт. Работа водозаборов в КОВГ способствует довольно быстрому подтягиванию (перетоку) загрязненной воды из верхнего слоя (ОГ).

Для оценки защищенности водозаборов важно оценить влияние различных факторов на время поступления и концентрацию загрязненной воды в водозаборе. Прежде всего, защищенность определяется мощностью и параметрами разделяющего слоя, а также соотношением вертикального к горизонтальному потокам ПВ.

На рисунке 5.1.1 видно, что при залповом выпадении радионуклидов на Ижорское плато, они достаточно быстро появляются в нижнем водоносном горизонте. Время появления и концентрация контролируется свойствами разделяющего слоя. Также видно, что во времени концентрация радионуклидов в водозаборной воде уменьшается. Это связано с тем, что первоначальный источник (то, что выпало на поверхность), разбавляется атмосферными осадками и сносится потоком подземных вод.

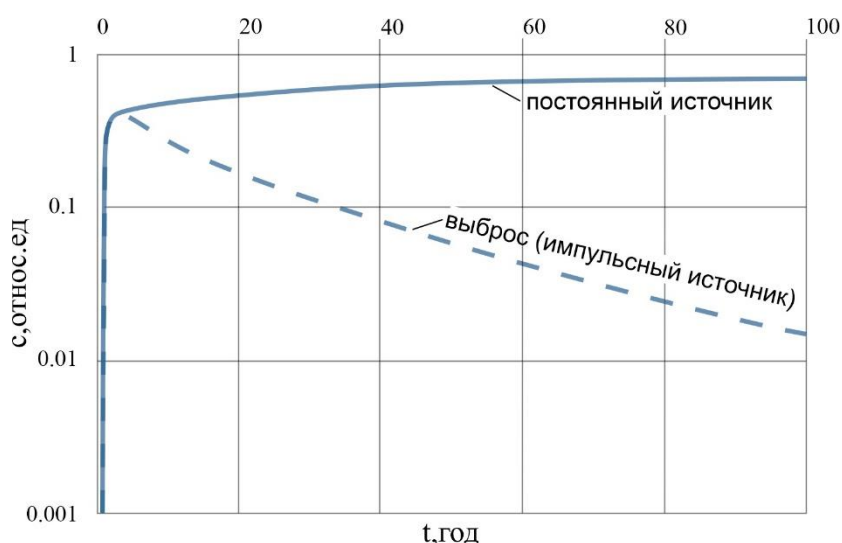


Рисунок 5.1.1– Изменение концентрации радионуклидов во времени в водозаборе КОВГ

Причём, время проникновения загрязнения через водоупорный слой рассчитывается по формуле 6.

$$t_b = \frac{m^2 \cdot n_a}{k * dH}, \quad (6)$$

где t_b – время проникновения загрязнения через водоупорный слой, сут; m – минимальная мощность водоупорного слоя, м; n_a – активная пористость водоупорного слоя, м³/ м³; k – коэффициент фильтрации водоупорного слоя, м/сут; dH – разница между отметками статического уровня в верхнем водоносном горизонте и динамического уровня в скважине, м.

Следующим фактором является период полураспада радионуклида-загрязнителя. Распад приводит к уменьшению общей активности радионуклидов в водоносном горизонте с течением времени. Например, высокая мобильность йода ограничена коротким периодом полураспада, что не позволяет ему мигрировать на значительные расстояния. Принято считать, что за 10 периодов полураспада происходит потеря все накопленной активности радионуклида. Если бы распада не происходило, то, концентрация Йода 131 за 10 периодов полураспада в КОВГ была бы в 840 раз больше, чем загрязнение с учетом распада (рисунок 5.1.2).

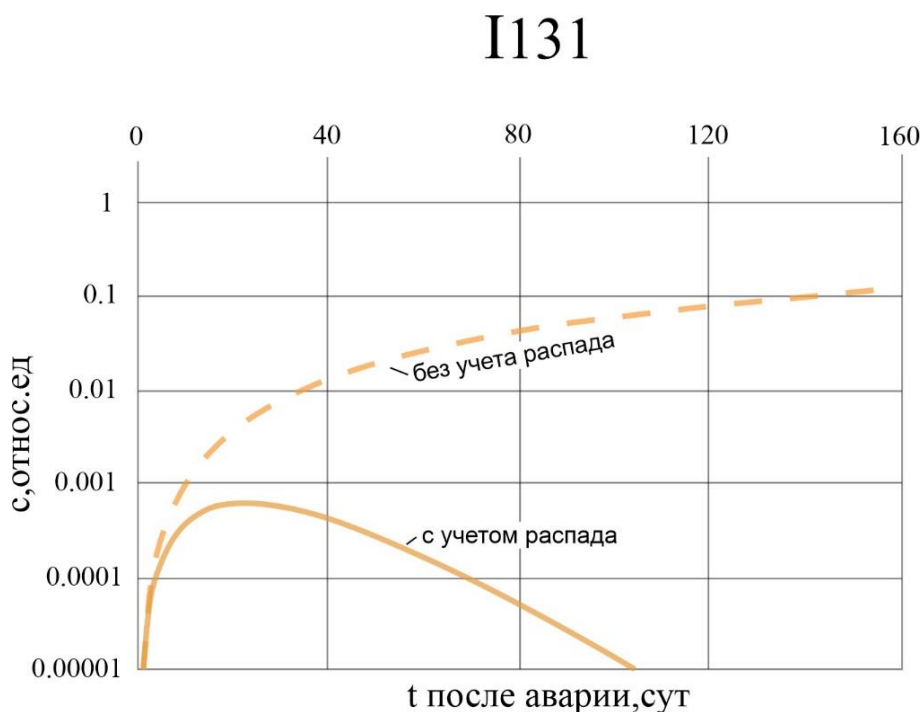


Рисунок 5.1.2 – Изменение концентрации радионуклидов во времени в водозаборе КОВГ

Сорбция радионуклидов на породе также способствует значительному снижению скоростей миграции радионуклидов и их локализации в месте поступления. На рисунке

5.1.3 видно, что чем меньше коэффициент распределения, тем меньше концентрация и больше время прихода радионуклида.

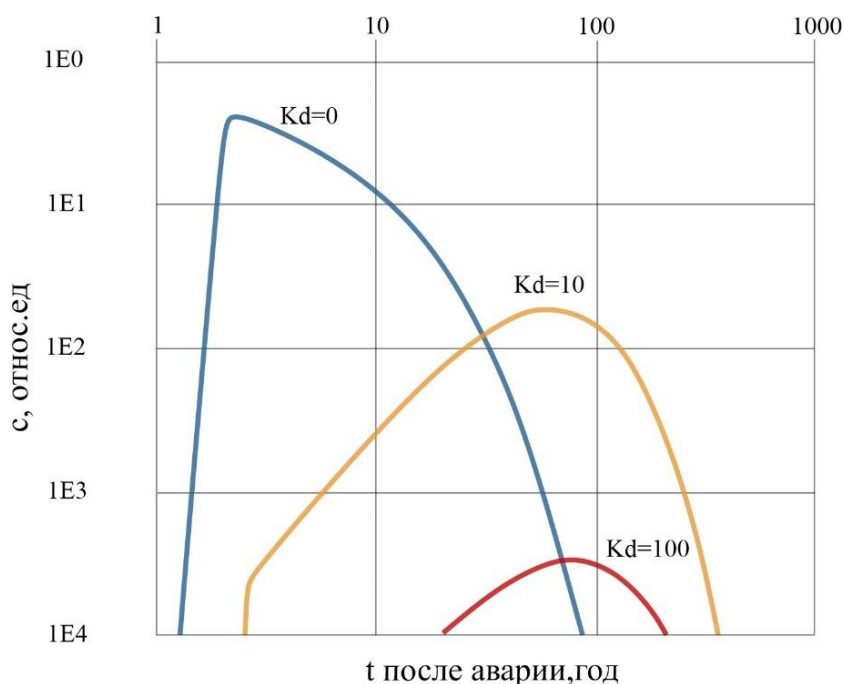


Рисунок 5.1.3 – Изменение концентрации радионуклидов во времени в водозаборе КОВГ

Таким образом, комбинация всех факторов контролируют максимальную объемную активность изотопов в подземных водах.

5.2 Оценка последствий загрязнения подземных вод радионуклидами при тяжелой запроектной аварии

Для оценки последствий загрязнения подземных вод радионуклидами при тяжелой запроектной аварии на ЛАЭС-2 была использована региональная гидрогеологическая модель. На модели рассматривался сценарий воздушного выброса и последующего газоаerosольного осаждения радионуклидов на земную поверхность в радиусе 30 км от ЛАЭС-2. В расчетах делалась предпосылка, что радионуклиды, осаждаясь на земную поверхность с дождем, напрямую поступают на уровень грунтовых вод. Несмотря на высокий консерватизм данного подхода, он справедливо может применяться для инженерных оценок, особенно в условиях закарстованных известняков Ижорского плато.

Развитие гипотетического ореола загрязнения подземных вод после тяжелой запроектной аварии на ЛАЭС-2 исследовалось как в целом по площади модели, так и в

отдельных контрольных точках, которые представляют первостепенные значения для последующей оценки дозовой нагрузки на население.

В качестве контрольных точек были выбраны действующие и проектируемые подземные водозаборы централизованного водоснабжения. Кроме того, на модели оценивалась удельная активность, которая выносится в речную сеть вместе с подземными водами.

Известно, что для целей водоснабжения на Ижорском плато используются подземные воды преимущественно ордовикского водоносного горизонта, реже кембро-ордовикского горизонта. На сегодняшний день крупнейший водозаборный узел вблизи 30 км зоны ЛАЭС-2 представляет собой рассредоточенный каптаж родников вблизи населенных пунктов Варвароси, Гостилицы, Вильповицы. Данный водозабор используется для водоснабжения Ижорского плато, а также г.г. Кронштадт, Ломоносов, Петродворец. С целью оценить наибольшее загрязнение подземных вод радионуклидами расположение контрольной точки Т₁ (см. рисунок 5.2.1) выбрано у водозабора Вильповицы, находящегося на границе 30 км зоны.

Для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Сосновый Бор и ЛАЭС-2 вблизи пос. Карстолово разработан проект водозабора с проектной производительностью 26 000 м³/сут, оборудованный на верхний интервал ОВГ. Водозабор представлен тремя узлами: северным, центральным и южным (на рисунке 5.1 контрольная точка Т₂). Для условий чрезвычайной ситуации дополнительные 10 000 м³/сут должны быть обеспечены за счет ресурсов более защищенных от поверхностного загрязнения КОВГ и нижнего интервала ОВГ (Контрольная точка Т₃ на рисунке 5.1) [Синдаловский Л.Н., 2021].

Таблица 10 – Реестр контрольных точек для региональной модели

№ п.п.	Индекс контрольной точки	Местоположение	Водоносный горизонт	Координаты UTM WGS 84		Дебит Q, м ³ /сут
				X	Y	
Действующие водозаборы						
1	Т ₁	д. Варвароси	верхний интервал ОВГ	645126	6626394	12 000
2		д. Гостилицы	верхний интервал ОВГ	647081	6626385	4 000
3		д. Вильповицы	верхний интервал ОВГ	651495	6626751	22 000
Проектные водозаборы						
4	Т ₂	пос. Карстолово	нижний интервал ОВГ	622297	6607579	9 000
5		пос. Карстолово	нижний интервал ОВГ	622297	6607148	10 000
6		пос. Карстолово	нижний интервал ОВГ	622297	6606781	7 000
7	Т ₃	пос. Карстолово	КОВГ	621907	6607196	10 000

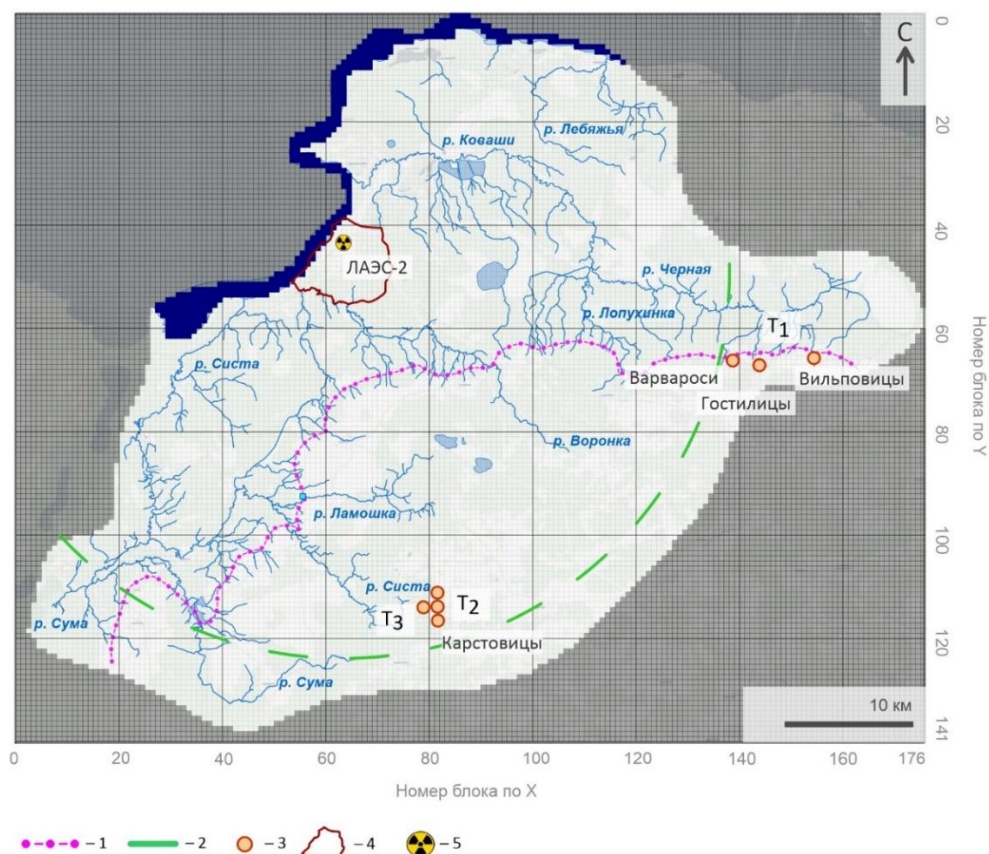


Рисунок 5.2.1– Карта расположения контрольных точек для оценки активности радионуклидов в подземных водах

При возникновении тяжелой запроектной аварии рассматривается высвобождение радионуклидов в атмосферу и их последующее соосаждение на дневную поверхность вместе с газоаэрозольным облаком. Высвобождаемая в окружающую среду активность дозообразующих радионуклидов приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Высвободившаяся активность за 24 часа при тяжелой запроектной аварии на ЛАЭС-2.

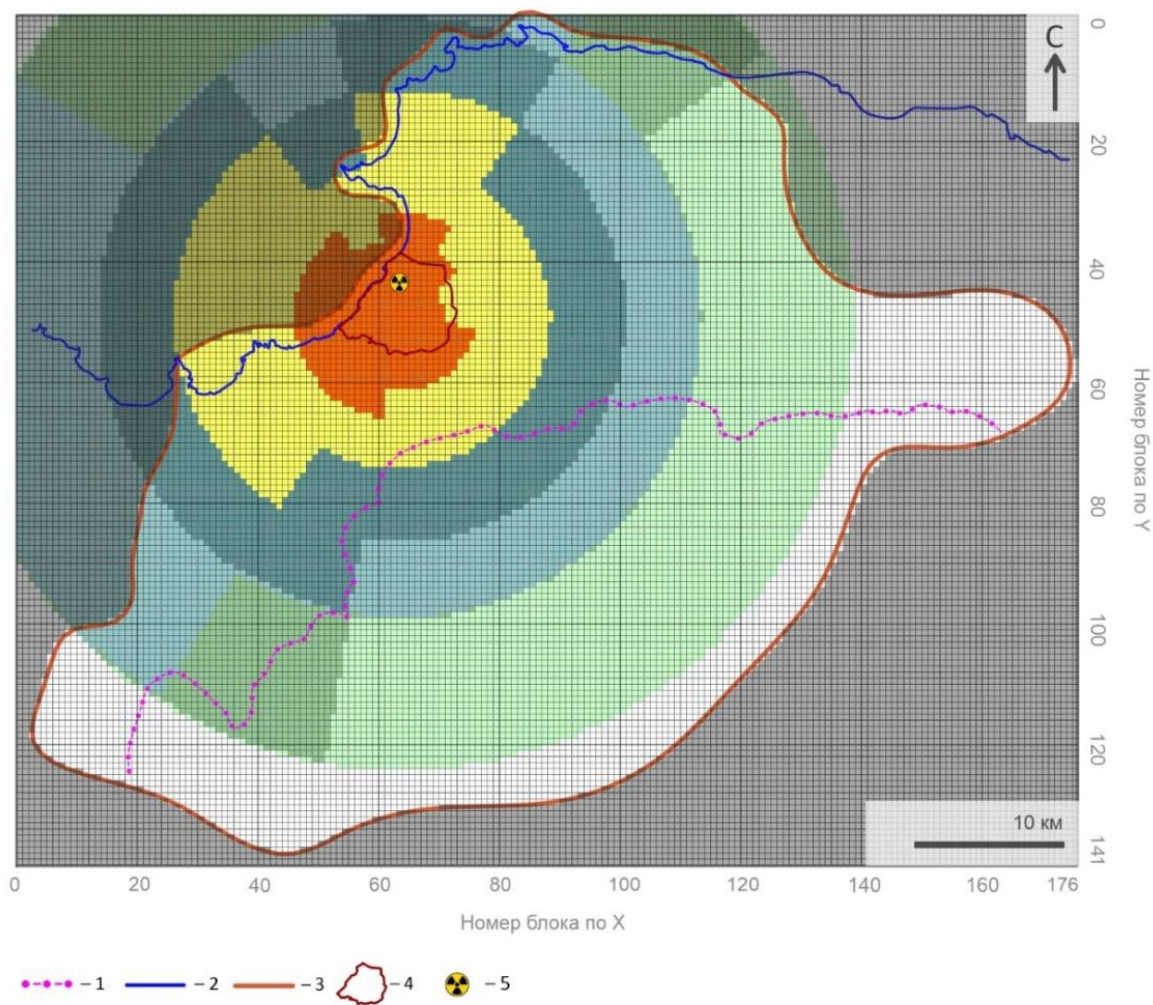
Изотоп	Активность (А), Бк	T _{1/2} , год	λ, сут ⁻¹
Cs-134	7,4E+12	2,06	9,2E-4
Cs-137	5,62E+12	30,0	6,3E-5
Sr-90	4,21E+11	29,12	6,5E-5
I-131	8,82E+13	2,2E-2	8,6E-2

Расчетные плотности 24-х часового выпадения изотопов Sr-90, Cs-134, Cs-137, I-131 использовались далее в миграционной модели (см. рисунок 5.2.2). Отметим, что

поступление радионуклидов в подземные воды имитировалось на модели вместе с поступлением инфильтрационного питания, т.е. задавалась объемная активность радионуклида в инфильтрационных водах. Если предположить, что аварийный выброс радионуклидов происходил в течение 1 суток, то начальную концентрацию радионуклидов в инфильтрационных водах (W) для каждого i -го модельного блока можно рассчитать по уравнению (7).

$$W_i = \frac{M_i}{R_i t}, \quad (7)$$

где W_i – объемная активность радионуклида в инфильтрационных водах в i -ом модельном блоке, Бк/м³; M_i – плотность выпадения за 24 часа аварии в i -ом модельном блоке, Бк/м²; R_i – инфильтрационное питание в i -ом модельном блоке, м/сут; t – время аварии (принято 1 сут).



Плотность выпадения радионуклидов, Бк/м²

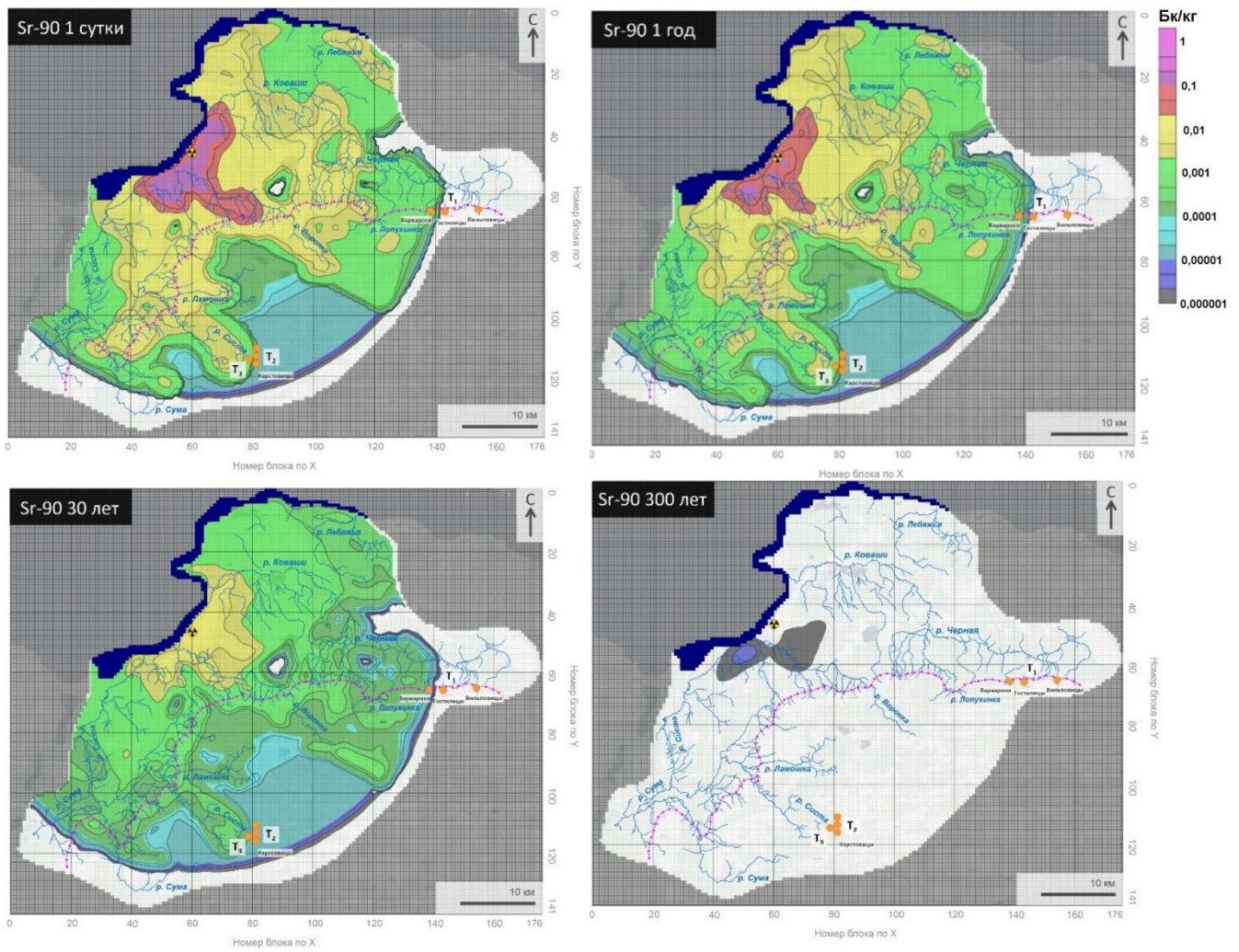
обозначение	Cs-134		Cs-137		Sr-90		I-131	
	от	до	от	до	от	до	от	до
	≤ 5.2E-03		≤ 3.9E-03		≤ 2.9E-04		≤ 6.2E-02	
	5.18E-03	1.1E+04	3.9E-03	8.4E+03	2.9E-04	6.3E+02	6.2E-02	1.3E+05
	1.1E+04	1.5E+04	8.4E+03	1.1E+04	6.3E+02	8.4E+02	1.3E+05	1.8E+05
	1.5E+04	3.0E+04	1.1E+04	2.2E+04	8.4E+02	1.7E+03	1.8E+05	3.5E+05
	3.0E+04	5.2E+04	2.2E+04	3.9E+04	1.7E+03	2.9E+03	3.5E+05	6.2E+05
	5.2E+04	1.5E+05	3.9E+04	1.1E+05	2.9E+03	8.4E+03	6.2E+05	1.8E+06
	1.5E+05	7.4E+07	1.1E+05	5.6E+07	8.4E+03	4.2E+06	1.8E+06	8.8E+08

1 – глинт; 2 – контур Финского залива; 3 – граница региональной модели; 4 граница локальной модели;
5 – ЛАЭС-2

Рисунок 5.2.2– Карта плотности выпадения (M) при ТЗПА на модельную область

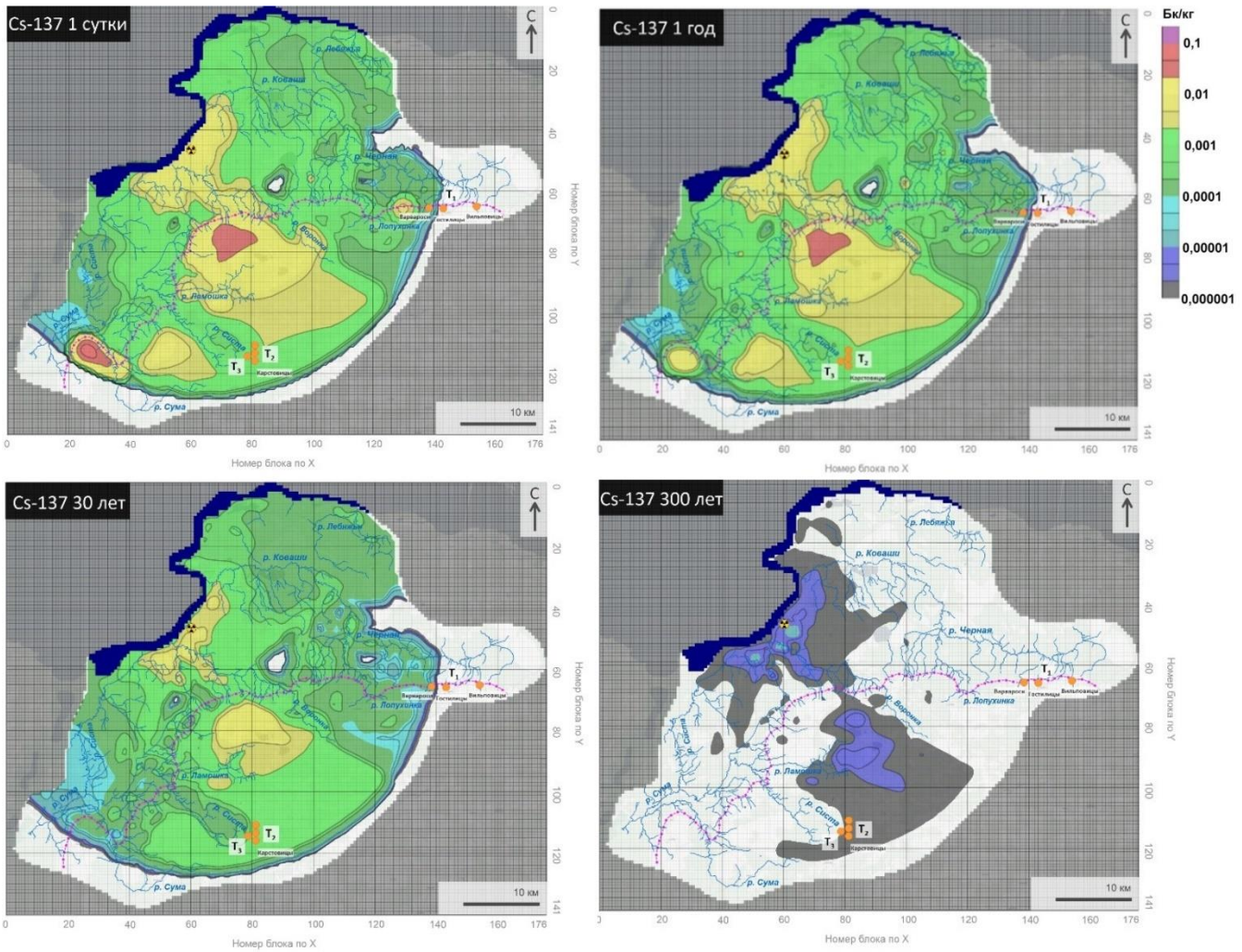
5.3 Результаты расчета на миграционной модели

Результаты миграции I-131, Cs-134, Cs-137, Sr-90 в подземных водах при ТЗПА представлены на рисунок 5.3.1 –5.3.4 ниже.



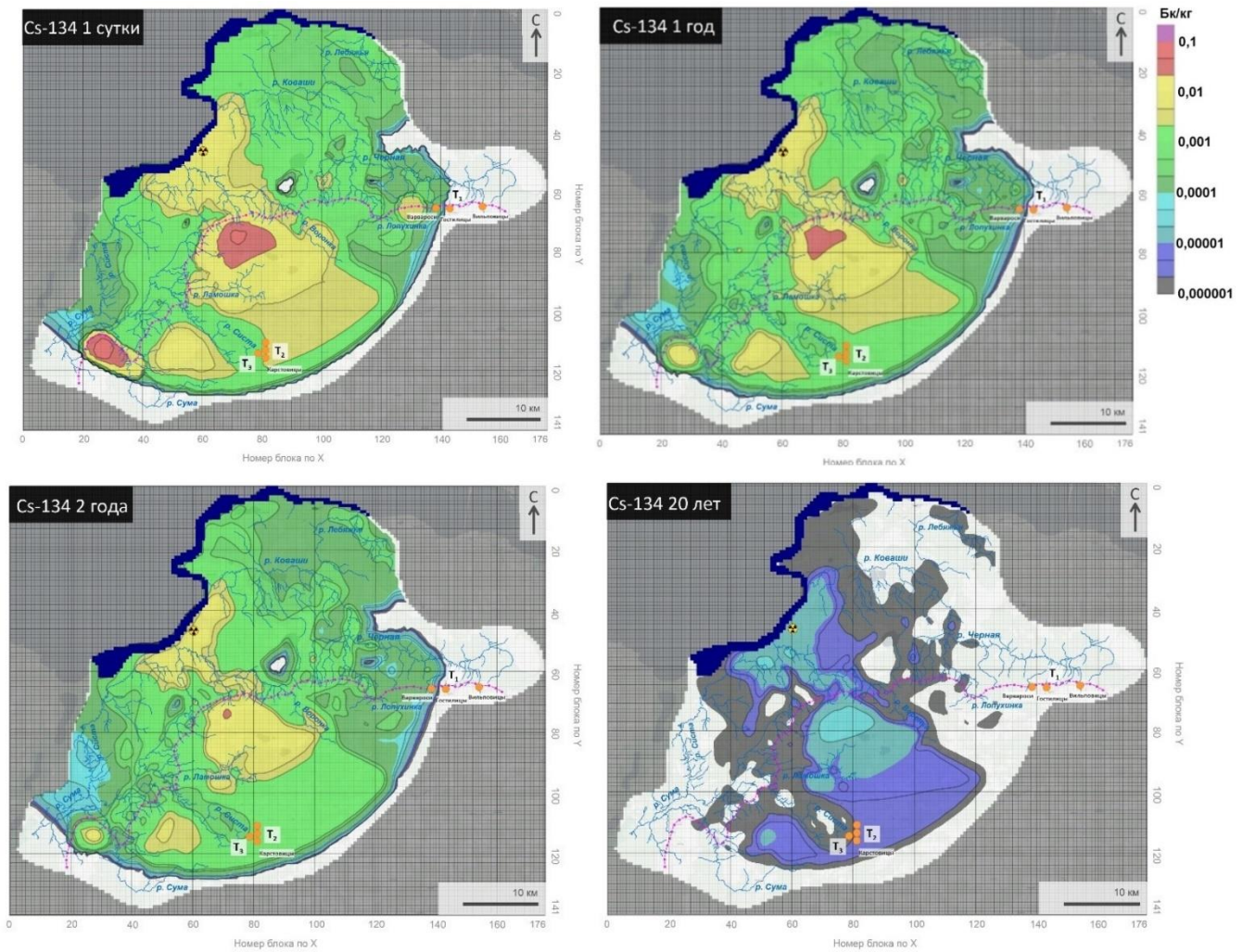
расчеты приведены на 1 сутки, 1, 30 и 300 лет после аварии

Рисунок 5.3.1 – Удельная активность Sr-90 (Бк/кг) в подземных водах при выпадении газоаэрозольного облака в пределах 30 км зоны вокруг ЛАЭС-2



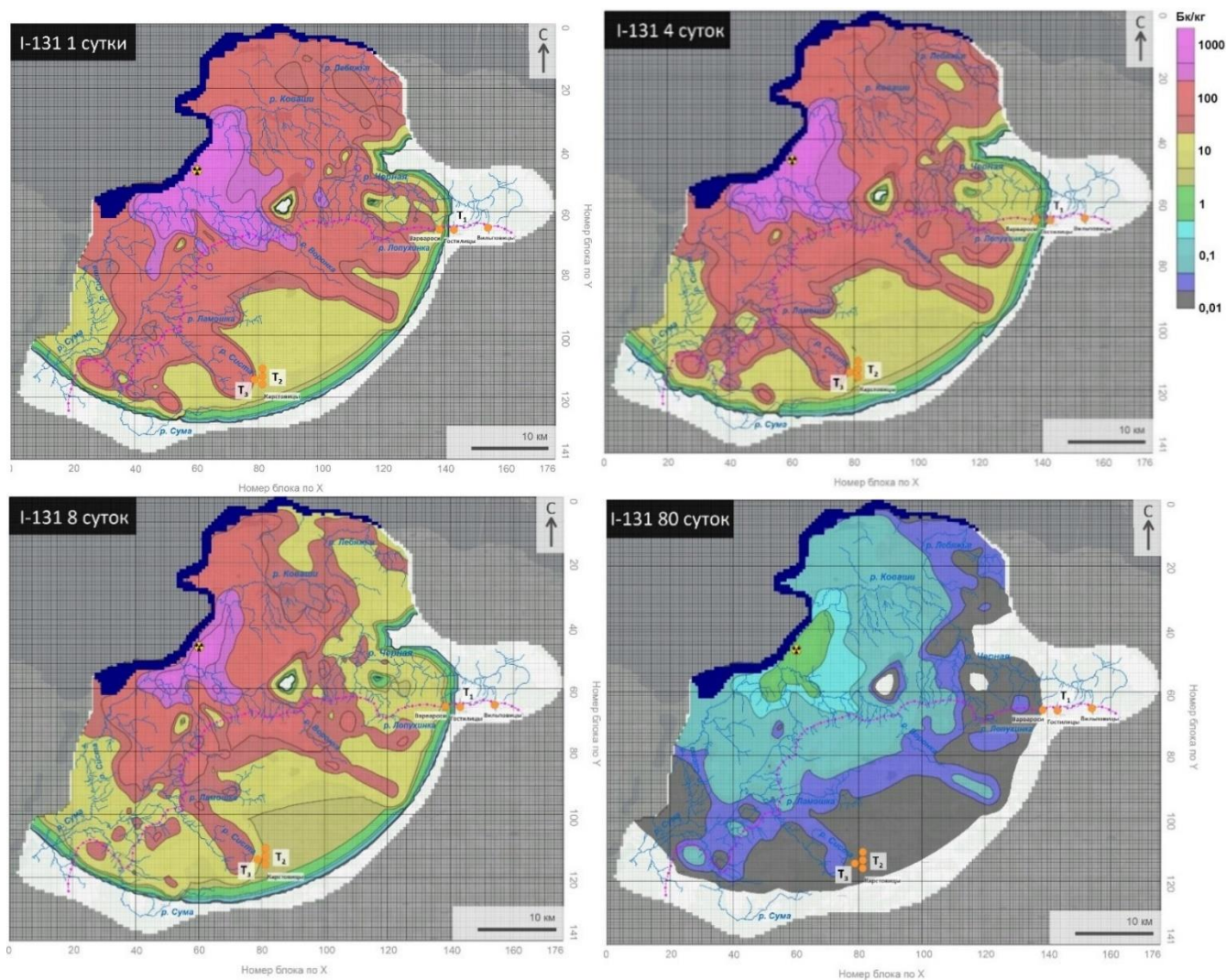
расчеты приведены на 1 сутки, 1, 30 и 300 лет после аварии

Рисунок 5.3.2 – Удельная активность Cs-137 (Бк/кг) в подземных водах при выпадении газоаerosольного облака в пределах 30 км зоны вокруг ЛАЭС-2



расчеты приведены на 1 сутки, 1, 2 и 20 лет после аварии

Рисунок 5.3.3 – Удельная активность Cs-134 (Бк/кг) в подземных водах при выпадении газозеролильного облака в пределах 30 км зоны вокруг ЛАЭС-2



расчеты приведены на 1, 4, 8 и 80 суток после аварии

Рисунок 5.3.4 – Удельная активность I-131 (Бк/кг) в подземных водах при выпадении газоаerosольного облака в пределах 30 км зоны вокруг ЛАЭС-2

Начальная максимальная концентрация изотопа в воде зависит не только от поступившей после аварии активности, но и от сорбционных свойств породы, а также от мощности водоносного горизонта. Так, при поступлении удельной активности с атмосферными осадками, ее значительная доля сразу же сорбируется на вмещающей породе, и только часть от начальной удельной активности остается в поровой воде и способна к миграции. Также очевидно, что поступление удельной активности в мощный водоносный горизонт приведет к значительно большему разбавлению, нежели в случае с мало обводненным горизонтом. Таким образом, комбинация плотности выпадения, сорбционных свойств пород и мощности водоносного горизонта контролируют максимальную удельную активность изотопов в подземных водах на 1 день после ТЗПА.

В таблице 12 приводятся максимальные удельные активности радионуклидов в грунтовом водоносном горизонте на различные моменты времени.

Таблица 12– Максимальные удельные активности радионуклидов в грунтовом водоносном горизонте на разные моменты времени после ТЗПА

Радионуклид	Максимальная удельная активность, Бк/кг			УВ, Бк/кг
	1 сутки	1 год	30 лет	
Sr-90	1,98	0,53	0,04	4,9
Cs-134	1,32	0,24	0,00027*	7,2
Cs-137	1,01	0,25	0,07	11
	1 сутки	8 суток	80 суток	
I-131	29357	5011	6,3	6,2

Из таблицы видно, что даже на начальные моменты времени после аварии удельные активности в воде изотопов (Sr-90, Cs-134, Cs-137) не превышают установленные уровни вмешательства по НРБ 99/2009. Удельные активности изотопа I-131 на начальные моменты времени (1 сутки) превышает в отдельных точках уровень вмешательства почти в 200 раз, однако ввиду малого периода полураспада, удельная активность во всех точках достигает допустимых значений примерно через 80 дней.

Также на модели была оценена средняя удельная активность подземных вод, которые разгружаются в поверхностные водотоки (р. Воронка, р. Систа, р. Коваши). Из рисунка 5.3.5 следует, что средняя удельная активность подземного стока для Sr-90 и Cs-134, 137 не превышает первых сотых Бк/кг даже в первые дни после аварии. Несмотря на низкие удельные активности радионуклидов в речной воде, “след” от аварии будет растянут на 30-50 лет.

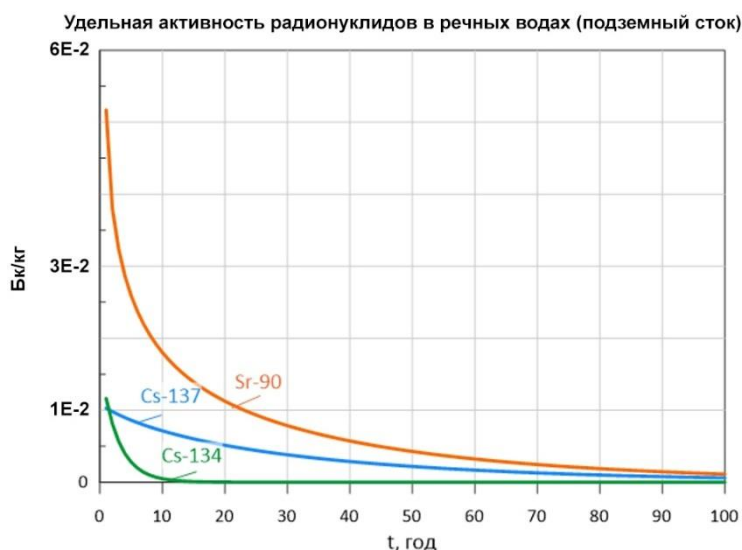


Рисунок 5.3.5 – Удельная активность Sr-90, Cs-137, Cs-134 в подземном стоке

Расчетами установлено, что удельная активность I-131 превышает уровень вмешательства в подземном стоке рассматриваемых рек на протяжении 56 суток (см. рисунок 5.3.6).

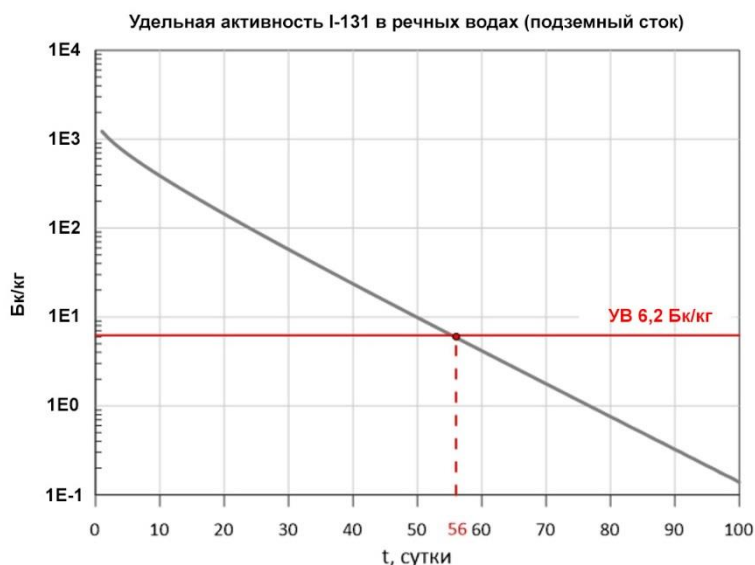


Рисунок 5.3.6 – Удельная активность I-131 в подземном стоке

Наряду с удельной активностью в подземном стоке, содержания радионуклидов после аварии были оценены на действующих и проектируемых подземных водозаборах централизованного водоснабжения, которые попадают в 30 км зону ЛАЭС-2.

Расчетные удельные активности I-131 в подземной воде для трех водозаборов представлены на рисунок 5.3.7 и в таблице 11. Из результатов расчетов видно, что при запроектной аварии на проектируемом водозаборе (точка T₁) в пос. Карстолово будут фиксироваться превышения уровней вмешательства по радиоактивному йоду. Удельные активности снизятся до допустимых значений уже через 8 дней после аварии. Важно отметить, что резервный водозабор, оборудованный на более защищенный кембрийско-ордовикский горизонт (точка T₂) в этом же месте, не превышает уровней вмешательства по йоду и может эксплуатироваться без остановки в поставарийный период.

Водозаборы в деревнях Варвароси, Гостилицы, Вильповицы находятся на границе 30 км зоны, поэтому сколько-нибудь значимого воздействия на них от аварии на ЛАЭС-2 не ожидается.

По результатам расчета также установлено, что удельные активности изотопов Sr-90, Cs-134,137 в воде подземных водозаборов при запроектной аварии будут значительно ниже уровня вмешательства (см. таблицу 13).

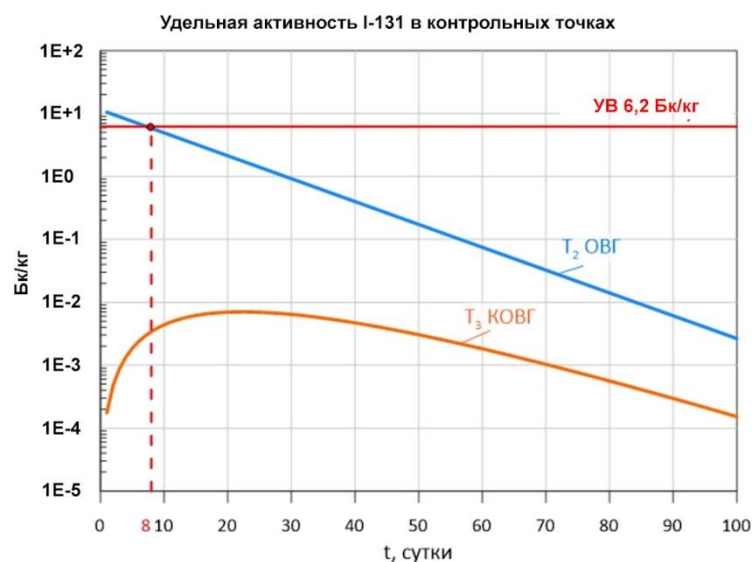


Рисунок 5.3.7 – Удельные активности I-131 в проектируемом водозаборе подземных вод в пос. Карстолово

Таблица 13 – Удельные активности радионуклидов в водозаборах подземных вод при запроектной аварии на ЛАЭС-2

Контрольная точка		T ₁	T ₂	T ₃
Привязка		д. Варвароси д. Гостилицы д. Вильповицы	пос. Карстолово	
Водоносный горизонт		верхний интервал ОВГ	нижний интервал ОВГ	КОВГ
Sr-90	C _{max} , Бк/кг	<1E-03	<1E-03	<1E-03
Cs-137	C _{max} , Бк/кг	<1E-03	4E-03	<1E-03
Cs-134	C _{max} , Бк/кг	<1E-03	5,3E-03	<1E-03
I-131	C _{max} , Бк/кг	2E-02	10,5	7E-03

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные выводы, полученные в ходе данного исследования.

В основу настоящей работы положена геологическая информация, полученная в процессе: обобщения материалов геологической и гидрогеологической съемок масштаба 1:200 000, выполненных в 1960 – 1966 гг. и в 1982 г. ПГО «Севзапгеология»; камеральной обработки данных бурения скважин; разнообразных геофизических исследований массива с поверхности, исследования (испытания) образцов керн в лабораторных условиях и опытно-фильтрационных работ (ОФР).

В геологическом строении территории выделяются образования архея-нижнего протерозоя кристаллического фундамента, верхнепротерозойские-верхневендские, нижне-среднепалеозойские (от кембрия до девона включительно) и повсеместно распространенные четвертичные отложения платформенного чехла. В пределах рассматриваемой территории выделяются водоносные комплексы, приуроченные как к четвертичным отложениям, так и к дочетвертичным породам.

По результатам оценки карстообразования был сделан вывод о том, что на территории Ижорского плато развит карст. Было выявлено, что воды на севере Ижорского плато более агрессивные. Это связано с приуроченностью этих вод к зонам разгрузки, повышенной трещиноватостью пород и меньшей мощностью. Эти зоны наиболее подвержены поверхностными загрязнениям.

Для изучения последствий потенциального радиоактивного загрязнения подземных вод от АЭС была разработана региональная геофильтрационная модель. Модельная область включает территорию, находящуюся в пределах 30-км зоны от ЛАЭС-2. В разрезе состоит из 7 расчетных слоев. По результатам гидрогеологического моделирования была воссоздана естественная структура потока подземных вод и уточнены фильтрационные параметры.

Были сформулированы факторы, влияющие на время поступления и концентрацию загрязненной воды в водозаборе: параметры и мощность разделяющего слоя, производительность водозабора, особенности физико-химического поведения радионуклидов и физико-географические условия исследуемой территории.

Подводя итоги результатов прогноза миграции радионуклидов в подземных водах во время тяжелой запроектной аварии, можно отметить следующее:

– При заданных плотностях выпадения изотопов Sr-90, Cs-137,134 их удельные активности в подземных водах не превысят установленных уровней вмешательства (УВ). Основная масса изотопов адсорбируется на породе и далее будет постепенно распадаться.

– Удельные активности I-131 в первые несколько дней могут превышать уровни вмешательства как в воде подземных водозаборов на Ижорском плато, так и в подземном стоке, разгружающемся в местные водотоки (р. Воронка, Коваши, Систа). Однако из-за короткого периода полураспада I-131, превышение УВ в воде подземных водозаборов продлится не более 8 дней, в подземном стоке рек – не более 56 дней.

При сценарии ТЗПА является наиболее консервативным по отношению к количеству высвобождаемых радионуклидов в окружающую среду. При рассмотрении сценария проектной аварии (ПА) высвобождаемая активность изотопов Cs-137,134 на 4 порядка меньше, чем при ТЗПА. Это означает, что ожидаемые удельные активности радионуклидов в подземных водах при ПА будут на 4 порядка ниже, чем при ТЗПА и не превысят установленных уровней вмешательства ни по одному радионуклиду.

По итогам исследования можно сделать вывод, о том, что ордовикский водоносный горизонт в случае запроектной аварии не защищен от аварийных выбросов ЛАЭС-2. Кембро-ордовикский водоносный горизонт, напротив, является защищенным и может быть использован как резервный источник водоснабжения в случае чрезвычайной ситуации.

Список литературы

1. Абрамов В.Ю. и др. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г.Сосновый Бор Ленинградской области) / под ред. Румынин В.Г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2002.
2. Алихова Т.Н. Карта дочетвертичных образований: О-35-VI. Геологическая карта СССР. Серия Ильменская, масштаб: 1:200000, серия: Ильменская, составлена: Северо-Западное геологическое управление. , 1961.
3. Баскова И.В. Отчет о проведении работ по объекту «Гидрогеологическое до изучение листов 27 О-35-VI, О-36-I масштаба 1:200000 (Лужско - Петербургская площадь)», 2010// ФБУ «ТФГИ по СЗФО» ф. 27945.
4. Вахрушев Б.А., Вахрушев И.Б. Моделирование карстового процесса в условиях хозяйственного освоения и антропогенной активизации карста // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 2.
5. Воронюк Г. Ю., Питулько В. М., Кулибаба В. В. Пространственно-временная изменчивость химического состава подземных вод на территории Ижорского плато. 2015 с.
6. ГОДИН В.Ю. Физиологически полноценная питьевая вода для жителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области // РАЗВЕДКА И ОХРАНА НЕДР. 2016. С. 44–52.
7. Грейсер Е.Л. и др. Отчет о предварительной и детальной разведке подземных вод для водоснабжения г. Ломоносов, Кронштадт, Петродворец (с подсчетом запасов по состоянию на 1.12.91), 1989–1991 гг. . Санкт-Петербург: , 1992.
8. Грейсер Л.Е. Формирование ресурсов подземных вод Ижорского месторождения // Записки Ленинградского горного института имени Г.В.Плеханова. 1991. С. 62–70.
9. Грейсер Э.Л. и др. Отчет о предварительной и детальной разведке подземных вод для водоснабжения г. Ломоносов, Кронштадт, Петродворец/в 3-х томах/. Ленинград: , 1979. 1–199 с.
10. Гринев Я.А. Оценка снеготпасов Европейской территории России. Санкт-Петербург: , 2016.
11. Жданов С.В. Гидрогеологические особенности развития карбонатного карста Ижорской возвышенности // 2013.
12. Карюхина Т.А., Чурбанова И.Н. Контроль качества воды. Москва: Стройиздат, 1986.
13. Колотильщикова В.К. Л. А. П. , Г. З. И. , А. С. П. Сводный отчет «О режимных наблюдениях Силурийской гидрогеологической станции за 1946-1950 г.г.» Ленинград: , 1952.
14. Кравченко Г.М., Матвейкин А.М. Имитационное 3D моделирование карстовых процессов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-3d-modelirovanie-karstovyyh-protsessov/viewer> (дата обращения: 15.03.2023).
15. Куриленко В.В., Жданов С.В. Проблемы водопользования Ижорского месторождения подземных вод // Записки Горного института. 2013. С. 216–221.
16. Минина И.В. Краткая характеристика природных условий развития карста на территории отдельных административных районов Ленинградской области // Сборник научных трудов «Геология в развивающемся мире». , 2020. С. 443–445.

17. Никифоровский А.А., Абрамов Д.В. К вопросу о формировании фильтрационных потоков в зоне активного водообмена почвогрунтов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35342445> (дата обращения: 15.03.2023).
18. Никифоровский А.А., Абрамов Д.В. Определение трещиноватых структур на Ижорском плато с помощью цифровых моделей рельефа // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ВОДОСБОРОВ. 2019. С. 100–104.
19. Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. Ленинград: Лениздат, 1973.
20. Рыжкова С.С., Челнокова А.Н. Карстовые явления Ижорского плато как уникальные ландшафтные объекты // Сборник докладов и статей VIII международной научно-практической конференции «Экологическое равновесие», 2017. С. 203–206.
21. СПБО ИГЭ РАН. Технический отчет Прогноз изменения гидрогеологических условий и миграции радионуклидов в подземных и поверхностных водах и расчет их накопления в донных отложениях при строительстве и эксплуатации. Этап 1. , 2021.
22. Antonio Pulido-Bosch. Principles of Karst Hydrogeology Conceptual Models, Time Series Analysis, Hydrogeochemistry and Groundwater Exploitation. Granada: , 2020. 1–369 с.
23. Ćirić M., Senić P. Intensity of dissolution of limestone and dolomite in different soil media (field experiment) // Catena (Amst). 1985. Т. 12. № 2–3. С. 211–214.
24. Garcia-Rios M. и др. Influence of the flow rate on dissolution and precipitation features during percolation of CO₂-rich sulfate solutions through fractured limestone samples // Chem Geol. 2015. Т. 414. С. 95–108.
25. Hattanji T. и др. Field and laboratory experiments on high dissolution rates of limestone in stream flow // Geomorphology. 2014. Т. 204. С. 485–492.
26. Kuniansky E. L. Simulating groundwater flow in karst aquifers with distributed parameter models— Comparison of porous-equivalent media and hybrid flow approaches // Scientific Investigations Report. 2016.
27. Langelier W. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment // J Am Water Works Assoc. 1936. Т. 28. С. 1500–1521.
28. P. Anderson Mary, W. Woessner William, J. Hunt Randall. «Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport». , 2015.
29. Plan L. Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps // Geomorphology. 2005. Т. 68. № 3–4. С. 201–212.
30. Ryznar J. W. A New Index for Determining Amount of Calcium Carbonate Scale Formed by a Water // J Am Water Works Assoc. 1944. Т. 36. № 4. С. 472–483.
31. Wallin M., Bjerle I. Rate models for limestone dissolution: A comparison // Geochim Cosmochim Acta. 1989. Т. 53. № 6. С. 1171–1176.
32. АЭС-2006. Ленинградская АЭС-2. Режимные гидрогеологические наблюдения на площадке размещения Ленинградской АЭС-2. Окончательный технический отчет. Санкт-Петербург: , 2012.

Приложение 1

Показатели химического состава подземных вод ордовикского водоносного горизонта

№	Мин-я	Населен. пункт	рН	НСО ₃	Са	Сl	К	Mg	Na	SO ₄	NO ₃
				мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
1	483	Б.Вруда	7.6	360	50.7	3.8	9	38.4	3.5	17.0	0.54
2	660	Зимитицы	7.3	472	60.8	7.09	0	39.9	50.8	24.5	4.43
3	518	Извары	7.4	370	65.2	14.3	0	40.1	6.2	17.9	4.43
4	519	Каложицы	7.3	364	60.8	10.6	0	35.3	20.7	24.5	3.99
5	544	Медниково	8.0	372	56	7.33	2	31.2	37.0	34.5	4.30
6	592	Местаново	7.7	397	60	19.1	2	36.0	40.0	29.6	9.31
7	643	Пеушалово	7.9	409	44	23.4	2	43.2	60.0	53.4	8.40
8	734	Терволово	7.4	405	57	54.0	9	32.4	90.0	37.0	50.0
9	493	Терволово	7.7	330	66.1	28.9	0	41.3	1.0	26.2	0.00
10	816	Алексеевка	7.4	430	129	22	6.5	40.9	15.2	160	13.0
11	413	Большая Пустомержа	7.9	281	44	13.9	0	40.8	1.2	27.1	5.60
12	562	Гурлево	7.4	398	48.4	8.83	0	35.8	44.9	23.7	2.66
13	521	Ивановское	7.5	384	68.1	8.9	0	29.2	20.9	9.5	0.00
14	611	Керстово	7.2	365	97.2	29.2	0	11.7	49.9	49.6	8.86
15	449	Котельский	7.8	326	17.2	13.3	3.3	38.3	40.9	9.5	0.31
16	377	Утешение	7.1	268	62.4	9.3	0	20.8	1.8	13.9	0.00
17	527	Ивановское	8.0	183	55.6	169	0	48.2	38.0	33.7	0.00
18	652	Витино	7.8	409	52	26.4	3.6	38.4	60.0	57.5	5.06
19	402	Глобицы	7.5	294	51.6	2.27	0	17.3	25.5	10.9	0.00
20	389	Копорье	7.4	283	27	5.6	1.9	27.1	30.0	12.3	1.95
21	565	Красный Бор	8.0	372	56	14.7	1.4	33.6	40.0	40.3	7.20
22	601	Шундорово	7.8	397	52	16.12	2	33.6	50.0	50.1	0.87
23	357	Вильповицы	7.5	262	51	6.8	0	14.0	19.1	0.0	4.00
24	568	Волосово	8.5	378	73	22.4	3	38.0	7.4	46.1	0.00
25	489	Новая Буря	7.1	329	74	17.6	3.4	31.0	4.5	28.8	0.00
26	510	Курковицы	7.4	370	55	5.7	11.7	40.2	4.3	23.0	0.40
27	490	Заполье	7.5	340	63.7	10	2.1	34.8	4.1	17.0	18.0
28	533	Извара	7.3	360	70	13	4.8	36.0	7.5	17.0	25.0
28	533	Извара	7.3	360	70	13	4.8	36.0	7.5	17.0	25.0
29	631	Гостилицы	7.5	375	79.3	56	3.2	38.5	32.2	31.0	16.0
30	495	Варвароси	7.6	340	69.3	6.3	1.6	34.2	3.1	26.0	14.0
31	516	Елизаветино	7.4	330	69.3	23	1.9	34.9	10.8	21.0	25.0
32	529	Сяськелево	7.3	360	73.3	8.2	2.2	36.4	3.0	25.0	21.0
33	472	Рабитицы	7.9	370	41.8	1.8	10.6	39.1	7.3	1.4	0.40
34	531	Лопухинка	7.5	362	77.4	8.5	2.8	32.9	5.0	25.0	17.0
35	506	Заостровье	7.6	330	69.6	11	4	31.4	5.8	30.0	24.0
36	452	Подозванье	7.5	302	73.8	3.8	3.9	17.1	1.9	13.0	36.0
37	841	Глобицы	7.3	479	123.7	16	9.1	47.5	21.6	51.0	93.0
38	586	Торосово	7.4	380	82.6	15	3.6	36.3	4.6	19.0	45.0

39	501	Зимитицы	7.5	360	62.8	5.2	4.1	36.7	2.5	23.0	6.30
40	441	Калозицы	7.7	310	57.6	3.4	2.6	31.7	1.8	26.0	7.70
42	599	п.Бегуницы	7.2	408	96.8	16	1.96	32.7	5.8	14.8	22.8
43	472	п.Гостилицы	7.4	340	42.5	3.5	1.14	49.5	2.5	21.0	12.3
44	482	д.Зимитицы	7.3	353	60.9	2.7	2.08	38.3	1.6	11.9	11.5
45	436	Ополье	7.2	278	67.7	13.3	4.08	22.7	8.5	24.7	16.7
47	361	д.Лопухинка	7.3	259	51.3	5.3	0.77	24.3	2.9	8.2	8.50
48	552	Кикерино	7.3	384	63.3	15.1	2.19	46.2	7.2	14.8	18.9
49	516	г.Волосово	7.1	355	67.1	10.6	2.71	38.0	5.4	13.6	23.5
49	810	Каськово	6.9	535	107	23.9	18.66	47.8	17.2	23.0	37.2
49	516	г.Волосово	7.1	355	67.1	10.6	2.71	38.0	5.4	13.6	23.5
50	440	г.Волосово	7.5	223	33.5	84.2	3.7	39.4	31.6	17.3	6.80
51	442	п.Б.Вруда	7.5	323	47.9	5.3	2.37	40.0	1.9	8.6	12.3
52	439	д.Калозицы	7.3	315	53.3	5.3	2.48	36.5	1.6	17.3	7.60
53	556	п. Ропша	7.1	347	73.1	23	9.1	38.3	7.8	22.6	35.6
54	809	Можайский	7.2	456	67.1	88.6	11.8	79.8	28.4	48.1	28.5
55	521	Сяськелево	7.2	365	62.1	10.6	1.1	45.0	2.1	18.5	16.3
56	539	Елизаветино	7.3	392	43.1	12.4	3.2	59.5	3.2	16.9	9.20
57	555	д. Кипень	7.2	381	54.1	14.2	1.5	56.5	2.5	26.7	18.5
58	352	д.Березнево	7.4	256	41	5.5	0	28.9	5.8	14.0	0.10
59	504	д.Туганицы	8.2	336	70	13.4	0	38.4	8.0	36.2	2.50
60	516	Елизаветино	7.4	330	69.3	23	1.91	34.9	10.8	21.0	25.0
61	887	д. Глядино	8.0	567	134	69.2	0	45.6	38.8	31.8	0.00
62	731	д. Глухово	7.6	567	60	5.5	0	39.6	21.4	35.3	1.80
63	475	д. Кипень	7.5	323	64.5	12.4	0	37.9	1.3	35.8	0.00
65	402	д.Ропша	7.0	293	45.4	5	0	22.7	24.2	11.5	0.00
66	562	д.Кипень	7.3	366	30	16.3	0	18.0	103	25.5	3.20
67	541	д.Кипень	7.7	348	64	14.4	0	50.0	0.5	57.5	6.80
68	528	д.Кипень	8.0	372	72	11.5	0	38.4	6.7	27.1	0.10
69	588	п.Келози	7.5	387	83.5	12	1.89	39.8	4.0	41.0	19.0
70	755	д.Ополье	7.1	440	103	51	17.6	33.5	35.3	51.0	23.0
71	451	д.Подозванье	7.5	302	73.8	3.8	3.86	17.1	1.9	13.0	36.0
72	557	г.Волосово	7.3	360	71.5	18	4.51	38.3	10.4	27.0	27.0
73	536	д.Роговицы	7.3	370	67.6	16	2.02	36.5	10.6	16.0	17.0
74	884	д.Лисино	7.1	600	92.7	43	29.36	54.8	24.3	27.0	13.0
75	510	д.Курковицы	7.4	370	55.0	5.7	11.73	40.2	4.3	23.0	0.40
76	490	отд.Заполье	7.5	340	63.7	10	2.1	34.8	4.1	17.0	18.0
77	533	д.Извара	7.3	360	70.0	13	4.75	36.0	7.5	17.0	25.0
80	485	п.Терпилицы	7.4	330	67.3	8.5	2.78	35.2	3.5	24.0	14.0
81	501	п.Зимитицы	7.5	360	62.7	5.2	4.14	36.8	2.5	23.0	6.30
1р	540	Ропша	7.2	381	73.0	13.5	2.76	40.1	2.8	27.1	
2р	665	Гостилицы	7.1	369	59.0	25.9	26.57	46.8	26.6	112	
3р	480	Лопухинка	7.4	326	57.0	9.39	5.9225	37.1	5.9	38.3	
4р	490	Глобицы	7.3	326	80.0	14.36	5.9225	23.7	5.9	34.1	
5р	615	Копорье	7.3	400	84.0	23.4	13.11	34.6	13.1	46.8	

6р	109	Липово	4.9	7	19.0	5.32	1.51	5.4	4.7	20.0	45.6
7р	104	Кирьямо	5.4	45	13.0	3.55	2.04	5.1	8.6	20.0	6.07
8р	396	Лопухинка	6.1	290	44.6	5.31	1.3	26.5	3.5	20.0	4.83
9р	649	Глобицы	6.9	417	97.0	10.2	12.7	30.0	13.2	24.1	44.0
10р	248	Гостилицы	5.7	48	29.1	62.0	11.45	5.7	24.6	38.3	29.0
11р	472	Лопухинка	7.0	341	72.0	7.5	1.5	25.7	4.2	12.1	7.80
12р	732	Верхние Рудицы	7.3	476	104	14.7	8.7	38.0	20.0	34.0	37.0
13р	207	д.Людное-2	5.6	98	28.1	12.4	9.28	8.3	8.5	20.0	22.7
14р	141	Ларионово	5.7	72	18.0	10.6	3.7	5.3	7.2	20.0	3.77
15р	392	Лопухинка	6.1	290	44.6	5.31	1.3	26.5	3.5	20.0	
16р	75	Ландышевка	5.9	33	12.0	3.55	1.78	1.5	2.9	20.0	