

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Ереев Даниил Александрович**

**Выпускная квалификационная работа**

**Исследование процессов и параметров, контролирующих загрязнение  
подземных вод на участке полигона промышленных токсичных отходов  
«Красный Бор»**

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 "Геология"

Основная образовательная программа: «Гидрогеология и инженерная геология»

Научный руководитель  
д.г.-м.н., чл.-корр., проф. В. Г. Румынин

«  »                      2022г.

Заведующий кафедрой  
к. г.-м. н. С. Б. Бурлуцкий

«  »                      2022г.

Санкт-Петербург

2022 г.

## Оглавление

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                         | 4  |
| 1. Геологические и гидрогеологические условия .....                    | 6  |
| 1.1. Стратиграфия .....                                                | 6  |
| 1.2 Тектоника .....                                                    | 13 |
| 1.3 Гидрогеологические условия .....                                   | 14 |
| 2. Современное состояние полигона .....                                | 26 |
| 3. Изучение фильтрационной неоднородности .....                        | 30 |
| 4. Изучение барьерных свойств кембрийских глин .....                   | 41 |
| 4.1. Пакерные опробования .....                                        | 41 |
| 4.2. Лабораторное исследование проницаемости глин прямым методом ..... | 53 |
| 4.3. Метод компрессионного сжатия .....                                | 59 |
| 4.4. Испытание в двухкамерной диффузионной ячейке .....                | 63 |
| 5. Прогноз миграции загрязнения .....                                  | 67 |
| Выводы .....                                                           | 70 |
| Список использованной литературы .....                                 | 71 |

## Список таблиц

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Таблица 2.1. Отходы захороненные на полигоне «Красный Бор» .....                                                                                     | 27 |
| Таблица 3.1. Соотнесение выделенных литогидрофаций с основными литологическими разностями .....                                                      | 30 |
| Таблица 3.2. Оптимизированные параметры коэффициента фильтрации отдельных литологических разностей пород в окрестностях полигона «Красный Бор» ..... | 36 |
| Таблица 4.1. Результаты поинтервальных нагнетаний с помощью пакерной системы .....                                                                   | 48 |
| Таблица 4.2. Результаты определений $k_f$ в кембрийских глинах прямым методом .....                                                                  | 55 |
| Таблица 4.3. Сравнение результатов 2020 года с переинтерпретацией. ....                                                                              | 62 |
| Таблица 5.1. Исходные данные для работы в ANSDIMAT .....                                                                                             | 69 |

## Список иллюстраций

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Рисунок 1.1. Геологическая карта дочетвертичных образований и условные обозначения к ней.....                                                 | 12 |
| Рисунок 1.2. Геологическая карта четвертичных отложений и условные обозначения к ней.....                                                     | 25 |
| Рисунок 2.1. Схема расположения карт – котлованов .....                                                                                       | 26 |
| Рисунок 2.2. Твердые отходы в карте 64.....                                                                                                   | 27 |
| Рисунок 3.1. Схема расположения систематизированных и обработанных скважин. Ближняя зона.....                                                 | 31 |
| Рисунок 3.2. Схема расположения систематизированных и обработанных скважин. Дальняя зона.....                                                 | 31 |
| Рисунок 3.3. Широтные литогидрофациальные разрезы.....                                                                                        | 32 |
| Рисунок 3.4. Меридиональные литогидрофациальные разрезы. Линию разреза см. на рис. 3.1.....                                                   | 33 |
| Рисунок 3.5 – Структурная карта кровли кембрийских глин.....                                                                                  | 34 |
| Рисунок 3.7. Карта суммарной проводимости четвертичных отложений .....                                                                        | 36 |
| Рисунок 3.8. Пример обработки откачки в программном комплексе ANSDIMAT методом Бауэра-Райса (А) и методом Купера (Б). .....                   | 37 |
| Рисунок 3.9. Схема предполагаемого расположения палеорусел по [10].....                                                                       | 39 |
| Рисунок 4.1. Схема расположения нагнетательных скважин и их геологический разрез.....                                                         | 42 |
| Рисунок 4.2. Состав мобильной пакерной установки .....                                                                                        | 43 |
| Рисунок 4.3. Модуль для обработки пакерных опробований в программе ANSDIMAT .....                                                             | 44 |
| Рисунок 4.4. Диаграмма соотношения бытового давления горной породы и давления раскрытия трещиноватой системы в глинах .....                   | 46 |
| Рисунок 4.5. Диаграммы соотношения давления нагнетания и расхода в опробуемых интервалах кембрийской глины.....                               | 52 |
| Рисунок 4.6. Пример графика $v$ -I. ....                                                                                                      | 54 |
| Рисунок 4.7. График $\varepsilon$ -t из протоколов 2020 года. ....                                                                            | 59 |
| Рисунок 4.8. Диффузионная ячейка в сборе с размещенным в ней образцом, готова к началу испытания. ....                                        | 63 |
| Рис. 4.9. Графики $C - t$ . Синим цветом выделены эмпирические данные, красная кривая построена по вышеприведенному уравнению для $Ct$ . .... | 65 |
| Рисунок 5.1. Схематизация условия карты №64. ....                                                                                             | 68 |
| Рисунок 5.2. Рабочее окно модуля для расчета миграции загрязнения ANSDIMAT .....                                                              | 68 |

## Введение

Концентрация в Санкт-Петербурге и Ленинградской области большого количества промышленных производств послужила в свое время основанием для создания в регионе предприятия захоронения промышленных токсичных отходов. СПб ГУПП «Полигон «Красный Бор» организован на основании решения Ленгорисполкома № 1068 от 02.12.1967 г., введён в эксплуатацию в 1969 году. С конца 2014 года прекращено пополнение полигона отходами.

Полигон расположен в Тосненском районе Ленинградской области, примерно в 2 км к северо-востоку от пгт Красный Бор. Место было выбрано в связи с тем, что здесь нет опасности затопления паводковыми водами, отсутствовало централизованное водоснабжение из ближайших водоемов и подземных вод, близко к поверхности залегала мощная (от 70 м) толща глин.

Территория полигона занимает площадь в 74 га 47 из которых используется для захоронения отходов. Последние представляют собой жидкие отходы органического и неорганического состава, твердые отходы и особо токсичные отходы. Все они в свою очередь подразделяются на 4 класса опасности: 1-2 класс – особо токсичные вещества (ртуть, свинец, ядохимикаты и др.), - захоронены в металлических контейнерах в кембрийских глинах, 3 и 4 классы захоронены в картах. После заполнения карты она засыпается глиной и плодородным слоем. В настоящее время лишь 5 из них остаются открытыми, 65 рекультивировали.

В 2003 году по периметру полигона закончена постройка сточной канавы взамен старой. По проекту она углублена практически в водоупорные горизонты (с севера четвертичные суглинки, с юга кембрийские глины), а дно ее оборудовано бетонными лотками. Канавка предназначена для перехвата поверхностного стока и потоков грунтовых вод с территории полигона. Она соединена с магистральным каналом, который впадает в реку Ижора.

Сейчас переполненный полигон является объектом повышенной опасности с экологической точки зрения. В окружающую среду загрязнение с него попадает в основном вместе с поверхностным стоком талых и дождевых вод с территории полигона, подземными водами верхней части разреза и путем испарения вредных веществ с открытых карт (более того, на полигоне несколько раз происходили пожары связанные с возгоранием отходов). Главной проблемой является неполная изоляция карт от четвертичных отложений прилегающих территорий. Верхняя часть разреза полигона (до 15 м) – это, в основном, техногенные грунты, представляющие собой переотложенные

техникой четвертичные отложения данной территории, и собственно сложнодислоцированные отложения квартера. Последние имеют в своем составе помимо суглинков еще и супеси/пески, что не позволяет называть их исключительно слабопроницаемыми, тем более водоупорными. Четвертичные отложения контактируют с содержащим карт, так как стенки котлованов хоть и заглублены в кембрийские глины, но в верхней части они сложены именно дисперсными грунтами квартера. Соответственно, возможна существенная миграция загрязнений именно в приповерхностной части разреза.

Актуальным является и изучение вопроса о водоупорных свойствах кембрийских глин. Они перекрывают ломоносовский водоносный горизонт, который хоть и не используется для централизованного водоснабжения, каптируется отдельными одиночными скважинами и используется для технического водоснабжения (МПВ «Шушарское»).

Целью настоящего исследования является оценка миграции загрязнения через толщу кембрийских глин и в дополнение к этому через четвертичные отложения. Для этого был проведен ряд исследований и непосредственно опытных работ и экспериментов:

- изучение материалов исследований прошлых лет;
- проведение опытно-фильтрационных работ (одиночные экспресс откачки, пакерные опробования);
- анализ лабораторных исследований проницаемости грунтов сторонними лабораториями: методом консолидации, прямым методом;
- изучение диффузионных свойств глин (проведение эксперимента в диффузионной камере, обработка результатов);
- прогноз миграции загрязнения через кембрийские глины.

Автор данной работы непосредственно принимал участие во всех вышеперечисленных пунктах за исключением пакерных опробований. Результатом данной работы является выявление путей миграции загрязнения, оценка скорости распространения по ним опасных веществ и прогноз этого распространения.

## 1. Геологические и гидрогеологические условия

Территория исследований приурочена к северо-западной окраине Русской плиты. Геологический разрез представлен кристаллическими породами фундамента архея и нижнего протерозоя, повсеместно перекрытого относительно маломощным осадочным чехлом (~ 350 м). Последний представляет собой отложения возрастом от верхнего венда до девона и квартера. Непосредственно на участке «Красный Бор» самые молодые отложения палеозоя относятся к нижнему кембрию (сиверская свита). Следует отметить, что угол падения отложений осадочного чехла совпадает с направлением погружения кровли фундамента и ориентирован на юго-восток.

### 1.1. Стратиграфия

#### *Архей - нижний протерозой (AR-PR<sub>1</sub>)*

По данным бурения и аномалиям гравитационного и магнитного полей на территории листа О-36-І в верхней части фундамента принято выделять породы, такие как граниты, гнейсо-граниты, грано-диориты, гранитизированные гнейсы и мигматиты.

#### *Вендская система*

##### *Верхний отдел*

Верхний отдел представлен редкинским и котлинским горизонтами, им отвечают терригенные циклически построенные отложения валдайской серии.

##### Валдайская серия

В составе валдайской серии выделяются старорусская и василеостровская свиты.

Старорусская свита (V<sub>2sr</sub>) представлена двумя пачками пород – нижней гравелито-песчаной и верхней глинистой. Гравелито-песчаная резко несогласно ложится на выветрелые породы кристаллического фундамента. Ее состав изменяется от гравелистых песков с галькой до мелкозернистых с прослоями глин до 1,5 метров. Верхняя пачка – глины уплотненные от серых до зеленоватых. Общая мощность свиты 35-45 метров.

Василеостровская свита (V<sub>2vo</sub>) подразделяется на две подсвиты: нижнюю и верхнюю.

Нижняя подсвита ( $V_2v_01$ ) залегает с размывом на старорусской свите. Основной ее состав – песчаники от разнозернистых до гравелистых, алевроиты. У кровли до 5 м слой уплотненных глин. Мощность до 50 м.

Верхняя подсвита ( $V_2v_02$ )

Свита сложена довольно однородной 120-150 метровой толщей зеленовато-серых тонкослоистых (типа ленточных) уплотнённых глин. В самом низу свиты может присутствовать пласт песчаников (до 5 м).

*Палеозойская эратема*

*Кембрийская система*

*Нижний отдел*

*Томмотский ярус*

*Лонтоваский горизонт*

Балтийская серия

В составе Балтийской серии выделяются ломоносовская и сиверская свиты.

Ломоносовская свита ( $E_1lm$ ) залегает с размывом на глинах василеостровской свиты, граница с которыми отчётливая по подошве разнозернистого кварцевого песчаника. Ломоносовская свита сложена пачкой переслаивания светло-серых кварцевых мелко-среднезернистых, с крупными зёрнами в основании, песчаников и алевролитов с маломощными (5-15 см) прослоями глин голубовато-серых вверху. Мощность песчаных прослоев колеблется от долей метра до 0,8-1,5 м. Мощность свиты изменяется от первых метров до 16 м.

Сиверская свита ( $E_1sv$ ), со залегает на ломоносовской свите без видимых следов перерыва. Свита сложена сравнительно однообразной толщей глин голубовато-серых, на отдельных участках с сиренево-фиолетовыми, красноватыми и коричневыми полосами, алевроитистыми, неравномерно слоистыми, гидрослюдистыми, Вверху глины могут быть выветрелыми, каолинизированными. Встречаются рассеянные кристаллы и друзы пирита и маркозита, присутствует глауконит. Мощность свиты по разрезам большого количества скважин колеблется в пределах 100 – 130 м. На дочетвертичную поверхность она выходит в широкой полосе к северу от глинта, как раз близ участка исследований.

На сиверской свите заканчиваются палеозойские отложения в районе полигона «Красный Бор». К югу от балтийского глинта присутствуют отложения вплоть до девона. В непосредственной близости от участка исследований находятся породы следующих стратонов:

*Кембрий, средний отдел*  
*Амгинский и майский ярусы*

- Саблинская свита ( $\text{Є}_2sb$ ) с размывом залегает на глинах сиверской свиты, перекрывается верхнекембрийскими отложениями, верхняя и нижняя её границы отчётливые. Она имеет широкое распространение к югу от Балтийско-Ладожского уступа (глинта). Мощность свиты непостоянна: колеблется от 5 до 15 м. Свита сложена песками уплотнёнными светло-серыми, иногда с желтоватым и розоватым оттенками кварцевыми по составу, с редкими тонкими прослойками глин.

*Верхний отдел*  
*Акса́йский ярус*

- Ладожская свита ( $\text{Є}_3ld$ ) приурочена к приглинтовой зоне. Она залегает с размывом на саблинской свите, перекрывается также с размывом песчаниками. Мощность свиты в зоне глинта 1-3 м, на юг возрастает до 6 м. Сложена песками и песчаниками светло-серыми иногда охристыми, ожелезнёнными, кварцевыми с примесью полевых шпатов, с фосфатными и железистыми стежениями в основании.

*Ордовикская система*

*Нижний отдел*

*Тремадокский ярус*

- Тосненская свита ( $\text{O}_1ts$ ) песчаники и пески с обломками брахиопод и глинистым цементом. Мощность до 12 м.

- Копорская свита ( $\text{O}_1kp$ ) аргиллиты, сланцы с песчанными прослойками. Мощность до 2 м.

*Аренигский ярус*

- Леэтсеская свита ( $\text{O}_1lt$ ) кварцево-глауконитовые пески и песчаники. Мощность до 2 м.

- Волховская свита ( $\text{O}_2vl$ ) доломиты, мергели известняки. Мощность до 6 метров.

*Лланвирнский ярус*

- Обуховская свита ( $\text{O}_2ob$ ) глины, известняки, доломиты. Мощность до 9 м.

*Четвертичная система*



Опираясь на карту четвертичных образований листа О-36-І, можно относительно точно оценить какие стратоны развиты на территориях прилегающих к «Красному Бору» – gIII<sub>4</sub>os, l,lgIII<sub>2</sub>pd, lgIII<sub>3</sub>bl. Однако, вследствие высокой дислоцированности отложений и их спорадического распространения, возможно присутствие и других четвертичных образований, поэтому ниже приведено полное описание квартера для листа О-36-І.

*Плейстоцен. Неоплейстоцен. Среднее звено.*

*Среднерусский надгоризонт.*

*Вологодский горизонт*

Флювиогляциальные отложения (fIIvl) имеют спорадическое распространение. Перекрываются флювиогляциальные образования московской мореной. Литологический состав образований представлен разнозернистыми, иногда гравелистыми песками и песками с включением гравия, гальки и валунов кристаллических пород. Мощность достигает 46 м в погребенных долинах.

*Московский горизонт*

Ледниковые отложения (gIIms) залегают на образованиях вологодского горизонта. Почти повсеместно московская морена перекрывается отложениями московско-осташковского межморенного горизонта. Морена представлена твердыми суглинками, реже супесями с включениями гравия, гальки и валунов изверженных и частично осадочных пород. Мощность изменяется до 20 м в погребенных долинах.

*Московский горизонт. Верхнее звено.*

*Микулинский горизонт. Мгинская свита*

Морские отложения (mIII<sub>1</sub>mg) имеют распространение в бассейне р. Славянки. Залегают она на поверхности водно-ледниковых и ледниковых образований московского возраста, а в редких случаях на дочетвертичных породах. Перекрываются — осташковской мореной. Мощность образований колеблется до 5 м.

*Валдайский надгоризонт.*

*Подпорожский горизонт*

Озерные и озерно-ледниковые отложения (l,lgIII<sub>2</sub>pd) распространены в Предглинтовой низменности (между р. Славянка и р. Ижора). Отложения представлены

песками мелкими и разнозернистыми, супесями и алевритами, глинами. Максимальная мощность отложений достигает 20 м.

#### *Осташковский горизонт*

Ледниковые отложения (gIII<sub>4os</sub>) распространены в южной части рассматриваемого района и слагают первый от поверхности и основной моренный горизонт. Морена перекрыта образованиями осташковского горизонта и более молодыми отложениями. Залегают на отложениях подпорожского горизонта, в Предглинтовой низменности и на Ижорском плато подошвой морены служат дочетвертичные образования. Морена представлена валунными песчано-глинистыми породами. Преобладают плотные, часто грубопесчаные суглинки. Мощность морены изменяется от 1,7 до 20 м.

Озерно-ледниковые отложения (lgIII<sub>4os</sub>) распространены в южной части рассматриваемого района. Озерно-ледниковые отложения подстилаются почти повсеместно осташковской мореной. В составе озерно-ледниковых слоев присутствуют супеси, суглинки, глины ленточные, песчано-супесчаный материал. Мощность отложений достигает 5 м.

#### *Слои Балтийско-ледникового озера*

Озерно-ледниковые отложения (lgIII<sub>3bl</sub>) Балтийского ледникового озера весьма широко распространены в северной части территории. Отложения залегают на морене и водно-ледниковых осадках осташковского возраста, местами перекрываются современными торфяно-болотными, озерными и аллювиальными отложениями. Отложения разнообразны по составу и представлены песками, часто с включениями гравия и гальки различного содержания, супесями, суглинками и глинами, в т.ч. ленточными. Мощность озерно-ледниковых осадков колеблется от 1,2 до 15 м.

#### *Голоцен*

Голоценовые отложения на территории рассматриваемого района имеют повсеместное распространение.

Озерные отложения (II) распространены по левому берегу р. Нева, в восточной части территории. Они залегают на озёрно-ледниковых отложениях второго балтийского ледникового озера. Состав озёрных отложений представлен песками, тонко и мелкозернистыми, отсортированными. Пески имеют чёткую слоистость. Мощность отложений составляет 1-6 м.

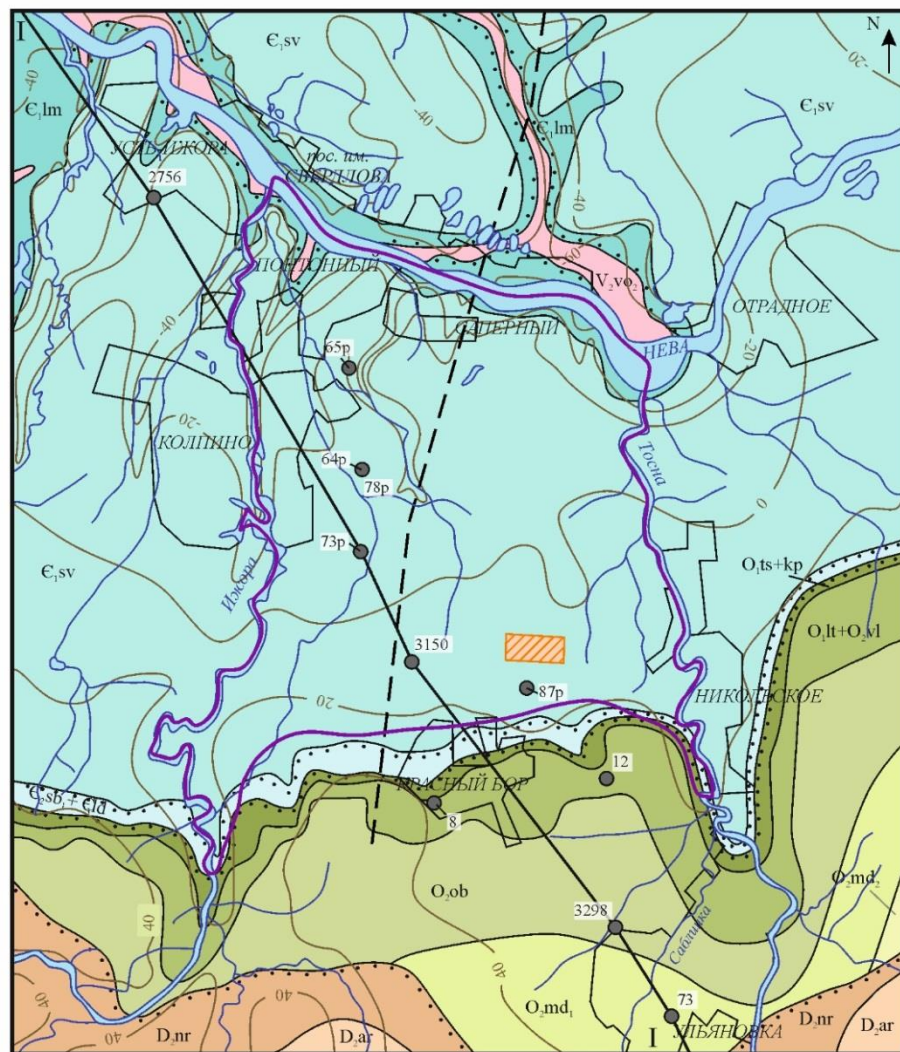
Биогенные (болотные) отложения (bH) широко распространены в пределах всей рассматриваемой территории, охватывая около 10% ее площади. Болота по своему генезису – верховые и низинные. Биогенные отложения залегают только с поверхности. Биогенные отложения – торф, мощность которого колеблется от 1,5 до 4,0 м.

Аллювиальные отложения (aH) в пределах рассматриваемого района пользуются сравнительно ограниченным распространением. Они развиты в долинах современных рек и ручьев и представлены русловыми и пойменными фациями. Русловой аллювий сложен разнообразными образованиями от гравийно-галечного материала до супесей и суглинков. Пойменный аллювий представлен песками, а также суглинками и супесями. Мощность аллювиальных отложений не велика, обычно не превышает 2-4 м.

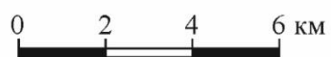
## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ДОЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

### СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ КОЛОНКА

| Система             | Отдел         | Ярус                     | Индикс            | Литология    | Мощность, м                                                                                                                                                                                                                    | Характеристика пород                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------|---------------|--------------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ДЕВОНСКАЯ СИСТЕМА   | СРЕДНИЙ ОТДЕЛ | Эйфельский ярус          | D.ar              | [Литография] | до 20                                                                                                                                                                                                                          | Арукюлааский горизонт. Арукюлааская свита. Пески и песчаники красноватые, прослой глины, в основании местами мергели                                                                                                  |
|                     |               |                          | D.nr              |              | до 20                                                                                                                                                                                                                          | Наровский горизонт. Наровская свита. Доломиты, мергели доломитовые, прослой глины и известняков, вверху прослой глины и песчаников, в основании местами брекчи карбонатно-глинистые                                   |
| ОРДОВИКСКАЯ СИСТЕМА | СРЕДНИЙ ОТДЕЛ | Лланвири-Эйфельский ярус | O.md <sub>1</sub> | [Литография] | до 20                                                                                                                                                                                                                          | Ухауский горизонт. Медниковская свита. Верхняя подсвита. Известняки, доломиты, мергели, липовые прослойки кукурситы                                                                                                   |
|                     |               |                          | O.md <sub>2</sub> |              | Азерский и ласнамягиский горизонты. Медниковская свита. Нижняя подсвита. Известняки доломитизированные, доломиты, тонкие прослой глины, со спорадически рассеянными железистыми оолитами в основании - верхний чечевичный слой |                                                                                                                                                                                                                       |
|                     |               |                          | O.ob              |              | Кундаский горизонт. Обуховская свита. Известняки и доломиты, прослой мергелей и глины, в основании с железистыми оолитами - «нижний чечевичный слой»                                                                           |                                                                                                                                                                                                                       |
|                     |               |                          | O.lt+O.vl         |              | Латорпский и волховский горизонты. Лезтеская и волховская свиты объединенные. Внизу - пески и песчаники глауконитовые с прослойками глины, мергелей и песчаных доломитов, вверху доломиты и известняки глауконитовые           |                                                                                                                                                                                                                       |
|                     |               |                          | O.ts+kp           |              | Пакерортский горизонт. Тосненская и колторская свиты объединенные. Внизу - пески и песчаники буровато-серые, кварцевые фосфатно-сильные (оболовые), вверху - ардуитово-красноватые (диактонитовые свиты)                       |                                                                                                                                                                                                                       |
|                     |               |                          | Є.ld              |              | Ладоский горизонт. Ладоская свита. Пески, песчаники, прослой глины                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                       |
| КЕМБРИЙСКАЯ СИСТЕМА | НИЖНИЙ ОТДЕЛ  | Трематокский ярус        | Є.sb <sub>1</sub> | [Литография] | до 25                                                                                                                                                                                                                          | Дейменский горизонт. Саблинская свита. Нижняя подсвита. Пески и песчаники мелко- и среднезернистые, кварцевые с редкими прослойками глины, фосфатно-сильные                                                           |
|                     |               |                          | Є.sv              |              | Сиверская свита. Глины алевролитовые, неравномерно-слоистые, с редкими прослойками вверху и внизу песчаников кварцевых                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                       |
|                     |               |                          | Є.lm              |              | Ломоносовская свита. Верхняя подсвита. Песчаники глинистые, алевролиты, вверху глины алевролитовые, переслаивающиеся с песчаниками                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                       |
| ВЕНДСКАЯ СИСТЕМА    | ВЕРХНИЙ ОТДЕЛ | Котлинский ярус          | V.vo <sub>1</sub> | [Литография] | до 130                                                                                                                                                                                                                         | Василеостровская свита. Верхняя подсвита. Глины уплотненные, тонкозернисто-слоистые, с тонкими алевролитовыми прослойками, с органическими пленками, с линзами сидерита, в основании прослой алевролитов и песчаников |



Составлено по материалам гидрогеологического доизучения листа О-36-1 масштаба 1:200 000. Баскова Н.В., 2010 г.



### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- |                                                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ДЕВОНСКАЯ СИСТЕМА</p> <p>СРЕДНИЙ ОТДЕЛ</p> <p>Эйфельский ярус</p>                                                                             | <p>Q</p> <p>D.ar</p> <p>D.nr</p>                                                                                    | <p>Четвертичные отложения (Только на разрезе).</p> <p>Арукюлааский горизонт. Арукюлааская свита. Песчаники, пески, алевролиты, прослой глины.</p> <p>Наровский горизонт. Наровская свита. Доломиты, мергели, прослой глины и известняков.</p>                                                                                                                                                                                                                         |
| <p>НИЖНИЙ-СРЕДНИЙ ОТДЕЛЫ</p> <p>О<sub>1-2</sub></p> <p>О<sub>2</sub>md<sub>1</sub></p> <p>О<sub>2</sub>md<sub>2</sub></p> <p>О<sub>2</sub>ob</p> | <p>O<sub>1-2</sub></p> <p>O<sub>2</sub>md<sub>1</sub></p> <p>O<sub>2</sub>md<sub>2</sub></p> <p>O<sub>2</sub>ob</p> | <p>Отложения объединенные (Только на разрезе).</p> <p>Ухауский горизонт. Медниковская свита. Верхняя подсвита. Известняки, доломиты, мергели, редкие, тонкие прослойки горючих сланцев (кукурситы).</p> <p>Азерский и ласнамягиский горизонты. Медниковская свита. Нижняя подсвита. Известняки, мергели, глины, прослойки горючих сланцев (кукурситы).</p> <p>Кундаский горизонт. Обуховская свита. Известняки и доломиты с тонкими прослойками мергелей и глины.</p> |
| <p>ОРДОВИКСКАЯ СИСТЕМА</p> <p>СРЕДНИЙ ОТДЕЛ</p> <p>Лланвири-Эйфельский ярус</p>                                                                  | <p>O.lt+O.vl</p> <p>O.ts+kp</p>                                                                                     | <p>Аренитский ярус. Латорпский и волховский горизонты. Лезтеская и волховская свиты. Пески и песчаники глауконитовые, глины, в верхней части мергели, доломиты и известняки глауконитовые.</p> <p>Термадокский ярус. Латорпский и волховский горизонты. Лезтеская и волховская свиты. Пески и песчаники глауконитовые, глины, в верхней части мергели, доломиты и известняки глауконитовые.</p>                                                                       |
| <p>НИЖНИЙ ОТДЕЛ</p> <p>Трематокский ярус</p>                                                                                                     | <p>Є.sb<sub>1</sub>+Є.ld</p>                                                                                        | <p>Амгинский, аксайский ярусы. Дейменский и ладожский горизонты. Саблинская и ладожская свиты объединенные. Нижняя подсвита. Пески, песчаники полевощатово-кварцевые, тонкие прослой глины.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p>КЕМБРИЙСКАЯ СИСТЕМА</p> <p>СРЕДНИЙ-ВЕРХНИЙ ОТДЕЛЫ</p> <p>Томмоотский ярус</p>                                                                 | <p>Є.sv</p> <p>Є.lm</p>                                                                                             | <p>Сиверская свита. Глины алевролитовые с редкими прослойками песчаников и алевролитов.</p> <p>Ломоносовская свита. Верхняя подсвита. Песчаники, переслаивающиеся вверху с алевролитами и глинами.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p>ВЕХНИЙ ПРОТЕРОЗОЙ</p> <p>ВЕНДСКАЯ СИСТЕМА</p> <p>Котлинский горизонт</p>                                                                      | <p>V.vo<sub>1</sub></p>                                                                                             | <p>Василеостровская свита. Верхняя подсвита. Глины уплотненные тонкослоистые, прослойки алевролитов, реде песчаников, линзы и стяжения сидерита</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
- 
- |           |  |                                                                                              |
|-----------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>а)</p> |  | <p>Границы между разновозрастными отложениями: а) согласного и б) несогласного залегания</p> |
|           |  | <p>Изогипсы рельефа дочетвертичной поверхности (проведены через 20 м)</p>                    |
|           |  | <p>Предполагаемый тектонический контакт</p>                                                  |
|           |  | <p>Линия геологического разреза</p>                                                          |
|           |  | <p>Участок исследований</p>                                                                  |
|           |  | <p>Структурные и картировочные скважины (сверху - номер)</p>                                 |

### РАЗРЕЗ ПО ЛИНИИ I-I

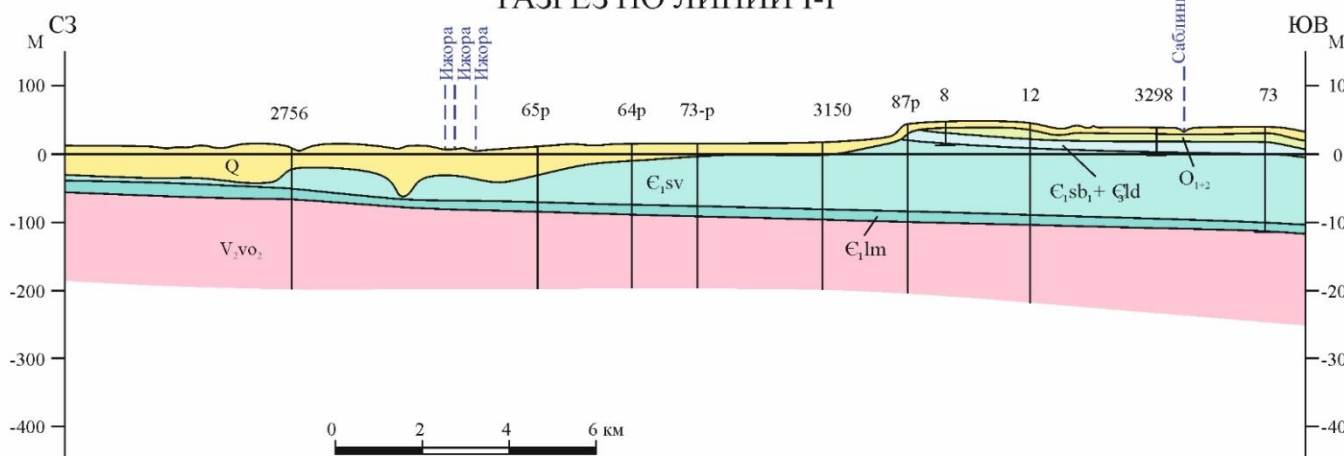


Рисунок 1.1. Геологическая карта дочетвертичных образований и условные обозначения к ней

## 1.2 Тектоника

Территория приурочена к окраине русской плиты, в ее строении участвуют два структурных этажа – нижний, представленный сильно метаморфизованными и дислоцированными породами кристаллического фундамента, и верхний, сложенный практически ненарушенными платформенными осадками.

Поверхность фундамента имеет общий уклон в юго-восточном направлении с градиентом погружения около 3 м/км. Рельеф фундамента неровный, с относительными превышениями до 50 м. Прослеживаются волнообразные поднятия с амплитудами до 30 м, обусловленные разрывными нарушениями северо-восточного простирания.

Верхний структурный этаж делится на три структурных яруса. Нижний (венд-ордовик) имеют близширотное простирание и полого наклонены на Ю-В. Местами прослеживаются брахиантиклинальные структуры, приуроченные к блоковым поднятиям фундамента.

Средний структурный ярус – отложения девона, залегают с резким несогласием на подстилающем ордовике. Полого наклонен на Ю-В.

Верхний ярус – отложения квартера.

Основная черта тектоники – степенное погружение пород на в юго-восточном направлении, соответственно на севере листа на поверхность выходят отложения фундамента, которые при продвижении к югу на дневной поверхности сменяются по порядку более молодыми образованиями.

Тектонические движения, во-видимому, разного времени обусловили развитие трещин в основном в карбонатных породах ордовика в двух направления – 75 и 315 градусов.

В приглинтовой зоне проявляется гляциотектоника. К ее нарушениям относятся складки с амплитудой до 8 м в кембрийских и ордовикских отложениях, сбросы и глыбовые смещения. Здесь породы сильно раздроблены. Также в этих зонах встречаются отторженцы пород того же возраста площадью до 1,5 км<sup>2</sup>. Следы гляциотектоники ослабевают при движении на юг.



### 1.3 Гидрогеологические условия.

#### Подземные воды четвертичных отложений

Территория района работ относится к Русскому сложному артезианскому бассейну (структура I порядка), и приурочена к северо-западной части Ленинградского артезианского бассейна (структура II порядка), а именно Предглинтового подрайону.

Подземные воды разделяются на воды четвертичных и дочетвертичных образований. В гидрогеологическом разрезе района работ выделяются следующие подразделения:

1. Голоценовый аллювиальный водоносный горизонт (aH);
2. Голоценовый биогенный водоносный горизонт (bH);
3. Голоцен-осташковский озёрный, ледниково-озёрный водоносный горизонт (lgШos-IH);
4. Осташковский ледниково-озёрный относительно водоупорный горизонт (lgШos);
5. Осташковский моренный относительно водоупорный горизонт (gIIos);
6. Московско-осташковский межморенный водоносный горизонт (lg,f IIms-Шos);
7. Московский моренный относительно водоупорный горизонт (gIIms);
8. Вологодско-московский межморенный водоносный горизонт (lg,fIIvl-ms);
9. Верхнеэфельско-нижнефранский водоносный горизонт (D<sub>2ef2</sub>-D<sub>3f1</sub>);
10. Верхнеэфельский (наровский) относительно водоупорный горизонт (D<sub>2ef2</sub>(nr));
11. Ордовикский водоносный горизонт (O<sub>2-3</sub>);
12. Тремадокский (копорско-леэтсеский) относительно водоупорный горизонт (O<sub>1t</sub>(kp-lt));
13. Кембро-ордовикский водоносный горизонт (Є<sub>1</sub>-O<sub>1</sub>);
14. Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт (Є<sub>1</sub>(ln));
15. Нижнекембрийский (ломоносковский) водоносный горизонт (Є<sub>1</sub>);
16. Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт (V<sub>2</sub>(kt)).

Голоценовый аллювиальный водоносный горизонт (aH) распространён в виде узких полос не превышая 100-150 м вдоль русел, слагая пойму и надпойменную террасу рек Ижора, Суйда, Оредеж. Изредка ширина распространения горизонта увеличивается до

1 км вдоль р.Ижора. Водоносный горизонт залегает первым от поверхности и подстилается чаще осташковским ледниково-озёрным относительно водоупорным горизонтом (lgIIIos) и осташковским моренным относительно водоупорным горизонтом (gIIIos). Его мощность колеблется от 1,0 до 10,0 м, чаще составляет 1,0-4,0 м. Водовмещающие породы представлены преимущественно разномерными песками, супесями с прослойками суглинков. Наибольшее распространение имеют мелкозернистые пески мощностью от 1,0 до 7,0 м. Воды горизонта повсеместно безнапорные. Глубина залегания уровня составляет 0,1-2,0 м, абсолютные отметки уровня изменяются от 88,0 – (-5,0) м.

Водообильность горизонта низкая. Коэффициент фильтрации песков составляет 0,03-0,2 м/сут, удельные дебиты скважин 0,003-0,07 л/с.

По химическому составу воды пресные с минерализацией 0,1-0,5 г/л., гидрокарбонатно-кальциевые, гидрокарбонатные со смешанным составом.

Питание горизонта осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков и подтока из смежных водоносных горизонтов, занимающих более высокое гипсометрическое положение, а в паводковые периоды за счёт речных вод, разгрузка - гидрографической сетью.

Подземные воды горизонта, ввиду ограниченности своего распространения, малой мощности и низкой водообильности водовмещающих пород используется лишь в сельской местности для индивидуального хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Голоценовый биогенный водоносный горизонт (bH) залегает первым от поверхности на различных по составу отложениях голоцена и верхнего неоплейстоцена. Горизонт приурочен к болотным отложениям и имеет широкое распространение по площади. Наиболее крупные болота – Гладкое, Гертовское, Жаровское. Водовмещающей породой является торф различной степени разложения, представляющей собой очень пористую, сильно влагоёмкую породу со слабой водоотдачей. Мощность водоносного горизонта зависит от мощности торфяника и колеблется в пределах от 0,5 до 15,0 м. Наиболее распространённая его мощность 1,5-3,0 м. Абсолютные отметки кровли горизонта изменяются от 3,0 до 90,0 м.

В пределах болот глубина залегания уровня грунтовых воды в зависимости от сезонных условий изменяется от 0,1 до 6,0 м. Абсолютные отметки уровня колеблются от 2,0 до 84,0 м.

По данным Яцкевич З.Ф. дебит скважин и шурфов колеблется от 0,001 до 0,05 л/с, при понижении уровня на 2,0-4,0 м. Удельный дебит составляет 0,00007-0,03 л/с, коэффициент фильтрации 0,001-4,0 м/сут.

Питание болот осуществляется атмосферными осадками, а так же за счёт подземных вод озёрно-ледникового отложений и отложений, слагающих камы. По типу питания преобладают болота верховые.

По химическому составу воды биогенного горизонта гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и кальциевые с минерализацией 0,03-0,3 г/л, с содержанием железа до 1,5-2,0 мг/л. Характерно низкое рН – не более 6. Специфической особенностью является повышенное содержание органики, окисляемость достигает 50-140 мг O<sub>2</sub>/л. Для питьевого водоснабжения воды болот непригодны из-за наличия в них растворённых органических веществ.

Голоцен-осташковский озёрный, ледниково-озёрный водоносный горизонт (IgIIIos-III) один из наиболее распространённых водоносных горизонтов четвертичной системы. Он объединяет близкие по составу отложения осташковского горизонта (наледниковый гляциолимний и балтийский гляциолимний) и голоцена. Эти горизонты не разделены водоупором и, в сущности, представляют единый водоносный горизонт. Водоносный горизонт распространён повсеместно за исключением восточной части территории вблизи Ижорского плато. Горизонт залегает на глубине 0,0-25,0 м, чаще 0,0-5,0 м, абсолютные отметки 95,0-(-5,0) м на морене осташковского горизонта и на глинах ледниково – озёрного относительно водоупорного горизонта и обычно первым от поверхности, иногда перекрыт торфом биогенного горизонта, песками аллювиального и морского горизонтов. Он представлен песками различной зернистости – мелко, тонкозернистые, реже среднезернистые, хорошо отсортированные. Изредка, обычно в нижней части горизонта, встречаются прослой гравелистых песков. Мощность горизонта изменяется от 1,0 до 25,0 м. Наибольшая мощность (15,0-20, м) горизонта развита в Предглинтовой и Приневской низменности, уменьшаясь до 4-5 м к югу.

Подземные воды горизонта имеют свободную поверхность, приобретая напор до 3,0 м на участках залегания песков среди глинистых отложений. На плоских равнинных участках уровень расположен на глубине до 4,0 м, на возвышенных участках - до 8,0 м. Абсолютные отметки уровня изменяются от 7,0 до 88,0 м, увеличиваясь в южном направлении.

Коэффициент фильтрации отложений составляет 0,001-4,1 м/сут [1]. Удельные дебиты скважин составляют 0,01-0,6 л/с.

Подземные воды горизонта пресные с минерализацией 0,04-0,9 г/л. Преобладают гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и кальциевый тип. В подземных водах горизонта наряду с гидрокарбонат-ионом в сопоставимых количествах присутствуют ионы хлорида или сульфата, так же отмечаются воды со смешанным катионным составом.



Питание горизонта осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков и перетекания из смежных водоносных горизонтов. Горизонт дренируется речной сетью и за счёт перетекания в смежные горизонты, расположенные на более низких гипсометрических уровнях. Горизонт широко используется для местного индивидуального водоснабжения.

Осташковский ледниково-озёрный относительно водоупорный горизонт (lgIIIos) развит повсеместно за исключением Ижорской возвышенности. Залегает горизонт с поверхности или перекрыт песками морского водоносного горизонта в северной части территории листа (г. Санкт-Петербург) или биогенными и аллювиальными отложениями в южном направлении от территории г. Санкт-Петербурга. Подстиляется горизонт чаще осташковской мореной. Горизонт залегает на глубине от 0,0-16,0 м, чаще 0,0-7,0 м, абсолютные отметки кровли варьируют от 70,0-(-20,0) м. На площади распространения в При-невской низине горизонт представлен ленточными глинами серого и голубовато-серого цвета, содержащие песчаные и супесчаные прослойки линз. На территории Госненской равнины горизонт представлен глинами.

Ленточные глины обладают резким различием фильтрационных свойств в вертикальном и горизонтальном направлениях, обусловленным переслаиванием глин и тонкозернистых песков. Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении составляет 0,05-0,4 м/сут, в вертикальном 0,01-0,0007 м/сут. Удельные дебиты скважин 0,0002-0,03 л/с [2]. По химическому составу воды гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,2-0,4 г/л.

Горизонт используется только для индивидуального водоснабжения в мелких населённых пунктах, где другие источники водоснабжения отсутствуют – в Предглинтовой и в Приневской низменности. Глубина колодцев не превышает 5-10 м.

Осташковский ледниково-озёрный относительно водоупорный горизонт (lgIIIos) развит повсеместно. Залегает горизонт с поверхности или перекрыт биогенными и аллювиальными отложениями. Подстиляется горизонт чаще осташковской мореной. Горизонт залегает на глубине 0,0-7,0 м, абсолютные отметки кровли варьируют от 40,0 до 10,0 м. На площади распространения в Приневской низине горизонт представлен ленточными глинами серого и голубовато-серого цвета, содержащие песчаные и супесчаные прослойки линз.

Ленточные глины обладают резким различием фильтрационных свойств в вертикальном и горизонтальном направлениях, обусловленным переслаиванием глин и тонкозернистых песков. Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении составляет 0,05-0,4 м/сут, в вертикальном 0,01-0,0007 м/сут. Удельные дебиты скважин

0,02-0,03 л/с [3]. По химическому составу воды гидрокарбонатные и хлоридно-сульфатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,1-0,9 г/л.

Режимные наблюдения за уровнем подземных вод ведутся по скважине 5044 (11100004 ГВК) в п. Понтонный. Среднегодовой уровень воды в 2017 г. по данным ГСМН составил 0,88 м, абсолютная отметка 15,12 м.

Горизонт используется только для индивидуального водоснабжения в мелких населённых пунктах. Глубина колодцев не превышает 5-10 м.

Осташковский моренный относительно водоупорный горизонт (gШос) развит повсеместно за исключением Ижорского плато. Обычно он перекрыт более молодыми отложениями, за исключением западной части территории листа. Подстилается горизонт, на большей части территории, дочетвертичными отложениями, а на площади развития палеодалин образует относительно водоупорную кровлю московско-осташковскому межморенному водоносному горизонту. Глубина залегания кровли горизонта варьирует от 0,0 до 50,0 м с абсолютными отметками от 110,0 до -22,0 м.

Горизонт сложен мореной, представленной супесчаными и суглинистыми разностями с гравием и галькой и с линзами песков. Мощность отложений варьирует от 1,0 до 50,0 м, чаще составляет 2,0-25,0 м. Величина коэффициента фильтрации морены составляет 0,00001-1,0 м/сут. Водоносностью обладают прослойки песков и линз. Их водообильность невысокая – удельные дебиты скважин 0,0001-0,5 л/с. В песчаных линзах величина напора составляет 0,1-10,5 м. По химическому составу воды хлоридно-гидрокарбонатные со смешанным катионным составом и гидрокарбонатные с магниевым-кальциевым составом, с минерализацией от 0,2 до 0,7 г/л. Питание горизонта осуществляется за счёт атмосферных осадков.

Практического применения для водоснабжения горизонт не имеет, только там где он выходит на поверхность используется для частного индивидуального водоснабжения.

Московско-осташковский межморенный водоносный горизонт (lg,f Пms-Шос) включает отложения, залегающие между осташковской и московской мореной. Распространён горизонт в основном на Приневской низине (древние долины), а так же небольшие площади его распространения выделены в районе г. Тосно и п. Виркино Гатчинского района. Горизонт залегает на глубине от 5,0 до 85,6 м, абсолютные отметки кровли варьируют от 92,0 до -67,5 м. Наиболее близко от поверхности горизонт залегает в г. Санкт-Петербурге.

Литологический состав вмещающих пород представлен песками мелкозернистыми и разномзернистыми с гравием, супесями, суглинками, ленточными глинами. Песчаные разности замещаются супесями, супесями гумусированными с прослоями торфяников

(часто газоносными, суглинками, глинами и ленточными глинами). Наибольшее проявление газа наблюдалось в районе ст. Сортировочной, Уткиной Заводи, Ново-Саратовской Колонии, Усть-Славянки. [4] При вскрытии газоносных линз фонтан воды и газа достигал высоты 10-12 м над устьем скважины. В газовом составе преобладает метан и азот.

Общая мощность горизонта изменяется от первых единиц до 70,0 м. Подземные воды напорные. Величина напора зависит от глубины вскрытия кровли обводнённой толщи и изменяется от 1,0 до 54,0 м. Пьезометрические уровни устанавливаются на глубине от 1,0 до 21,4 м (скв.74, п. Мяглово-Карьер). В долинах рек и в понижениях рельефа уровень может устанавливаться выше поверхности земли на 0,5-3,0 м (Полюстрово).

Водообильность горизонта определяется литологическим составом водовмещающих пород. Удельные дебиты скважин составляют 0,005-4,0 л/с, коэффициент фильтрации водовмещающих пород 0,06 -76,0 м/сут. Водопроницаемость по данным разведочных работ [5] относительно высокая: от 22 до 1900 м<sup>2</sup>/сут (месторождение Корчино).

По химическому составу воды в основном гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и хлоридно-гидрокарбонатные кальциевые-натриевые, а так же смешанные по катионному и анионному составу с минерализацией от 0,1 до 1,4 г/л, чаще 0,3-0,9 г/л. Для водоносного горизонта характерно повышенное содержание двухвалентного железа – до 3,9 мг/л.

Питание горизонта осуществляется за счёт перетекания из вышележащих горизонтов и инфильтрации атмосферных осадков через песчаные “окна” вышележащих горизонтов.

Горизонт широко используется для водоснабжения населённых пунктов, садоводческих хозяйств, ферм. Недостатком качества этих вод для хозяйственно – питьевого водоснабжения является высокое содержание железа.

В 1989г. были защищены запасы пресных питьевых подземных вод на месторождениях: Колпинское – 15,7 тыс.м<sup>3</sup>/сут, Петро-Славянское – 4,8 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Месторождения не эксплуатируются и относятся к не распределённому фонду недр.

Водоносный горизонт на прилегающих территориях к полигону не встречается.

Московский моренный относительно водоупорный горизонт (gIIms) имеет широкое распространение на территории Приневской низины. Севернее левобережья р. Нева горизонт имеет почти сплошное распространение за исключением отдельных участков размыва, большая часть которых сосредоточена в древних долинах. Горизонт перекрыт осташковской мореной или московско-осташковскими отложениями межморенного

горизонта, подстилается – дочетвертичными отложениями или вологодско-московскими отложениями межморенного горизонта. Кровля горизонта залегает на глубине от 14,0 до 55,0 м, абсолютные отметки 3,0-(-63,0) м.

Московская морена представлена суглинками и супесями валунными с преобладанием суглинков, а так же с гравием и галькой и линзами песков. Мощность морены колеблется в широких пределах от первых метров до 45,0 м.

Водоносный горизонт на прилегающих территориях к полигону не встречается.

Вологодско-московский межморенный водоносный горизонт (lg,Плвл-ms) развит в Приневской низине. Приурочен к вологодско-московским водноледниковым и флювиогляциальным отложениям. Залегает в основном в переуглублённых долинах и понижениях дочетвертичного рельефа на глубине 35,0-67,0 м, абсолютные отметки -27,0 - (-58,0) м. Перекрывается горизонт московской мореной, подстилается вологодской мореной или коренными отложениями.

Водовмещающие породы представлены разнозернистыми песками и песками с включением гравия, гальки, реже валунов, а так же суглинками и глинами. Мощность горизонта составляет 1,0-70,0 м. Воды горизонта напорные, величина напора составляет 14,0-70,0 м, пьезометрические уровни устанавливаются на глубине от 0,5 до 10,0 м. Водообильность горизонта зависит от гранулометрического состава водовмещающих песков. Удельные дебиты скважин составляют 0,4-6,9 л/с. Коэффициент фильтрации 0,2-106,3 м/сут [5]. По химическому составу воды в основном гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые или натриевые с минерализацией 0,1-0,4 г/л.

Воды горизонта используются для водоснабжения населения. На территории г.Санкт-Петербурга в 2003г на Корчминском месторождении в ТКЗ были защищены запасы пресных питьевых подземных вод в количестве 14,5 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Месторождение эксплуатируется. В 1989г. утверждены запасы пресных питьевых подземных вод по Усть-Ижорскому месторождению в количестве 4,8 тыс.м<sup>3</sup>/сут и по Щербинковскому месторождению в количестве 41,8 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Месторождения не эксплуатируются и относятся к нерапределённому фонду.

Водоносный горизонт на прилегающих территориях к полигону не встречается.

#### Подземные воды дочетвертичных отложений

Описание верхнеэфельско-нижнефранского водоносного горизонта (D<sub>2ef2</sub>-D<sub>3f1</sub>), верхнеэфельского (наровского) относительно водоупорного горизонта (D<sub>2ef2</sub>(nr)),

ордовикского водоносного горизонта ( $O_{2-3}$ ), а также тремадокского (копорско-леэтсеского) относительно водоупорного горизонта ( $O_{2t}$  (кр-лт)) в разделе не приводится, поскольку данные гидрогеологические подразделения распространены лишь к югу от балтийского глинта и гидравлическая связь с исследуемой зоной может осуществиться лишь при восходящей фильтрации вод ломоносовского горизонта через нижнекембрийский водоупорный горизонт.

#### Кембро-ордовикский водоносный горизонт ( $\epsilon_1-O_1$ )

Водоносный горизонт распространен южнее глинта, но описан здесь, так как непосредственно слагает его стену. Залегает под копорско-леэтсеским водоупорным горизонтом, а вдоль уступа в виде узкой полосы выходит под четвертичные образования.

Горизонт включает песчаные породы от люкатиной свиты нижнего кембрия до тосненской свиты нижнего ордовика. Водовмещающие породы представлены мелкозернистыми песками и песчаниками с редкими прослоями глин. Мощность горизонта увеличивается от уступа на юг и юго-восток от 5 до 25 м. Глубина залегания кровли возрастает по падению пород от 6 до 28 м (п. Красный Бор, п. Ульяновка).

Водоносный горизонт на большей части территории содержит напорные воды с величиной напора над кровлей до 16 м и только в пределах узкой полосы вдоль глинта вскрываются безнапорные воды. Глубина залегания уровня 2,5-20 м (скв. 53, 3298).

Питание водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков и поступления вод из вышележащего ордовикского горизонта. Движение подземных вод в целом направлено с запада на восток.

Вдоль глинта и в долинах рек Ижора, Тосна происходит разгрузка подземных вод. Здесь зафиксированы родники с дебитом 0,01-1,0 л/с.

Водообильность горизонта достаточно выдержанная. Удельный дебит скважин изменяется от 0,01 до 2,0 л/с·м. Коэффициент фильтрации песков 0,5-8,0 м/сут. Водопроницаемость горизонта характеризуется показателем не более 100 м<sup>2</sup>/сут.

На большей части территории подземные воды пресные гидрокарбонатные магниево-кальциевые, кальциево-магниевые и со смешанным катионным составом. В единичных водопунктах зафиксированы подземные воды сульфатно- и хлоридно-гидрокарбонатные с минерализацией 0,4-0,6 г/л.

Запасы подземных вод кембро-ордовикского водоносного горизонта утверждены на Красноборском (5 тыс.м<sup>3</sup>/сут) и Анноловском (0,03 тыс.м<sup>3</sup>/сут) месторождениях.

Подземные воды кембро-ордовикского горизонта широко используются для водоснабжения, иногда совместно с ордовикским горизонтом. Он является источником

водоснабжения таких населенных пунктов, как п. Красный Бор, п. Аннолово, а также города Тосно.

#### Нижнекембрийский (лонтоваский) водоупорный горизонт ( $C_1(ln)$ )

Горизонт распространен на большей части территории, отсутствуя лишь на севере и в пределах глубоких древних долин. На Предглинтовой и Приневской низменности он залегает под четвертичными образованиями на глубине от нескольких метров до 30-50 м.

Лонтоваский горизонт сложен плотными тонкоплитчатыми глинами, в толще которых встречаются маломощные (1-10 см) прослои тонко- и мелкозернистых песчаников. Мощность горизонта составляет 24 м в зоне выклинивания (скв. 2756) и достигает 133 м южнее полигона «Красный Бор» (скв. 12 ст. Поповка).

Коэффициент фильтрации кембрийских глин по результатам консолидационных испытаний равен  $4,53 \cdot 10^{-9} - 4,82 \cdot 10^{-9}$  м/сут (усредненное значение для глин с глубиной залегания 6,9-14,8 м, абсолютная отметка 8,6-15,8 м) [2].

Лонтоваский горизонт «синих глин» является региональным водоупором на территории Ленинградского артезианского бассейна. В южной части г. Санкт-Петербурга в нижнекембрийских глинах проложены такие станции метрополитена, как «Купчино», «пр. Ветеранов» и др.

#### Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт ( $C_1$ )

Водоносный горизонт распространен всей территории площади работ. 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.

Водоносный горизонт сложен тонко- и мелкозернистыми песчаниками с прослоями глин и алевролитов. Мощность увеличивается от 3-5 м в зоне выклинивания до 10-25 м в южной и юго-восточной частях территории. В Предглинтовой низменности глубина залегания кровли горизонта в зависимости от мощности перекрывающих четвертичных образований и лонтоваских глин составляет 60-100 м, южнее глинта с погружением горизонта под осадочную толщу кембрия и ордовика глубина залегания увеличивается до 128-164 м. Подстилающими породами повсеместно являются глины котлинского горизонта верхнего венда.

Водоносный горизонт содержит напорные воды. Величина напора закономерно увеличивается по падению кровли на юг и юго-восток от 51 м до 135 м. Уровень воды

устанавливается на Предглинтовой низменности на глубине 4,3-14 м, на Тосненской равнине увеличивается до 30 м.

Движение подземных вод ломоносовского горизонта происходит в северном направлении от Тосненской равнины к Предглинтовой низменности, а также на Приневской низменности. Абсолютные отметки уровня уменьшаются от 35 до 5 м.

Водообильность горизонта слабая. Удельный дебит скважин составляет 0,003-0,01 л/с·м (скв. 70, скв. 73). Водопроницаемость по результатам опытно-фильтрационных работ 2008 г. составила 0,8 м<sup>2</sup>/сут, коэффициент пьезопроводности 3,9·10<sup>5</sup> м<sup>2</sup>/сут [6].

Подземные воды горизонта на рассматриваемой территории имеют преимущественно хлоридный натриевый состав с минерализацией 1,8-3,6 г/л. В связи со слабой водообильностью и повышенной минерализацией подземных вод горизонт для хозяйственно-питьевого водоснабжения на площади работ не используется.

В 2008 г. оценены запасы подземных вод ломоносовского водоносного горизонта в объеме 0,019 м<sup>3</sup>/сут для технологического водоснабжения на месторождении «Шушаровское» в Колпинском районе. Вода хлоридная натриевая с минерализацией 2,5 г/л. В связи с природным несоответствием качества вод горизонта питьевым нормативам, вода, поступающая из скважины, проходит предварительную подготовку (обезжелезивание, опреснение и др.). После подготовки качество воды отвечает нормам СанПиН 2.1.4.1074-01 [6], в частности минерализация воды 2,2 г/л уменьшилась до величины менее 0,5 г/л.

Превышение по железу носит природный характер, имеет региональное распространение и связано с гидрохимическими особенностями состава водовмещающих пород. Отклонение от нормативного показателя по мутности связано с повышенным содержанием железа. Повышенное содержание железа в целом характерно для подземных вод северо-запада и объясняется восстановительной обстановкой, складывающейся в зоне затрудненного газообмена под мощной непроницаемой толщей кембрийских глин, при которой устойчива двухвалентная форма железа, склонная оставаться в растворе.

Удельная суммарная альфа- и бета-радиоактивность вод обусловлена наличием природных радионуклидов. Поскольку, суммарное отношение измеренных значений удельной активности радионуклидов в воде к соответствующим уровням вмешательства меньше единицы, мероприятия по снижению радиоактивности не обязательны, т.е. воды ломоносовского горизонта соответствуют нормам СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009).

Режимные наблюдения за уровнем подземных вод ведутся за пределами района работ, в п. Вопша Гатчинского района. Среднегодовой уровень воды в 2016 г. по данным ГСМН составил 45,13 м, абсолютная отметка устья 54,08 м.

### Верхневендский (котлинский) водоупорный горизонт $V_2(kt)$

Горизонт распространен на всей рассматриваемой территории. В районе Санкт-Петербурга и вдоль р. Невы горизонт залегает под четвертичными образованиями на глубине 52 м. Здесь мощность горизонта, зависящая от дочетвертичного рельефа, изменяется в больших пределах от 50 до 130 м.

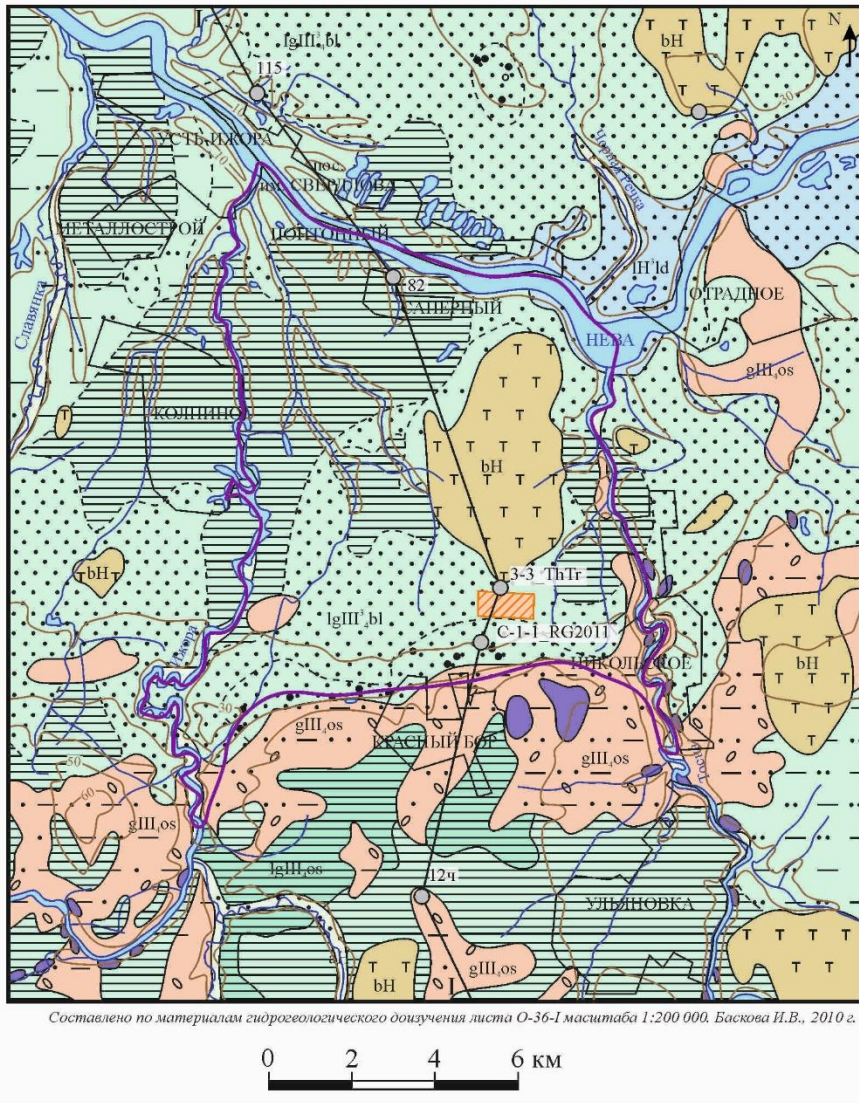
В юго-восточном и южном направлении горизонт погружается под образование кембрия и ордовика на глубину до 93 (г. Колпино) – 145 м (ст. Саблино). Здесь мощность горизонта более выдержана и составляет 100-130 м.

Горизонт сложен плотными тонкослоистыми зеленовато-серыми и красновато-бурыми глинами с коэффициентом фильтрации  $1 \cdot 10^{-6}$  м/сут [3]. Коэффициент вертикальной фильтрации котлинских глин был определен МГУ в 1982 г. методом математического моделирования.

Горизонт является мощным выдержанным водоупором, разделяющим четвертичный и ломоносовский водоносный горизонты от нижележащего вендского комплекса.



ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

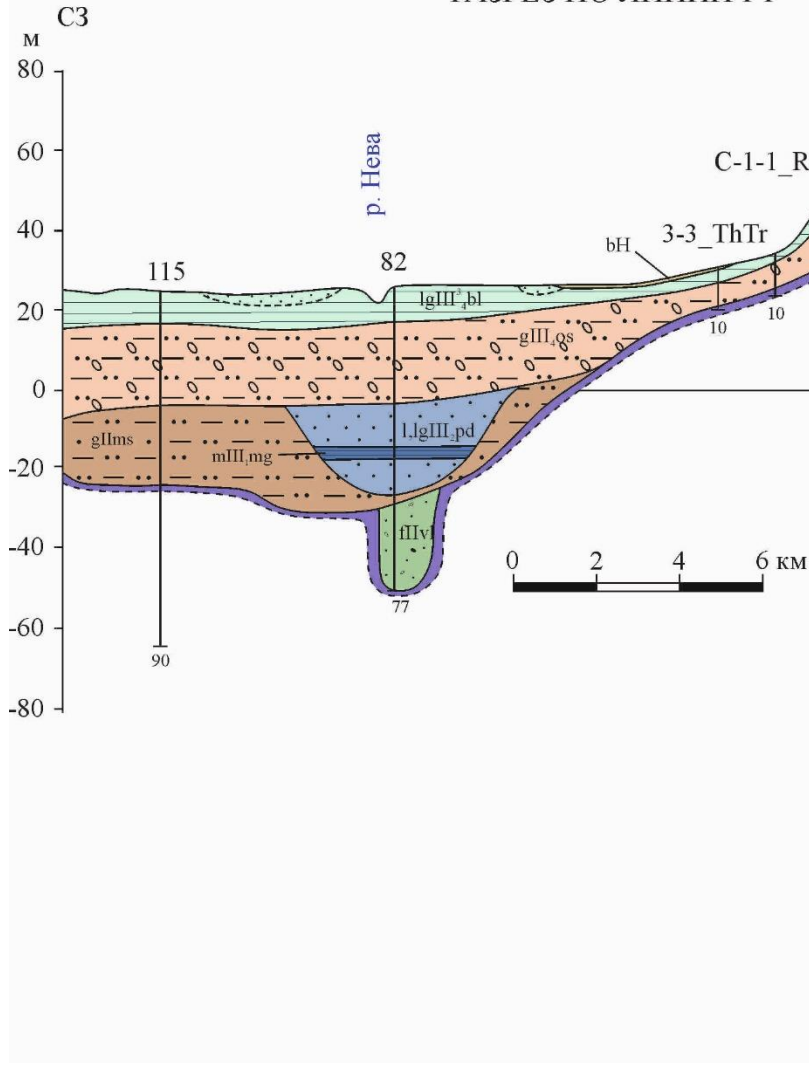


УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| Найболее   | Раздел        | Звено   | Ступень   | Условные части голоцена | СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ                                                                                                   |
|------------|---------------|---------|-----------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Голоцен    |               |         | Верхняя   | aH                      | Аллювиальные отложения. Пески (до 4м)                                                                                                                 |
|            |               |         |           | bH                      | Биогенные (болотные) отложения. Торф (до 4м)                                                                                                          |
|            |               |         |           | lH <sup>1</sup> ld      | Озерные отложения ладожской трансгрессии. Пески (до 6м)                                                                                               |
| Плейстоцен | Неоплейстоцен | Верхнее | Четвёртая | lgIII <sup>1</sup> ,bl  | Озерно-ледниковые отложения Балтийского ледникового озера. Глины ленточные, пески, супеси, пески с гравием и галькой. Мощность до 15м                 |
|            |               |         |           | lgIII,os                | Озерно-ледниковые отложения. Пески, пески с гравием и галькой, глины и глины ленточные. Мощность до 5м                                                |
|            |               |         |           | gIII,os                 | Ледниковые отложения. Суглинки и супеси с гравием, галькой и валунами, включая оторосцы дочетвертичных образований. Мощность до 20м                   |
|            |               |         |           | l.lgIII,pd              | Подпорожский горизонт. озерные и озерно-ледниковые отложения. Пески, супеси, суглинки (до 20м) (только на разрезе)                                    |
|            |               |         |           | mIII,mg                 | Микунинский горизонт. Мгинская свита. Морские образования. Глины, суглинки, редко супеси и пески (до 5м) (только на разрезе)                          |
|            |               |         |           | gIIms                   | Московский горизонт. Ледниковые образования (морена). Суглинки и супеси с гравием, галькой и валунами (до 20м) (только на разрезе)                    |
|            |               |         |           | fIIv                    | Вологодский горизонт. Флювиогляциальные образования (в древних долинах). Разнозернистые пески, пески с гравием и галькой (до 46м) (только на разрезе) |
| Среднее    |               | Первая  | Вторая    |                         |                                                                                                                                                       |

Дочетвертичные образования

РАЗРЕЗ ПО ЛИНИИ I-I



Литологические обозначения

- Пески
- Торф
- Пески с гравием и галькой
- Суглинки
- Глины и глины ленточные
- Суглинки с гравием, галькой и валунами
- Прочие знаки**
- Достоверные границы стратиграфо-генетических подразделений
- Границы литологических разностей пород
- Горизонталы рельефа дневной поверхности
- Линия геологического разреза, скважина и её номер
- Участок исследований

115  
|  
90  
Скважины на разрезах: сверху - номер скважины; внизу - глубина скважины, м

Рисунок 1.2. Геологическая карта четвертичных отложений и условные обозначения к ней



## 2. Современное состояние полигона

Выше было сказано, что на площади полигона в 74 га 47 занято непосредственно картами. Последние представляют собой котлованы глубиной до 22 м. В настоящее время заполнены и закрыты более 60 карт-котлованов, заполнены, но не закрыты 5 карт: №№ 59, 66, 67, 68, в них около 700 тыс. тонн жидких промышленных отходов. Самые опасные № 64, 68 карты временно укрыли геомембранным покрытием на понтонном основании.

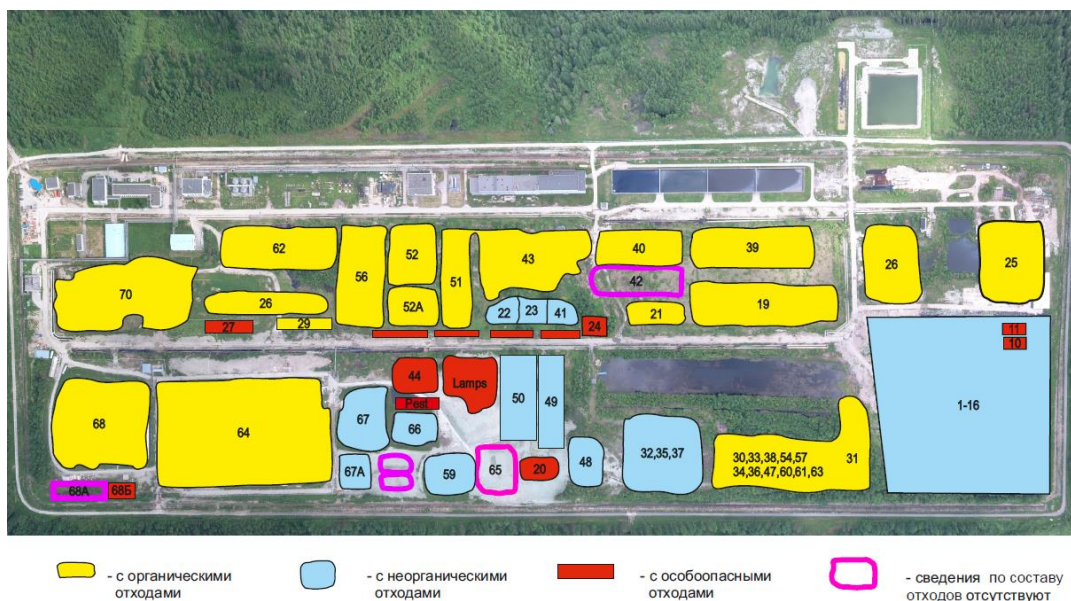


Рисунок 2.1. Схема расположения карт – котлованов

Особо токсичные отходы - сильнодействующие ядовитые вещества: пестициды 1 класса опасности; мышьяковый и мышьяковистый ангидриды; соли мышьяка; сулема; соли синильной кислоты; соли нитрилакриловой кислоты принимались в специальных контейнерах из стали марки СТ-3 толщиной 10 мм, внутри забетонированных, снаружи залитых битумом. Они были захоронены в отдельные специальные карты.

Таблица 2.1. Отходы захороненные на полигоне «Красный Бор»

| Наименование отхода или группы отходов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Класс опасности | Опасные свойства отходов, способ размещения                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Особо токсичные вещества: соединения ртути, гальванические отходы, содержащие хром (6-вал.), кадмий, свинец, цианиды, ядохимикаты                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1-2             | Токсичные. Герметичные контейнеры на специальной площадке.                   |
| Осадки после обработки жидких промышленных отходов, содержащих, в основном, органические соединения: эмульсии и эмульсолы, отходы производства фенола и ацетона, отходы лакокрасочной продукции, отходы производства каучука, отходы производства пластмасс, отходы хим.фарм. промышленности, отходы бытовой химии, отходы производства спиртов, отходы масложировой продукции, отходы электротехн. промышленности, загрязненные растворители | 3               | Экотоксичные пастообразные вещества. Карты для органических отходов          |
| Осадки после обработки жидких промышленных отходов, состоящих, в основном, из неорганических соединений: отходы гальванических производств, отходы обезжиривания металлов, отходы, содержащие жидкое стекло, отходы бумажной полиграфической промышленности, нейтрализованные цианистые отходы и пр                                                                                                                                           | 3               | Экотоксичные пастообразные вещества. Карты для неорганических отходов        |
| Твердые промышленные отходы (грунты, содержащие нефтепродукты, прочие загрязненные грунты, шины, затвердевшие лаки, краски, мастики, строительные отходы                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 4               | Экотоксичные Твердые. В качестве загустителей для последующего закрытия карт |



Рисунок 2.2. Твердые отходы в карте 64

Изначально на территории полигона залежали четвертичные отложения мощностью до 6 м и более. В результате строительства и эксплуатации объекта в разрезе появились насыпные техногенные грунты, которые представляют собой перекопанные и переотложенные породы квартера с примесью строительного мусора и используемых технологических грунтов. В итоге верхняя часть разреза полигона представлена в основном теми же суглинками, супесями и песками, что и до антропогенного воздействия. Дополнительно по краям карт возведены насыпи до 4 м высотой из кембрийских глин, нарушенное состояние которых негативно сказывается на их водоупорных свойствах.

Борта вырытых котлованов (карт) сложены кембрийскими глинами, техногенными и четвертичными грунтами и отсыпанными глинами насыпей, которые местами замещают квартал до кровли кембрия. В результате помимо контакта с плотными древними глинами отходы полигона взаимодействуют с дисперсными четвертичными отложениями (суглинки, супеси, пески), залегание которых носит сложнодислоцированный характер. Через такие контакты и происходит загрязнение подземных вод.

По предварительным оценкам основная масса загрязняющих веществ выносится с поверхностным стоком. Специалисты АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» подсчитали приблизительный водный баланс территории полигона: с поверхностным и подземным стоком с территории полигона стекает 197000 м<sup>3</sup> загрязненной воды в год (6,2 л/с). Основная масса попадает в реку Большая Ижорка с кольцевого канала полигона, который в итоге разгружается в реку, и по тальвегам прилегающих понижений/оврагов.

По результатам оценки загрязнения окружающей среды специалистами «Севзапгеология» и «Урангеологоразведка» в пределах территории санитарно-защитной зоны полигона «Красный Бор» можно сделать ряд выводов:

1. Основными источниками загрязнения на рассматриваемой территории являются полигон «Красный Бор», закрытая свалка «Усть-Тосно», сельскохозяйственные поля, расположенные в южной части СЗЗ и транспортные магистрали.

2. Загрязнение почвы в СЗЗ за пределами Полигона носит локальный характер, и связано в первую очередь с переносом загрязнений от указанных источников с паводковым стоком и атмосферным переносом (в основном летучих органических соединений).

3. Химический состав поверхностных вод и концентрация в них загрязнителей значительно изменяется во времени, более точно о состоянии водных объектов можно судить по загрязненности донных отложений.

4. Результаты мониторинга подземных вод показывают, что за время эксплуатации Полигона за его пределами не были сформированы выдержанные ореолы

загрязнения, т.е. прямого и длительного выноса опасных веществ в окружающую среду с подземными водами не происходило. Характер изменения концентраций загрязняющих веществ в подземных водах во времени и пространстве указывает на их вторичное происхождение. Наиболее вероятно, что локальные очаги загрязнения подземных вод связаны с загрязнением почво-грунтов зоны аэрации и гидравлической связью с поверхностными водами. Так, в периоды паводка уровни подземных вод могут подниматься ближе к поверхности земли и контактировать с загрязненными почвами. Или в период половодья часть поверхностной загрязненной воды может остаться в многочисленных бессточных западинах, а затем оттуда уже поступать в подземные воды.

Так как карты распространены весьма плотно и занимают основную часть территории полигона (до 64% площади), а вторичное загрязнение грунтов развито предположительно повсеместно, было принято считать всю территорию полигона источником загрязнения.

### 3. Изучение фильтрационной неоднородности

С 1960-х годов по настоящее время было проведено множество работ по геологическому изучению территории полигона и прилегающих площадей и в проектно-изыскательных целях. Долгое время отчеты и результаты этих работ не были систематизированы и не имели единого места хранения. Только в 2016 году Российский геологический центр произвел сбор и анализ ранее выполненных работ.

Для создания геолого-гидрогеологической модели сотрудниками СПБО ИГЭ РАН были выбраны 30 отчетов, из них использовалась и оцифровывалась информация по более чем 500 скважинам. Литологические данные сразу систематизировались по «литогидрофациям», а не по генезису и возрасту, т.к. это упрощало создание геолого-гидрогеологической модели. Под литогидрофациями принимали одну или набор литологических разностей, которые обладают схожими фильтрационными свойствами. Всего на участке исследований было выделено 6 литогидрофаций

Таблица 3.1. Соотнесение выделенных литогидрофаций с основными литологическими разностями

| № | Литогидрофация                       | Литология                               |
|---|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | Техногенные проницаемые породы       | Техногенный песок и супесь              |
| 2 | Техногенные слабопроницаемые породы  | Техногенные суглинки                    |
| 3 | Захороненные карты                   | Смесь строительного мусора, глин, песка |
| 4 | Четвертичные проницаемые породы      | Горф, четвертичные пески и супеси       |
| 5 | Четвертичные слабопроницаемые породы | Четвертичные суглинки                   |
| 6 | Кембрийские слабопроницаемые породы  | Кембрийские глины                       |

На основании полученных данных была создана трехмерная модель распространения шести литогидрофаций (рис. 3.3, 3.4), а так же карта кровли кембрийских глин (рис. 3.5). Данные о залегании захороненных карт были получены с помощью геофизических данных, на основании материалов топографической съемки карт при их строительстве и фоновых геологических скважин. Уточнение границ и глубин карт прямыми методами (бурением) не представлялось возможным, так как из-за нарушения целостности перекрывающих отложений могли произойти выбросы под давлением токсичных загрязняющих веществ, что опасно для жизни рабочих и окружающей среды.



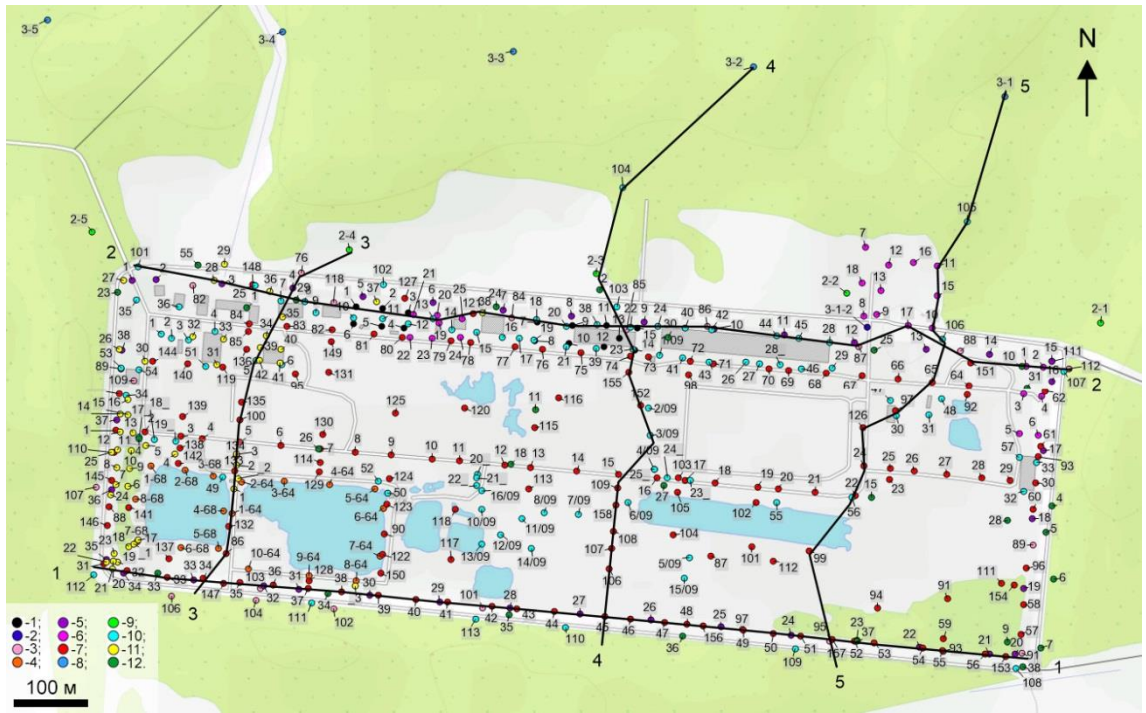


Рисунок 3.1. Схема расположения систематизированных и обработанных скважин.  
Ближняя зона.

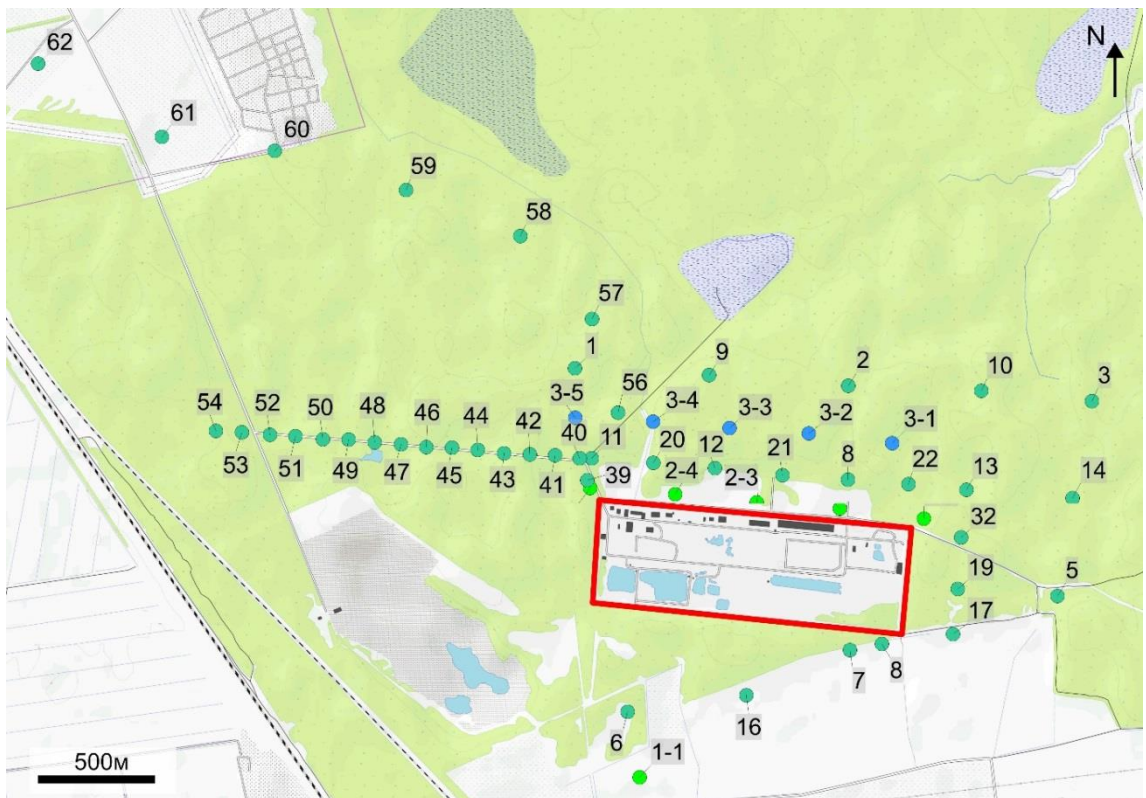


Рисунок 3.2. Схема расположения систематизированных и обработанных скважин.  
Дальняя зона

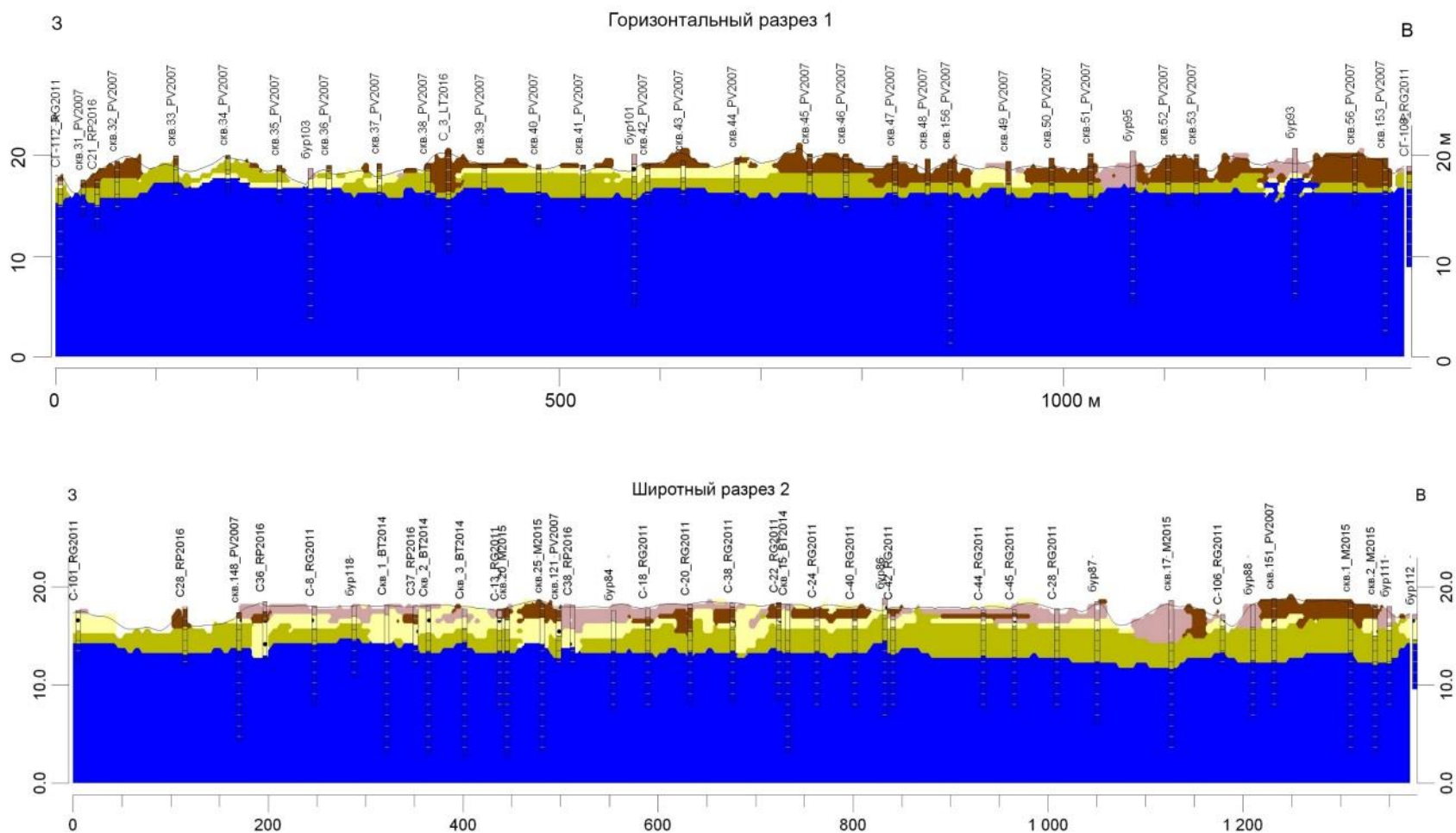


Рисунок 3.3. Широтные литогидрофациальные разрезы.  
Линию разреза см. на рис. 3.1. Легенда на Рисунке 3.4



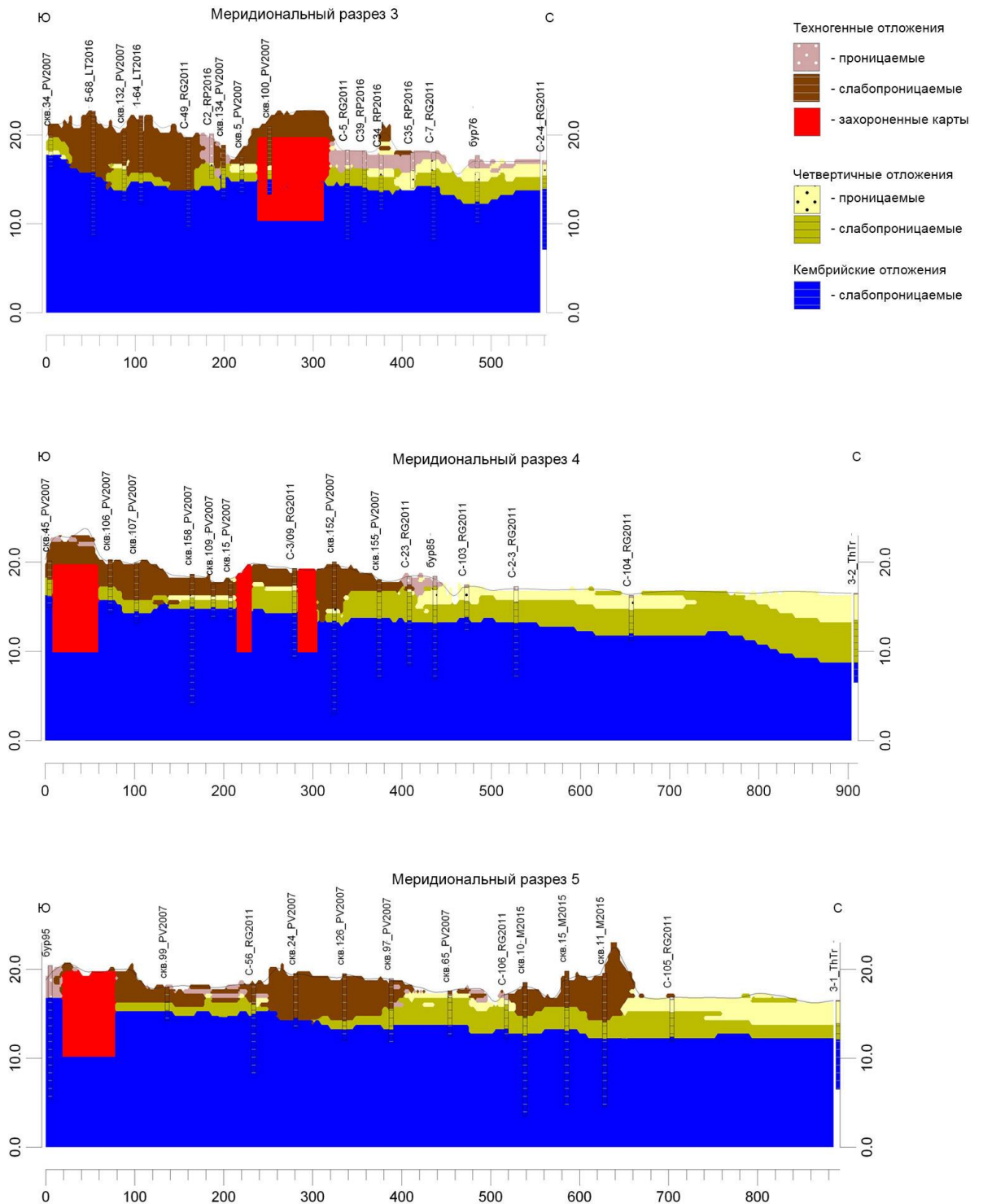


Рисунок 3.4. Меридиональные литогидрофациальные разрезы. Линию разреза см. на рис. 3.1

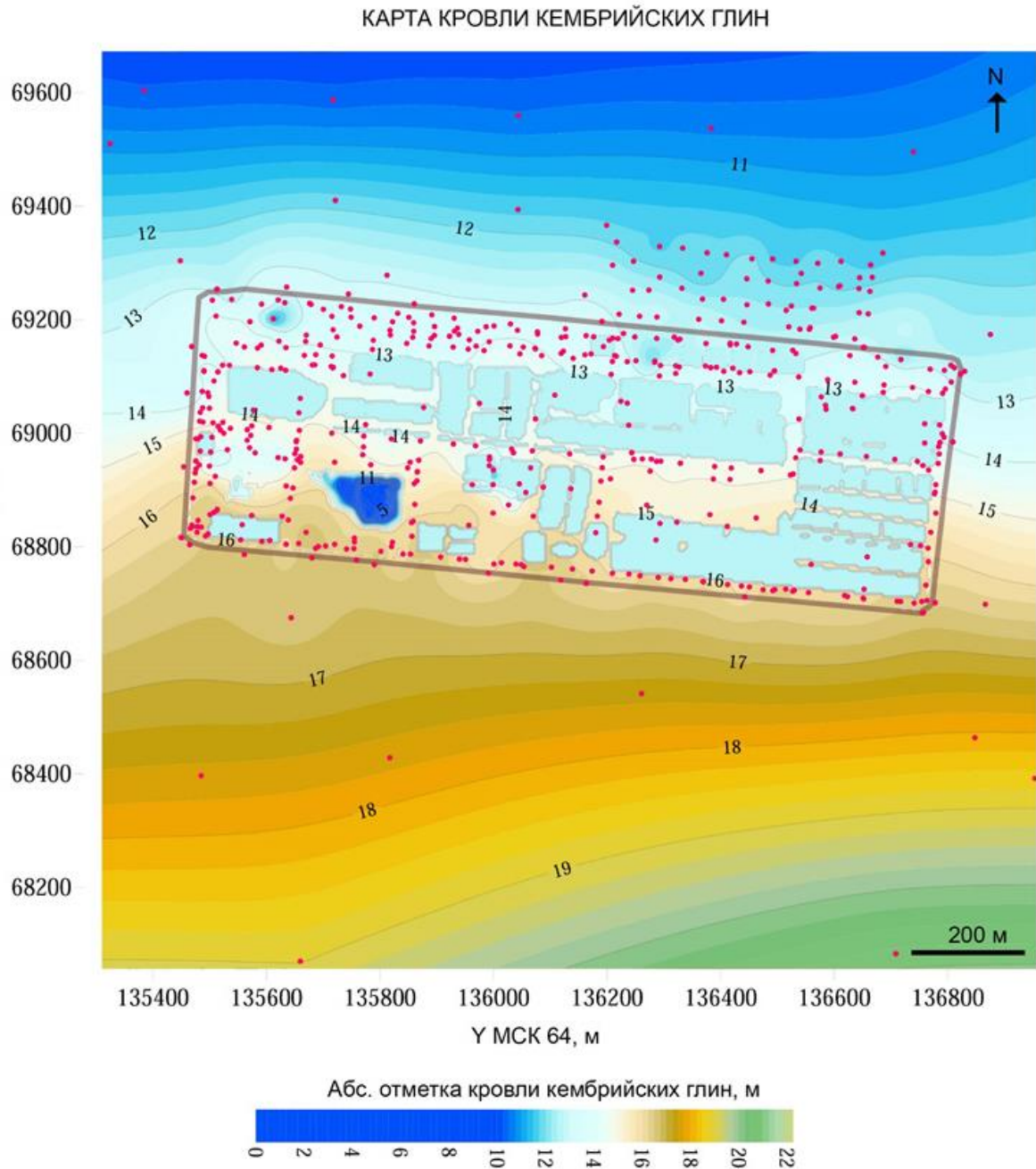


Рисунок 3.5 – Структурная карта кровли кембрийских глин

Для качественной оценки проницаемости четвертичных отложений на территории полигона и прилегающих площадях неоднократно проводились опытно-фильтрационные опробования. Наибольший вклад был внесен тремя организациями: РГЭЦ (12 откачек в 2009 г.) [7]; ЛЕНТИСИЗ (12 наливов в 2019 г.) [8]; КомплексПроект (14 откачек в 2020 г.) [9]. Места проведения ОФР совместно с результатами интерпретации отмечены на рисунке 3.6.

Поскольку грунтовый водоносный горизонт исследуемой территории является слабоводообильным, то для его опробования был выбран метод экспресс-откачек. В 2020

г КомплексПроектом бурились скважины на глубину до 10 м, по разрезу выделялся интервал обводненных пород и в интервал наиболее проницаемой части разреза устанавливался сетчатый фильтр длиной 3 м с гравийной обсыпкой толщиной 19 см. Из ствола скважины производилась откачка воды до уровня низа фильтра, а затем производилось прослеживание восстановления. Проведение откачек, а не наливов было продиктовано стремлением не нарушить сформировавшийся гидрохимический режим в пласте в период проведения инженерно-экологических изысканий и отбора проб воды из скважин (налив инородной по химическому составу воды в скважину может привести к смещению гидрохимических показателей на достаточно продолжительный период времени в условиях слабой проницаемости пласта).

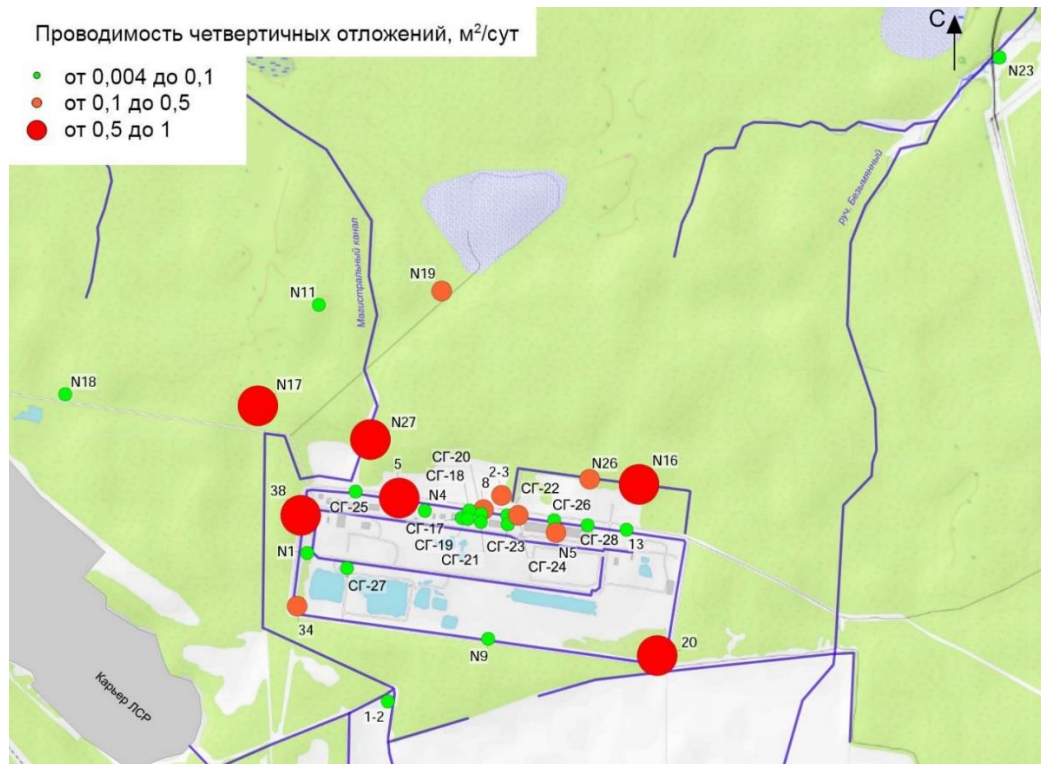


Рисунок 3.6. Карта распределения проводимости в четвертичных отложениях. Красный – опробования 2020 г (КомплексПроект); оранжевый – 2019 г (ЛЕНТИСИЗ); зеленый – 2009 г (РГЭЦ)

Все архивные данные по откачкам, проведенные РГЭЦ (в 2011 г) и ЛЕНТИСИЗ (в 2019 г) были заново переинтерпретированы. Обработка экспресс опробований проводилась при помощи решений Купера и Бауэра-Райса (рис. 3.8).

При проведении экспресс-опробований определялись средневзвешенные коэффициенты фильтрации интервала пород вскрытого фильтром скважины. Для того чтобы полученный эффективный параметр пересчитать на коэффициенты фильтрации

отдельных литологических разностей, проводилась специальная процедура подбора. Для этого в фильтровом интервале опробования каждой скважины были оценены мощности каждой литологической разности (песка, супесей, суглинков и глин). Для каждой разности подбирался такой коэффициент фильтрации, в результате которого бы суммарная расчетная проводимость интервала соответствовала полученному по результатам откачки параметру. Для всех 32 экспресс опробований подбирался один набор фильтрационных параметров. Результаты этого подбора представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Оптимизированные параметры коэффициента фильтрации отдельных литологических разностей пород в окрестностях полигона «Красный Бор»

|                               | Песок | Супесь | Суглинок   | Глина      |
|-------------------------------|-------|--------|------------|------------|
| Коэффициент фильтрации, м/сут | 0,4   | 0,1    | Менее 1E-2 | Менее 1E-4 |

На основании полученных в ходе экспресс опробований данных о проводимости квартера была построена карта суммарной проводимости четвертичных отложений (рис. 3.7).

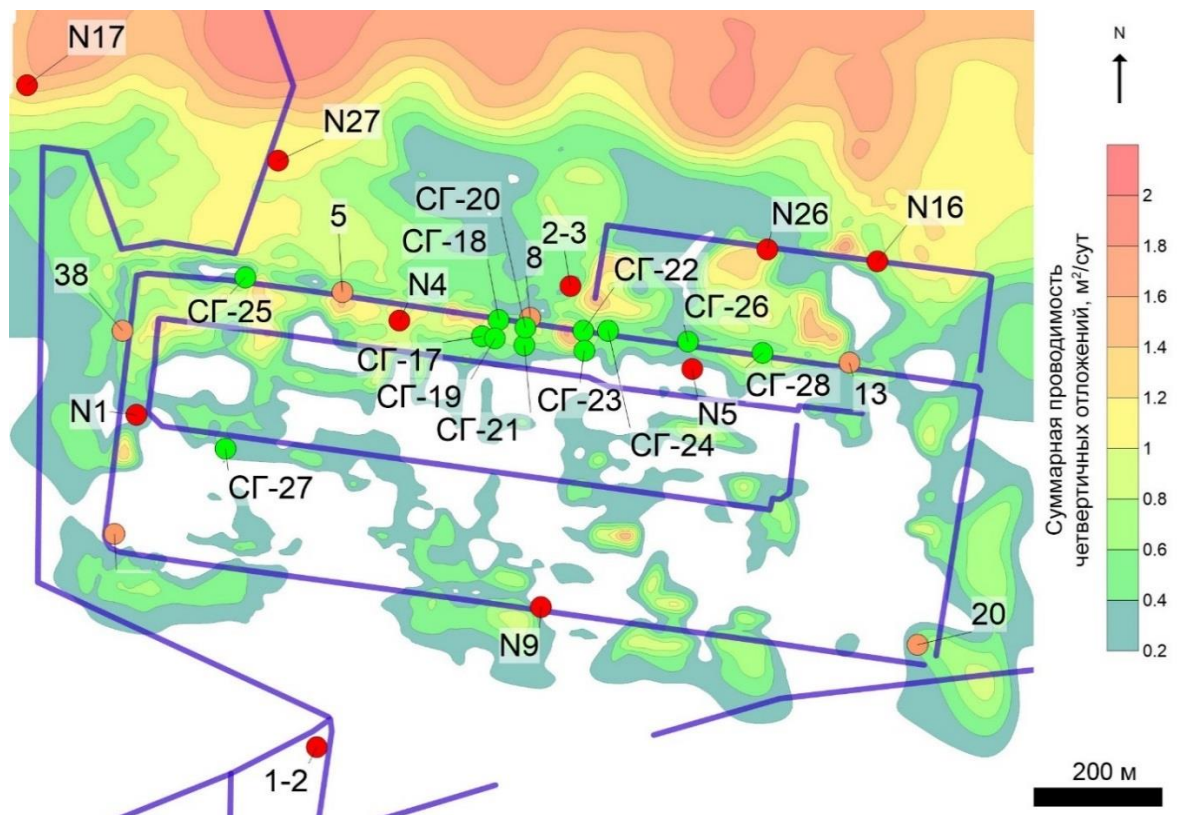


Рисунок 3.7. Карта суммарной проводимости четвертичных отложений



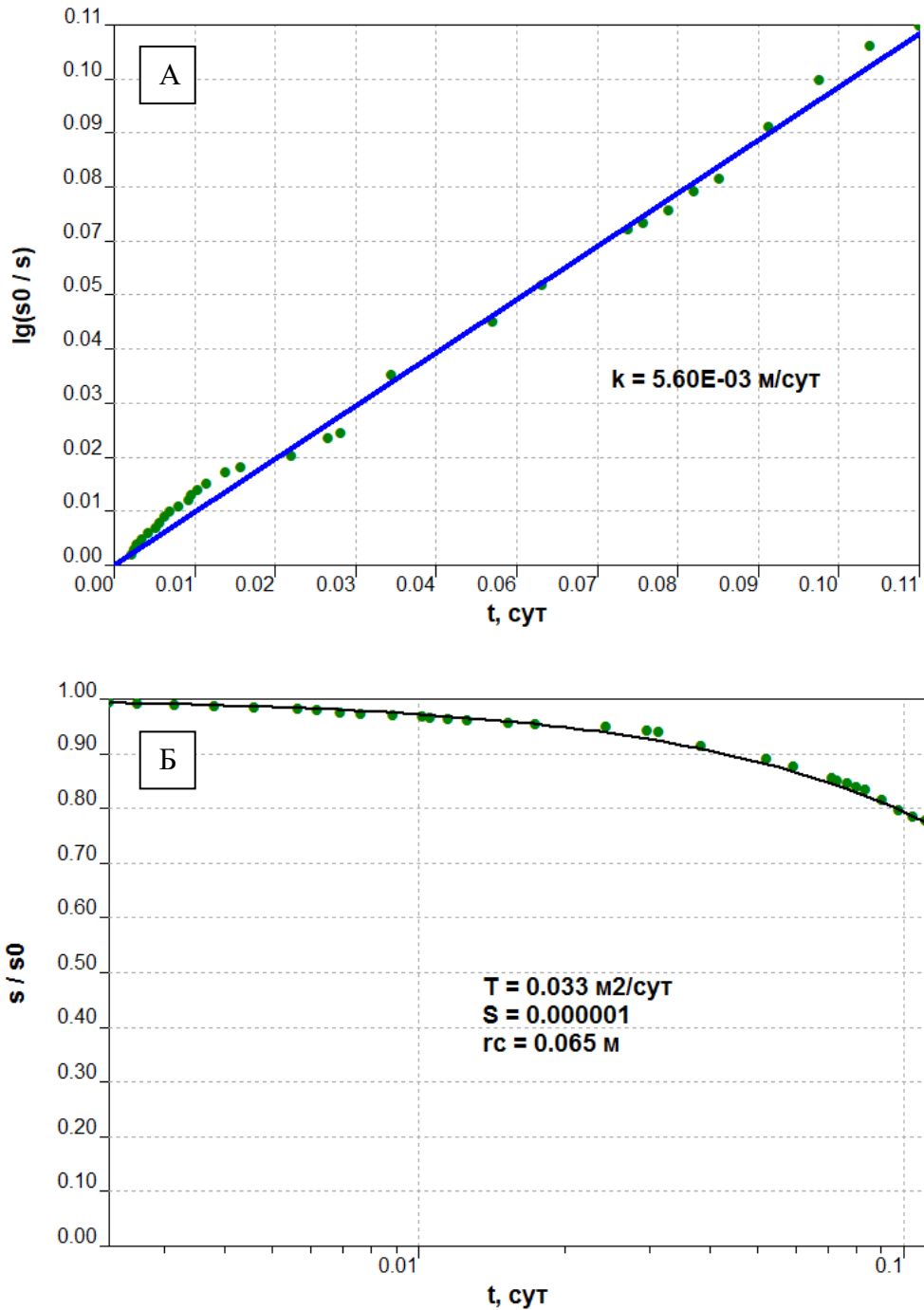


Рисунок 3.8. Пример обработки откачки в программном комплексе ANSDIMAT методом Бауэра-Райса (А) и методом Купера (Б).

По карте (рис. 3.7) хорошо видно, что существует общий тренд увеличения проводимости четвертичных отложений с юга на север-северо-запад. Это хорошо согласуется с геологическими представлениями об увеличении мощности четвертичных отложений в том же направлении. На южной границе Полигона суммарная водопроницаемость грунтовых вод меньше  $0,2 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Лишь только в отдельных скважинах встречаются прослои проницаемых песков, которые локально поднимают значение

проводимости. На территории Полигона в процессе откопки карт песчаные прослой были изъяты. Относительно выдержанный прослой песков начинает фиксироваться только на северной границе Полигона под дренажной канавой. Это создает предпосылки к формированию возможных путей миграции загрязнения с территории Полигона вместе с подземными водами. Максимальные проводимости четвертичных отложений наблюдаются на северной границе карты и не превышают значений в  $2 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Отдельным вопросом при изучении структурных особенностей территории полигона стало наличие палеорусел. Погребенные долины характерны для региона, в котором проводятся исследования, и их наличие может стать благоприятным фактором для ускоренной и концентрированной миграции загрязнения. Так же палеорусло может быть косвенным признаком наличия разлома в коренных отложениях, либо присутствия ослабленной зоны в них. Оба варианта будут негативно сказываться на защитной функции толщи глин.

Специалисты, занимавшиеся изучением наличия палеорусел на территории полигона разделились на две группы: одни утверждают о наличие неотектонических процессов и разломов с присутствием погребенных долин, а другие же говорят об обратном. Подробнее о методах их исследований и результатах рассказано ниже.

В середине 1990-х и начале 2000-х годов поиском палеорусел занимались сотрудники ГПП “Севзапгеология” под руководством Б.Г. Дверницкого и В.Н. Пекельного [10], [11]. В основу поиска была положена технология биолокации и спектро-сейсмического исследования (А.Г. Гликман).

Сотрудниками ГПП “Севзапгеология” составлена карта (рис. 3.9). Согласно этой карте прослеживается русло вдоль южной границы Полигона, а также русло, которое сечет Полигон в северо-восточной части Полигона. Выделенные авторами работ области были ассоциированы с зонами повышенного транзита подземных вод. Развитием работы стало проведение комплекса газогеохимической съемки территории и кондуктометрической съемки. По результатам исследований построена карта районирования территории Полигона по уровню неотектонической активности

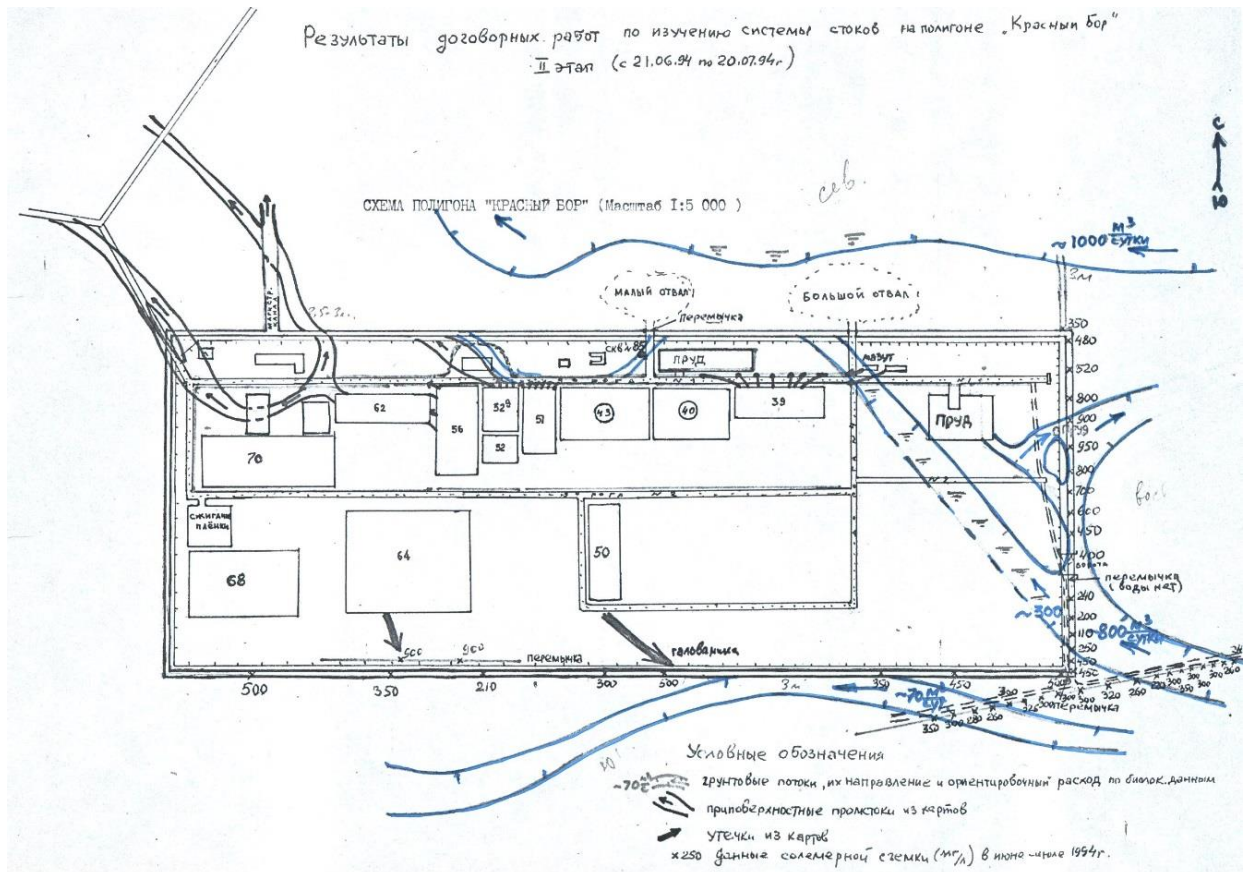


Рисунок 3.9. Схема предполагаемого расположения палеорусел по [10]

Отметим, что использованные сотрудниками ГПП “Севзапгеология” методы и полученные ими результаты вызвали в сообществе геологов неоднозначную реакцию. На сегодняшний момент примененные специалистами ГПП “Севзапгеология” методы исследований официально не используются при изысканиях. Более того, они признаны большинством специалистов как псевдонаучные, т.к. не имеют под собой строгого теоретического базиса.

Несмотря на некоторую неоднозначность применяемых сотрудниками ГПП “Севзапгеология” методов исследований в своей работе, они способствовали привлечению внимания специалистов к проблеме изучения тектонического строения территории Полигона.

В 2006 году сотрудниками ФГУ НПП “Геологоразведка” были произведены геофизические исследования на территории полигона. Ими были применены следующие методы:

- Радиоэлектроманнитное профилирование (РЭМП);
- Радиоэлектроманнитное зондирование (РЭМЗ);
- Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ);
- Георадар (радиолокатор).

По результатам данных исследований не было найдено доказательств присутствия разрывных нарушений.

В 2020 году были выполнены работы по электротомографии и сейсмопрофилированию. Вместе с этим были пробурены опорные скважины для уточнения разреза и дополнительно изучены фондовые материалы по уже имеющимся выработкам.

Электротомография в обработке исполнителей не смогла дать уместных результатов даже по выделению кровли кембрийских глин. Территория площадки – техногенное поле, в котором присутствует множество объектов дающих искажения при электроразведке. Поэтому аномалии полученные на электроразведочном профиле плохо коррелируют с данными по бурению.

Сейсмопрофилирование дало более информативный результат по скорости продольных волн. С ее помощью хорошо отбивается кровля плотных кембрийских глин, при этом не выделяется явных зон разуплотнения, которые отражаются в падении скорости распространения.

По карте кровли кембрийских глин (рис. 3.5) выраженных линейных понижений не прослеживается, отложения кембрия полого падают на С-С-3. Таким образом, ни сейсмопрофилирование, ни прямые данные по бурению не подтвердили существование палеорусел в местах, отмеченных специалистами «Севзапгеология».

По итогу мы имеем следующие закономерности развития грунтов на территории полигона:

- 1) мощность четвертичных отложений увеличивается с юга (2-3 м) на север (до 10м), так же как и их проводимость;
- 2) четвертичные отложения в верхней своей части имеют проницаемый слой;
- 3) в основании квартера находятся слабопроницаемые суглинки;
- 4) в кровле кембрийских глин имеется слой дислоцированных глин мощностью в несколько метров;

Еще раз отметим что многочисленные данные бурения и дополнительных геофизических исследований не дали подтверждения развития палеорусел на территории полигона, тем более в тех местах, где они предполагались. Таким образом, массив глин будет принят за однородный пласт с выдержанными характеристиками слагающих его пород.



## 4. Изучение барьерных свойств кембрийских глин

Для оценки коэффициента фильтрации кембрийских глин у нас имелись протоколы лабораторных испытаний за 2016, 2019 (метод компрессионного сжатия) и 2020 год (метод компрессионного сжатия и определение коэффициента фильтрации прямым методом). Также непосредственно сотрудниками ИГЭ РАН были проведены пакерные опробования. Имеющиеся материалы по вышеперечисленным исследованиям были повторно обработаны и проверены на корректность в рамках настоящей работы.

### 4.1. Пакерные опробования

Чтобы оценить фильтрационную неоднородность кембрийских глин в плане и в разрезе по линии ПФЗ в 2021 году были проведены поинтервальные нагнетания в скважины. Нагнетания осуществлялись при помощи специализированного оборудования с применением пакеров.

Сразу же отметим, что нагнетания не могут быть использованы для определения коэффициентов фильтрации пород ниже значений  $1\text{E-}4$  м/сут. Это связано с инструментальными ограничениями. Например, если мы зададимся коэффициентом фильтрации глин  $1\text{E-}6$  м/сут, то при давлении нагнетания 2 атм (20 м водного столба) в метровый интервал глин можно закачать 1 л воды за 27 дней. По этой причине проведение полевых опытно-фильтрационных работ в кембрийских глинах следует рассматривать как необходимый элемент для подтверждения того, что в глинах при естественном сложении отсутствуют открытые трещины или система трещин, по которым возможна быстрая фильтрация жидкости. А определение низких значений коэффициентов фильтрации глины следует проводить только в лабораторных условиях.

Поинтервальные нагнетания проводились на 4 участках (рис. 4.1). Технология работ предполагала на первом этапе бурение инженерно-геологической скважины на глубину до 10 м. По скважине проводилось описание разреза, уточнялись границы пород и интервалы установки пакеров. Также из инженерно-геологической скважины отбирались монолиты керна из намеченных для нагнетания интервалов, для последующего определения в лаборатории коэффициента фильтрации.

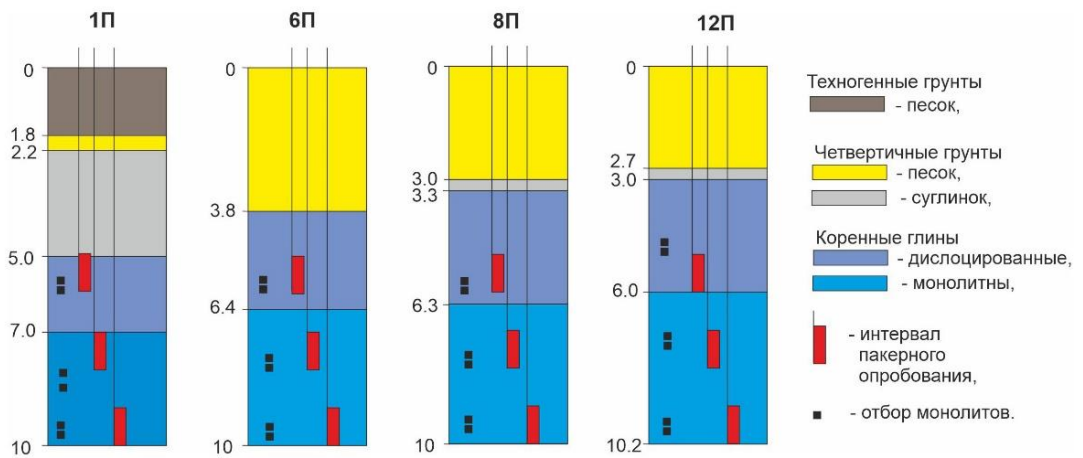


Рисунок 4.1. Схема расположения нагнетательных скважин и их геологический разрез

На втором этапе на расстоянии 1,5-2 м от инженерно-геологической скважины бурилась опытная скважина. Верхний проницаемый слой и толща пластичных четвертичных суглинков перекрывалась кондуктором до границы с кембрийскими глинами. Как правило, глубина кондуктора составляла 4 м. После установки кондуктора скважина разбуривалась 76 колонковой трубой на 2 м ниже забоя (до 6 м). Производилась промывка ствола скважины и установка пакера таким образом, чтобы опробуемый интервал составлял от забоя 1 м (т.е. в интервале от 5 до 6 м).

На третьем этапе проводилось нагнетание в интервал. После проведения эксперимента пакер извлекался из скважины, и она разбуривалась до глубины 8 м, а потом до 10 м. Таким образом, нагнетаниями поочередно были опробованы интервалы от 5 до 6 м; от 7 до 8 м; от 9 до 10 м.

При проведении нагнетаний нами была использована методика Люжона [18]. Она предполагает нагнетания с серией различных давлений. Давление ступенчато повышается до тех пор, пока не наступит раскрытие трещин, что отражается в поглощении большого

объема нагнетаемой жидкости. После раскрытия трещин ступени давления понижаются. Все нагнетания в интервал начинались с давления 1 атм, постепенно доводя давление ступенями до 6-10 атм. Суть методики Люжона заключается в том, чтобы на основании сопоставления скорости удельного поглощения от разных ступеней давления делать выводы о поведении и параметрах трещиноватой системы в изучаемом геологическом массиве.

Нагнетание воды в интервал осуществлялось при помощи специального компрессора. Для контроля давления в интервале опробования на установке был смонтирован манометр. Продолжительность каждой ступени составляла от 3 до 10 мин до тех пор, пока расход нагнетаемой в интервал воды не стабилизируется. Нагнетаемый расход контролировался расходомером. Общий вид нагнетательной установки и пакера приведен на Рисунке 4.2



Рисунок 4.2. Состав мобильной пакерной установки

Во время экспериментов постоянно проводился контроль герметичности изолированного интервала. Для этого уровнемером измерялся уровень воды над пакером. Также поддерживалось постоянное давление в подушках пакера (30 атм). Дополнительно на протяжении всего эксперимента проводился мониторинг уровня воды в инженерно-геологической скважине, пробуренной на расстоянии 1,5-2 м от нагнетательной.

На основании проведенных нагнетаний по методике Люжона можно оценить коэффициент фильтрации кембрийских глин для каждой ступени нагнетания. Для этого используется решение Мойе (4.1).

$$k = \frac{Qg\rho}{2\pi l_w \Delta P} \left( 1 + \ln \frac{l_w}{2r_w} \right) \quad (4.1.1)$$

$k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/сут;  $l_w$  – длина опробуемого интервала, м;  $r_w$  – радиус скважины, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – изменение давления на скважине, Па.

При проведении расчетов величина  $\Delta P$  складывалась из суммы давлений: показания манометра + давление столба воды от манометра до устья скважины + давление столба воды от устья скважины до статического уровня. Например, при нагнетании с 1 атм. (показания на манометре) величина  $\Delta P$  составит 1,4 атм (1 атм на манометре + 2 м от манометра до устья скважины + 2 м от устья скважины до статического уровня в сумме дают 1,4 атм).

Все расчеты проводились в программном комплексе ANSDIMAT. Пример окна интерфейса программы представлен на Рисунке 4.3.

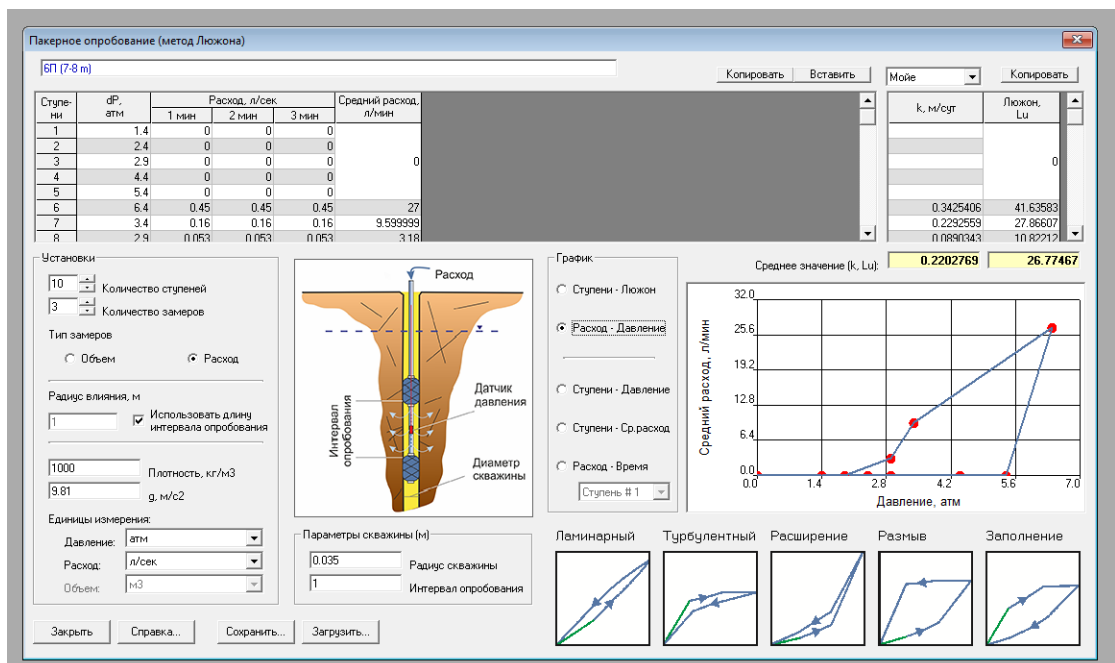


Рисунок 4.3. Модуль для обработки пакерных опробований в программе ANSDIMAT

Результаты поинтервальных нагнетаний представлены в Таблице 4.1, а также на рисунке 4.4. Из этих материалов видно, что ни в одном из исследуемых интервалов не

было обнаружено фильтрации воды при нагнетании воды с давлением, сопоставимым с бытовым. Это означает, что в естественном сложении в кембрийской глине отсутствуют водопроводящие трещины (т.е. все трещины блоковой системы находятся в сомкнутом состоянии).

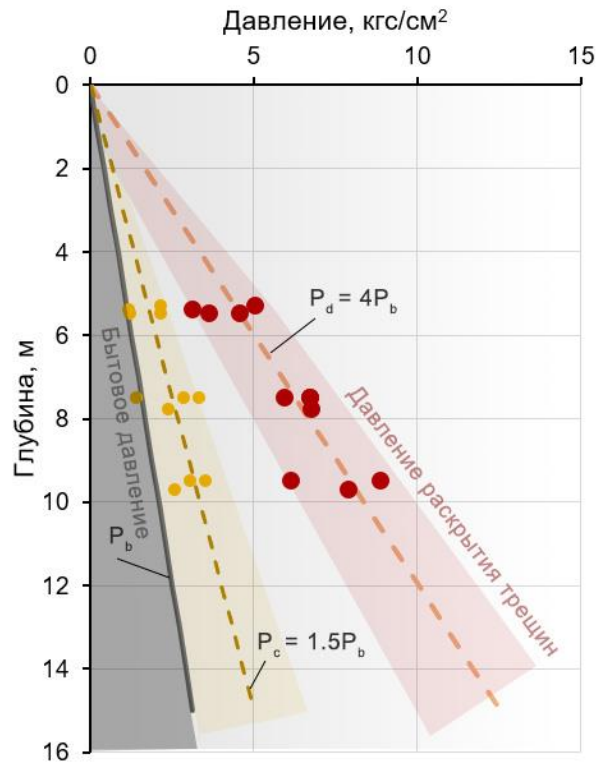
По мере увеличения давления до определенного момента также не наблюдается фильтрации (поглощения). Лишь только при достижении 4-х кратного превышения бытового давления в интервале наблюдается раскрытие систем трещин, т.е. происходит гидроразрыв, и вода начинает поступать в пласт. В таблицах 1-4 это давление обозначено как давление прорыва,  $P_d$ . В момент прорыва появляется поглощение в опробуемом интервале. Коэффициенты фильтрации могут достигать 0,5 м/сут. Очевидно, чем глубже находится интервал опробования, тем большее давление нужно приложить для вскрытия систем трещин. Так, например, на глубине 5 м достаточно нагнетать с давлениями около 2-3 атм, а на глубине 10 м уже потребуется 5-6 атм (рис. 4.3).

На Рисунке 4.4 проявляется гистерезис восходящей и нисходящей кривой давлений при нагнетании. Это свидетельствует о том, что в процессе нагнетания с большими давлениями в массиве проявляются пластичные деформации. Несмотря на необратимые деформации, при снижении давления нагнетания, во всех опробуемых интервалах произошло обратное смыкание трещин и массив вновь стал проявлять непроницаемые свойства. Вероятно, смыкание трещин происходит за счет действия на трещину бытового горного давления. В таблице 4.1 приведено для каждого интервала давление смыкания,  $P_c$ .

Для подтверждения последнего тезиса в скв 12П был проведен налив воды в интервал 4,8-10,2 м после гидроразрыва. В результате эксперимента было установлено, что за 14 часов уровень воды в скважине понизился на 1 см, причем данное понижение было зафиксировано в первоначальный период наблюдений.

На рисунке 4.3 показана связь глубины залегания кембрийской глины с поведением блочного массива. Хорошо видно, что по мере увеличения глубины требуются все более значительные давления для раскрытия блочной системы. Давление раскрытия трещин ( $P_d$ ) превышает горное давление ( $P_b$ ) примерно в 4 раза. Эта закономерность сохранится с глубиной.





Красные точки – измеренные давления раскрытия трещин ( $P_d$ ); Желтые точки – измеренные давления закрытия (смыкания) трещин ( $P_c$ ); серая линия – эпюра горного давления

Рисунок 4.4. Диаграмма соотношения бытового давления горной породы и давления раскрытия трещиноватой системы в глинах

Из рисунка 4.5 следует, что наиболее уязвимы при внешнем воздействии оказываются слой дислоцированных глин, где давление прорыва близко к величинам бытового давления.

По результатам поинтервальных нагнетаний можно сделать следующие выводы:

- при естественных условиях в исследуемых интервалах глубин (5-10 м) и дислоцированные и монолитные кембрийские глины обладают свойствами непроницаемого барьера. Все трещины блочного массива находятся в сомкнутом состоянии;

- при внешнем воздействии на глины с давлениями, превышающими 4 горных давления, происходит вскрытие трещин блочной системы. Коэффициенты фильтрации в таких условиях могут достигать до 0,5 м/сут;

- в естественных условиях кембрийские глины склонны к самозалечиванию трещин. Полевые эксперименты подтвердили, что даже после гидроразрыва толщи глин, она вновь приобретает свойства барьера после снятия избыточных давлений. Трещины смыкаются за счет пригрузки сверху горным давлением;

– потенциально наиболее уязвим для образования трещин при внешнем воздействии является интервал дислоцированных глин. При давлении от 2 атм. происходит раскрытие блоковой системы в верхнем интервале. При нагнетании в средний интервал, расположенный на границе дислоцированных и монолитных глин, или чуть ниже этой границы, для раскрытия трещинной системы придется приложить значительно большее давление (от 4-5 атм);

– для определения значений коэффициента фильтрации кембрийских глин в естественных условиях необходимо использовать лабораторные методы.

Таблица 4.1. Результаты поинтервальных нагнетаний с помощью пакерной системы

| № скв. | Интервал |       | Степень испытания   |                    |                      |                    |                      |                    |                      | Кэф. фильтрации<br>k, м/сут | Давление прорыва*<br>P <sub>d</sub> , атм | Давление закрытия*<br>P <sub>c</sub> , атм | Примечания                   |
|--------|----------|-------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|
|        | от, м    | до, м | Давление*<br>P, атм | Расход поглощения  |                      |                    |                      |                    |                      |                             |                                           |                                            |                              |
|        |          |       |                     | V <sub>1</sub> , л | t <sub>1</sub> , сек | V <sub>2</sub> , л | t <sub>2</sub> , сек | V <sub>3</sub> , л | t <sub>3</sub> , сек |                             |                                           |                                            |                              |
| II     | 4.9      | 5.9   | 1.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  | 2.5                                       | 0.5                                        | УГВ над пакером не изменился |
|        |          |       | 2.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 3.0                 | 5                  | 29                   | 5                  | 29                   | 5                  | 29                   | 0.24                        |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 1.0                 | 1                  | 37                   | 1                  | 37                   | 1                  | 37                   | 0.09                        |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 0.5                 | 0                  | 60                   | 0                  | 60                   | 0                  | 60                   | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        | 7.0      | 8.0   | 1.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  | 6.0                                       | 2.5                                        | УГВ над пакером не изменился |
|        |          |       | 2.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 3.5                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 4.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 5.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 6.0                 | 1                  | 26                   | 1                  | 15                   | 1                  | 15                   | 0.2                         |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 3.0                 | 1                  | 12                   | 1                  | 12                   | 1                  | 12                   | 0.12                        |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 2.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 60                   | 0                  | 60                   | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        | 9        | 10    | 1.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  | нет                                       | -                                          | УГВ над пакером не изменился |
|        |          |       | 2.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 3.5                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 4.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 5.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 6.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 7.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 8.0                 | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |
|        |          |       | 11.0                | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4                  |                                           |                                            |                              |

\* - указано значение, зафиксированное на манометре



Продолжение таблицы 4.1.

| № скв. | Интервал |       | Ступень испытания |                   |                    |                      |                    |                      |                    | Коэф. фильтрации | Давление прорыва * | Давление закрытия * | Примечания                                                                                                                                                                                                       |
|--------|----------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | от, м    | до, м | Давление*         | Расход поглатения |                    |                      |                    |                      |                    |                  |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       |                   | P, атм            | V <sub>1</sub> , л | t <sub>1</sub> , сек | V <sub>2</sub> , л | t <sub>2</sub> , сек | V <sub>3</sub> , л |                  |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
| 12П    | 4.8      | 5.8   | 2.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       | 4.5                | 1.5                 | УГВ над пакером не изменился                                                                                                                                                                                     |
|        |          |       | 3.5               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 4.5               | 22                | 60                 | 33                   | 90                 | 44                   | 120                | 0.37             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 3.0               | 10.9              | 60                 | 16                   | 90                 | 21                   | 120                | 0.26             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 1.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        | 7.3      | 8.3   | 1.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       | 6                  | 1.5                 | УГВ над пакером не изменился .<br>В наблюдательной скв. на расстоянии 1,9 м фиксировался рост УГВ: 20 см за 12 сек                                                                                               |
|        |          |       | 4.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 6.0               | 1                 | 18                 | 3                    | 54                 | 5                    | 90                 | 0.04             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 10.0              | 5                 | 11                 | 5                    | 11                 | 5                    | 11                 | 0.21             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 1.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        | 9.2      | 10.2  | 1.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       | 7                  | 1.5                 | УГВ над пакером не изменился .<br><br>В наблюдательной скважине на расстоянии 1,9 м рост УГВ не зафиксирован.<br>После пакерного опробования в скважине проводился налив. Отметка УГВ опустилась на 1 см за 14 ч |
|        |          |       | 4.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 5.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 6.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 7.0               | 1                 | 29                 | 6                    | 99                 | 12                   | 144                | 0.04             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 8.0               | 1.8               | 6                  | 2                    | 6                  | 2                    | 6                  | 0.19             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 4.0               | 1                 | 8                  | 2                    | 16                 | 5                    | 14                 | 0.13             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 3.0               | 1                 | 12                 | 2                    | 24                 | 4                    | 48                 | 0.11             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 2.0               | 1                 | 27                 | 3                    | 87                 | 4                    | 118                | 0.07             |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|        |          |       | 1.0               | 0                 | 60                 | 0                    | 120                | 0                    | 180                | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                                                                                                                  |

\* - указано значение, зафиксированное на манометре

Продолжение таблицы 4.1.

| № скв. | Интервал |       | Ступень испытания |                    |                      |                    |                      |                    |                      | Коэф. фильтрации | Давление прорыва * | Давление закрытия * | Примечания                                                                                                           |
|--------|----------|-------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | от, м    | до, м | Давление*         | Расход погашения   |                      |                    |                      |                    |                      |                  |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | P, атм            | V <sub>1</sub> , л | t <sub>1</sub> , сек | V <sub>2</sub> , л | t <sub>2</sub> , сек | V <sub>3</sub> , л | t <sub>3</sub> , сек |                  |                    |                     |                                                                                                                      |
| 8П     | 5        | 6     | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 4                  | 0.5                 | УГВ над пакером не изменился<br>В наблюдательной скважине на расстоянии 2,4 м фиксировался рост УГВ: 20 см за 10 сек |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 180                  | 0                  | 240                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 3.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 4.0               | 5                  | 30                   | 5                  | 21                   | 5                  | 23                   | 0.23             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 6.0               | 10                 | 22                   | 5                  | 11                   | 5                  | 11                   | 0.34             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 2.0               | 5                  | 28                   | 5                  | 28                   | 5                  | 28                   | 0.36             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 1.0               | 5                  | 69                   | 5                  | 69                   | 5                  | 69                   | 0.25             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 0.1               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        | 7        | 8     | 1.5               | 0                  | 6                    | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 6                  | 0.5                 | УГВ над пакером не изменился<br>В наблюдательной скважине на расстоянии 2,4 м рост УГВ не зафиксирован.              |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 6                    | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 3.5               | 0                  | 6                    | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 4.0               | 0                  | 6                    | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 5.0               | 0                  | 6                    | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 6.0               | 1                  | 2                    | 1                  | 2                    | 1                  | 2                    | 0.38             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 4.0               | 5                  | 15                   | 5                  | 15                   | 5                  | 15                   | 0.37             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 2.0               | 5                  | 24                   | 5                  | 24                   | 5                  | 24                   | 0.43             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 1.0               | 5                  | 72                   | 5                  | 72                   | 5                  | 72                   | 0.24             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 0.1               | 0                  | 60                   | 0                  | 60                   | 0                  | 30                   | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        | 9        | 10    | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 5.2                | 2.5                 | УГВ над пакером не изменился<br>В наблюдательной скважине на расстоянии 2,4 м рост УГВ не зафиксирован.              |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 3.5               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 4.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 5.0               | 1                  | 110                  | 1                  | 110                  | 1                  | 110                  | 0.01             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 6.0               | 5                  | 13                   | 5                  | 13                   | 5                  | 13                   | 0.29             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 3.0               | 3                  | 32                   | 5                  | 55                   | 5                  | 55                   | 0.13             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 2.8               | 3                  | 70                   | 3                  | 70                   | 3                  | 70                   | 0.06             |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |
|        |          |       | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                                                                      |

Продолжение таблицы 4.1.

| № скв. | Интервал |       | Ступень испытания |                    |                      |                    |                      |                    |                      | Коэф. фильтрации | Давление прорыва * | Давление закрытия * | Примечания                                                            |
|--------|----------|-------|-------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|        | от, м    | до, м | Давление*         | Расход погашения   |                      |                    |                      |                    |                      |                  |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | P, атм            | V <sub>1</sub> , л | t <sub>1</sub> , сек | V <sub>2</sub> , л | t <sub>2</sub> , сек | V <sub>3</sub> , л | t <sub>3</sub> , сек |                  |                    |                     |                                                                       |
| 6П     | 5        | 6     | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 3                  | 1.5                 | Вода появилась над пакером. Давление на подушках 30 бар.              |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 3.0               | 5                  | 18                   | 5                  | 18                   | 5                  | 18                   | 0.39             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        | 7        | 8     | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 5.2                | 2                   | УГВ над пакером не изменился<br><br>В набл. скв. уровень не изменился |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 2.5               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 4.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 5.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 6.0               | 5                  | 11                   | 5                  | 11                   | 5                  | 11                   | 0.34             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 3.0               | 5                  | 31                   | 5                  | 31                   | 5                  | 31                   | 0.23             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 2.5               | 1                  | 19                   | 2                  | 38                   | 3                  | 57                   | 0.09             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 1.5               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        | 9        | 10    | 1.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       | 8                  | 2                   | УГВ над пакером не изменился<br><br>В набл. скв. уровень не изменился |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 3.5               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 4.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 5.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 6.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 7.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 7.9               | 1                  | 20                   | 3                  | 46                   | 3                  | 46                   | 0.04             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 8.0               | 5                  | 24                   | 5                  | 24                   | 5                  | 24                   | 0.12             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 4.0               | 5                  | 34                   | 5                  | 44                   | 5                  | 43                   | 0.14             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 2.5               | 4                  | 104                  | 0.5                | 50                   | 0.5                | 50                   | 0.03             |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 2.0               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |
|        |          |       | 1.5               | 0                  | 60                   | 0                  | 120                  | 0                  | 180                  | Менее 1E-4       |                    |                     |                                                                       |

\* - указано значение, зафиксированное на манометре

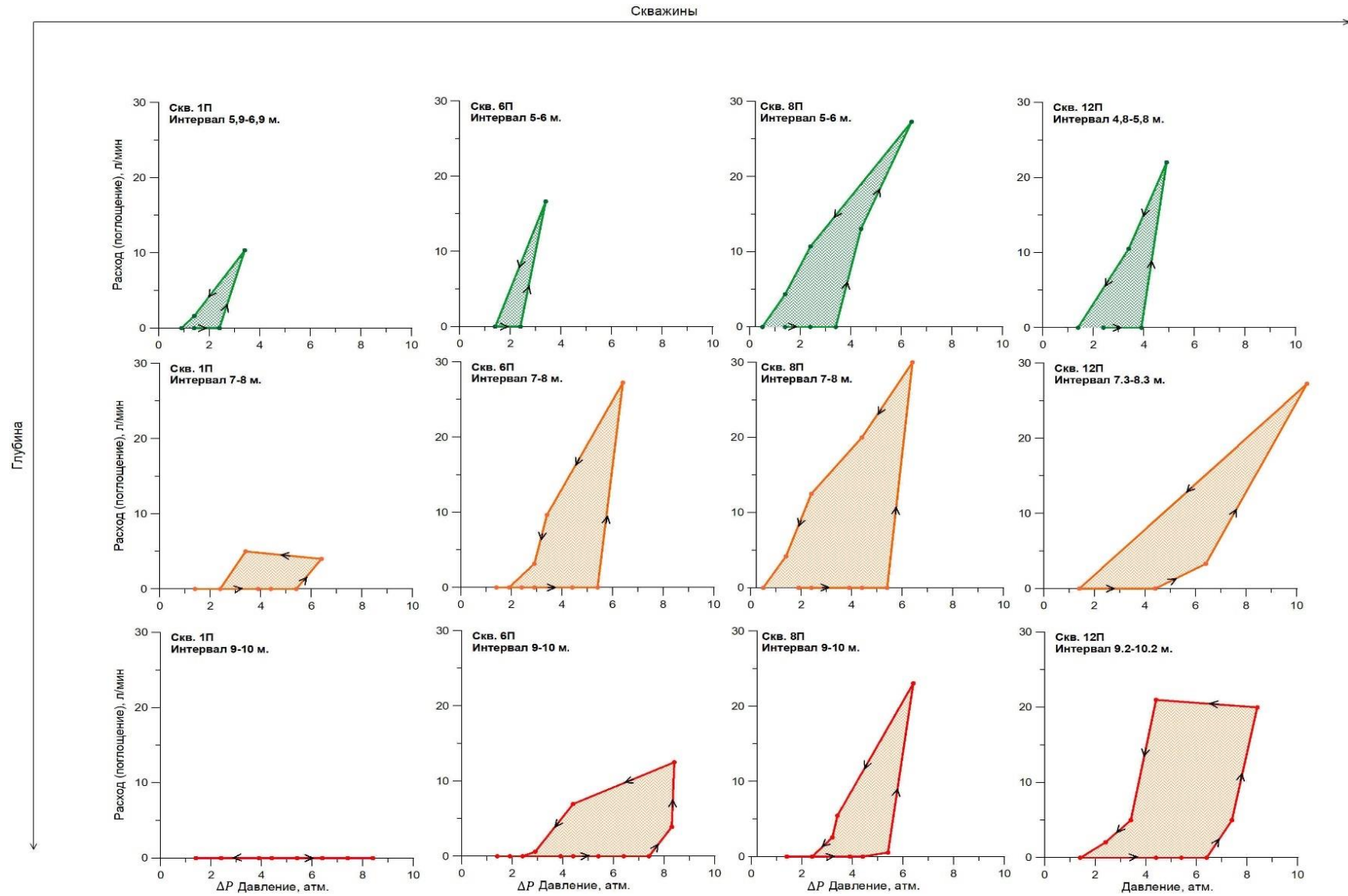


Рисунок 4.5. Диаграммы соотношения давления нагнетания и расхода в опробуемых интервалах кембрийской глины

#### 4.2. Лабораторное исследование проницаемости глин прямым методом

Коэффициент фильтрации кембрийских глин в лабораторных условиях был определен двумя способами. Один из них числится в протоколах испытаний предыдущих лет как «прямой метод». Судя по данным, которые представлены в имеющихся документах и которые фиксировались во время испытаний, а также по ГОСТу на который ссылается лаборатория – 25584-2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации», - мы сделали вывод, что глины испытывались как песчаные грунты с постоянным напорным градиентом [12] с разницей в том, что градиенты напоров (значения которых были порядка первых сотен) создавались не напором столба воды, а каким-то прибором.

Суть метода «Определение коэффициента фильтрации песчаных грунтов при постоянном градиенте напора» заключается в замере объема жидкости, проходящего через образец и времени фильтрации этого объема на нескольких ступенях расхода. Зная линейные размеры образца, вычисляют скорость фильтрации по формуле

$$v = \frac{V}{Ft} \quad (4.2.1)$$

где  $F$  и  $t$  площадь поперечного сечения образца и время фильтрации соответственно. После этого строится график (рис. 2) зависимости  $v$ - $I$  ( $I$  напорный градиент), полученные точки аппроксимируются прямой и вычисляется ее угловой коэффициент равный  $k_f$ :

$$k_f = \frac{v}{I} \quad (4.2.2)$$

Очевидно, что расчеты не выходят за пределы формулы Дарси. В ГОСТе также указано, как учитывать поправки на температуру в лаборатории, но, не имея данных по температуре, мы остановились на предыдущей формуле.

Еще до ознакомления с ГОСТом мы просмотрели протоколы лабораторных испытаний и, используя вышеупомянутую формулу Дарси, рассчитали  $k_f$ . Результаты получились практически аналогичными лабораторным заключениям о значениях  $k_f$ . Сравнение результатов по образцам приведены в таблице 2, пример графика  $v$ - $I$  на Рисунке 4.6.

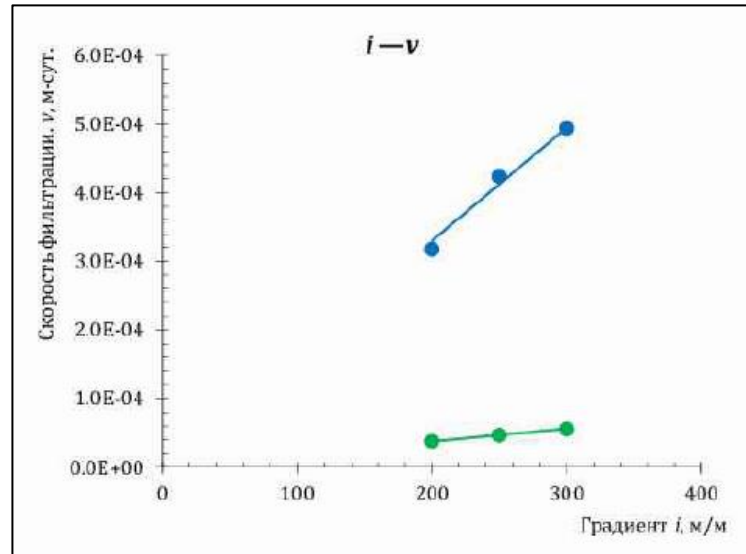


Рисунок 4.6. Пример графика  $v-I$ .

Одной из особенностей проведения данного опыта является то, что образцы с одной и той же глубины испытывались с фильтрацией по напластованию и поперек (в глинах местами отчетливо выделяется слоистая текстура, слои имеют субгоризонтальное простирание). В последнем случае  $k_f$  был, как правило, на порядок меньше (стабильно меньше в 8 - 12 раз).

Таблица 4.2. Результаты определений  $k_f$  в кембрийских глинах прямым методом

| Номер скважины | Интервал отбора проб, м | Градиент, д.е. | V, мл | V, м/сут | $k_f$ , м/сут<br>(пересчитанный) | $k_f$ , м/сут<br>(данные лаборатории) |
|----------------|-------------------------|----------------|-------|----------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1п             | 5,8-6,0                 | 200            | 0,16  | 2,8E-04  | 1,40E-06                         | 1,4E-6                                |
|                |                         | 250            | 0,2   | 3,5E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,23  | 4,1E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 200            | 0,1   | 2,2E-05  | 1,10E-07*                        | 1,1E-7*                               |
|                |                         | 250            | 0,13  | 2,9E-05  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,15  | 3,3E-05  |                                  |                                       |
|                | 6,8-7,0                 | 200            | 0,12  | 1,1E-04  | 5,42E-07                         | 5,4E-7                                |
|                |                         | 250            | 0,15  | 1,3E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,19  | 1,7E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 200            | 0,06  | 1,3E-05  | 6,39E-08*                        | 6,5E-8*                               |
|                |                         | 250            | 0,07  | 1,5E-05  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,09  | 2,0E-05  |                                  |                                       |
|                | 9,7-9,9                 | 200            | 0,09  | 3,2E-04  | 1,61E-06                         | 1,6E-6                                |
|                |                         | 250            | 0,12  | 4,2E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,14  | 4,9E-04  |                                  |                                       |
|                |                         | 200            | 0,09  | 2,6E-05  | 1,33E-07*                        | 1,3E-7*                               |
|                |                         | 250            | 0,11  | 3,2E-05  |                                  |                                       |
|                |                         | 300            | 0,14  | 4,1E-05  |                                  |                                       |

Прим. \* - образцы испытанные поперек напластаванию

Продолжение таблицы 4.2

| Номер скважины | Интервал отбора проб, м | Градиент, д.е. | V, мл | V, м/сут | к <sub>ф</sub> , м/сут<br>(пересчитанный) | к <sub>ф</sub> , м/сут<br>(данные лаборатории) |
|----------------|-------------------------|----------------|-------|----------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 6п             | 6,6-6,8                 | 200            | 0,09  | 3,2E-04  | 1,61E-06                                  | 1,6E-06                                        |
|                |                         | 250            | 0,12  | 4,2E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,14  | 4,9E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,13  | 3,8E-05  | 1,88E-07*                                 | 1,9E-07*                                       |
|                |                         | 250            | 0,16  | 4,7E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,19  | 5,6E-05  |                                           |                                                |
|                | 8,1-8,3                 | 200            | 0,18  | 2,1E-04  | 1,03E-06                                  | 1,0E-06                                        |
|                |                         | 250            | 0,22  | 2,6E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,26  | 3,1E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,09  | 1,9E-05  | 9,09E-08*                                 | 9,2E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,11  | 2,3E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,13  | 2,7E-05  |                                           |                                                |
|                | 9,4-9,6                 | 200            | 0,15  | 1,3E-04  | 6,63E-07                                  | 6,6 E-07                                       |
|                |                         | 250            | 0,19  | 1,7E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,22  | 1,9E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,07  | 1,5E-05  | 7,28E-08*                                 | 7,4E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,08  | 1,8E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,1   | 2,2E-05  |                                           |                                                |

Прим. \* - образцы испытанные поперек напластаванию



Продолжение таблицы 4.2

| Номер скважины | Интервал отбора проб, м | Градиент, д.е. | V, мл | V, м/сут | K <sub>ф</sub> , м/сут<br>(пересчитанный) | K <sub>ф</sub> , м/сут<br>(данные лаборатории) |
|----------------|-------------------------|----------------|-------|----------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 8п             | 5,7-5,9                 | 200            | 0,19  | 1,7E-04  | 8,40E-07                                  | 8,4E-07                                        |
|                |                         | 250            | 0,24  | 2,1E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,14  | 2,5E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,08  | 2,0E-05  | 9,54E-08*                                 | 9,5E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,09  | 2,3E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,11  | 2,8E-05  |                                           |                                                |
|                | 8,1-8,3                 | 200            | 0,2   | 2,4E-04  | 1,17E-06                                  | 1,2E-06                                        |
|                |                         | 250            | 0,25  | 2,9E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,3   | 3,5E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,07  | 2,1E-05  | 1,05E-07*                                 | 1,1E-07*                                       |
|                |                         | 250            | 0,09  | 2,6E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,11  | 3,2E-05  |                                           |                                                |
|                | 9,3-9,5                 | 200            | 0,09  | 1,1E-04  | 5,17E-07                                  | 5,2E-07                                        |
|                |                         | 250            | 0,11  | 1,3E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,13  | 1,5E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,12  | 1,8E-05  | 8,79E-08*                                 | 8,8E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,15  | 2,2E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,18  | 2,6E-05  |                                           |                                                |

Прим. \* - образцы испытанные поперек напластаванию

Продолжение таблицы 4.2

| Номер скважины | Интервал отбора проб, м | Градиент, д.е. | V, мл | V, м/сут | K <sub>ф</sub> , м/сут<br>(пересчитанный) | K <sub>ф</sub> , м/сут<br>(данные лаборатории) |
|----------------|-------------------------|----------------|-------|----------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 12п            | 7,3-7,5                 | 240            | 0,09  | 2,0E-05  | 7,90E-08                                  | 8E-08                                          |
|                |                         | 260            | 0,09  | 2,0E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,11  | 2,4E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,02  | 2,5E-06  | 1,34E-08*                                 | 1,3E-08*                                       |
|                |                         | 260            | 0,03  | 3,8E-06  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,03  | 3,8E-06  |                                           |                                                |
|                | 7,6-7,8                 | 200            | 0,14  | 1,6E-04  | 8,42E-07                                  | 8,4E-07                                        |
|                |                         | 250            | 0,18  | 2,1E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,22  | 2,6E-04  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,15  | 1,5E-05  | 7,31E-08*                                 | 7,3E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,19  | 1,9E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,22  | 2,2E-05  |                                           |                                                |
|                | 9,3-9,5                 | 200            | 0,15  | 6,6E-05  | 3,29E-07                                  | 3,2E-07                                        |
|                |                         | 250            | 0,18  | 7,9E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,22  | 9,7E-05  |                                           |                                                |
|                |                         | 200            | 0,06  | 6,6E-06  | 3,42E-08*                                 | 3,4E-08*                                       |
|                |                         | 250            | 0,07  | 8,8E-06  |                                           |                                                |
|                |                         | 300            | 0,08  | 1,0E-06  |                                           |                                                |

Прим. \* - образцы испытанные поперек напластаванию

### 4.3. Метод компрессионного сжатия

Нас интересует проведение испытания для определения характеристик консолидации  $c_v$  и  $c_a$  - ГОСТ 12248.4-2020 [13]. Оно укладывается в рамки проведенных лабораторных испытаний предыдущих лет для определения модуля деформации, одометрического модуля и компрессионного, и представляло собой определенную обработку первой ступени нагрузки. Эта обработка четко описана в вышеуказанном ГОСТе

Коэффициент фильтрационной консолидации ( $c_v$ ) определяется следующим образом:

- 1) Образец в установке нагружается компрессионным прибором сразу до заданной нагрузки (в нашем случае это первая ступень компрессионного испытания);
- 2) После этого строится график  $\varepsilon-\sqrt{t}$  (относительная деформация от корня времени). Проводят прямую аппроксимирующую линейный участок, который, как правило, находится в первых 50% относительной деформации. Затем из точки пересечения получившейся прямой с осью ординат строят прямую, угловой коэффициент которой в 1,15 раз меньше углового коэффициента первой. Абсцисса места пересечения второй прямой и графика  $\varepsilon-\sqrt{t}$  будет нам необходима для определения коэффициента фильтрационной консолидации (рис. 4.7). Теоретически она должна быть равна корню из времени 90% консолидации ( $\sqrt{t_{90}}$ ).

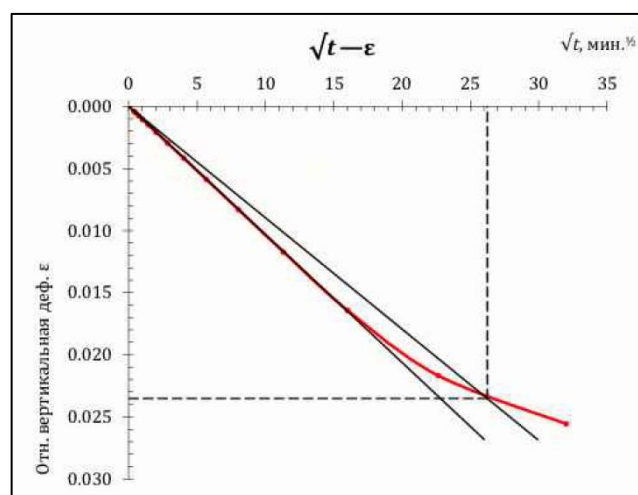


Рисунок 4.7. График  $\varepsilon-\sqrt{t}$  из протоколов 2020 года.

3) Определяем коэффициент фильтрационной консолидации по формуле

$$c_v = \frac{T_{90} h^2}{t_{90}} f_T \quad (4.3.1)$$

где  $T_{90}$  - коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,90, равный 0,848;  $h$  - высота образца (средняя между начальной высотой и высотой после завершения опыта на консолидацию), при *двухсторонней фильтрации* принимается высота, *равная половине высоты образца*;  $t_{90}$  - время, мин;  $f_T$  - температурный поправочный коэффициент (в нашем случае равен единице).

Попутно из компрессионного испытания определяем коэффициент относительной сжимаемости ( $m$ , Па) по формуле:

$$m = \frac{\Delta e_i}{\Delta \sigma (1 + e_{i-1})} \quad (4.3.2)$$

$\Delta \sigma$  - приращение вертикального эффективного напряжения при нагружении на  $i$ -ом шаге, н/м<sup>2</sup> (или Па);  $\Delta e_i$  - изменение коэффициента пористости при нагружении на  $i$ -ом шаге, д.е.;  $e_{i-1}$  - коэффициент пористости на  $i-1$  шаге, д.е.

Теперь, имея параметры  $c_v$  и  $m$ , обратимся к теории консолидации Терцаги [14]. В водонасыщенном состоянии уменьшение объема пор происходит за счет оттока несжимаемой жидкости. Таким образом, скорость осадки грунта контролируется скоростью оттока жидкости, т. е. коэффициентом фильтрации. Многочисленные испытания на консолидацию глинистых грунтов позволили Терцаги установить следующее эмпирическое соотношение:

$$c_v = \frac{k_\phi}{m_v y_v} \quad (4.3.3)$$

$$k_\phi = c_v \cdot m \cdot y_v \quad (4.3.4)$$

где  $y_v$  - удельный вес воды. В этой формуле по итогам лабораторных исследований нам неизвестно лишь значение коэффициента фильтрации. Нам удалось обработать имеющиеся данные лабораторных исследований 2016, 2019, 2020 гг. и сверить их результаты с переинтерпретацией.

2016 и 2019 гг.: графоаналитическая обработка  $\varepsilon - \sqrt{t}$  проведена неверно, так как вместо корня из времени по абсциссе строился логарифм времени. Отсюда сразу

расхождения во всех параметрах. Но при подстановке в формулу определения коэф. консолидации их неверно определенного  $t_{90}$ , мы получали аналогичные значения  $c_v$ , но  $k_f$  у них все равно был на порядок/и меньше. Их параметр  $t_{90}$  всегда был больше нашего, следовательно получались заниженные значения  $c_v$ . А опираясь на формулу из теории Терцаги (нам неизвестно, по какой методике лаборатория рассчитывала параметры), связанную с  $k_f$ , то занижаются и значения последнего. Также в 2019 году приводились необъяснимо маленькие значения давления компрессионного прибора при довольно высоких относительных деформациях. Мы считаем результаты лабораторных исследований 2016 и 2019 гг. некорректными и ставим большой вопрос над правильностью указанных данных в протоколах исследований.

2020 г.: графики испытаний этого года были верны, данных о замерах деформации во времени не было, поэтому мы воспользовались графиками, приведенными в протоколах (рис. 3). В последних не было указано время  $t_{90}$ , мы сами снимали значения с графика. Однако, наши значения  $k_f$  практически совпали с лабораторными, расхождение возможно из-за различия графоаналитической обработки (выборе времени  $t_{90}$ ), в основном оно не превышало 15% (максимум 20%), но всегда наши значения были больше, соответственно для запаса прочности при расчете миграции будем опираться на значения повторной обработки. Сводная таблица наших значений и лабораторных за 2020 год приведены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3. Сравнение результатов 2020 года с переинтерпретацией.

| Глубина отбора<br>образца (скв. 135),<br>м | Лаборатория                  |                       | Переинтерпретация            |                    | Δ, %  |            |
|--------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------|-------|------------|
|                                            | $c_v$ , см <sup>2</sup> /год | $k_{\phi}$ ,<br>м/сут | $c_v$ , см <sup>2</sup> /год | $k_{\phi}$ , м/сут | $c_v$ | $k_{\phi}$ |
| 9.8                                        | 630                          | 2.3E-07               | 649                          | 2.4E-07            | 3.1   | 2.9        |
| 19.8                                       | 5100                         | 1.8E-06               | 5382                         | 1.8E-06            | 5.5   | 2.7        |
| 29.8                                       | 14000                        | 8.2E-07               | 13962                        | 8.2E-07            | -0.3  | -0.4       |
| 39.8                                       | 31000                        | 3.8E-06               | 31695                        | 3.8E-06            | 2.2   | 1.0        |
| 49.8                                       | 14000                        | 4.5E-06               | 16483                        | 5.1E-06            | 17.7  | 13.3       |
| 59.8                                       | 21000                        | 2.7E-06               | 23554                        | 3.0E-06            | 12.2  | 9.6        |
| 69.8                                       | 12000                        | 3.0E-06               | 13249                        | 3.4E-06            | 10.4  | 11.9       |
| 79.8                                       | 19000                        | 4.5E-06               | 22010                        | 5.1E-06            | 15.8  | 13.5       |
| 89.8                                       | 630                          | 1.6E-07               | 761                          | 1.9E-07            | 20.8  | 17.9       |
| 99.8                                       | 3100                         | 6.2E-07               | 3553                         | 7.0E-07            | 14.6  | 13.2       |
| 109.8                                      | 2400                         | 3.6E-07               | 2637                         | 4.0E-07            | 9.9   | 10.1       |
| 119.8                                      | 1800                         | 3.6E-07               | 2164                         | 4.3E-07            | 20.2  | 19.3       |
| 129.8                                      | 1100                         | 2.1E-07               | 1261                         | 2.5E-07            | 14.6  | 17.7       |

#### 4.4. Испытание в двухкамерной диффузионной ячейке

Данный вид испытания проводится для определения коэффициента диффузии глинистого образца. Имея аналитическую формулу, описывающую процесс диффузии в данном эксперименте, можно проследить зависимость между коэффициентом диффузии и активной пористостью и постараться провести графоаналитическую обработку полученных данных.

Экспериментальная установка представляет собой небольшой резервуар, разделенный перегородкой с отверстием диаметром 4,5 см (рис. 4.8). В это отверстие помещается подготовленный образец исследуемой породы (кембрийской глины) с известными линейными параметрами. Технологически предусмотрено герметизация мест стыковки образца и паза, а также его продольное закрепление с помощью пластин с отверстиями, предотвращающее размокание/набухание образца в процессе замачивания.

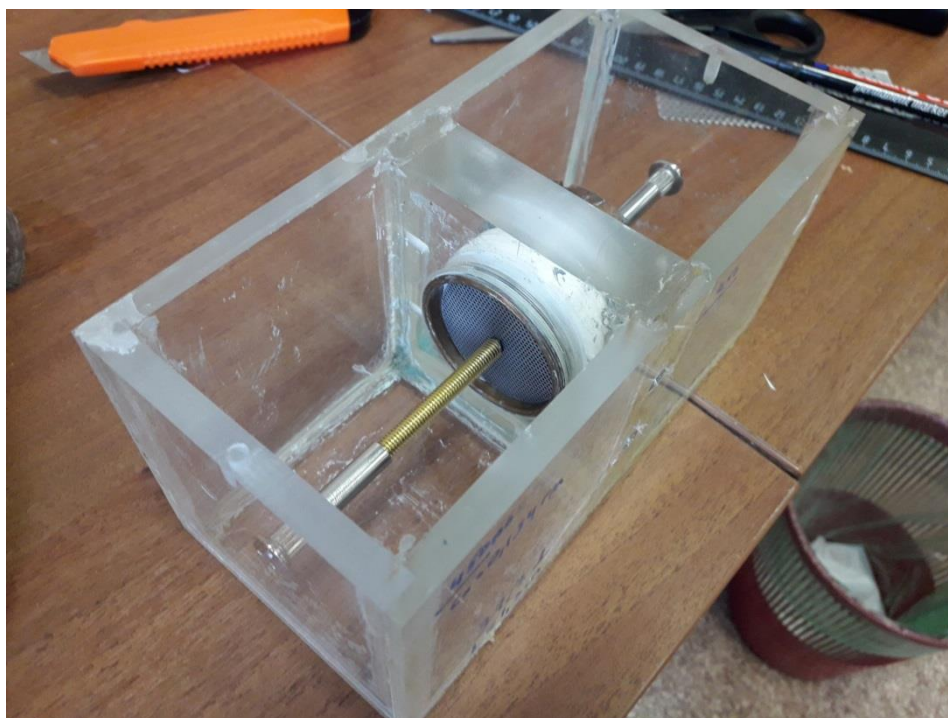


Рисунок 4.8. Диффузионная ячейка в сборе с размещенным в ней образцом, готова к началу испытания.

Предварительно образец на две недели замачивается пресной «нулевой водой», которая будет использована в приемной камере и для приготовления растворов. Затем в одну из камер наливается раствор NaCl с известной концентрацией  $C_1$ , в нашем случае она равна 4,5 г/л ( $C_1$  = сумме начальной минерализации воды и растворенной соли). Во вторую ячейку наливается «нулевая» вода с минерализацией  $C_0$ . Важно, чтобы уровень

воды в обеих камерах был одинаков. После этого несколько раз в сутки или реже начинают производить замеры концентрации  $C_2$  в ячейке с меньшей минерализацией.

В этом эксперименте высокоминерализованная ячейка подразумевается как неограниченный источник NaCl с постоянным уровнем концентрации за счет большого градиента концентраций в камерах. У принимающей, второй ячейки объем воды конечен и известен. Таким образом, можно вычислить относительную концентрацию NaCl ней по формуле:

$$\bar{C} = \frac{C_2 - C_0}{C_1 - C_0} \quad (4.4.1)$$

Затем строится график  $\bar{C} - t$ . На рисунке 5 приведен пример такого графика за две недели эксперимента в диффузионной ячейке №1 (всего ячеек у нас две). Теоретически, график должен ложиться на кривую, которая соответствует уравнению:

$$\bar{C}(t) = \frac{AL}{V_d} \left[ \frac{eD_p t}{L^2} - \frac{eR_e}{6} - \frac{2eR_e}{3.14^2} * \sum_{n=1}^{100} \left[ \frac{(-1)^n}{n^2} * \exp \frac{-D_p * n^2 * 3.14^2 * t}{L^2 * R_e} \right] \right] \quad (4.4.2)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения образца,  $L$  – длина,  $V_d$  – объем приемной ячейки,  $e$  – активная пористость,  $\underline{D}_p$  – коэффициент поровой диффузии равный  $D_e/e$  [15],  $R_e$  – фактор задержки равный единице.  $\underline{D}_e$  – искомый коэффициент диффузии. Для наглядности подчеркнуты неизвестные параметры, значения которых предстоит узнать.



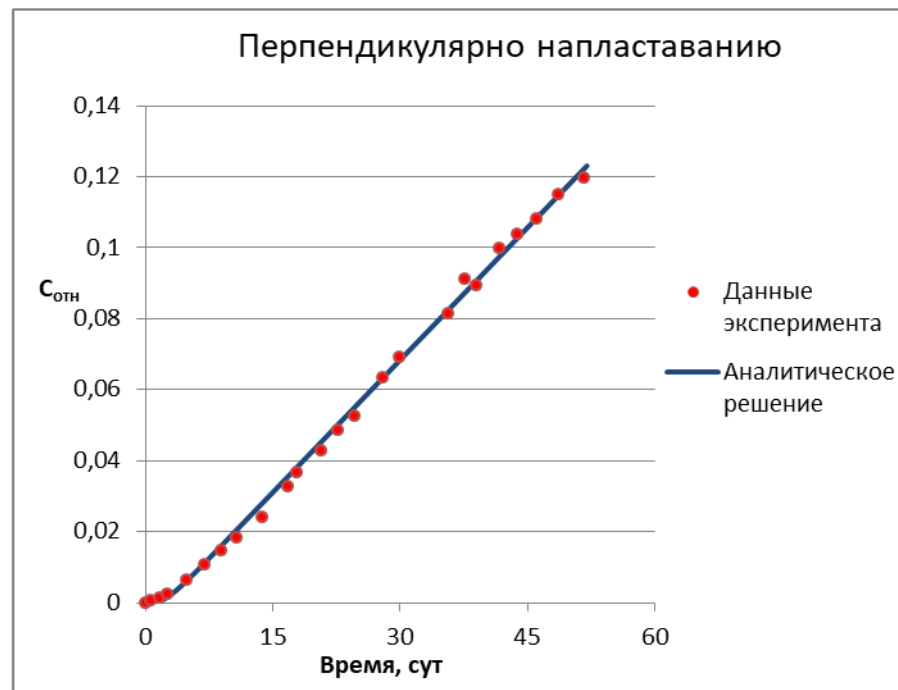
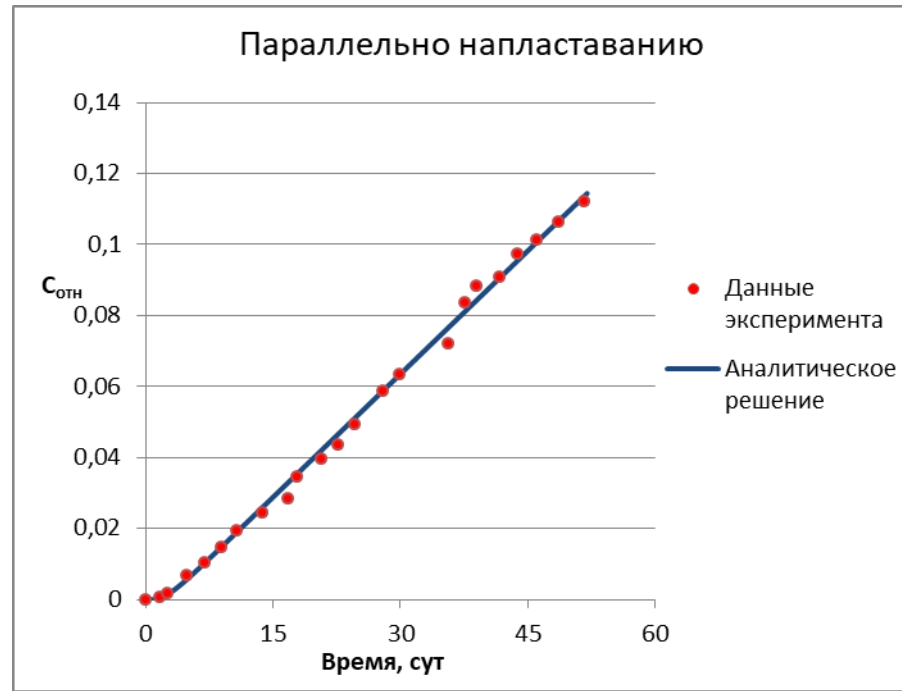


Рис. 4.9. Графики  $\bar{C} - t$ . Синим цветом выделены эмпирические данные, красная кривая построена по вышеприведенному уравнению для  $\bar{C}(t)$ .

На Рисунке 4.9 приведена аппроксимация данных эксперимента. По этим результатам мы вычислили коэффициент диффузии, а далее с этими данными составили прогноз фильтрации загрязнений через толщу кембрийских глин с учетом не только непосредственного массопереноса загрязнения с потоками воды, но и принимая во внимание диффузионные и дисперсионные процессы. По результатам данной

графоаналитической обработки получены следующие значения коэффициента поровой диффузии:

- параллельно напластаванию:  $D_p=1,65E-5$  м<sup>2</sup>/сут;
- перпендикулярно напластаванию:  $D_p=1,42E-5$  м<sup>2</sup>/сут.

Имея значения пористости ( $n$ ) равное 0,1, получим значения эффективной молекулярной диффузии: по формуле:

$$D_e = D_p \cdot n \quad (4.4.3)$$

- параллельно напластаванию:  $D_e=1,65E-6$  м<sup>2</sup>/сут;
- перпендикулярно напластаванию:  $D_e=1,42E-6$  м<sup>2</sup>/сут.

## 5. Прогноз миграции загрязнения

Для прогнозирования миграции загрязнения через толщу глин в подстилающий ломоносовский горизонт условия на полигоне были схематизированы по наиболее глубокой и крупной карте (рис. 5.1):

- «урез» жидких отходов находится на абсолютной отметке 22 м ( $H_1$ );
- дно карты заглублено до альтитуды в 0 м;
- подошва глин находится на отметке в -90 м;
- напор в ломоносовском горизонте, в который происходит миграция, достигает абсолютной отметки в 7 м ( $H_2$ ).

Соответственно, толща, через которую необходимо пройти загрязнению, обладает мощностью в 90 м ( $M$ ), а градиент напоров равняется 0,167 и вычислен по формуле:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{M} \quad (5.1)$$

Имея данные, полученные по результатам диффузионного эксперимента, далее можно воспользоваться новым модулем программного комплекса ANSDIMAT, который моделирует миграцию загрязнения с учетом сорбции, дисперсии, распада. В нашем случае считается, что компонент инертный, стабильный, что увеличивает его потенциал как загрязнителя. Концентрация загрязнения в точке ( $x; y$ ) на момент времени  $t$  описывается уравнением:

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 x}{4\sqrt{\pi D_x}} \exp\left(\frac{ux}{2D_x}\right) \int_0^t \exp\left(-\frac{u^2\tau}{4D_x} - \frac{x^2}{4D_x\tau}\right) \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{-l_s/2 - y}{2\sqrt{D_y\tau}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{l_s/2 - y}{2\sqrt{D_y\tau}}\right) \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^3}}$$

где  $C_0$  – граничная концентрация, мг/л;  $C(x, y, t)$  – расчетная концентрация, мг/л;  $D_{px}, D_{py}$  – поровый коэффициент молекулярной диффузии по оси  $X$  и  $Y$ ,  $m^2/сут$ ;  $D_x, D_y$  – поровая дисперсия по оси  $X$  и  $Y$ ,  $m^2/сут$ ;  $D_{x\_eff}, D_{y\_eff}$  – эффективный коэффициент молекулярной диффузии по оси  $X$  и  $Y$ ,  $m^2/сут$ ;  $l_s$  – длина источника, м;  $n$  – активная пористость, д.е.;  $t$  – время от начала загрязнения, сут;  $u$  – действительная скорость фильтрации, м/сут;

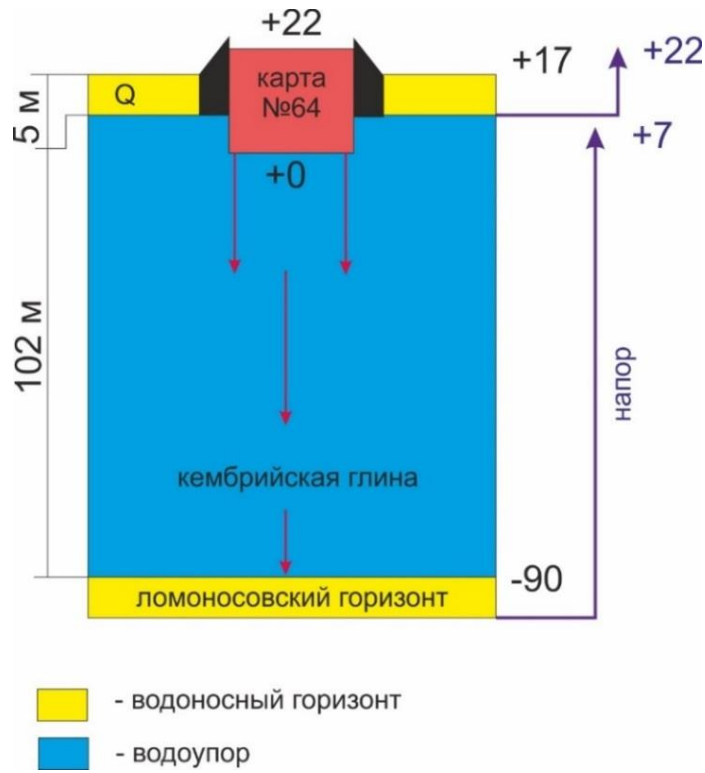


Рисунок 5.1. Схематизация условия карты №64.

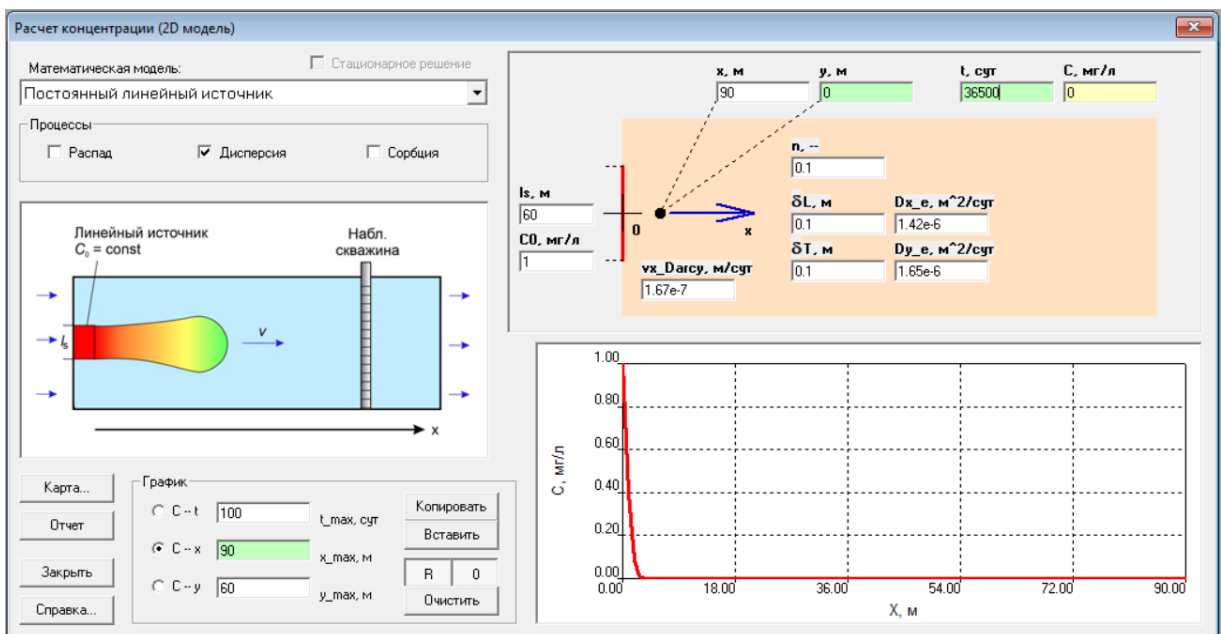


Рисунок 5.2. Рабочее окно модуля для расчета миграции загрязнения ANSDIMAT

Таблица 5.1. Исходные данные для работы в ANSDIMAT

| Параметр                                  | Значение |
|-------------------------------------------|----------|
| $D_{e y}$ , м <sup>2</sup> /сут           | 1,65E-6  |
| $D_{e x}$ , м <sup>2</sup> /сут           | 1,42E-6  |
| I, ед.                                    | 0,167    |
| $k_f$ (по результатам лаб. ис-ний), м/сут | 1,0E-6   |
| $V$ ( $k_f * I$ ), м/сут                  | 1,67E-7  |
| $\delta L$ , м (дисперсивность)           | 0,1      |
| $\delta T$ , м (дисперсивность)           | 0,1      |
| $n$ , д.е.                                | 0,1      |

По результатам моделирования получили графики и 2D модель распределения концентрации загрязнения в толще глин на несколько периодов времени (рис. 5.3). В подошве глин концентрация загрязнения величиной в 1% от исходной (в карте) достигнет через 54 тыс. лет. Следует отметить, что при заданном коэффициенте фильтрации, несмотря на высокий градиент напоров, миграция загрязнения в существенной степени обуславливается диффузионными процессами.

Здесь же отметим, что, несмотря на агрессивный и пестрый состав захороненных отходов, они не влияют на физико-химические свойства глин, вследствие чего коэффициент фильтрации и диффузионные характеристики останутся неизменными [16]

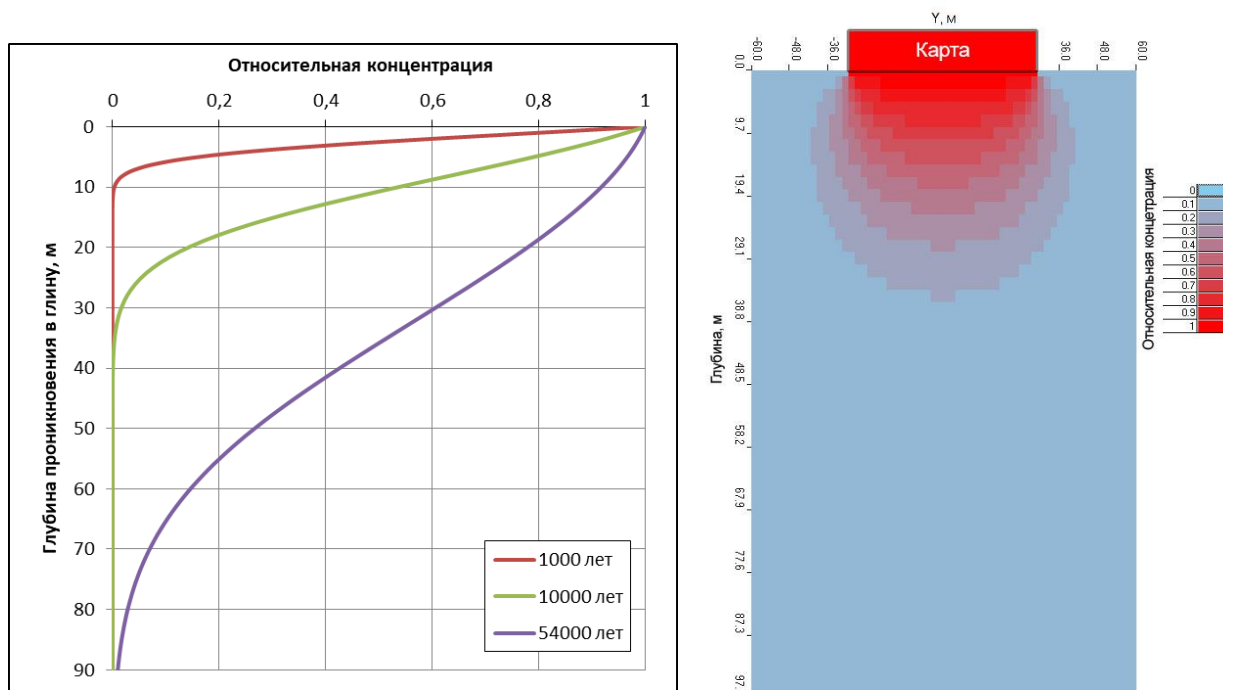


Рисунок 5.3. Результаты моделирования миграции загрязнения в ANSDIMAT

## Выводы

Ореол загрязнения полигона «Красный бор» пока что локализован по большей части непосредственно на территории предприятия и на приграничных территориях, а также в донных отложениях прилегающей орографической сети. Чтобы исключить дальнейшее загрязнение и возможность миграции загрязнения с подземными водами, рекомендуется изолировать полигон от атмосферных осадков (исключить возможность миграции загрязнения с поверхностным стоком), перекрыв его непроницаемым барьером, а также возвести по периметру противofильтрационную завесу, заглубив ее ниже подошвы дислоцированных кембрийских глин. В таком случае у токсичных отходов не останется иных путей выноса, кроме как через стометровую крайне слабопроницаемую толщу отложений кембрия. По результатам данной работы можно сделать следующие выводы о глинах, как о естественном барьере:

1) Образцы ненарушенного сложения обладают коэффициентом фильтрации порядка  $1E-6$  и ниже. По классификации ГОСТ-25100-2020 можно считать водонепроницаемыми [18].

2) Массив обладает системой трещин, плотность которой уменьшается с глубиной. Эти трещины находятся в закрытом состоянии, а для того чтобы они раскрылись необходимо превышение бытового давления как минимум в три раза, что в естественных условиях недостижимо. По результатам пакерных испытаний также было установлено, что эти трещины обладают потенциалом самозалечивания, и это при крайне малом времени наблюдения с точки зрения геологии.

3) Изучив образцы глин и смоделировав процесс миграции загрязнения в программном комплексе ANSDIMAT, можно сказать, что в массопереносе загрязняющих веществ идет в основном за счет дисперсионных процессов.

Таким образом, загрязнение на границе кембрийских глин и подстилающем их ломоносовском горизонте достигнет значения в 1% от концентрации в картах через 54 тыс. лет. Отложения кембрия можно считать надежным противofильтрационным барьером.

## Список использованной литературы

1. Вигдорчик М.Е. Отчет по теме: «Составление комплекса гидрогеолого-мелиоративных карт Северо-Запада Европейской территории СССР. Часть III. Ленинградская область. СЗТГУ, 1973 г.
2. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки рабочей документации на объекте: «Аварийно-восстановительные работы по ремонту дамб обвалования наливных карт №№ 64 и 68 СПб ГУПП «Красный Бор» по адресу: Ленинградская область, Тосненский район, территория СПб ГУПП «Полигон «Красный Бор» (Понтонная ул., 6-й км)», ЗАО «ЛенТИСИЗ». Т.3. Инженерно-геологические изыскания, 2016 г.
3. Баскова И.В., Капустина Н.В., Яновский А.С., Андреева Н.Г., Шебеста Е.А., Марков М.Л., Воронюк Г.Ю, редактор Конюхова Т.А. Отчет о выполнении работ по объекту «Гидрогеологическое доизучение листов О-35-VI, О-36-I масштаба 1:200 000 (Лужско-Петербургская площадь)», 2010 г.
4. Использование грунтового стока в районе полигона «Красный Бор» для снижения загрязнения его поверхностных вод и уменьшения паводковых нагрузок. ГПП Севзапгеология, 1994
5. Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф. и др. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты. СПб.: Изд-во с.-Петерб. ун-та., 2002 г., 246 с.
6. Григорьева Е. Н. Отчет о результатах работ по оценке запасов подземных вод на скважинном водозаборе автопредприятия ООО «АвтоСтар» в г.Санкт-Петербурге, Московское шоссе, 165, 2008 г.
7. Технический отчет об инженерных изысканиях для корректировки проекта строительства I очереди экспериментального предприятия по переработке токсичных отходов на территории ГУПП «Полигон «Красный Бор» Тосненского района Ленинградской области. Том 2. Инженерно-геологические изыскания. Книга 1. Текст отчета. Российский геоэкологический центр – филиал федерального государственного унитарного геологического предприятия «Урангеологоразведка». Санкт-Петербург, 2009 г.
8. Технический отчёт по результатам комплексных изысканий по объекту: «Строительство противодиффузионной завесы для исключения негативного влияния промышленных отходов на водозаборные сооружения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» в случае возникновения нештатных (аварийных) ситуаций», 2019 г.



9. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации в «Выполнение работ по проектированию ликвидации накопленного вреда окружающей среде на полигоне токсичных промышленных отходов «Красный бор». ООО Проект 108, 2020 г.
10. Использование грунтового стока в районе полигона «Красный Бор» для снижения загрязнения его поверхностных вод и уменьшения паводковых нагрузок. ГПП Севзапгеология, 1994
11. Отчет о результатах договорных работ на объекте Красный Бор. ГПП Севзапгеология, 2000
12. ГОСТ 25584-2016 Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М.: Стандартинформ, 2016.
13. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020.
14. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М.: государственное издательство литературы по строительству и архитектуры. 1958, 607 с.
15. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. Учебник для вузов. – СПб.: Наука, 2020. – 559 с.
16. Мартянова Г.И., Дойникова Л.А. Отчет по теме «Исследование изменений состава и свойств кембрийских глин при их взаимодействии с жидкими промхимотходами на опытном полигоне «Красный Бор» с целью прогноза охраны окружающей среды». НИИЗК ЛГУ, 1981, 73 с.
17. ГОСТ 25100 2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020
18. Houlsby, A., 1976. Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. Q. J. Eng. Geol. Vol. 9, pp. 303-313.