

Санкт-Петербургский государственный университет

***Кропотова Ксения Сергеевна***

Выпускная квалификационная работа бакалавра

***«Анализ корреляционных связей физико-механических свойств дисперсных грунтов с их водно-физическими и геоэлектрическими характеристиками»***

Научный руководитель:  
зав. каф. Гидрогеология  
инженерной геологии  
ин-та наук о Земле,  
к.г.-м. н., доцент  
Бурлуцкий  
Станислав Борисович

Рецензент:  
д. т. н., проф.  
Глазунов  
Владимир Васильевич

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Общие сведения о районе исследования.....	5
1.1. Физико-географический очерк.....	5
1.1.1. Рельеф.....	5
1.1.2. Гидрография.....	7
1.1.3. Климат.....	9
1.2. Геологические и гидрогеологические условия.....	11
1.2.1. Стратиграфия.....	11
1.2.2. Четвертичные отложения.....	14
1.2.3. Гидрогеологические условия.....	16
1.3. Глинистые грунты и их особенности.....	21
1.4. Характеристика участка исследования.....	24
1.4.1. Местоположение и геологическое строение.....	24
1.4.2. Природные и природно-техногенные процессы.....	29
1.5. Выводы к первой главе.....	31
Глава 2. Оползневые процессы.....	33
2.1. Классификация оползней.....	33
2.2. Факторы, определяющие развитие оползней.....	37
2.3. Оползнеопасность.....	38
2.4. Механизм оползневого процесса.....	39
2.5. Выводы ко второй главе.....	39
Глава 3. Основные результаты исследования.....	40
3.1. Физические свойства грунтов.....	42
3.2. Прочностные свойства грунтов и их зависимость от влажности.....	42
3.3. Удельное электрическое сопротивление грунтов и его зависимость от влажности.....	45
3.4. Комплексный анализ зависимостей физико-механических свойств дисперсных грунтов с их водно-физическими и геоэлектрическими характеристиками.....	48
3.5. Выводы к третьей главе.....	49
Заключение.....	51
Список литературы.....	52
Перечень приложений.....	55
Приложение А.....	56
Приложение Б.....	57
Приложение В.....	58
Приложение Г.....	64

## Введение

Оползневые процессы несут опасность для сооружений и людей. Эти процессы развиваются на склонах, в долинах, оврагах и на берегах рек. Оползни, разрушая целые города, приводят к катастрофам с человеческими жертвами и большими материальными убытками. В том числе, оползни воздействуют на изменение природных условий и на формирование геологических процессов, с которыми они генетически связаны. Тем самым, возникает необходимость в своевременном контроле за состоянием оползневых массивов, поскольку это поможет уменьшить риски и предотвратить жертвы.

Оползнем называется сползание масс пород на склоне без потери контакта с основным массивом (СП 11-105-97 часть II). Образуются оползни в основном из-за нарушения баланса между сдвигающими усилиями и удерживающими силами. Наиболее частыми причинами нарушения равновесия являются изменения напряжённого состояния и снижения сопротивления сдвигу пород. Таким образом, на устойчивость склона влияют прочностные параметры грунтов, слагающих его: угол внутреннего трения и сцепление.

Физико-механические свойства глинистых грунтов могут изменяться под влиянием различных техногенных и природных факторов, в результате чего будет изменяться устойчивость склона. К основным природным факторам, оказывающим влияние на прочностные свойства глин, относятся изменение влажности в следствии сильного таяния снега или выпадения значительного объема осадков в виде дождей.

Для оценки физико-механических свойств грунтов в оползневом массиве применяются лабораторные и полевые методы определения этих характеристик. Несмотря на то, что эти методы точны и постоянно совершенствуются, эти методы построены на одномерной интерпретации, требуют достаточно много ресурсов и времени на проведение определений прочностных свойств грунтов. В связи с этим традиционные методы, применяемые при изучении оползней, не позволяют в достаточной мере изучить неоднородную структуру оползневого массива, и оперативно оценивать изменения физико-механических свойств во времени вдоль всего исследуемого профиля. Для решения данной проблемы можно воспользоваться современными технологиями инженерной геофизики. Геофизические методы делают возможным детальное изучение больших площадей, в отличие от методов инженерно-геологических изысканий (Бурлуцкий, 2015).

Для применения геофизических методов в оценке изменения прочностных параметров грунтов в оползневом массиве требуются определения корреляционных зависимостей между «геофизическими» и «инженерно-геологическими» свойствами. Проведенные ранее

исследования выявили зависимости геоэлектрических параметров глинистых грунтов с их водно-физическими свойствами (влажность), вместе с тем изменение влажности этих грунтов влияет на их прочностные свойства. Иными словами, изменение прочностных свойств глинистых грунтов оползневых массивов вследствие изменения их влажности будет отражаться на их геоэлектрических свойствах, это создает перспективу в применении методов инженерной электроразведки при изучении оползневых массивов.

Целью настоящей работы является анализ корреляционных зависимостей физико-механических свойств дисперсных грунтов с их водно-физическими и геоэлектрическими характеристиками.

Для достижения поставленной цели были исследованы грунты – кембрийские глины, отобранные на оползневом склоне на левом берегу реки Тосны в районе города Никольское в Тосненском районе Ленинградской области.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Рассмотреть свойства грунта в области оползня;
- 2) Провести испытания на сдвиг с разной влажностью;
- 3) Определить удельное электрическое сопротивление породы с разной влажностью;
- 4) На основе полученных данных сделать предложения о взаимосвязи физико-механических свойств и геоэлектрических.

Выражается благодарность за постоянную помощь и поддержку в написании выпускной квалификационной работы научному руководителю Бурлуцкому Станиславу Борисовичу. Отдельную благодарность автор выражает Лаздовской Марине Артуровне, Титову Константину Владиславовичу, Емельянову Вячеславу Ильичу, Карам Жоржу Симоновичу и Евенковой Татьяне Дмитриевне за огромную помощь в проведении лабораторных исследований. Использовано оборудование Технопарка СПбГУ, Ресурсного центра "Геомодель".

## Глава 1. Общие сведения о районе исследования

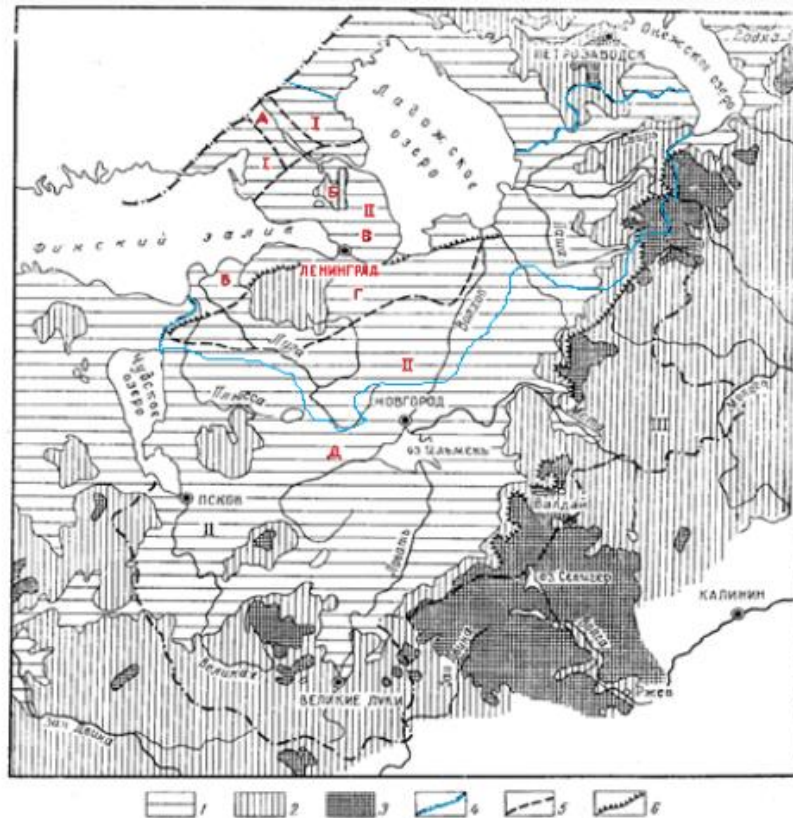
### 1.1. Физико-географический очерк

Территория исследуемого объекта – оползня в глинистых породах находится недалеко от города Никольское Ленинградской области в 50 км от Санкт-Петербурга.

#### 1.1.1. Рельеф

Ленинградская область находится на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Практически горизонтальное залегание пород осадочного чехла, а также слабая тектоническая активность района обуславливают равнинный характер рельефа.

Современный рельеф в значительной степени ледниковый, возникший во время таяния последнего (валдайского) ледника (от 50 до 10 тыс. лет назад).



Абсолютные высоты: 1 – 0-100 м; 2 – 100-200 м; 3 – 200-300 м; 4 – границы Ленинградской области; 5 – границы орографических районов: I – Север Карельского перешейка, II – Прибалтийская низменность, А – Вуоксинская низина, Б – Центральная возвышенность Карельского перешейка, В – Предглинтовая низменность, Г – Ордовикское плато, Д – Девонская равнина; 6 – Балтийско-Ладожский и Валдайско-Онежский уступ.

Рисунок 1. Схематическая гипсометрическая карта Ленинградской области (Архангельский, 1967)

Северная часть Ленинградской области располагается на севере Карельского перешейка. Рельеф холмисто-грядовый с северо-западной ориентировкой, вызванной направлением движения ледника, с абсолютными высотами до 115-130 м. По направлению к югу рельеф понижается и выглаживается с 60-130 до 5-50 м абсолютных высот (Вербицкий, 2012).

Остальная часть Ленинградской области находится в Прибалтийской низменности, которая делится на орографические районы: Вуоксинская низина, центральная Карельская возвышенность, Предглинтовая низменность, Ордовикское плато, Девонская равнина (Архангельский, 1967).

Вуоксинская низина располагается в центре севера Карельского перешейка и делит его на две части. Низина представляет собой слабоволнистую равнину, наклоненную к юго-востоку, с абсолютными высотами 5-50 м.

Центральная Карельская возвышенность считается возвышенной моренной равниной. Поверхность неровная, на южной окраине расположены камовые холмы. Абсолютные высоты в 170-205 м центральной части возвышенности понижаются до 120 м к периферии (Архангельский, 1967).

Рельеф Предглинтовой низменности представлен небольшим количеством заболоченных террасовых поверхностей, наклоненных к Финскому заливу и Ладожскому озеру. Местами расположены возвышенности – камовые массивы с абсолютными отметками до 85-90 м.

Балтийско-Ладожский глинт отделяет от Предглинтовой низменности Ордовикское плато. Максимальные абсолютные отметки 100-120 м. В западной части глинт крутой, в восточной части он выглаживается и практически на всем расстоянии уступ расчленен оврагами и каньонообразными речными долинами с порожистыми руслами рек в местах пересечения ими уступа.

Ордовикское плато представляет собой плоскую возвышенную равнину, полого понижающуюся к югу. Плато разделяется на два участка: западный (Ижорское плато с высотами до 168 м) и восточный участок (Волховское плато с высотами до 80 м) (Архангельский, 1967).

Девонская равнина граничит с юга с Ордовикским плато и протягивается с северо-востока на юго-запад. В состав равнины входят низины (абсолютные высоты 10-30 м) и возвышенности между ними (абсолютные высоты 30-150 м) (Кофман, 1971).

В четвертичное время в формирования рельефа оказали большое влияние геологические процессы, связанные с чередованием ледниковых и межледниковых эпох. Происходила экзарация поверхности, образовывались новые понижения рельефа, а уже имеющиеся углублялись. Рассматриваемую область можно поделить на два геоморфологических комплекса: денудационный и аккумулятивный. К первому виду принадлежит север Карельского перешейка (выход Балтийского кристаллического щита), а ко второму – остальная часть региона (осадочный чехол Восточно-Европейской платформы) (Вербицкий, 2012).

### 1.1.2. Гидрография

Ленинградская область практически полностью принадлежит к бассейну Балтийского моря, кроме небольшого района, расположенного к юго-востоку от Вепсовской возвышенности, относящегося к бассейну Каспийского моря.

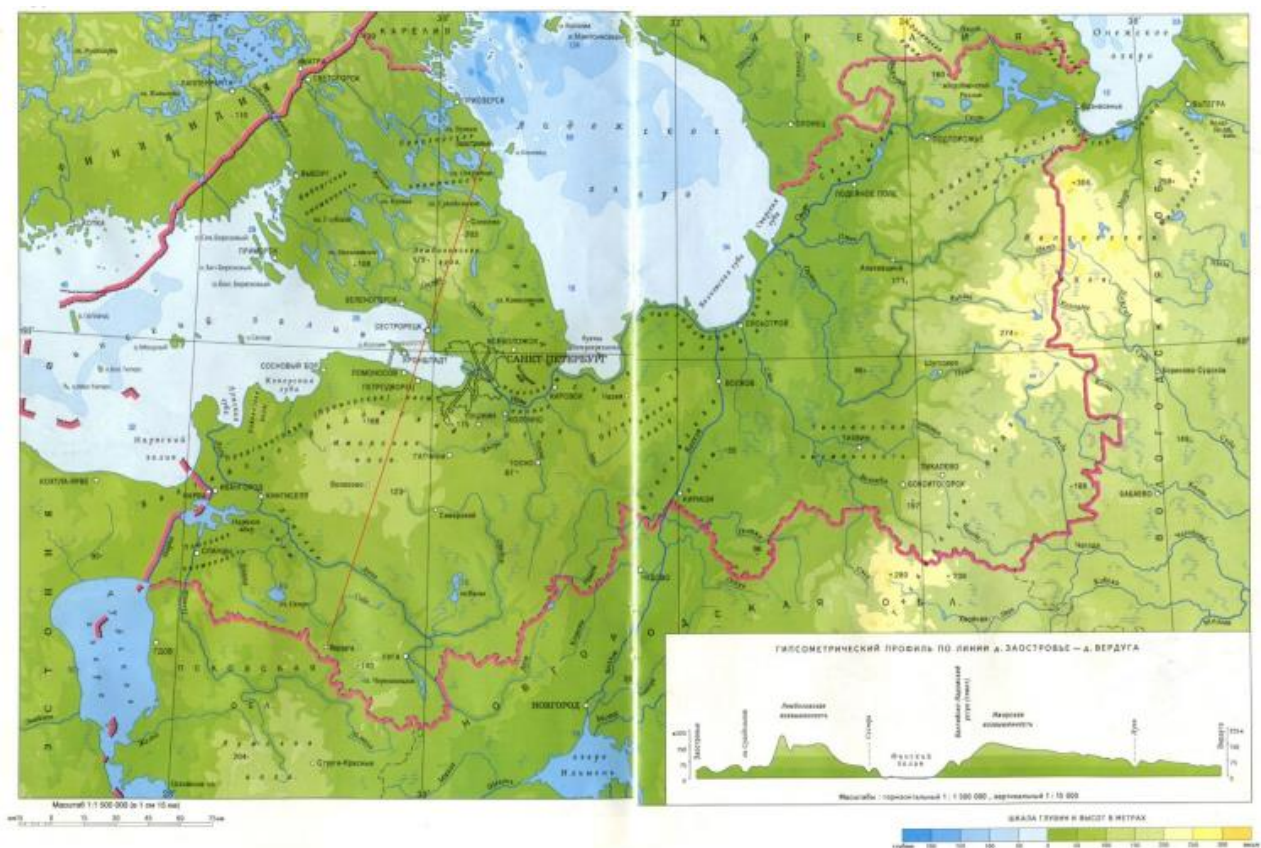


Рисунок 2. Физическая карта Ленинградской области («Института геоэкологии РАН» [Электронный ресурс])

Речная сеть Ленинградской области густая и разветвленная. Суммарная протяжённость рек составляет около 50 тыс. км.

Общее количество рек более 25 тыс. Главной считается р. Нева, которая соединяет Ладожское озеро и Финский залив. В последний ледниковый период на территории был Балтийское ледниковое озеро, спуск которого отделил Ладожское озеро. Около 3,5-4 тыс. лет назад в результате поднятия Ладожского озера образовалась река Нева. Река считается судоходной («Институт Озероведения Российской академии наук» [Электронный ресурс]).

Реки Свирь и Волхов протекают на месте бывших ледниковых водоемов и соединяют Онежское озеро с Ладожским, озеро Ильмень с Ладожским. На реках построена ГЭС, которая сделала реки более пригодными для судоходства и сформировала Верхнесвирское водохранилище. Р. Свирь отличается от р. Волхов равномерным режимом, так как регулируется Онежским озером, когда р. Волхов имеет более неравномерный режим, связанный со значительными колебаниями уровня воды озера Ильмень («Институт Озероведения Российской академии наук» [Электронный ресурс]).

Река Вуокса считается озёрно-речной системой, включающей ряд озёр и протоков. Река используется в энергетических целях. Вуокса имеет выход в Ладожское озеро близ города Приозерск.

Река Сясь берет начало из болот западного склона Валдайской возвышенности. Бассейн реки охватывает восточную часть Ленинградской области («Институт Озероведения Российской академии наук» [Электронный ресурс]).

Также следует рассмотреть реки, впадающие в Финский залив: Нарва и Луга. Река Нарва вытекает из Чудского озера. На реке находится крупная гидроэлектростанция, в результате постройки которой образовалось Нарвское водохранилище, которое является судоходным. Р. Луга имеет сток в Тесовских болотах в Новгородской области и местами считается судоходной («Институт Озероведения Российской академии наук» [Электронный ресурс]).

Реки Ленинградской области питаются, в основном, за счет таяния снега и атмосферных осадков, а также подземных вод. В связи с чем, для всех рек характерен водный режим: весеннего половодья с резким повышением уровня воды, летнего и зимнего меженного периода. Осенью, а также иногда при длительных дождях летом на реках области наблюдаются паводки (Научно-популярная энциклопедия «Вода России» [электронный ресурс]).



Согласно данным многолетних исследований реки Ленинградской области покрыты льдом с конца ноября – декабря по апрель–май. Максимальной толщины лед достигает в марте.

На территории Ленинградской области неравномерно расположено более 6800 водоемов. Большинство озер связано с ледниковой деятельностью на территории, а существованию водоемов поддерживает избыточное увлажнение территории.

На востоке Ленинградской области располагаются карстовые озёра, которые периодически исчезают, в результате засухи, изменения течения подземных потоков и других причин. Вдоль побережья Финского залива находятся лагунные озёра с солоноватой водой. Также на территории Ленинградской области расположены старичные и пойменные озера (Научно-популярная энциклопедия «Вода России» [Электронный ресурс]).

Ладожское озеро - самое крупное в Европе. Его глубина увеличивается в сторону северного побережья до 225 м. В озере находится более 500 небольших островов, большая часть которых располагается в северной части («Энциклопедия научной библиотеки» [Электронный ресурс]).

Онежское озеро в Ленинградской области попадает только южной частью. Его глубина достигает 120 м. Около 50 рек и более тысячи небольших водотоков впадают в Онежское озеро (Архангельский, 1967).

Около 17% территории Ленинградской области занята болотами. Господство выпадающих осадков над испарением, а также равнинный характер рельефа с большим количеством впадин, плохая проницаемость грунтов и приповерхностное залегание грунтовых вод определяют процессы заболачивания в области.

### **1.1.3. Климат**

Ленинградская область находится в умеренном климате с переходом от морского к континентальному. В результате активной циклонической деятельности воздушных масс погода переменчива и считается особенностью региона. Основными характеристиками климата являются большая относительная влажность воздуха в течение всего года, относительно короткое умеренно теплое и влажное лето и довольно продолжительная умеренно холодная зима с частыми оттепелями.

Средняя годовая температура воздуха 5,6 °С, наиболее холодным месяцем в году, в котором среднемесячная температура составляет минус 6,5 °С, считается январь, наиболее

теплым – июль, средняя температура которого около +18,6 °С (СП 131.13330.2020, станция Санкт-Петербург).

Количество выпадающих осадков в области около 650-700 мм в среднем в год. Наибольшее выпадение осадков – в августе, наименьшее – в феврале. В теплый период года выпадает 64 % осадков, в холодный – 36 %. В году среднем 194 дня, в которых выпадают осадки. Снежный покров появляется примерно в начале ноября и держится по март, окончательно сходит в середине апреля. Средняя высота снежного покрова 33 см, наибольшая 61 см.

Также главное значение несет ветровой режим. Преобладающие направления ветров обладают повторяемостью от сезона к сезону: зимой и осенью – юго-западные, а весной и летом – западные. Средняя скорость ветра в год – 3,0 м/с. Также скорость ветра отличается в разные периоды года: в холодный – сильнее, в теплый - слабее. Сильные ветры (до 15 м/с) бывают редко, 8-10 дней в году, в основном зимой.

Нормативная глубина сезонного промерзания грунтов, согласно п.5.5.3 СП 22.13330.2016 и т.5.1 СП 131.13330.2020, составляет:

- крупнообломочные грунты – 1,45 м;
- суглинки и глины – 0,98 м;
- супеси, пески пылеватые и мелкие – 1,28 м;
- торф – 1,0 м.

В соответствии с климатическим районированием страны для строительства (СП 131.13330.2020), Приложение А «Строительная климатология») территория относится к строительно-климатическому району II-Б.

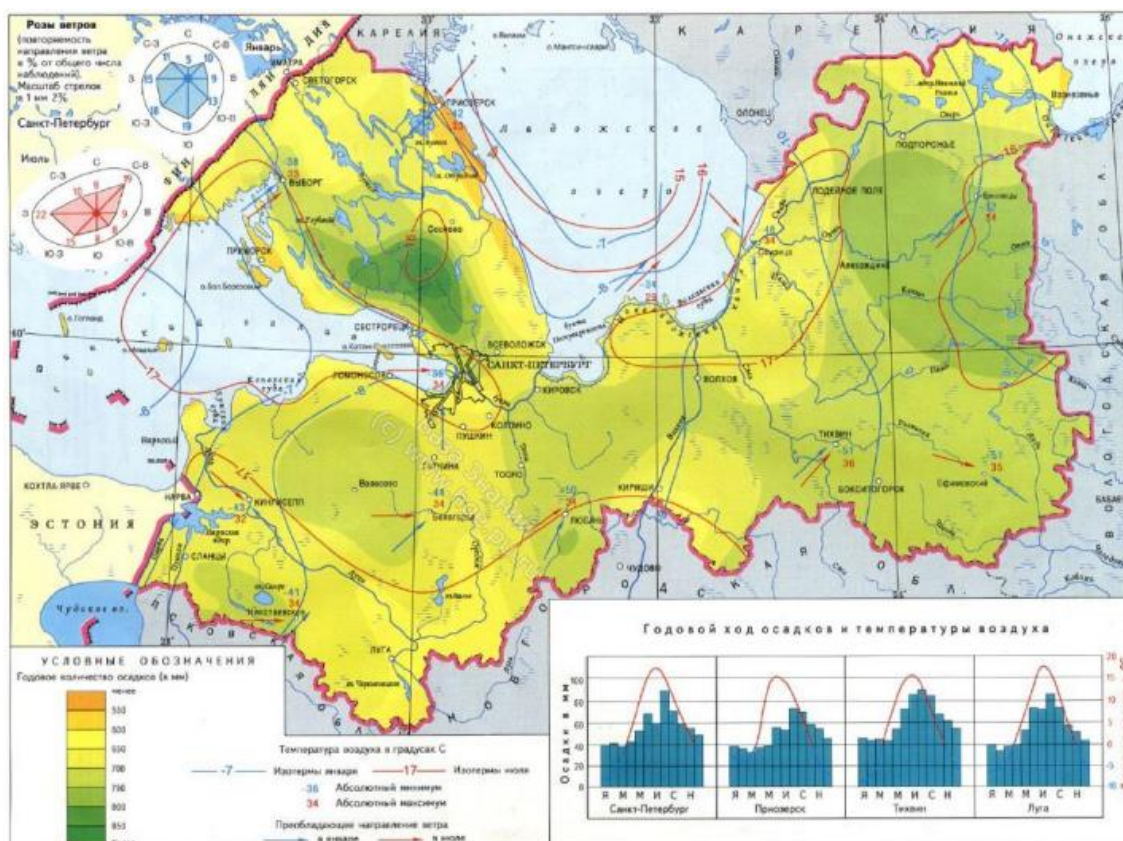


Рисунок 3. Климатическая карта Ленинградской области. («Института геоэкологии РАН» [Электронный ресурс])

## 1.2. Геологические и гидрогеологические условия

Ленинградская область находится в северо-западной части Восточно-Европейской платформы. В исследуемом регионе разделяют два структурных этажа: нижний, представленный кристаллическим фундаментом, верхний – осадочным чехлом.

Практически везде наблюдаются рыхлые четвертичные образования, в основном ледникового и водно-ледникового происхождения (Кофман, 1971).

### 1.2.1. Стратиграфия

Кристаллический фундамент прослеживается на поверхности только в районе Карельского перешейка и является частью Балтийского щита и представлен гнейсами и сланцами и интрузиями кислых и основных пород архея и нижнего протерозоя (Вербицкий, 2012). Выше залегают верхнепротерозойские-фанерозойские осадочные отложения, которые вскрыты скважинами (Кофман, 1971).

В фундаменте платформ расположены многочисленные рифтовые структуры-авлакогены, которые заполнены осадочными породами, представленными грубозернистыми красноцветными и серыми песчаниками приозерской свиты, выше салминскими песчаниками

с покровами щелочных базальтов и песчаниками пашской свиты. Силл габбро-монционитов возрастом 1458 млн лет внедрен в осадочный разрез (Бискэ, 2019).

В середине венда начинает формироваться плитный комплекс чехла Русской платформы. Вендские образования представлены старорусской и василеостровской свитами. На фундаменте несогласно залегает старорусская свита, что в основании сложена разнозернистыми песчаниками, выше которых залегают глины зеленовато-серые плотные гидрослюдистые и коричневые монтмориллонитовые. Кровля выветрелая, ожелезнённая, табачно-жёлтой окраски, с трещинками усыхания.

Василеостровская свита имеет трансгрессивный характер осадконакопления. Нижняя подсвита ( $V_2v_{01}$ ) сложена песчаниками разнозернистыми зеленовато-серыми косослоистыми, переслаивающимися с алевролитами и глинами зеленовато-серыми, коричневыми. Мощность нижней подсвиты повышается в юго-восточном направлении с 10-25 м до 30-45 м. Верхняя подсвита ( $V_2v_{02}$ ) в основании слагается песчаниками глинистыми, выше плотными тонкослоистыми «ляминаритовыми» глинами. Подсвита имеет максимальную мощность до 140 м (Вербицкий, 2012).

Воронковская свита ( $V_2vr$ ), которая распространена в западной части Лужско-Ладожской моноклинали, имеет разрез с регрессивным характером и сложена в основании пестроцветными тонкослоистыми глинами и алевролитами, выше – светло-серыми мелкозернистыми кварцевыми алевролитами и песками. Мощность до 20 м.

Суммарная мощность поздневендских отложений достигает 250 м.

Кембрийская система (Є) в Ленинградской области состоит из ломоносовской, сиверской, саблинской, ладожской свит.

Ломоносовская свита ( $Є_{1lm}$ ) представлена песчаниками, алевролитами и глинами. Свита залегает с размывом на породах василеостровской свиты, о чем свидетельствуют песчаные отложения в основании. Мощность свиты увеличивается в юго-восточном направлении с 4 м до 23 м.

Сиверская свита ( $Є_{1sv}$ ) сложена голубовато-серыми гидрослюдистыми глинами, имеющие в основании прослойки алевролитов. Местами вверху встречаются скопления глинистых окатанных галек. Глины относительно глубоководные, связанные с морской трансгрессией. (Бискэ, 2019) Мощность свиты уменьшается в южном направлении с 120 м до 70 м (Натальин, 2001).

Отложения саблинской свиты ( $Є_{2sb}$ ) представлены светло-серыми кварцевыми песчаниками с мелкозернистой структурой и косою слоистостью. В песчаных породах наблюдаются прослои и гнезда бурых и красноцветных песчаников, кольца Лизеганга, в

кровле отложений – конкреции окислов железа. Отложения отвечают условиям морского побережья и образованы на фоне общей регрессии. Мощность свиты 10-15 м (Бискэ, 2019).

Ладожская свита (Є<sub>3</sub>ld) сложена светло-серыми кварцевыми песчаниками и песками горизонтально- и косослоистыми, в которых прослеживаются остатки раковин беззамковых брахиопод рода *Obolus*. Формирование свиты происходило в промежуток времени относительно краткосрочной трансгрессии и регрессии. Мощность свиты увеличивается с 1 м на севере до 14 м на юге.

В ордовике (O) образовалась толща большой мощности и преимущественно карбонатного состава в время обширной трансгрессии, происходившей одновременно с медленным тектоническим погружением. В основании находятся образования тосненской свиты (O<sub>1</sub>ts), сложенные светло-серыми средне-мелкозернистыми косослоистыми кварцевыми песчаниками. В подошве свиты наблюдаются фосфатные гальки и детрит. Также прослеживаются остатки беззамковых брахиопод и конодонт. Мощность отложений 2-5 м. (Бискэ, 2019).

Отложения копорской свиты (O<sub>1</sub>kp) представлены черными аргиллитами, которые местами замещены сланцеватыми битуминозными глинами, имеющие в составе остатки дендроидных граптолитов. Данная свита считается маркирующим горизонтом. Мощность свиты от 10-30 см до 6,5 м (Бискэ, 2019).

Песчаники тосненской свиты вместе с черными сланцами копорской свиты образуют пакерортский горизонт, сланцевая часть которого обогащена ураном, ванадием и платиной (Бискэ, 2019).

Лезтеская свита (O<sub>1</sub>lt) представлена темно-зелеными мелкозернистыми песками и песчаниками с многочисленными зернами глауконита (до 50%). Мощность отложений 0,5-2 м (Вербицкий, 2012).

Волховская свита (O<sub>2</sub>vl) сложена известняками и доломитами, которые неоднородны по литологическому составу и разделяются на три подсвиты. Первая – «дикари», сложена плотными пестрыми доломитизированными известняками мощностью 0,7-2 м. Подсвита «желтяки» представлена пятнистыми желтыми и фиолетово-бурыми тонкоплитчатыми мелкокристаллическими глинистыми известняками. Присутствуют конодонты и граптолиты. Мощность свиты меняется с 0,3-0,6 м до 1-2 м. Подсвита «фризы» представлена известняками, местами переходящие в доломиты, в основном тонкослоистые с редкими тонкими прослоями мергелей и глин, зеленовато-серые со слабым фиолетовым оттенком и с примесью глауконита. Мощность отложений 0,9-4 м. Вся свита характеризуется также наличием брахиопод, наутилоидей, трилобитов и остракод (Бискэ, 2019).

Обуховская свита (O<sub>2ob</sub>) представлена желтовато-серыми тонкоплитчатыми доломитами и известняками, в которых есть прослои известковистых глин и мергелей. В свите содержатся остатки трилобитов, брахиопод и конодонт. Мощность свиты увеличивается в южном направлении от 1,5 до 7,5 м. (Вербицкий, 2012).

В силуре (S) происходило выветривание на возвышенной равнине.

Отложения среднего и верхнего девона (D<sub>2-3</sub>) прослеживаются на юге и юго-востоке Ленинградской области и представлены песками и песчаниками, доломитами и мергелями. Мощность неравномерная и достигает более 100 м на юге.

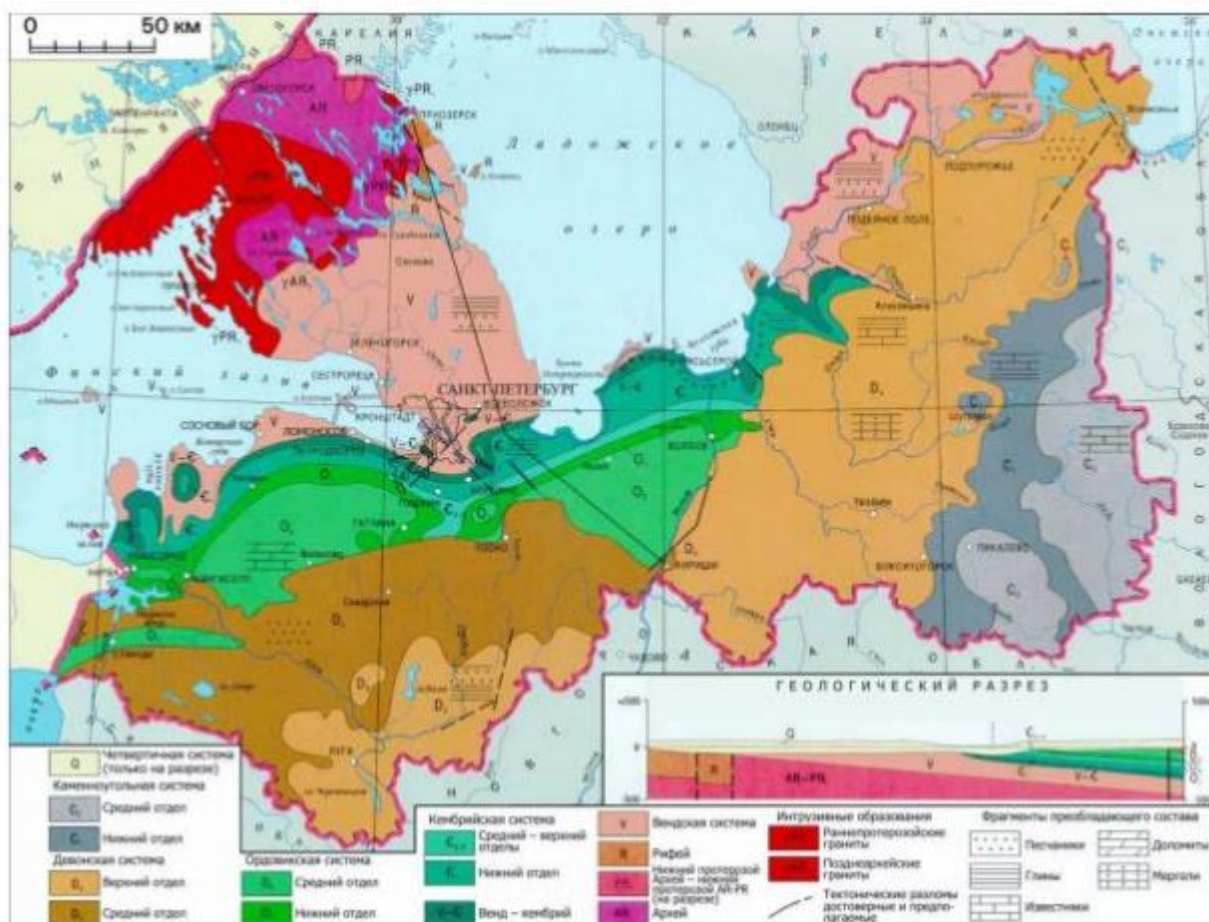


Рисунок 4. Геологическое строение северо-западного окончания Русской платформы в Ленинградской области (Вербицкий, 2012)

### 1.2.2. Четвертичные отложения

Отложения (Q<sub>IV</sub>) верхнего плейстоцена и голоцена плащеобразно перекрывают денудированную поверхность нижележащих пород. Наблюдаются повсеместно и имеют различный генезис, но преимущественно имеют ледниковое происхождение: моренные, флювиогляциальные и озерно-ледниковые, а из водных: широко развиты морские, озерные и болотные осадки. Все они представлены по большей части переслаивающимися песчано-глинистыми отложениями и считаются специфическими грунтами.

Мощность отложений неравномерная и в среднем не превышает 20-30 м, однако может достигать до 100-130 м в погребенных долинах (Сергеева, 2013).

Ледник двигался со Скандинавского полуострова и следующие поступающие ледники практически не оставляли отложения предыдущих, что осложняет установление истории развития территории. Четвертичные отложения данной области – это по большей части отложения московского и валдайского оледенений (Сергеев, 1982).

Отложения московского оледенения встречаются только в глубоких палеодолинах. В составе образований московского ледника выделяются основная и краевая морены. Основная морена сложена грубыми валунными суглинками, реже валунными супесями и глинами, местами известковистыми и с большим количеством валунов гранита, гранитогнейсов, порфиритов.

В начале позднего неоплейстоцена произошло потепление (микулинское межледниковье), которое привело к полному исчезновению ледникового покрова и возникновению морского бассейна. Предглинтовая низменность являлась морской акваторией непродолжительное время. Морские отложения (mPimg) наблюдаются в пределах южного побережья Финского залива и Ладожского озера и сложены тёмно-серыми, зеленовато-чёрными суглинками и глинами, как правило гумусированными, с включениями раковин морских моллюсков и вивианита. Реже представлены супесями и песками. К юго-востоку от Балтийско-Ладожского уступа горизонт сложен континентальными отложениями (Астахов, 2008).

В Ленинградской области широко представлены отложения валдайского оледенения. В течение всего средневалдайского интервала (50-24 тыс. лет назад), когда территория являлась областью с древними озерами, различных по размерам. Ленинградский горизонт сложен континентальными водными осадками: суглинками, алевролитами, тонкозернистыми пылеватыми песками, илами, торфом. Мощность достигает 24 м.

В осташковское время (поздний валдай) происходит похолодание и новое наступание ледника и его последующая деградация, с чем связано генетическое, литологическое разнообразие осадков: комплексы ледниковых (основная и краевая морены), водно-ледниковых, аллювиальных, озёрно-аллювиальных и озёрных отложений. Моренные отложения сложены красновато-коричневыми валунными суглинками, супесями и глинами. Флювиогляциальные образования слагают озы, камы и зандровые поля, которые сложены песками. Аллювий создает первую и вторую надпойменные террасы крупных рек и сложен разнозернистыми горизонтально- и косослоистыми песками. Озерно-ледниковые отложения развиты на низменных площадях, в наиболее пониженных участках и представлены ленточными глинами, которые замещаются суглинками, супесями, песками к краевой части.

Голоценовые отложения распространены повсеместно и представлены континентальными осадками водного ряда, биогенными, эоловыми, морскими и техногенными. Во время голоцена происходила эрозия, с переотложением материала в речных долинах, озерах и морях, а на севере – процессы заболачивания, с образованием торфяников (Астахов, 2008).

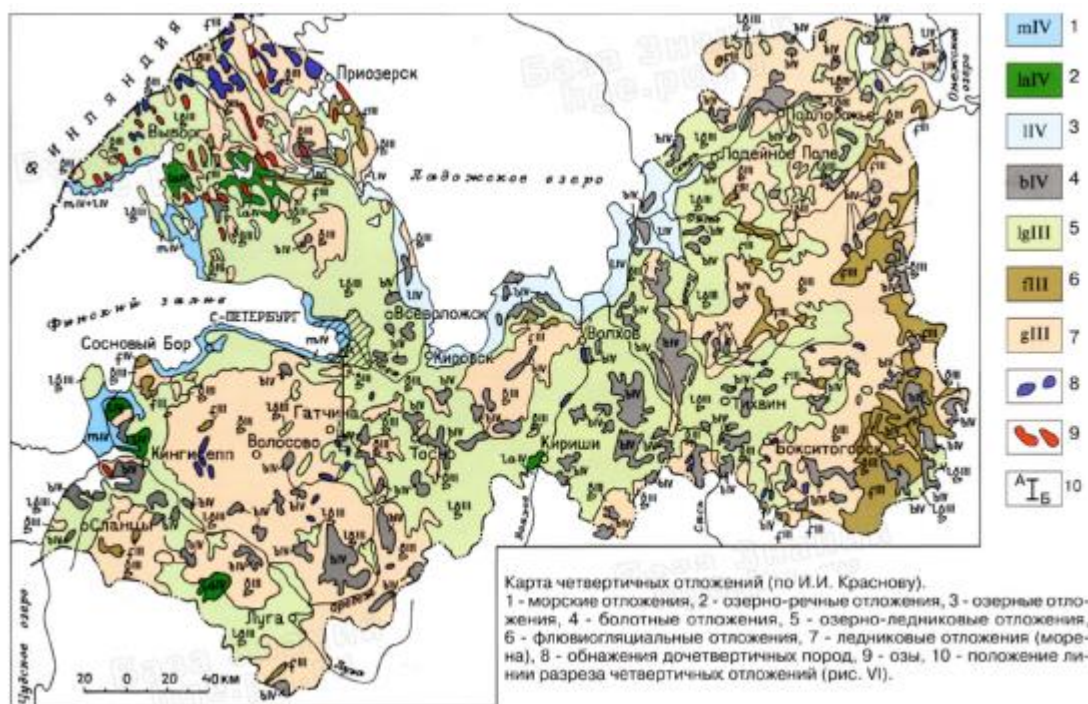


Рисунок 5. Карта четвертичных отложений (по И.И. Краснову)

### 1.2.3. Гидрогеологические условия

В составе Ленинградской области выделяются две гидрогеологические структуры: Балтийский гидрогеологический массив и Ленинградский артезианский бассейн. К первой относится ее северная часть (Карельский и Онего-Ладожский перешейки), а вся остальная – к второму (Грейсер, 2005).

К отложениям неоплейстоцена и голоцена приурочен четвертичный водоносный комплекс (ВК), который развит повсеместно и неравномерно, приурочен к озо-камовым массивам, флювиогляциальным полям и межморенным водоносным горизонтам. Вмещающие породы – разноразмерные пески. Мощность колеблется от 1 до 80 м. Водообильность неравномерная. В зависимости от положения в разрезе, степени проницаемости и литологического состава пород выделяют относительно водоупорные горизонты (ВУГ), межморенные, моренные и надморенные водоносные горизонты (Вербицкий, 2012).

Глубина залегания надморенных горизонтов в пределах плоских равнин и болотных массивов не больше 1,0 м, на возвышенностях – 3,5-10 м. Питание происходит за счет инфильтрации атмосферных вод, разгружаются горизонты в поверхностные водоёмы и



водотоки. По результатам опытно-фильтрационных работ, коэффициент фильтрации вмещающих пород меняется от 0,0025 м/сут (в торфах и глинах) до 25 м/сут (в крупнозернистых песках и галечниках). Воды по большей части пресные, имеют различный химический состав, обусловленный как природными факторами, так и антропогенными (Вербицкий, 2012).

В Ленинградской области выделяют два межморенных водоносный горизонта. Верхний московско-валдайский ММВГ перекрывается отложениями лужской морены и подстилается московской, с напором подземных вод 20-40 м. Второй – нижний днепровско-московский межморенный водоносный горизонт залегает под московской мореной, подстилается днепровской мореной, с напором подземных вод 40–60 м. Водопроницаемость около 20–50 м<sup>2</sup>/сут (Грейсер, 2005).

Воды каменноугольных отложений магниевые-кальциевые и карбонатно-кальциевые, жёсткие.

Московский водоносный горизонт расположен в Карбоновом плато. Вмещающие породы сложены трещиноватыми и закарстованными карбонатными породами, которые имеют мощность 15–55 м. Воды безнапорные и движутся в юго-восточном направлении.

Верейский водоупорный горизонт расположен в юго-восточной части Ленинградской области, сложен красноцветными глинами, в которых имеются прослои мелкозернистых глинистых песков, песчаников, доломитов, известняков и мергелей. Мощность 5–10 м.

Веневско-протвинский водоносный комплекс развит на западе Карбонового плато и сложен известняками и доломитами, с прослоями глин. Мощность 50–80 м. Водопроницаемость увеличивается от 400–500 до 1500–5000 м<sup>2</sup>/сут с повышением степени закарстованности и трещиноватости известняков. В среднем водопроницаемость составляет 100 м<sup>2</sup>/сут. Воды напорно-безнапорные и используются для водоснабжения юго-восточной части Ленинградской области.

Малевско-михайловский водоносный комплекс расположен в восточной части Ленинградской области и представляет собой чередование глин и песков, мощностью 55–90 м (Грейсер, 2005).

Верхнедевонский водоносный комплекс сложен чередующимися песками, глинами, песчаниками, известняками. Мощность повышается в юго-восточном направлении с 1–15 м до 120–140 м. Максимальная водопроницаемость до 100–300 м<sup>2</sup>/сут. Подземные воды преимущественно безнапорные и слабонапорные (с напором менее 20 м). Воды комплекса эксплуатируются.

Саргаевско-даугавский водоносный комплекс расположен в центре Ленинградской области и сложен переслаиваниями мергелей, доломитов, известняков, глин. Мощность

повышается с 10 м на северо-западе до 135 м на юго-востоке. Водопроницаемость комплекса меньше  $50 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Подземные воды считаются слабонапорными и безнапорными. Комплекс эксплуатируется единичными скважинами (Грейсер, 2005).

Аракюласко-швянтыйский водоносный комплекс находится в юго-западной части Ленинградской области. Комплекс представлен красноцветными песками и песчаниками, в которых переслаиваются глины и алевролиты. Мощность колеблется от 15 до 140 м. Водопроницаемость изменяется от 50-100 до  $300-500 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Воды слабонапорные с напором менее 20 м и используются в водоснабжении г. Луга.

Наровский слабоводоносный горизонт расположен в юго-западной части Ленинградской области. Вмещающие породы – слаботрещинчатый мергель, доломит и известняк, глина, местами с прослоями песков и песчаников. Мощность 20-55 м. В основном считается водоупором, за исключением области с выходом его под четвертичные отложения.

Ордовикский водоносный комплекс находится южнее Балтийско-Ладожского уступа и представлен трещиноватыми и закарстованными известняками и доломитами. Мощность увеличивается с 5 м на северо-западе до 130 м на юго-востоке. Водопроницаемость в основном  $500-2500 \text{ м}^2/\text{сут}$  до  $10000 \text{ м}^2/\text{сут}$  в областях, где более трещиноватые породы. Воды безнапорные и слабонапорные, с повышением напора от 2 м до 190 м на юго-востоке.

Кембро-ордовикский водоносный комплекс находится в юго-восточной стороне от Балтийско-Ладожского уступа и представлен песком и слабосцементированным песчаником с небольшими прослоями глин и алевролитов. Мощность комплекса повышается с 2 м на северо-западе до 60 м на юго-востоке. Водопроницаемость  $50-300 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Воды напорные и высоконапорные, в области приглинтовой полосы они безнапорные. Напор повышается до 340 м при движении на юг (Грейсер, 2005).

Лонтоваский водоупорный горизонт находится на юге от Финского залива и Ладожского озера и представлен глиной. Мощность повышается с 2 м до 130 м на юго-востоке. Водоупор разделяет пресные воды верхних водоносных комплексов от солоноватых и соленых вод нижних комплексов.

Ломоносовский водоносный горизонт также расположен на юге от Финского залива и Ладожского озера, но отличается содержанием солоноватых и соленых вод, за исключением западной части с пресными водами. Водовмещающими породами служат мелко- и среднезернистые песчаники, которые переслаиваются с алевролитами и глинами. Мощность 5-60 м. Водопроницаемость повышается от 50 до  $140 \text{ м}^2/\text{сут}$  в направлении на запад. Воды напорные, с повышением напора от 5 до 300 м в юго-восточном направлении (Грейсер, 2005).

Верхнекотлинский водоносный горизонт наблюдается на всей территории Ленинградской области, кроме Выборгского и Приозерского районов и сложен плотными глинами. Мощность составляет 50-130 м.

Вендский водоносный комплекс представлен на всей территории, в составе которого минеральные воды. Представлен песками и песчаниками с прослоями глин и алевролитов общей мощностью 7–57 м. Водопроницаемость 50–100 м<sup>2</sup>/сут. Воды напорные с повышением напора от 30 до 174 м при движении на юг.

Архей-протерозойская водоносная зона развита в области трещиноватости и коры выветривания пород кристаллического фундамента в северной части Карельского перешейка и сложена гнейсами, гранитами и кристаллическими сланцами. Мощность неравномерная от 1–2 до 50 м. Подземные воды пресные, с увеличением глубины их минерализация повышается. Сложности в нахождении обводненных зон не позволяют использовать эти воды (Грейсер, 2005).

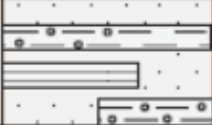






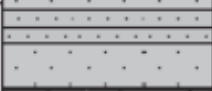



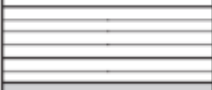

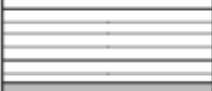
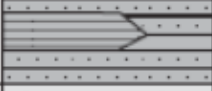
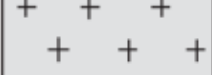
Группа	Система	Отдел	Литологическая колонка	Краткое описание пород	Мощность, м	Гидрогеологическое подразделение, индекс
Кайнозой	Четвертичная			Песок, супесь, суглинков, глина, суглинков валунный	5-80	Четвертичный ВК, Q
		Палеозой	Карбон	средний		Известняк, доломит
	Глина, мергель				5-10	Верейский ВУГ, C <sub>2</sub> vr
нижний				Известняк, доломит, глина	50-80	Веневско-протвинский ВК, C <sub>1</sub> vp-pr
				Песок, известняк, глина	55-90	Малевско-михайловский ВК, C <sub>1</sub> ml-mh
Девон	верхний			Песок, глина, известняк, песчаник	5-140	Верхнедевонский ВК, D <sub>3</sub>
				Известняк, доломит, глина	10-135	Саргаевско-даугавский ВК, D <sub>3</sub> sr-dg
	средний			Песок, песчаник, алевролит	15-140	Аруколаско-швянтайский ВК, D <sub>2</sub> ar-D <sub>2</sub> sv
				Мергель, доломит, известняк, глина	20-55	Наровский относительно ВУГ(СВУГ), D <sub>2</sub> nr
Ордовикский	вер. ср. ниж.			Известняк доломитизированный, доломит	5-130	Ордовикский ВК, O
	Кемб्रो-ордовикский		вер. ср.		Песок, песчаник, глина	2-60
нижний			Глина	2-130	Лонтоваский ВУГ, E <sub>1</sub> ln	
			Песок, алевролит, глина	5-60	Ломоносовский ВГ, E <sub>1</sub> lm	
Протерозой (верхний)	Венд			Глина	50-130	Верхнекотлинский ВУГ, V kt <sub>2</sub>
			Песчаник, песок, глина	10-80	Вендский ВК, V	
Архей-нижний протерозой				Гнейсы, граниты, мигматиты	-	Архей-протерозойская водоносная зона, AR-PR

Рисунок 6. Гидрогеологическая стратиграфическая колонка: ВК — водоносный комплекс; ВГ — водоносный горизонт; СВУГ — слабоводоносный горизонт; ВУГ — водоупорный горизонт (Грейсер, 2005)

### 1.3. Глинистые грунты и их особенности

В Ленинградской области повсеместно встречаются ижнекембрийские синие глины, а в районе Предглинтовой низменности они выходят на поверхность или перекрыты четвертичными отложениями небольшой мощности. Синие глины считаются типичными морскими осадками. Для данных глин характерна однородность и пластичность. По составу они гидрослюдистые, иногда монтмориллонитовые, с наличием пиритизированных следов червеобразных мелких кристаллов и друз пирита.

Факторы, которые воздействуют на свойства глинистых пород:

1. Минеральный состав. В составе глин очень мелкие по размеру микрокристаллы глинистых минералов, которые влияют на основные свойства пород. Кроме того, на свойства оказывают влияние особенности кристаллического строения.

Кристаллическая структура глин состоит из различных соединений тетраэдрических и октаэдрических элементов. Тетраэдр состоит из центрального атома кремния и четырех атомов кислорода вокруг него, соединения тетраэдров образуют тетраэдрическую сетку. Октаэдр образуется шестью атомами кислорода или гидроксильными группами вокруг центра, в котором может находиться атом алюминия, железа или магния. Октаэдрическая сетка состоит из соединенных октаэдров.

Тетраэдрические и октаэдрические сетки близки размерами, поэтому они могут спокойно соединяться друг с другом и образовывать единый гетерогенный слой. Связи между гетерогенными слоями у глинистых минералов бывают разными, так как строения слоев и их заряды могут отличаться. Прочная связь между слоями обуславливается водородной связью или ионно-электростатической связью. В таком случае у глинистых минералов (каолинит, гидрослюда, хлорит, палыгорскит) имеется более жесткая кристаллическая структура, в которой молекулы воды и обменные катионы не могут проникать в межслоевое пространство кристалла и такие минералы не набухают (Рис 7). Менее прочная межслоевая связь обеспечивается молекулярными силами. Такие глинистые минералы (монтмориллонит, нонтронит) будут обладать раздвижной кристаллической структурой (Рис. 8), в межслоевое пространство которой будут проникать молекулы воды и обменные катионы при гидратации и будет происходить набухание (Осипов, 1989).

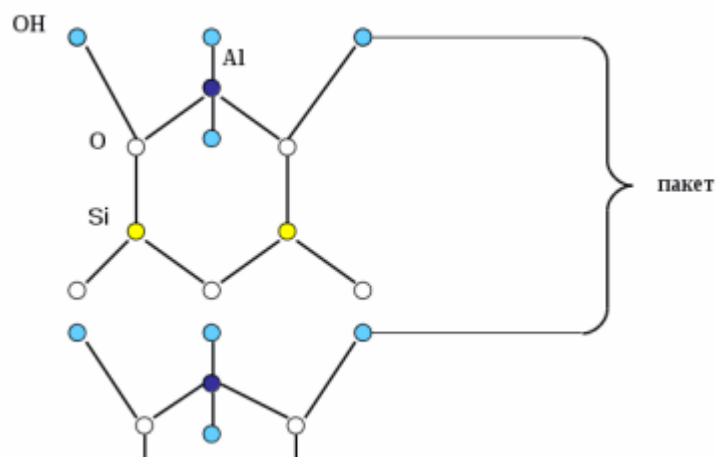


Рисунок 7. Схема кристаллической решетки каолинита (Соколов, 2000)

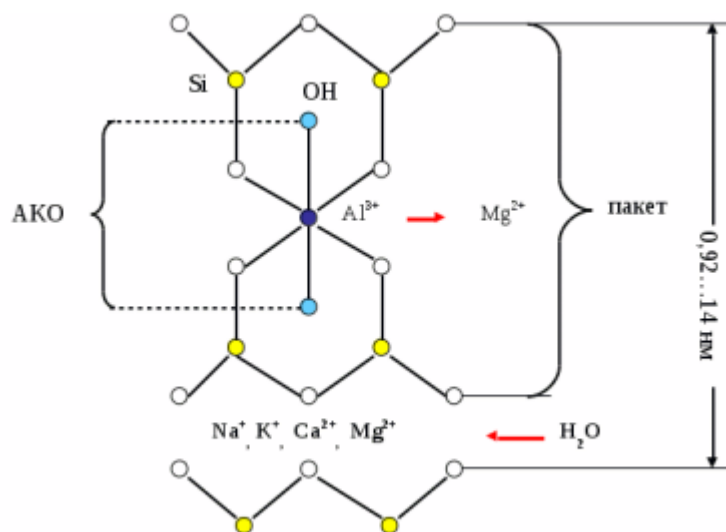


Рисунок 8. Схема кристаллической решетки монтмориллонита (Соколов, 2000)

2. Структура: размер, форма, характер поверхности и количественное соотношение структурных элементов, их ориентацию в пространстве и тип структурных связей (Осипов, 1989). Более того особенности структурных связей влияют на свойства глин, главным образом на прочностные и деформационные.

Между частицами в глинистых породах имеются различные взаимодействия, которые зависят от состава и структуры: гравитационные, магнитные, молекулярные, электростатические, ионно-электростатические, силы поверхностного натяжения и силы, обусловленные химическими связями. Данные силы действуют только в местах контактов частиц (Осипов, 1989), которые бывают: коагуляционными, переходными и фазовыми (Соколов, 2000).

Коагуляционные контакты в основном бывают у молодых глинистых осадков и слабоуплотненных глин. Их характерной особенностью считается наличие между частицами

связанной воды, слабая прочность и тиксотропия. В данном случае действуют молекулярные, магнитные и электростатические взаимодействия.

Переходные контакты встречаются у водонасыщенных плотных глинистых пород и у слабовлажных глин. Особенностью является точечная площадь соприкосновения и образование относительно прочной связи в результате действия ионно-электростатических и валентных сил. Для данных контактов характерна способность переходить в коагуляционные контакты при увлажнении породы и восстанавливаться при высыхании.

Фазовые контакты бывают в сильно уплотненных сцементированных глинах, аргиллитах, глинистых сланцах. Характерной чертой считается наличие непосредственного соприкосновения между минеральными частицами на значительной контактной площади или развитие на контакте новой фазы (кремнезема, гипса, карбонатов), цементирующей минеральные частицы и микроагрегаты. Действуют ионно-электростатические и химические силы, которые обуславливают их высокую прочность. Глинистые породы с такими контактами сохраняют прочность и не пластифицируются во время увлажнения.

Контакты глинистых пород, а также их прочность естественно сменяются по ходу геологического развития. Например, свежие нелигифицированные глинистые осадки с коагуляционным типом контакта, за счет гравитационного уплотнения превращаются в пластичные глины с переходным типом контакта. При дальнейшем уплотнении осадков на больших глубинах при высоких значениях температуры и давления переходные контакты трансформируются в фазовые, что приводит к образованию прочных глинистых пород.

Во время исследования свойств глинистых грунтов, стоит сфокусироваться на механических свойствах грунтов, ведь по ним можно говорить об их прочности. Это способность грунтов сопротивляться разрушению под действием нагрузки, а деформацией называется свойство изменять под нагрузкой форму сложения и объем (Ломтадзе, 1990).

Деформационными свойствами пород называют их способность противостоять нагрузкам, не приводящим к разрушению. В результате изменяется объем и форма. В основном влажные пластичные глины склонные к подобным превращениям, так как под действием внешних нагрузок они начинают уплотняться и может происходить осадка сооружений (Соколов, 2000).

При оценке устойчивости, знание прочностных свойств горных пород считается главным фактором, который позволяет составлять прогноз поведения этих пород в разнообразных условиях. Одной из основных характеристик грунта – это его сопротивление

сдвигу, которое определяет устойчивость грунта в склонах, откосах и в основаниях инженерных сооружений.

Также выветрелость и разуплотнение пород может обуславливать прочностные и деформационные свойства пород. В результате выветривания появляются микротрещины, слабеют связи между частицами и изменяется химический состав пород, что приводит к понижению прочности глинистых пород.

Отдельно стоит выделить поведение глинистых пород и их свойств при взаимодействии с водой: после увлажнения глины теряют их прочность. К примеру, глины переходят из плотных полутвердых в пластичные под действием воды. Подобные процессы происходят на оползневых склонах, образуя оползни в результате обильного увлажнения.

## 1.4. Характеристика участка исследования

### 1.4.1. Местоположение и геологическое строение

Участок исследований расположен в юго-западном районе города Никольское в Тосненском районе в Ленинградской области. В геоморфологическом плане участок отнесен к Предглинтовой низменности (Рис. 9).

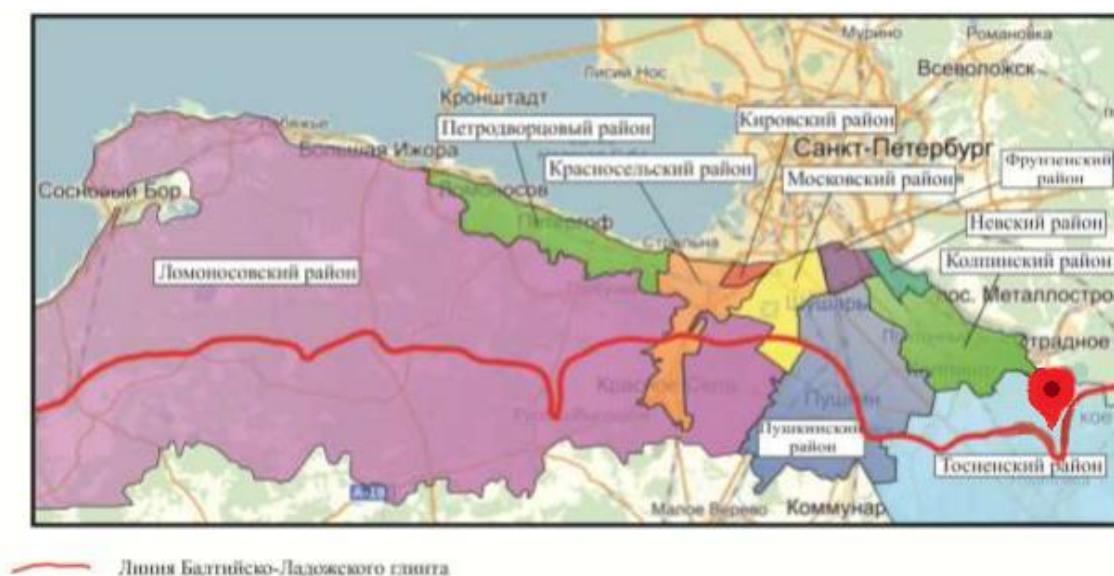


Рисунок 9. Районы Санкт-Петербурга и Ленинградской области в Предглинтовой низменности, с отмеченным объектом исследования (Коробко, 2015)

Предглинтовая низменность находится в области соединения структур: Балтийского щита и северо-западной части Русской плиты. С запада граничит с Финским заливом, с северо-востока присоединяется к р. Неве, с севера ограничена Центральным поднятием Карельского перешейка, с юга – Балтийско-Ладожским уступом (Рис 10).





Рисунок 10. Зона соединения Балтийского щита и Русской плиты на северо-западе Ленинградской области (Масленников, 2010)

В Предглинтовой низменности кристаллический фундамент покрыт осадочным чехлом, что выделяется на вендско-кембрийские отложения и песчано-глинистые отложения плейстоцена-голоцена.

В венде отложения образовывались в мелководных эпиконтинентальных морях, куда терригенный материал поступал с Балтийского щита (Мачабели, 1981).

В кембрии чередуются трансгрессии и регрессии, в результате дифференциации тектонического режима. Пески ломоносовского горизонта покрываются лонтоваскими синими глинами, образованными в теплом климате и относительно спокойном гидродинамическом режиме. Терригенный материал приходил в результате размыве верхнекотлинских глин венда (Рис. 11).

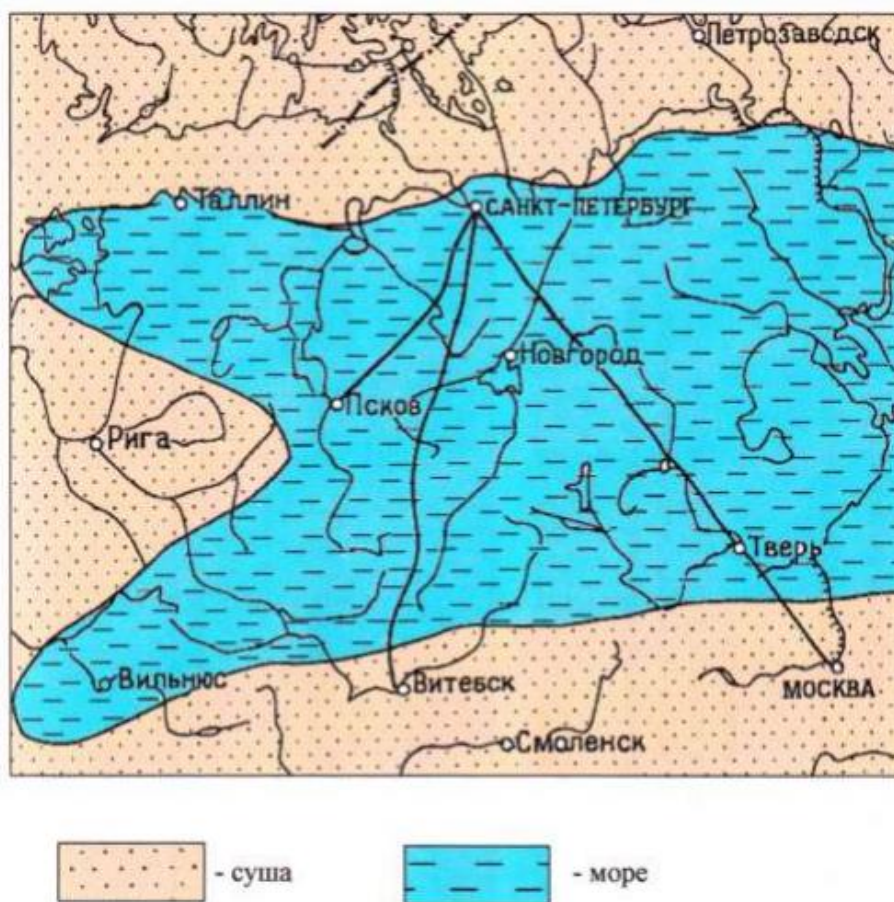


Рисунок 11. Соотношение моря и суши в раннем кембрии (лонтоваский век) (Мачабели, 1981)

Лонтоваское время бассейна завершилось поднятием всей территории и субаэральным выветриванием, на что указывает наличие железистой и каолиновой коры выветривания.

Осадочные образования залегают моноклинально со слабым падением в сторону юго-востока. Еще одной отличительной характеристикой геологического строения осадочного чехла изучаемой территории, считается развитие структурно-денудационных форм дочетвертичного рельефа (Рис. 12).

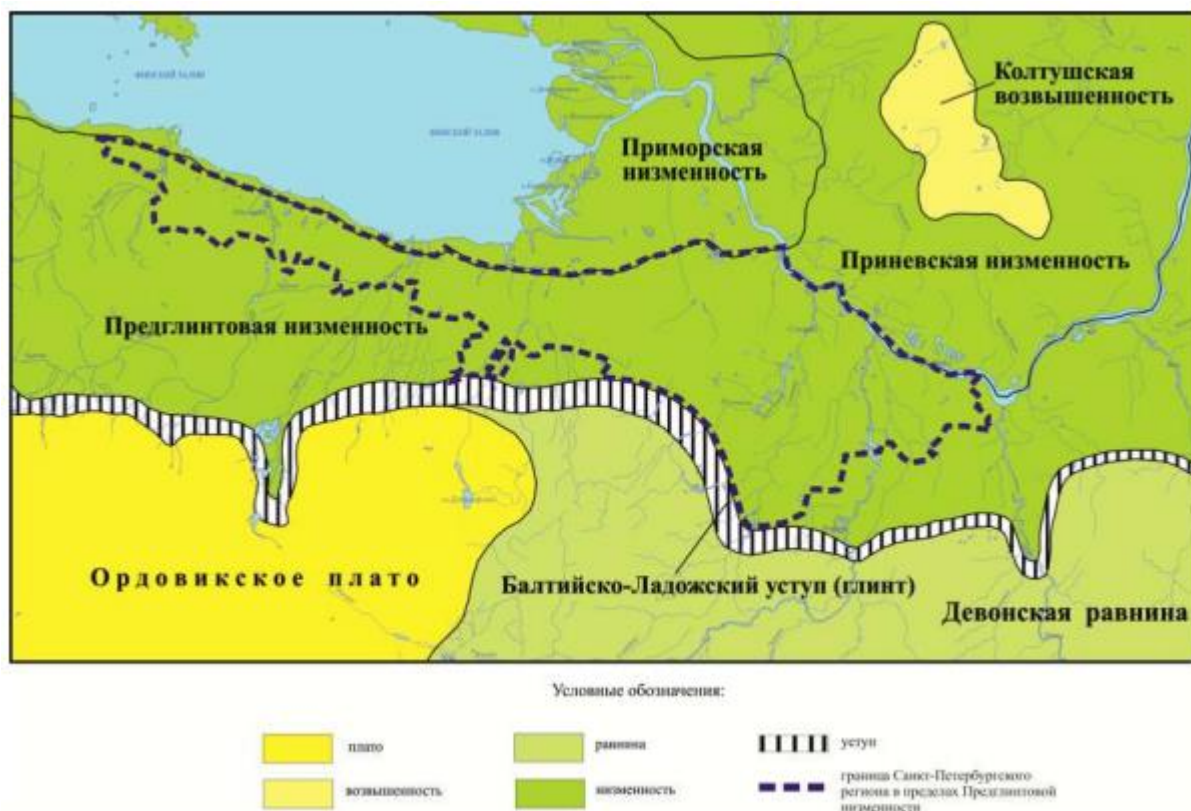


Рисунок 12. Орографическая схема (Коробко, 2015)

В конце карбона территория поднялась выше уровня моря и превратилась в равнинную сушу. В результате выветривания, действия рек и ледников сохранились только отложения венда-кембрия, которые покрыты четвертичными образованиями, что сложены озерными, ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями.

Рассматриваемый регион определяется следующей порядком залегания четвертичных отложений.

#### Четвертичная система Q

#### Плейстоцен, Неоплейстоцен

#### Московский горизонт

Отложения образовались в результате московского оледенения и являются: флювиогляциальными, ледниковыми и озерно-ледниковыми.

Ледниковые отложения (gПms) находятся в древних долинах и сложены суглинками, реже зеленовато-серыми супесями, имеются включения гравия, гальки, валунов, обогащены глинистым материалом кембрия. Мощность варьирует от 1 до 45 м.

Флювиогляциальные отложения (fПms<sup>3</sup>) сложены разнозернистыми песками и песчано-гравийными грунтами, с общей мощностью 10–15 м.

Озерно-ледниковые отложения ( $lg\Pi ms^3$ ) располагаются в юго-западной части Предглинтовой низменности и сложены пылеватými песками, супесями и ленточными глинами, с общей мощностью 3,5 м.

#### Микулинский горизонт

#### Мгинская свита

Морские отложения ( $m\Pi_1 mg$ ) находятся в северо-восточной части в палеоолинах и сложены серыми пылеватými суглинками и мелкими песками, с редкими включениями гравия и органических веществ, общей мощностью от 2,0 до 18,8 м.

#### Валдайский надгоризонт

#### Подпорожский горизонт

Озерные и озерно-ледниковые отложения ( $l,lg\Pi_2 pd$ ) расположены между рекой Саблинка и рекой Тосна и сложены суглинками, супесями, общей мощностью до 6 м.

#### Ленинградский горизонт

Озерные отложения ( $\Pi_3 ln$ ) сложены песками пылеватými, алевритами, супесями и торфом, общей мощностью 5,4-18,0 м.

#### Осташковский горизонт

Ледниковые отложения ( $g\Pi_4 os$ ) находятся почти повсеместно и сложены суглинками, супесями с включениями гравия, гальки, валунов, мощностью 0,2-80 м.

Флювиогляциальные надморенные отложения ( $f\Pi_4 os$ ) распространены локально в озах и камах, сложены песками средней крупности, имеются включения гравия, гальки, мощностью 0,5-5,0 м.

Озёрно-ледниковые отложения ( $lg\Pi_4 os$ ) расположены локально и сложены зеленовато-серыми песками средними крупности, ленточными глинами и суглинками, общей мощностью 4,0-20,0 м.

Озерно-ледниковые отложения ( $lg\Pi_4^3 bl$ ) бывшего Балтийского ледникового озера вверху сложены глинистыми отложениями с ленточной слоистостью, ниже супесями, которые переходят в пески, в которых наблюдаются включения гравия, гальки. Мощность варьирует от 0,5 до 30,0 м.

#### Голоцен

Данные отложения имеют широкое распространение и сложены биогенными и аллювиальными отложениями, которые расположены по всем рекам.

Биогенные (болотные) отложения ( $pH$ ) сложены коричнево-черным торфом, мощностью 1,5-3,0 м.

Аллювиальные отложения ( $aH$ ) сложены песками разной размерности, супесями, мощностью до 4,0 м.

## **1.4.2. Природные и природно-техногенные процессы**

При проектировании и строительстве инженерных сооружений необходимо учитывать влияние опасных геологических процессов, а также давать прогноз таких процессов при анализе взаимодействия сооружения с геологической средой.

Специфика инженерно-геологических условий в большей степени определяет развитие и активизацию природных и природно-техногенных процессов и явлений на территории Предглинтовой низменности.

К наиболее опасным, с точки зрения обеспечения надежности строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности, действующим и прогнозируемым природным и техногенным процессам и явлениям относятся:

1. эндогенные: радоноопасность и «глиняный диапиризм»;
2. экзогенные: оползневые процессы, заболачивание и развитие пльвунов.

### **1.4.2.1. Радоноопасность**

Территория Ленинградской области относится к региону с высоким уровнем радоноопасности.

В пределах Предглинтовой низменности главной причиной загрязнения является расположение в непосредственной близости от земной поверхности диктионемовых сланцев, содержащих уран выше фонового в 10–100 раз.

Из-за широкого распространения кембрийских глин на территории Предглинтовой низменности, сотрудниками кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Горного университета было проведено исследование влияния воздействия радиации на глины. Было установлено, что синие глины претерпевают следующие изменения: происходит уменьшение содержания глинистых минералов за счет их аморфизации, снижение содержания пылеватой фракции, емкость поглощения возрастает в 2 раза, плотность глин уменьшается в 1,2 раза, снижаются параметры механических свойств, наблюдается радиолиз поровой воды, постепенное снижение влажности и развитие дезинтегрированности толщи глин, а также интенсификация микробной деятельности во вмещающей толще синих глин, сопровождающаяся 50 дополнительным снижением их прочности и повышением уровня биохимической коррозии конструкционных материалов (Коробко, 2015).

### **1.4.2.2. «Глиняный диапиризм»**

«Глиняные диапиры» - это достаточно крупные тела из осадочного материала, внедрившиеся в перекрывающую толщу в следствие вязко-пластичного движения (Филлипов, 2016).

В Ленинградской области крупные и наиболее известные сложные дислокации и отторженцы в современных образованиях исследовали Волин А.В. и Лобанов И.Н., которые принимают выдавливание нижнекембрийских глин через отложения осадочного чехла как исход неравномерной: ледниковой нагрузки и возможно разнонаправленного движения блоков фундамента (Волин, 1974; Лобанов, 1979).

В пределах диапировых структур нижнекембрийские глины имеют характерный визуальный признак – тонкослоистую текстуру, слои которой располагаются под различными углами к горизонту. Также параметры физико-механических свойств данных глин отличны от этих глин в условиях ненарушенного залегания. В таких глинах наблюдается трещиноватость и расслоенность, что повышает проницаемость и понижает прочность (Чочиа, 1993).

Исходя из вышесказанного при проектировании, строительстве и эксплуатации в районах развития глиняных диапировых структур существует потребность в оценке состояния и свойств синих глин.

### 1.4.2.3. Экзогенные процессы

Экзогенные процессы в Ленинградской области вызваны: структурно-тектоническим размещением региона, напряженно-деформированным состоянием горных пород, деятельностью подземных и поверхностных вод, гидродинамическими условиями, а также техногенным воздействием.

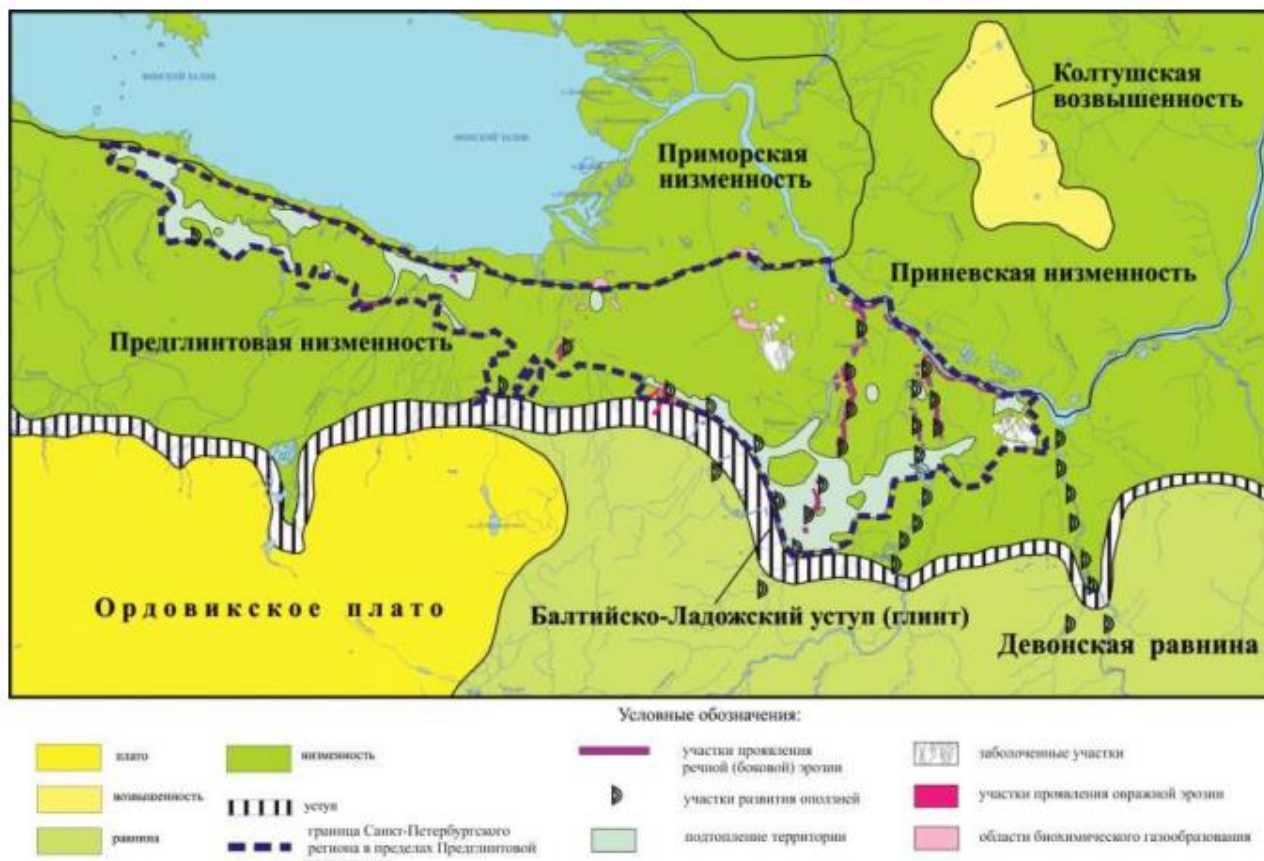


Рисунок 13. Схематическая карта проявления экзогенных процессов в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (Коробко, 2015)

К экзогенным процессам, развивающимся в Предглинтовой низменности, относятся:

- овражная эрозия, которая зачастую формируется по моренным суглинкам (Рис. 13), с длиной оврагов на более 200 м и глубиной 3–20 м, и У-образной формой (Коробко, 2015). На изучаемой территории формы проявления оврагообразования не представляют угрозы для зданий, сооружений и людей.

- речная (боковая) эрозия проявляется на всех реках рассматриваемой территории, но, как правило, интенсивность слабая или средняя. В пределах Предглинтовой низменности наиболее интенсивно процесс боковой эрозии проявляется на реках Дудергофка, Кикенка, Большая Ижорка, Шингарка, Тосна, Поповка и многих других.

- подтопление и изменение температурного режима за счет утечек из инженерных коммуникаций наблюдается в застроенных районах Ленинградской области, что приводит к ухудшению свойств грунтов, изменению их напряженного состояния, что в свою очередь влияет на устойчивость сооружений.

- заболачивание, оказывающее отрицательное влияние на подстилающие грунты. Так как территория характеризуется избыточно-влажным гумидным климатом, распространением на поверхности слабопроницаемых отложений и развитием равнинного рельефа болота распространены в области. Торфы содействуют в понижении прочностных характеристик глинистых грунтов (Панкратова, 2012).

- пльвуны, на рассматриваемой территории ломоносовские песчаники, разрушенные до песков, а также водонасыщенные песчано-глинистые озерно-ледниковые и флювиогляциальные отложения имеют пльвунные свойства. Пльвуны образуются в результате формирования особых гидродинамических условий в погребенных долинах, наличия водонасыщенных песчано-глинистых отложений, находящихся под действием напоров (Коробко, 2015).

- оползневые процессы распространены по берегам рек, сложенных нижнекембрийскими глинами. Изменение прочностных свойств глин под действием природных и техногенных факторов возбуждает процессы оползнеобразования, которые будут рассмотрены далее.

### 1.5. Выводы к первой главе

1. Вся территория Ленинградской области находится в умеренном климате в зоне избыточного увлажнения при относительной влажности воздуха от 50 до 90%. Следовательно, сезонные изменения климата приводят к сезонным колебаниям температуры и влажности глин.

2. Современная история геологии области относится к изменениям климата, отступанию ледникового покрова, тектоническим движениям земной коры, вызванным как внутренними, так и изостатическими процессами, а также колебаниям уровня Мирового океана.

3. Нижнекембрийские синие глины широко распространены на территории Ленинградской области. В Предглинтовой низменности глины выходят поверхность или покрыты четвертичными отложениями небольшой мощности. На изучаемой территории деформированные слои сложены синими глинами, поэтому они подлежат более детальному изучению влияния природных факторов на изменение свойств.

4. Нижнекембрийские глины – типичные морские осадки, характеризующиеся однородностью и пластичностью, гидрослюдистым составом, реже монтмориллонитовым, выветрелым состоянием в коре.

5. При изучении свойств глинистых грунтов, главное внимание следует уделять механическим свойствам грунтов, так как по ним можно судить о их прочности. Прочность грунтов при сдвиге характеризуется основными прочностными характеристиками – углом внутреннего трения и удельным сцеплением.

6. Сезонные изменения влажности глин приводят к потере прочности и переходу в пластичное и текучепластичное состояние. Понижение прочности глинистых пород под действием природных и техногенных факторов провоцирует оползни.

7. Из эндогенных процессов наибольшее влияние оказывает радоновое загрязнение, обусловленное наличием в породах высокого содержания урана. Воздействие радиации выражается в изменении параметров физических и механических свойств глинистых пород. Выдавливание глин определило разрушенность структурных связей в ней, что повышает проницаемость и снижает прочность.

8. Распространение и развитие различных видов экзогенных процессов обусловлено структурно-тектоническим положением, напряженно-деформированным состоянием горных пород, деятельностью вод, гидродинамическими условиями. В Предглинтовой низменности распространены следующие экзогенные процессы: овражная и речная эрозия, подтопление и заболачивание. На рассматриваемой территории речная эрозия проявляется на всех реках и способствует развитию оползневых процессов, которые являются наиболее опасными действующими и прогнозируемыми процессами, развитие которых зависит от прочностных свойств глин.



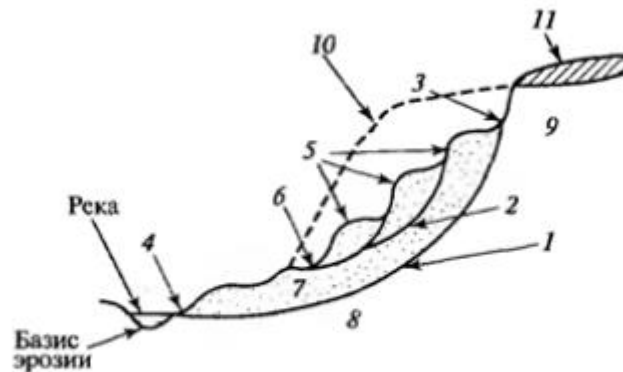
## Глава 2. Оползневые процессы

### 2.1. Классификация оползней

Развитие на склонах гравитационных процессов в пределах городских территорий является одной из самых важных вопросов инженерной геодинамики в сложившихся условиях интенсивной техногенной нагрузки.

Оползни считаются опасными для всех видов инженерных сооружений. Основной областью развития таких процессов являются склоны, долины, овраги и берега рек.

Согласно СП 11-105-97 части II: оползень – это движение масс пород на склоне, идущее без потери контакта с подстилающим неподвижным массивом. Элементы оползня показанны на рисунке 14 (Ананьев, 2005).



1 – наиболее глубокая линия скольжения; 2 – верховая линия скольжения; 3 – оползневый уступ (обрыв); 4 – «язык» оползня; 5 – смещенные мелкие тела (части оползня); 6 – оползневые террасы с уклоном к оползню; 7 – тело оползня; 8 – подстилающие породы; 9 – породы (коренные) оползневого склона; 10 – форма склона до оползня; 11 – делювий

Рисунок 14. Основные элементы оползневого склона (Ананьев, 2005)

Оползни возникают в основном в результате нарушения равновесия между сдвигающими усилиями и сдерживающими силами, которое происходит из-за изменения напряжённого состояния и снижения сопротивления сдвигу пород.

Оползни различаются по строению, размерам, причинам и условиям образования и, следовательно, нет единой классификации оползневых процессов (Ломтадзе, 1977).

Рассмотрим самые распространенные из них.

Одна из первых классификаций оползней Ф.П. Саваренского (1934 г.) сделана на основе положения поверхности скольжения по отношению к склоновому массиву. Согласно этой классификации, оползни делятся на три группы: асеквентные, инсеквентные и консеквентные.

Асеквентные оползни, которые появляются в однородной среде, с вогнутой круглоцилиндрической поверхностью скольжения, которая определяется физико-механическими свойствами грунтов.

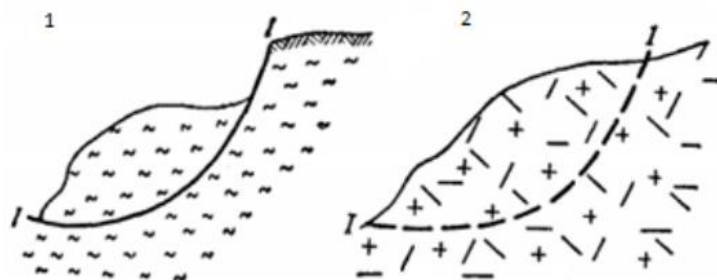


Рисунок 15. Асеквентный оползень: 1- в однородных глинистых породах, 2 – в трещиноватых твердых породах (Ломтадзе, 1977)

Консеквентные оползни формируются в неоднородных и трещиноватых породах и имеют волнистую или наклонно-ступенчатую поверхность скольжения, обусловленная строением склона и присутствующими поверхностями ослабления.

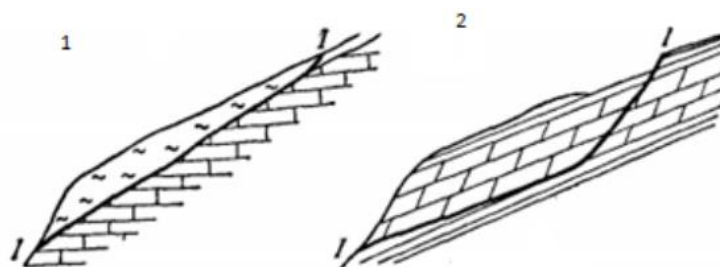


Рисунок 16. Консеквентный оползень: 1- делювия по коренным породам, 2 – в моноклинально наклонных слоистых породах (Ломтадзе, 1977)

Инсеквентные оползни происходят в неоднородных, слоистых породах, которые залегают горизонтально или наклонно в сторону склона. В данном случае поверхность скольжения криволинейная, врезающаяся и пересекающая слоистость под разными углами (Иванов, 2001).

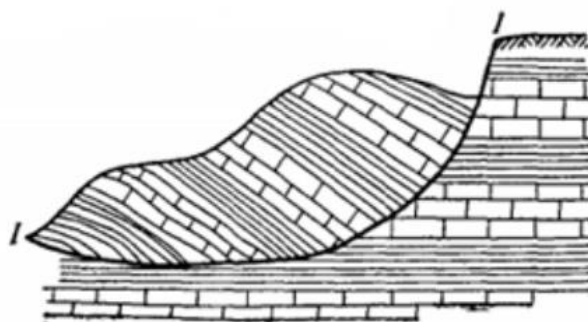


Рисунок 17. Инсеквентный оползень (Ломтадзе, 1977)

Классификация В.Д. Ломтадзе (1977 г.) основана на составе и характере движения оползневых масс: структурные, пластические и структурно-пластические.

Структурными оползнями считаются, когда блок или несколько блоков масс двигаются по поверхности скольжения с незначительными нарушениями их внутреннего строения, также делятся на асеквентные, консеквентные, инсеквентные.

Пластическими оползнями являются, когда скольжение пород напоминает движение вязкой жидкости, считаются всегда консеквентными.

У структурно-пластического оползня блоки пород, которые скользят, разрушаются и превращаются в массу, что двигается аналогично вязкой жидкости по поверхности скольжения (Ломтадзе, 1977).

Оползни в районе реки Тосны можно отнести к структурно-пластическим по классификации В.Д. Ломтадзе.

Также существует классификация в нормативном документе СП 11.105-97 части II.

Таблица 1. Классификация оползней по СП 11.105-97 часть II

Типы опасных склоновых процессов (по механизму смещения пород)	Подтипы	Характеристика пород основного деформируемого горизонта (ОДГ)	Характер проявления
Оползни сдвига (скольжения)	Инсеквентные (срезающие)	Глинистые (реже выветрелые полускальные и скальные) породы, массивные или слоистые, с пологим, или обратным падению склона залеганием слоев	Отрыв и смешение блоков пород по вогнутой криволинейной поверхности с одновременным их запрокидыванием
	Консеквентные (соскальзывающие)	Прослой глинистых пластичных грунтов в толще более прочных грунтов и поверхности ослабления, наклоненные в сторону падения склона	Смещение массива или блоков пород по поверхностям ослабления

<p>Оползни выдавливания</p>	<p>-</p>	<p>Глинистые, преимущественно пластичные</p>	<p>Выдавливание грунта из-под подошвы прибрежного уступа склона и его смещение совместно с ранее образовавшимися на склоне оползновыми накоплениями</p>
<p>Оползни вязкопластические</p>	<p>Оползни-потоки Сплывы (оплывины)</p>	<p>Глинистые, малоуплотненные и слаболигифицированные, пластичные</p>	<p>Вязкопластическое течение массы грунта: по ложбинам - оползни-потоки, вытянутой по оси оползания формы в плане; на увлажненных крутых уступах - сплывы; в пределах зоны сезонного промерзания при оттаивании - оплывины</p>
<p>Оползни гидродинамического разрушения</p>	<p>Суффозионные Гидродинамического выпора</p>	<p>Водонасыщенные песчаные и глинистые пылеватые грунты</p>	<p>Отрыв оползневой массы или обрушение суффозионной ниши с последующим растеканием сместившейся водонасыщенной массы</p>
<p>Оползни внезапного разжижения</p>	<p>Несейсмогенного разжижения Сейсмогенного разжижения</p>	<p>Слабоуплотненные глинистые и песчаные водонасыщенные грунты, подверженные быстрому разупрочнению при динамических воздействиях</p>	<p>Разжижение при динамическом воздействии (техногенном сотрясении или сейсмических толчках) и быстрое вязкое течение разжиженного грунта по уклону рельефа</p>

## 2.2. Факторы, определяющие развитие оползней

Сползание масс горных пород происходит в основном под влиянием силы тяжести и других сил, в следствие нарушения устойчивости.

Различные факторы определяют нарушение предельного состояния масс пород. Однако в каждой ситуации имеется решающий фактор, который активизирует оползневой процесс. Данный фактор считается причиной процесса, без которого не произошел бы оползень. Но несмотря на это, когда оценивается оползнеопасность, учитываются и анализируются все факторы.

Основные факторы делятся на группу, связанную с изменением свойств горных пород, слагающих склон, и группа, в которой происходит изменение напряженного состояния пород приоткосного массива (Иванов, 2001).

Таблица 2. Перечень основных факторов возникновения оползней по Иванову И.П.

Природные факторы	Техногенные факторы	Характер и результаты воздействий
Факторы, изменяющие свойства пород, слагающих склон, откос		
Выветривание пород	Разрушение пород горными и строительными работами	Уменьшение прочности пород за счет изменения из физического состояния
Увлажнение природными водами	Увлажнение техногенными водами	Уменьшение прочности пород за счет их разуплотнения, размокания, набухания
Изменение температуры пород	Оттаивание ММП при разработке МПИ и эксплуатации сооружений	Уменьшение прочности, за счет разрушения цементационных связей
Суффозия	Фильтрационных вынос	Уменьшение плотности и прочности песчано-глинистых пород
Вековая ползучесть горных пород	Продолжительность эксплуатации откосного сооружения	Реологические изменения, уменьшение прочности
Факторы, изменяющие напряженное состояние пород приоткосного массива		
Эрозия, абразия	Подрезка природных склонов	Увеличение угла наклона склонов и откосов, возрастание сдвигающих усилий
Изменение баланса эрозии	Углубление выемки	Увеличение высоты склонов, возрастание сдвигающих усилий

Изменение уровня грунтовых вод	Осушение карьеров	Формирование гидростатического и гидродинамического давлений вод
Затопление атмосферными осадками и поверхностными водами	Затопление и подтопление при строительстве гидротехнических сооружений	Формирование гидростатического и гидродинамического давлений вод
Пригрузка склонов делювием и обвальными массивами	Статистическая и динамическая нагрузка от сооружений и транспорта	Возрастание сдвигающих усилий, формирование порового давления
Землетрясения	Наведенные землетрясения, промышленные взрывы	Возрастание сдвигающих усилий, формирование порового давления
Аккумуляция аллювиально-делювиальных отложений	Террасирование, подпорные сооружения	Увеличение удерживающих усилий. Возрастание коэффициента устойчивости

Согласно Государственному мониторингу состояния недр на территории Ленинградской области образование склоновых процессов в основном связано с подмыванием берегов рек, которые разрушаются по обвально-осыпному типу. Реже встречаются оползни-оплывины или оползни срыва, которые появляются в результате эрозионного размыва берегов рек. Такие оползни встречаются на реках Нева, Свирь, Ижора, Тосна и других.

### 2.3. Оползнеопасность

В соответствии с СП 11-105-97 часть II оползнеопасными склонами считаются те, на которых идут или ранее шли оползневые процессы.

Для оценивания устойчивости оползневого склона необходимо осуществлять инженерно-геологические изыскания на всей площади потенциально опасного склона и до предполагаемой границы устойчивой части склона, а для склонов на берегах следует захватить и подводные части, даже в том случае, когда проектируемый объект занимает только часть склона.

Границы исследуемой территории обуславливаются с учетом ожидаемого отрицательного техногенного влияния и развития оползнеобразующих процессов, таких как боковая и донная эрозия, абразия, выветривание и другие.

Также при изысканиях на оползнеопасных склонах требуется определение типа и подтипа склонового процесса согласно классификации СП 11-105-97 часть II, приведенной в таблице 1.

#### **2.4. Механизм оползневого процесса**

Во многих классификациях отдельное внимание уделяется механизму оползня.

Механизм оползневого процесса обуславливается особенностью грунтов в оползневом теле и характером их залегания, зная которые можно выделить тип механизма. Тип механизма позволяет прогнозировать динамику и последствия оползня, а также выбирать расчетные модели, для обоснования мероприятий инженерной защиты. Механизм движения оползневого массива по поверхности скольжения стоит рассматривать совместно с процессом образования самой поверхности.

Стоит учесть, что в следствие увлажнения в глинистых породах переходные контакты меняются на коагуляционные, которые обладают меньшей прочностью, что приводит к внезапному увеличению сдвиговых напряжений и началу сдвиговых деформаций особенно в ослабленных областях склона. По ходу накопления сдвиговых деформаций в глинах идет переориентация глинистых частиц и образуются поверхности скольжения.

#### **2.5. Выводы ко второй главе**

1. В Ленинградской области образование склоновых процессов в основном объясняется подмыванием берегов рек, разрушающихся по обвальнo-осыпному типу. Реже наблюдаются оползни-оплывины или оползни срыва, как результат эрозионного размыва берегов рек.

2. В Предглинтовой низменности оползни, развитые по берегам рек, чаще всего инсеквентные, а оползни, возникшие по причине техногенного воздействия, инсеквентно-консеквентные. На вогнутых берегах реки Тосны (от впадения р. Саблинки и ниже по течению) оползни консеквентные. В соответствии классификации В.Д. Ломтадзе, на склонах реки Тосны образуются структурно-пластические оползни.

3. Фактором формирования оползней в Ленинградской области по схеме И.П. Иванова считается наличие пластичных пород в основании, представленных кембрийскими глинами, в которых происходит накопление сдвиговых деформаций, провоцировавшие изменение напряженного состояния склона в целом.

### Глава 3. Основные результаты исследования

Исследуемый оползневой склон располагается на левом берегу р. Тосна в юго-западной части г. Никольское в Тосненском районе в Ленинградской области (Рис. 18).

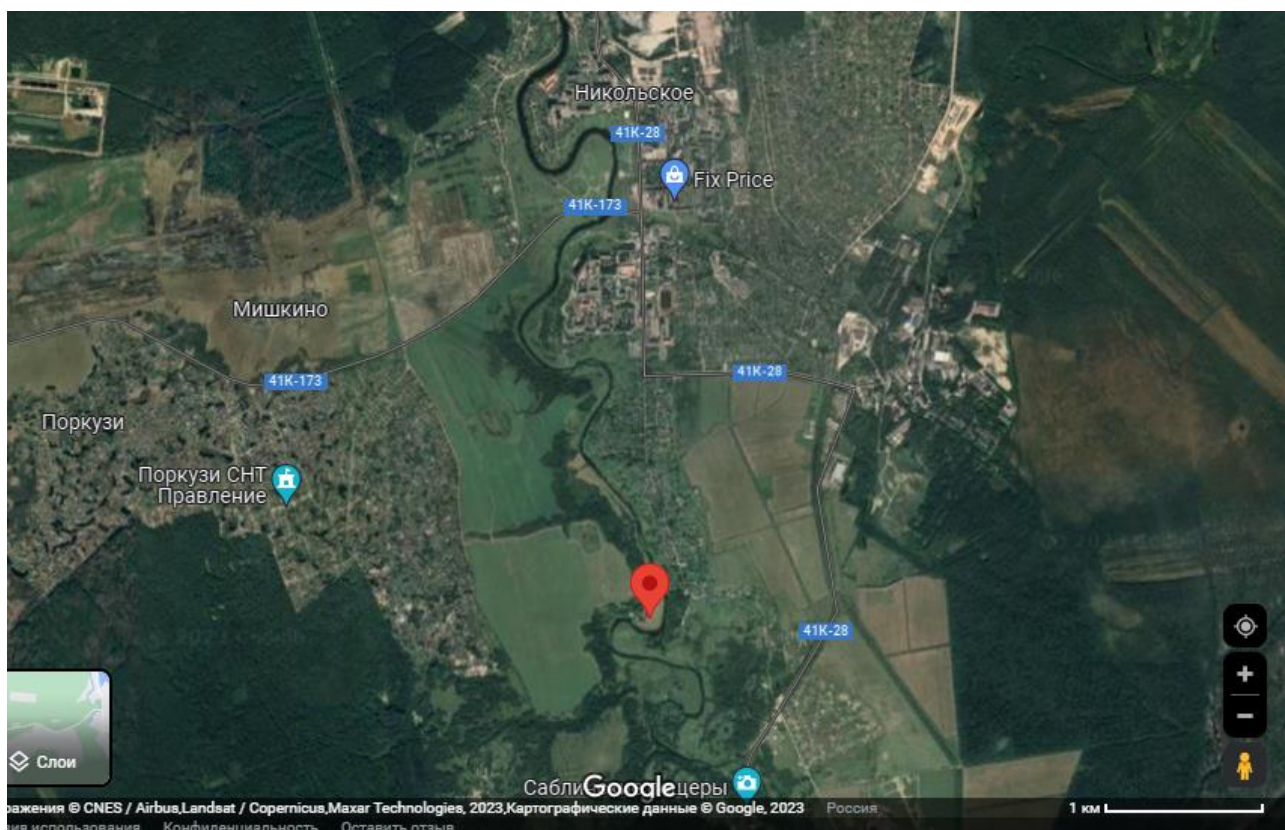


Рисунок 18. Расположение объекта исследования (Google Maps. URL:

[https://www.google.ru/maps/place/59°40'40.7\"N+30°47'08.4\"E](https://www.google.ru/maps/place/59°40'40.7\) (дата обращения 04.02.2023))

В обнажении на оползневом склоне наблюдаются лонтоваские синие глины ( $\text{C}_1$ ) мощностью 20-50 м (Мохнач, 2007), которые перекрываются четвертичными образованиями ( $\text{IqIII}$ ), мощность которых около 5 м (Рисунок 19а). Поверхность скольжения оползня приурочена к контакту четвертичных суглинков и синих глин, но находится в лонтоваском горизонте (Рисунок 19б) (Бурлуцкий, 2015).



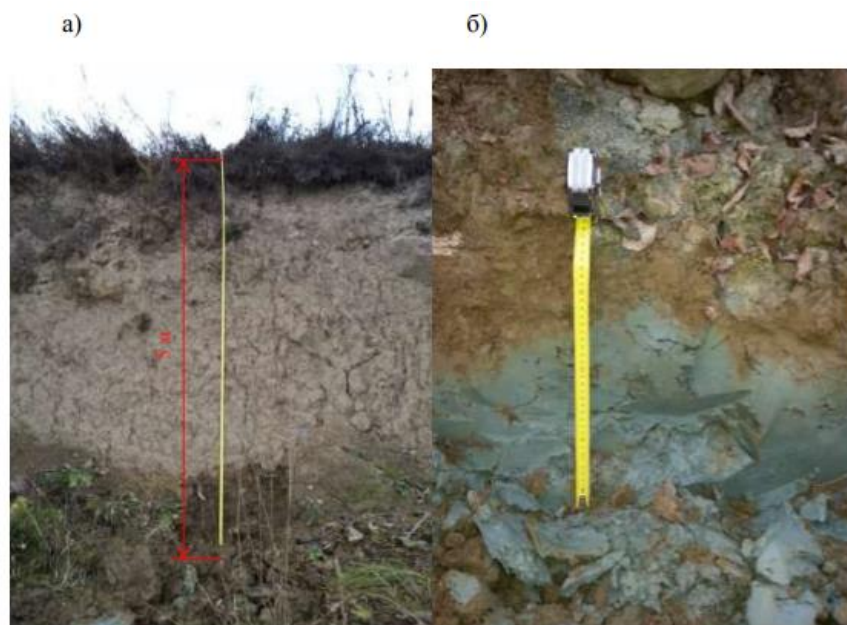


Рисунок 19. Оползневой уступ, сложенный четвертичными породами (а) фрагмент поверхности скольжения в шурфе (б) (Бурлуцкий, 2015)

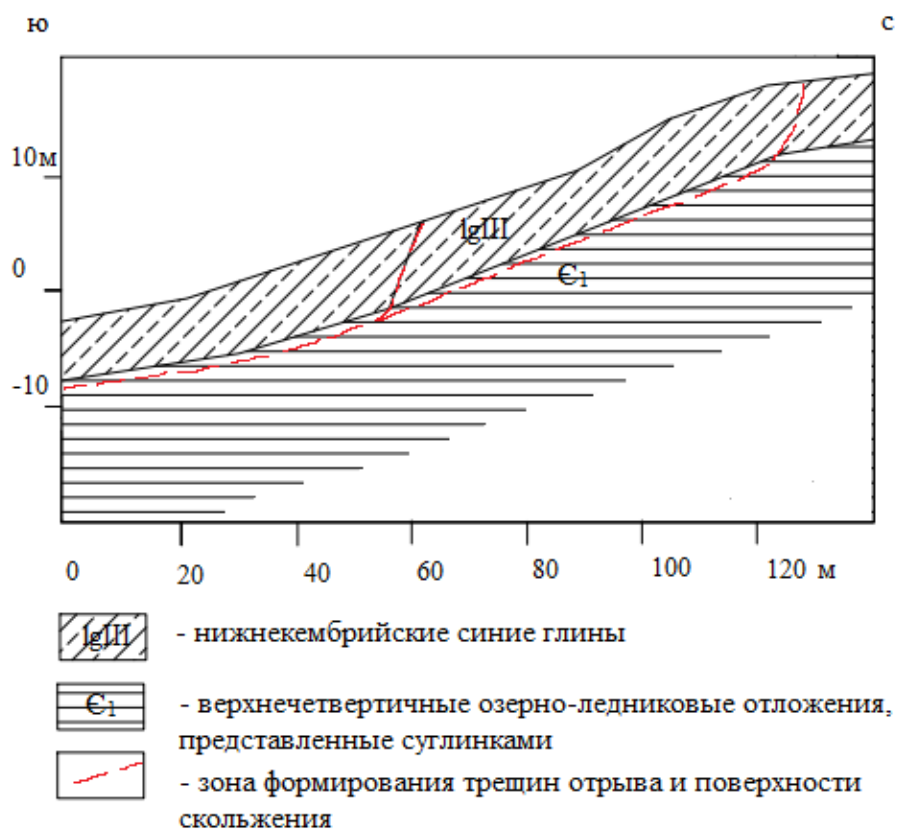


Рисунок 20. Схематический разрез оползневой склона на левом берегу реки Тосна

Исследуемый оползень консеквентного типа согласно классификации Ф.П. Саваренского, имеет наклонную поверхность скольжения, вызванная строением склона, и

существующими поверхностями ослабления. По классификации В.Д. Ломтадзе оползень считается структурно-пластическим (Ломтадзе, 1977).

### 3.1. Физические свойства грунтов

Для изучения физических и прочностных характеристик сопротивления сдвигу и геоэлектрических свойств был отобран монолит глины с естественного обнажения в зоне скольжения оползня. Проводились исследования естественной влажности  $W$ , влажности на границе текучести  $W_L$  и границе раскатывания  $W_p$ , гранулометрического состава, плотности  $\rho$  в естественном состоянии, плотности частиц грунта  $\rho_s$ . Анализ гранулометрического состава, физических и прочностных характеристик грунтов выполнялись в учебной лаборатории в Санкт-Петербургском государственном университете, согласно ГОСТ 12536—2014, ГОСТ 5180—2019. Полученные данные показаны в Приложении А.

Нижнекембрийские отложения залегают под верхнечетвертичными образованиями и сложены: глиной легкой пылеватой тугопластичной с прослоями песка серо-голубая. Естественная влажность грунта составила 28 %, верхний предел пластичности 47 %, нижний предел пластичности 21 %, число пластичности 0,26 д.ед.

Следует отметить, что глины имеют повышенную влажность 26-30 % и пониженную плотность 1,95-1,97 г/см<sup>3</sup>, что свидетельствует о высокой степени разуплотнения. Пониженные показатели сопротивления сдвигу позволяют судить о потере прочности глин и разрушении структурных связей.

### 3.2. Прочностные свойства грунтов и их зависимость от влажности

В результате сдвиговых испытаний по схеме неконсолидированно-недренированного среза для образца с ненарушенного сложения были получены угол внутреннего трения  $\varphi = 5^\circ$  и сцепление  $C = 39$  кПа.

Н.Н. Масловым разработана теория «плотности-влажности» для определения сопротивляемости сдвигу глинистых грунтов. В соответствии с данной теорией такие параметры, как угол внутреннего трения  $\varphi$  и начальное сцепление  $C$ , находятся в прямой зависимости от начального состояния, прежде всего от влажности ( $W$ ) грунта, а также от приложенной к нему нагрузки ( $p$ ):

$$\tau_{pw} = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + C_w,$$

где  $\tau_{pw}$  – сопротивляемость грунта сдвигу при некоторой его плотности и влажности и воздействующей на него нагрузке  $p$ ;

$\varphi_w$  – истинный угол трения, который не зависит от возрастающей с нагрузкой связности грунта;

$C_w$  – общее сцепление, зависящее от плотности и влажности.

Для установления влияния изменения влажности на прочностные свойства нижнекембрийских глин было выполнено определение величин удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  на образцах нарушенного сложения (пасты) с разной влажностью.

Для оценивания сопротивляемости сдвигу глин были подготовлены образцы с разными показателями влажности (18%, 20%, 21%, 22%, 24%, 26%, 27%, 28%, 30%, 32%, 34%). Испытания проводились по схеме быстрого среза при нормальных давлениях 98кПа, 196кПа, 294кПа, для исключения переуплотнения грунта.

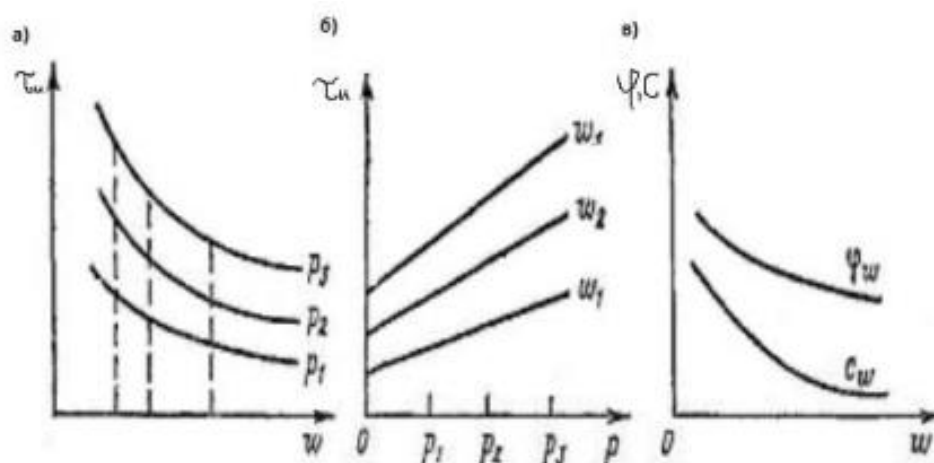


Рисунок 21. Обобщенные зависимости предельного сопротивления сдвигу от влажности (а) и от давления (б); зависимость удельного сцепления  $C_w$  и угла внутреннего трения  $\varphi_w$  от влажности (в) (Омуралиев, 2016)

Всего было выполнено одиннадцать испытаний. Результаты лабораторных определений прочностных свойств глин приведены в приложении В.

На рисунке 22 приведена экспериментальная зависимость изменения сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки для нижнекембрийской глины  $\tau=f(P, W\%)$ , при различных значениях влажности. На каждой из приведенных прямых плотность и влажность грунта для разных ступеней нагрузок остается постоянной, то есть каждая прямая отвечает грунту в состоянии определенной влажности. Согласно теории Н.Н. Маслова сцепление и угол внутреннего трения, которые определяются природными свойствами грунтов и начальным его состоянием (влажностью  $W$ ), остаются неизменным для данного состояния. Следовательно, угол внутреннего трения и сцепление грунта функционально связаны с его влажностью.

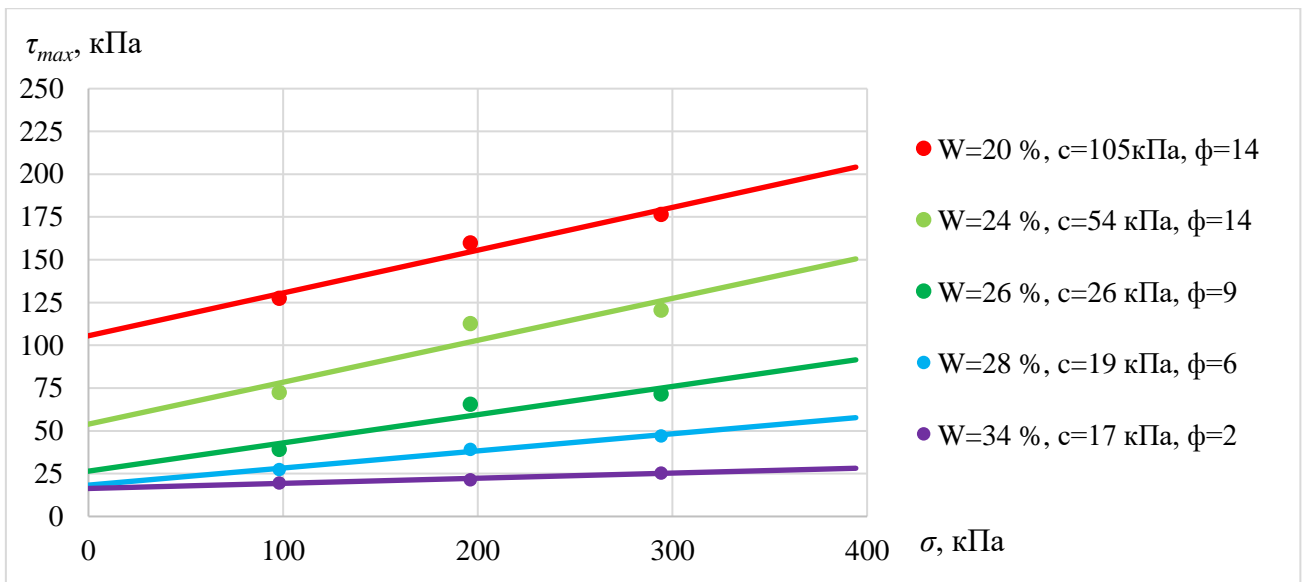


Рисунок 22. Зависимость сопротивления сдвигу для нижнекембрийских глин от вертикальной нагрузки (индекс кривых - влажность)  $\tau=f(\sigma, W\%)$  на примере нескольких образцов

На рисунках 23 и 24 приведены изменения сцепления угла внутреннего трения от влажности грунта  $C=f(W)$ ,  $\varphi=f(W)$  соответственно.

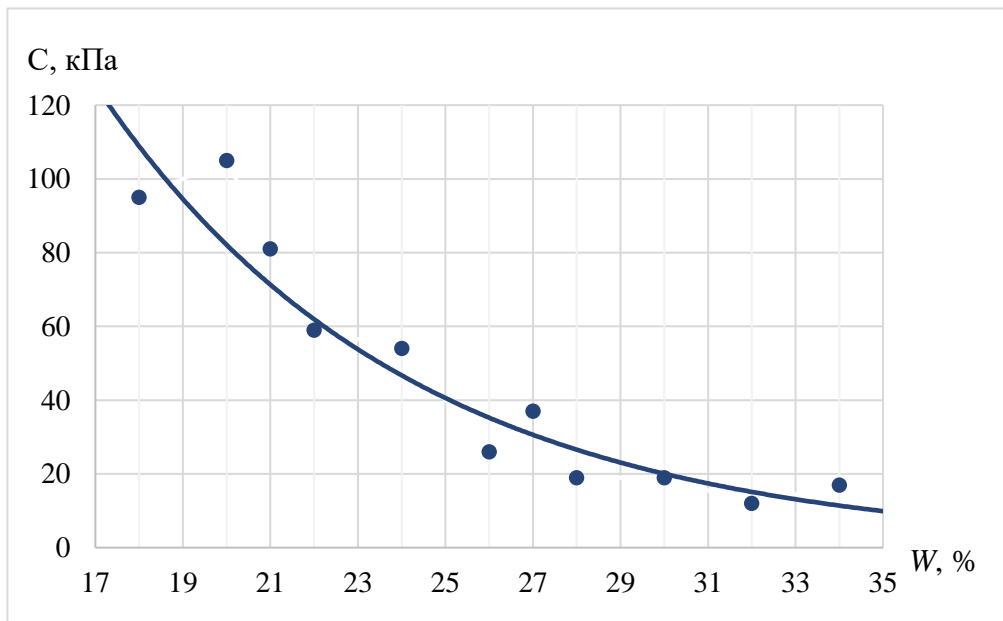


Рисунок 23. Зависимость величины сцепления от влажности глин

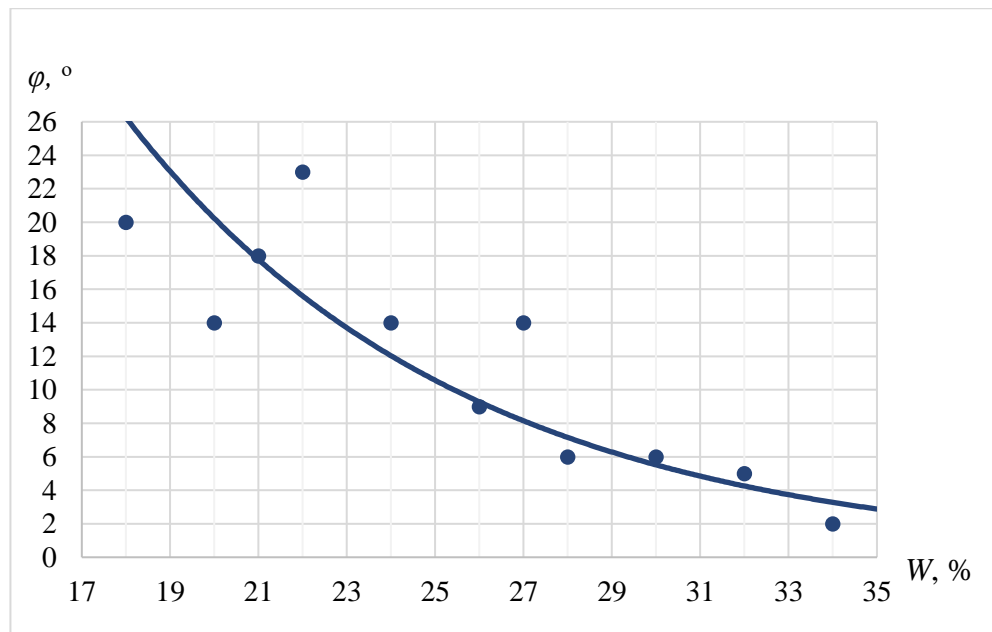


Рисунок 24. Зависимость угла внутреннего трения от влажности глины.

Из приведенных выше графиков видно, что увеличение влажности исследуемых глины приводит к уменьшению сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  вследствие перехода грунтов от тугопластичного к текучепластичному состоянию. При изменении влажности от 18% до 34%, сцепление грунта снижается с 105 до 12 кПа, угол внутреннего трения уменьшается с  $20^\circ$  до  $2^\circ$ . С увеличением влажности от 18 до 34% общее сопротивление сдвигу уменьшается более чем в 8 раз. Заметно, также, что уменьшение прочностных свойств при увеличении влажности идет по зависимостям, близким к логарифмическим.

### 3.3. Удельное электрическое сопротивление грунтов и его зависимость от влажности

Результаты электротомографических исследований позволяют оценить возможности технологий инженерной геофизики для проведения мониторинга оползневых процессов.

Таким образом, нахождение зависимости прочностных свойств пород и электрических характеристик считается важной темой исследования. Так как, понижение прочностных характеристик с повышением влажности доказано, осталось рассмотреть зависимость удельного электрического сопротивления грунта от его влажности.

Измерения производились с помощью аппаратуры SIP-Fuchs III (Рис. 25) (производства компании «Radic Research»).



Рисунок 25. Аппаратура SIP-Fuchs III (Емельянов, 2020)

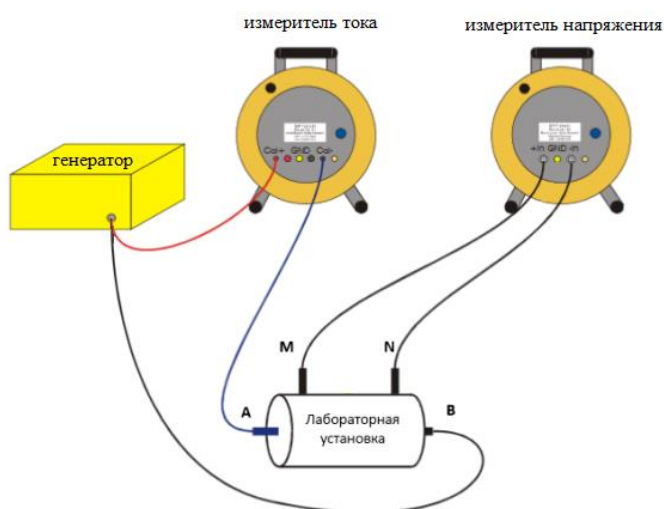


Рисунок 26. Схема конфигурации SIP Fuchs для лабораторных измерений (по Radic Research с изменениями) (Емельянов, 2020)

Лабораторная установка (Рис. 27) состоит из двух плексигласовых контейнеров, наполненных водным раствором NaCl. Между контейнерами жёстко фиксируется ячейка с образцом.

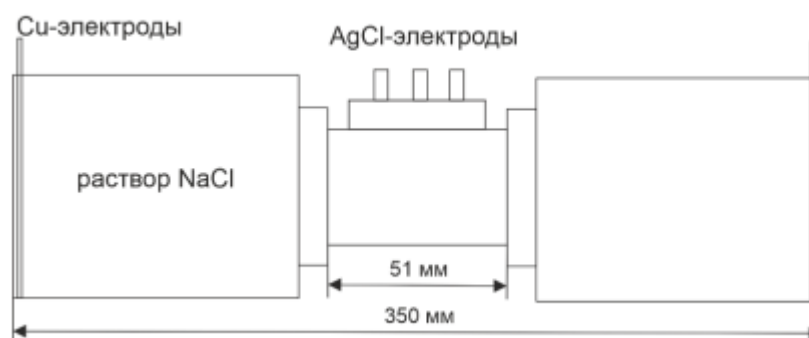


Рисунок 27. Лабораторная симметричная пятиэлектродная установка (медные питающие электроды; в качестве приемных электродов использовались хлорсеребряные электроды, измерения напряжения выполнялись относительно центрального приемного электрода) (Емельянов, 2020)

В результате получены данные, приведенные в Приложении Г, которые указывают на понижение удельного электрического сопротивления с 9,85 до 6,62 Ом\*м с увеличением влажности с 20% до 34%. На рисунке 28 показана зависимость удельного электрического сопротивления от влажности грунта.

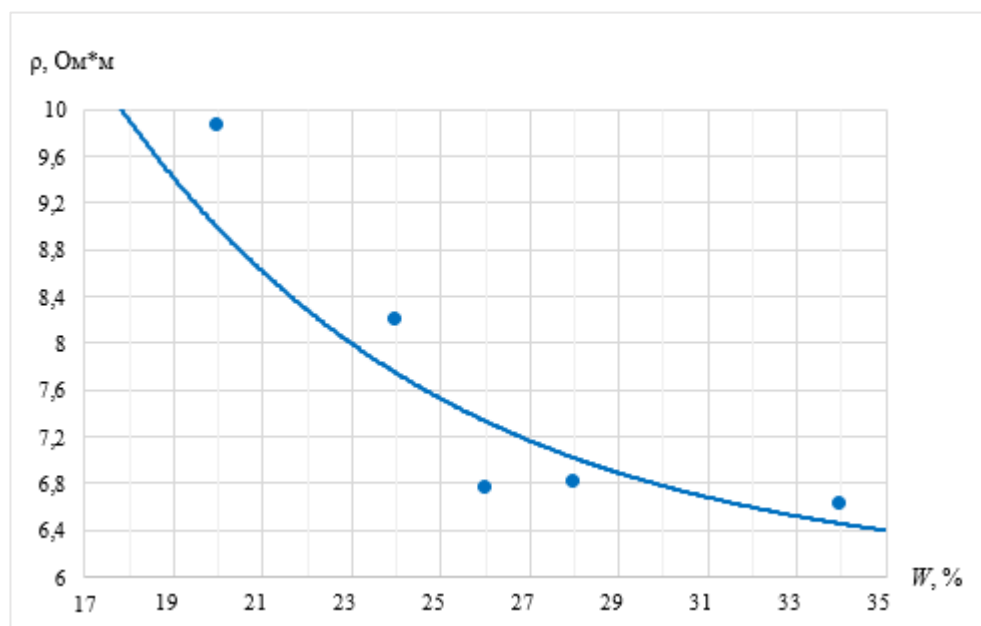


Рисунок 28. Зависимость удельного электрического сопротивления от влажности глин

Из графика видно, что при увеличении влажности с 20% до 34% удельное электрическое сопротивление глин уменьшается с 9,8 Ом\*м до 6,6 Ом\*м. При этом заметно, что уменьшение удельных электрических сопротивлений от увеличения влажности происходит по зависимостям, близким к логарифмическим.

Также экспериментально подтверждены изменения удельного электрического сопротивления песчано-глинистых грунтов от влажности при изучении каротажа сухих скважин (Шарапанов, 1974). На рисунке 29 показана эмпирическая зависимость, которая также близка к логарифмической.

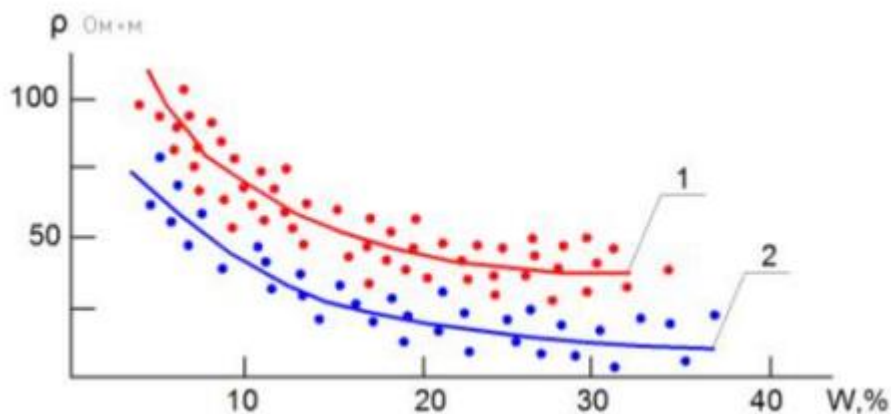


Рисунок 29. Зависимость удельного электрического сопротивления от влажности пород по результатам каротажа сухих скважин: 1- легкий суглинок; 2- средний и тяжелый суглинок (Шарапанов, 1974)

### 3.4. Комплексный анализ зависимостей физико-механических свойств дисперсных грунтов с их водно-физическими и геоэлектрическими характеристиками

На рисунке 30 показан совместный график зависимостей удельного электрического сопротивления  $\rho$ , угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $C$  от влажности  $W$ .

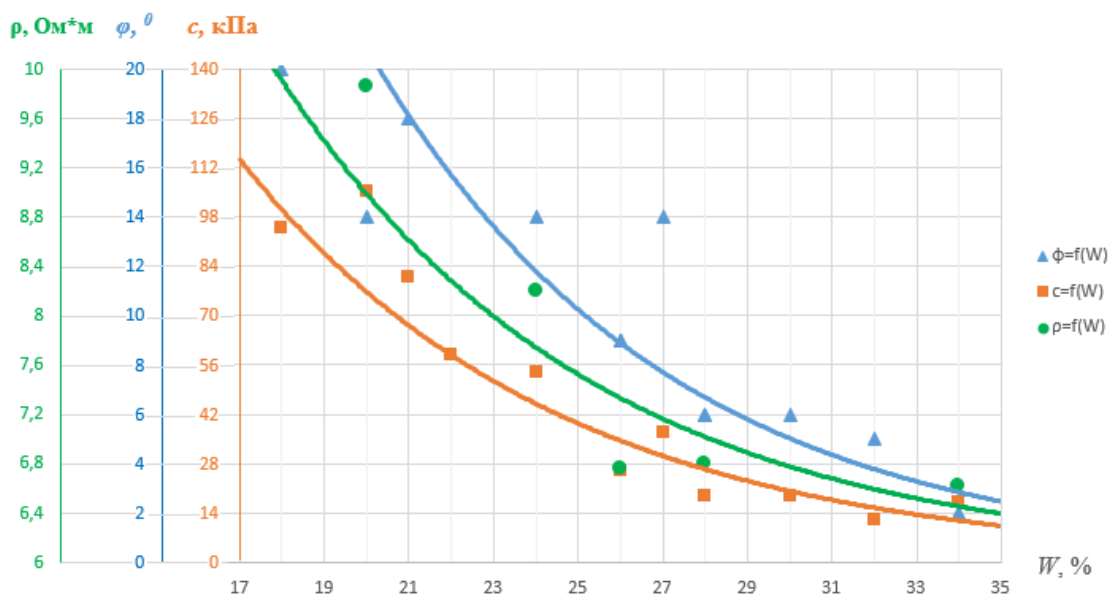


Рисунок 30. Зависимость удельного электрического сопротивления  $\rho$ , угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $C$  от влажности глин  $W$



Из графика видно, что при увеличении влажности с 20% до 34% удельное электрическое сопротивление глин уменьшается с 9,85 Ом\*м до 6,62 Ом\*м, сцепление грунта снижается с 105 до 12 кПа и угол внутреннего трения уменьшается с 20° до 2°. Таким образом, с увеличением влажности от 20 до 34% общее сопротивление сдвигу уменьшается более чем в 8 раз, а значение УЭС при этом уменьшается в 1,5 раза.

На общем графике можно также отметить, что зависимости падения прочностных свойств и геоэлектрических характеристик глинистых грунтов от увеличения их влажности схожи и близки к логарифмическим. Соответственно, появляется возможность более точного коррелирования физико-механических свойств грунтов и геоэлектрических характеристик, которое позволит применять электроразведку в оценке изменения прочностных свойств грунтов в оползневом массиве.

В дополнение стоит сказать, что пространственное распределение влажности глинистых пород оползневого склона имеет достаточно выраженный характер, что предоставляет возможность формирования геоэлектрической модели оползня с выделением его основных элементов, характеризующихся измененными геоэлектрическими свойствами (Бурлуцкий, 2015).

### **3.5. Выводы к третьей главе**

1. Изучаемый оползневой склон на левом берегу реки Тосна в городе Никольское сложен нижнекембрийскими глинами (Є<sub>1</sub>), перекрытыми верхнечетвертичными озерно-ледниковыми суглинками (lgIII).

2. Для установления корреляционных связей влажности и прочностных свойств нижнекембрийских глин было выполнено определение величин удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  на образцах нарушенного сложения (пасты), при различных значениях влажности (18%, 20%, 21%, 22%, 24%, 26%, 27%, 28%, 30%, 32%, 34%). Испытания проводились при нормальных давлениях 98; 196; 294 кПа.

3. Увеличение влажности исследуемых глин приводит к уменьшению сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  вследствие перехода грунта от тугопластичного к текучепластичному состоянию. При изменении влажности от 18 до 34%, сцепление грунта снижается от 105 до 17 кПа, угол внутреннего трения уменьшается от 20° до 2°.

4. Для установления влияния изменения влажности глин на их удельное электрическое сопротивление было выполнено определение удельного сопротивления грунтов  $\rho$  на образцах нарушенного сложения (пасты), при разных значениях влажности (20%, 24%, 26%, 28%, 34%). Испытания проводились при фиксированной частоте в 11 Гц.

5. Увеличение влажности с 20% до 34% приводит к понижению удельного электрического сопротивления с 9,85 до 6,62 Ом\*м.

6. Обобщая корреляционные связи геоэлектрических свойств и прочностных характеристик сопротивления сдвигу глинистых грунтов с влажностью, можно заметить понижение УЭС одновременно с понижением прочностных свойств. Также наблюдается схожая зависимость понижения удельного электрического сопротивления, угла внутреннего трения и сцепления от повышения влажности, близкая к логарифмической. В следствии этого, появляется перспектива использования электроразведки в оценке изменения прочностных свойств оползневого склона.

## Заключение

В результате исследований, проведенных в рамках написания выпускной квалификационной работы, которые включали в себя сбор, систематизацию и анализ фондовых и литературных данных, полевые работы, комплекс лабораторных исследований, обработку результатов, было установлено следующее:

- Оползневые процессы представляют угрозу для сооружений и людей, в следствии чего появляется потребность в оценке устойчивости склона. Коэффициент устойчивости рассчитывают как отношение сдерживающих сил к сдвигающим усилиям. Сопротивление грунта сдвигу является одним из важнейших его прочностных параметров, главным образом, определяющим устойчивость грунтовых масс на склонах, поэтому возникает необходимость изучения влияния влажности пород на изменение их прочностных свойств.

- В пределах Предглинтовой низменности нижнекембрийские синие глины выходят на дневную поверхность, либо перекрыты маломощным чехлом четвертичных отложений. Основной деформируемый горизонт располагается в кембрийских глинах, поэтому они были выбраны для изучения.

- Результаты исследований показали, что увеличение влажности исследуемых глин приводит к уменьшению сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  вследствие перехода грунта от тугопластичного к текучепластичному состоянию. При изменении влажности от 18% до 34%, сцепление грунта снижается с 105 до 17 кПа, угол внутреннего трения уменьшается от  $20^\circ$  до  $2^\circ$ , иначе говоря при увеличении влажности от 18% до 34% общее сопротивление сдвигу уменьшается более чем в 8 раз. В то же время увеличение влажности кембрийский глин приводит к уменьшению значений удельного электрического сопротивления: с увеличением влажности с 20% до 34%, удельное электрическое сопротивление падает с 9,85 до 6,62 Ом\*м.

- Установленные корреляционные связи физико-механических свойств дисперсных грунтов на примере кембрийских глин с их водно-физическими и геоэлектрическими характеристиками открывают дополнительные возможности современных методов инженерной электроразведки при изучении и оценки устойчивости оползневых массивов.

## Список литературы

1. ГОСТ 5180-2019 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
2. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов.
3. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
4. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
5. ГОСТ 20522-2012 Методы статистической обработки результатов испытаний.
6. СНиП 22-01-95 Геофизика опасных природных воздействий. – М.: Минстрой России, 1996. – 9 с.
7. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства: в 6 ч. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000. – 93 с. – ч.2.
8. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. М.: Минстрой России, 2016. – 228 с.
9. СП 131.13330.2020 Строительная климатология.
10. Ананьев В.П. Инженерная геология: Учебник для строительных спец. вузов/ В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. – 3-е изд. М.: Высш. шк., 2005. – 575 с.
11. Архангельский Б.Н. Гидрогеология СССР. Том III. Ленинградская, Псковская и Новгородская области/ Б.Н. Архангельский, И.К. Зайцев. М.: Недра, 1967. - 325 с.
12. Астахов В.И. Начала четвертичной геологии. СПб: СПбГУ, 2008. - 224 с.
13. Бискэ Г.С. Геология России. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2019. – 228 с.
14. Бурлуцкий С.Б. Физико-геологические модели оползневых склонов по данным электро- и сейсмотомографии: дисс. канд. геол.-минералогич. наук: 25.00.10/ Бурлуцкий Станислав Борисович. - СПб., 2015. – 201 с. 84
15. Вербицкий В.Р. Объяснительная записка. Серия Центрально-Европейская. Листы О-35 – Псков, (N-35), О-36/ В.Р. Вербицкий, И.В. Вербицкий, О.В. Васильева, В.В. Саванин // Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000. – Санкт-Петербург. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012.- 510 с.
16. Волин А.В. Диапировые структуры окрестностей Ленинграда. Природная обстановка и фауны прошлого. № 8. Киев. «Наукова думка», 1974, с. 142-150.
17. Грейсер Е.Л. Пресные подземные воды: состояние и перспективы водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов/ Е.Л. Грейсер, Н.Г. Иванова //Разведка и охрана недр.- 2005 г., вып. №5. – С.36-48.

18. Дашко Р.Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. - №13. - С.25-71.
19. Дронов А.В. Балтийско-Ладожский глинт. // СПбГУ. 2002. № 2-3. С.16-17.
20. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1972. – 308 с.
21. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. – 328 с.
22. Иванов И.П. Инженерная геодинамика/ И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский// СПб.: Наука, 2001. — 416 с.
23. Коробко А.А. Инженерно-геологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности (санкт-петербургский регион): дисс. канд. геол.- минералогич. наук: 25.00.08/ Коробко Анастасия Андреевна. - СПб., 2015. – 224 с.
24. Кофман В.С. Геология СССР. Том 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание/ В.С. Кофман, В.А. Селиванова //М.: Недра, 1971. - 504 с.
25. Краснов И.И. Карта четвертичных отложений Европейской части СССР и прилегающих акваторий., масштаб: 1:1500000 -Министерство геологии СССР, 1971 г.
26. Лобанов И.Н. О природе дислокаций Дудергофских высот и района г. Павловска. - Изв. ВГО, т. 111, вып. 4, 1979, С. 334-342.
27. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. / В.Д. Ломтадзе. - Л., «Недра», 1977. - 479 с.
28. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Недра, 1990. — 328 с.
29. Масленников И.А. Геологические факторы, определяющие безопасность ПЗРО в коренных отложениях глин Ленинградской области/ И.А. Масленников, Е.Б. Андерсон, В.Г. Савоненков и др. // V Международный ядерный форум. СПб.: НОУ ИДПО «Атомпроф». 2010. С. 193–199.
30. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними) / М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
31. Мачабели Г.А., Мерабишвили М.С., Квирикадзе Г.А. Генезис, геолого-экономическая и технологическая оценка месторождений бентонитов СССР. Тбилиси: Изд-во Мецниереба. 1981. 305 с.
32. Мохнач М.Ф. Методическое пособие по учебной геологической практике / М.Ф. Мохнач, Т.И. Прокофьева. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007, – 56 с.

33. Натальин Н.А. Саблино - природная жемчужина окрестностей Санкт-Петербурга // Экскурсии в геологии. СПб, 2001. 122 с.
34. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. - 211 с.
35. Панкратова К. В. Инженерно-геологическая оценка техногенеза компонентов подземного пространства при его освоении и использовании на примере Санкт-Петербурга: автореф. Дис. канд. геол.-минералогич. наук: 25.00.08 / Панкратова Ксения Викторовна. – СПб, 2012. – 24 с.
36. Попов И.В. Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ, 1959. – 510 с.
37. Сергеев Е.М. Инженерная геология СССР. Т. I. – М.: МГУ, 1982.- 527 с.
38. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства// Соросовский Образовательный Журнал. 2000. № 10. С.23-25.
39. Терцаги К. Механика грунтов в инженерной практике/ К. Терцаги, Р. Пек// М.: Строиздат, 1958. — 608 с.
40. Чочиа Н. Г. Палеогеография позднего кайнозоя Восточной Европы и Западной Сибири (ледниковая и ледово-морская концепции): монография / Н. Г. Чочиа, С.П. Евдокимов; под общ. ред. Н.Г. Чочиа. — Саранск: Мордов. университет, 1993. — 248 с.
41. Шарапанов Н.Н. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель / Н.Н. Шарапанов, Г.Я. Черняк, В.А. Барон. – М.: Недра, 1974. – 173 с.
42. URL: <http://hge.spbu.ru> (дата обращения: 05.02.2023) – Официальный сайт «Института геоэкологии РАН и НИЦ Гидрогеологии Института Наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета»
43. URL: <http://www.limno.org.ru> (дата обращения: 08.02.2023) – Официальный сайт "Институт Озероведения Российской академии наук"
44. URL: [http://water.rf.ru/Регионы\\_России/2530/Ленинградская\\_Область](http://water.rf.ru/Регионы_России/2530/Ленинградская_Область) (дата обращения: 10.02.2023) – Официальный сайт Научно-популярная энциклопедия «Вода России»
45. URL: <http://enc.sci-lib.com> (дата обращения: 03.02.2023) – Официальный сайт "Энциклопедия научной библиотеки"

### Перечень приложений

Номер приложения	Наименование приложения	Количество листов
Приложение А	Результаты лабораторных определений физических свойств и гранулометрического состава грунтов	1
Приложение Б	Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта естественного заложения	1
Приложение В	Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью	6
Приложение Г	Результаты определения удельного электрического сопротивления грунтов с заданной влажностью	1

Результаты лабораторных определений физических свойств и гранулометрического состава  
грунтов

Глина легкая пылеватая тугопластичная с прослоями песка голубовато-серая

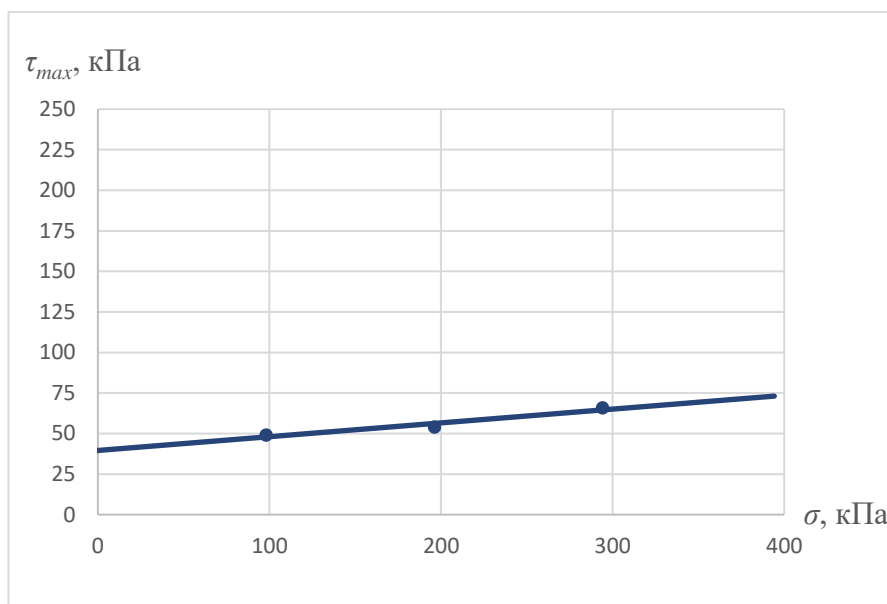
% содержание частиц по фациям, мм									
>10	10.0-2.0	2.0-1.0	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005
			0.07	0.10	0.13	14.49	30.13	28.58	26.50

Влажность %			Число пластичн.	Плотность, г/см <sup>3</sup>			Коэфф. порист.	Показ. консист., д.ед.
прир.	на границе			грунта	скел.	частиц		
	текуч.	раскат.	ρ				ρ <sub>d</sub>	ρ <sub>s</sub>
W	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	ρ	ρ <sub>d</sub>	ρ <sub>s</sub>	e	I <sub>L</sub>
28	47	21	26	1.96	1.48	2.80	47	0.42



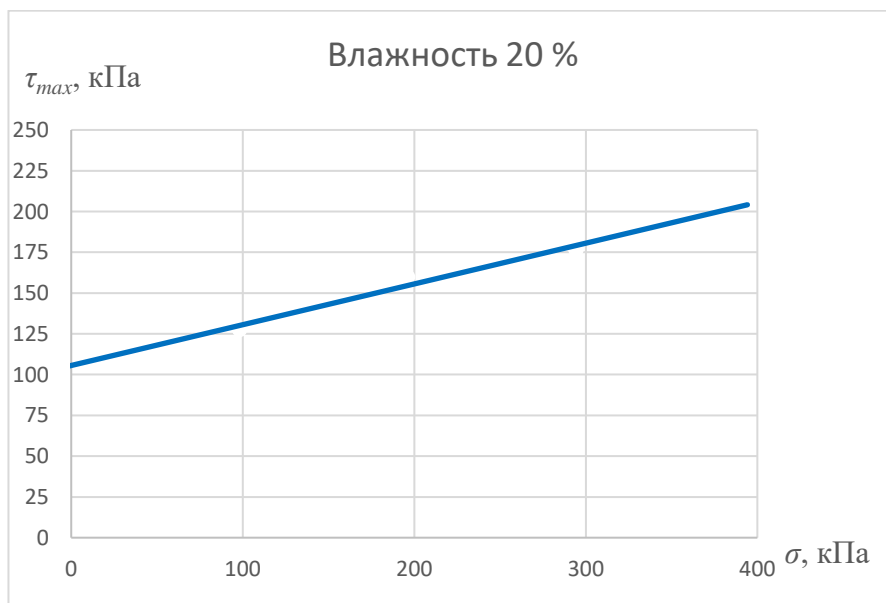
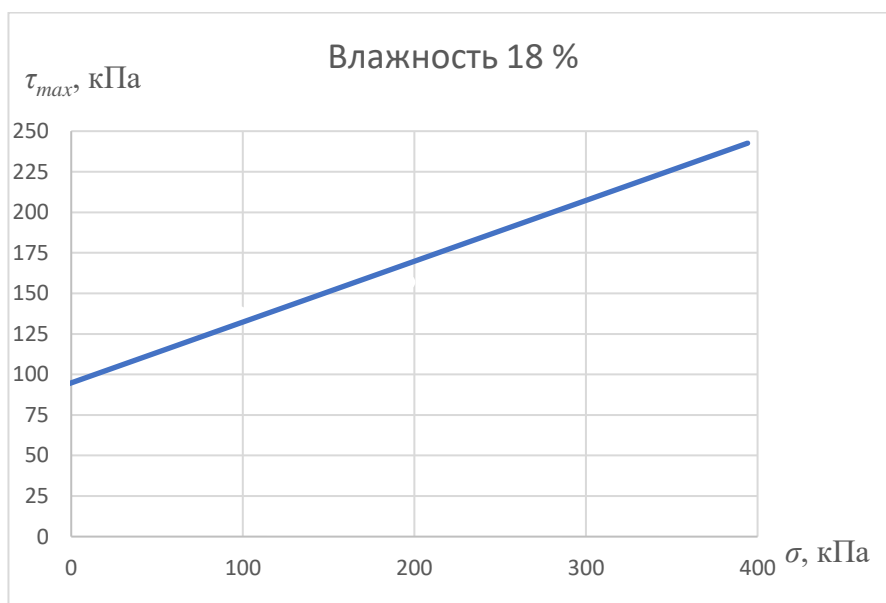
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта естественного заложения

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Монолит 26-28%	98	49	5	39
	196	54		
	294	66		



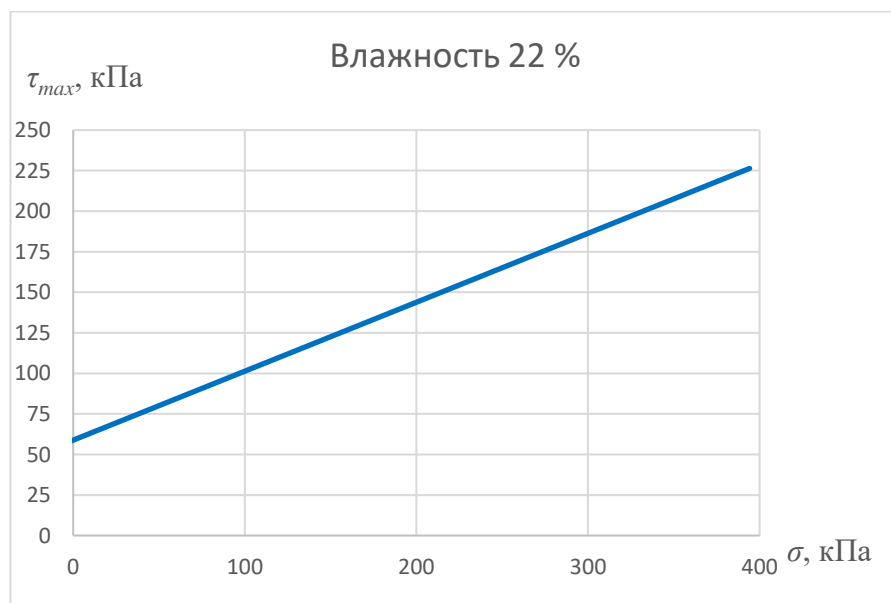
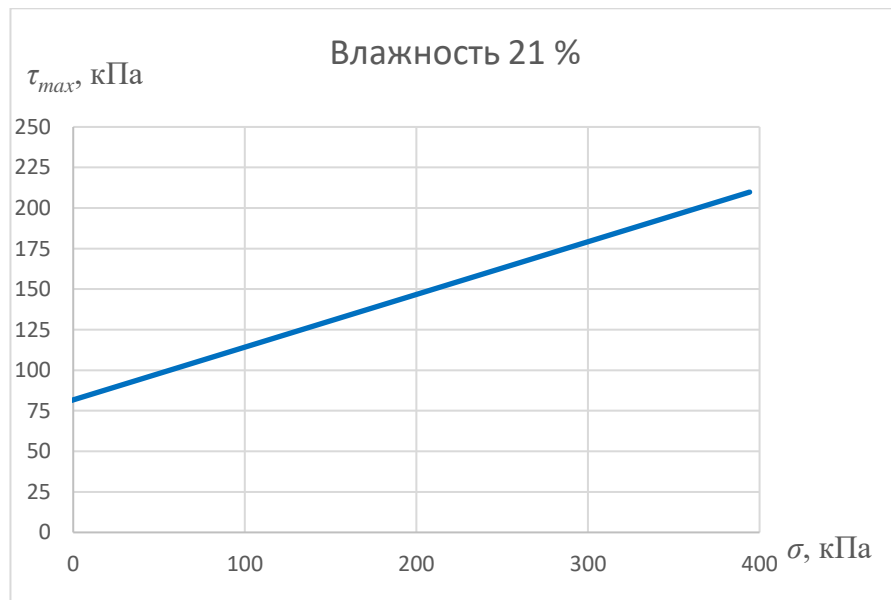
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 18%	98	137	20	95
	196	157		
	294	211		
Паста 20%	98	127	14	105
	196	160		
	294	177		



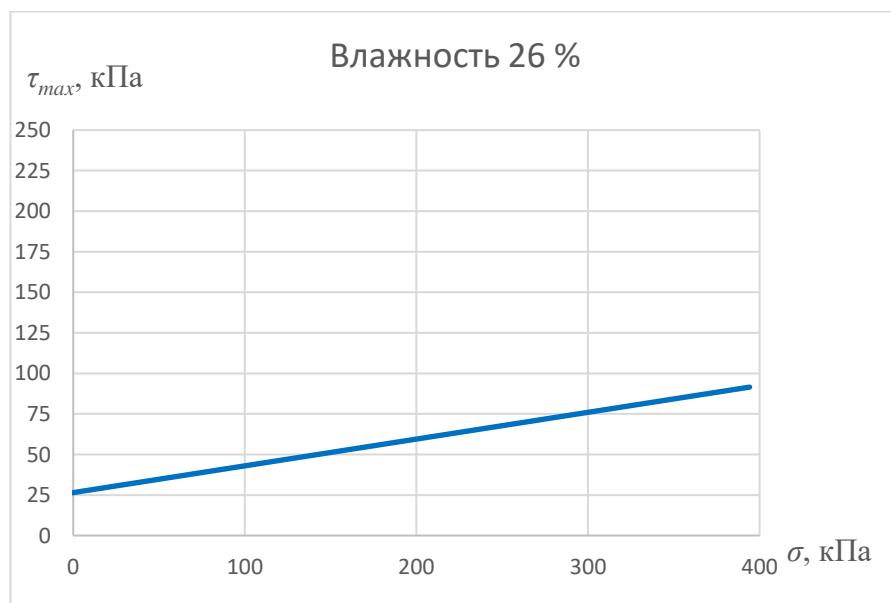
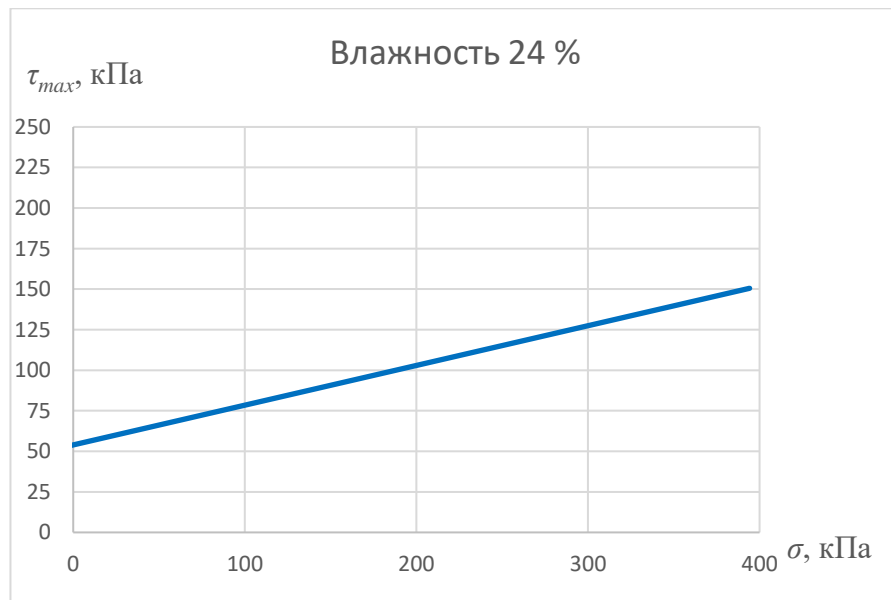
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 21%	98	113	18	81
	196	147		
	294	177		
Паста 22%	98	98	23	59
	196	147		
	294	181		



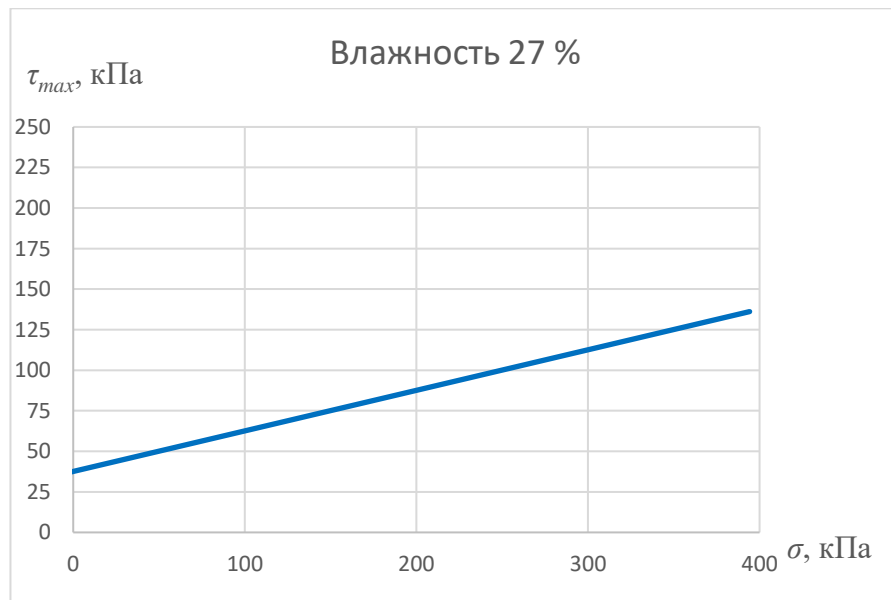
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 24%	98	73	14	54
	196	113		
	294	121		
Паста 26%	98	39	9	26
	196	66		
	294	72		



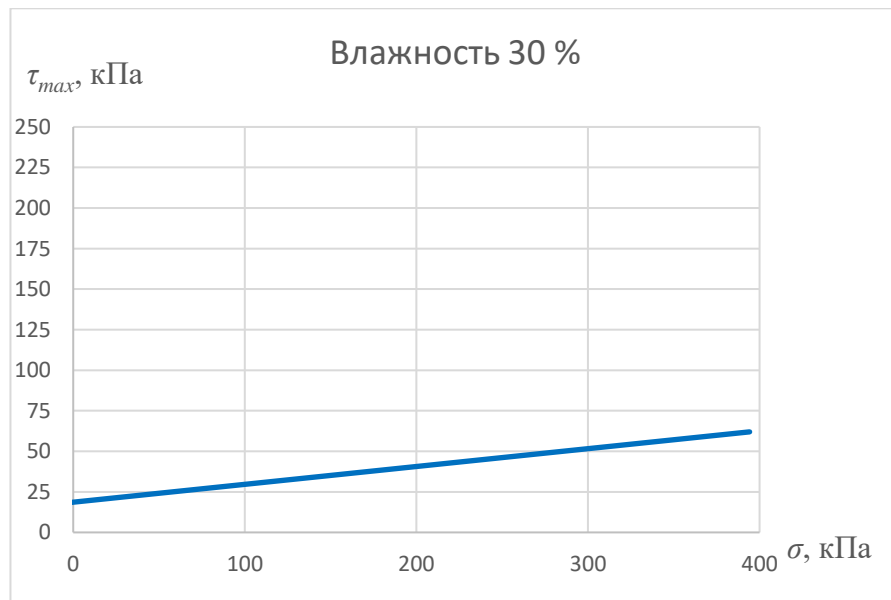
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 27%	98	59	14	37
	196	93		
	294	108		
Паста 28%	98	27	6	19
	196	39		
	294	47		



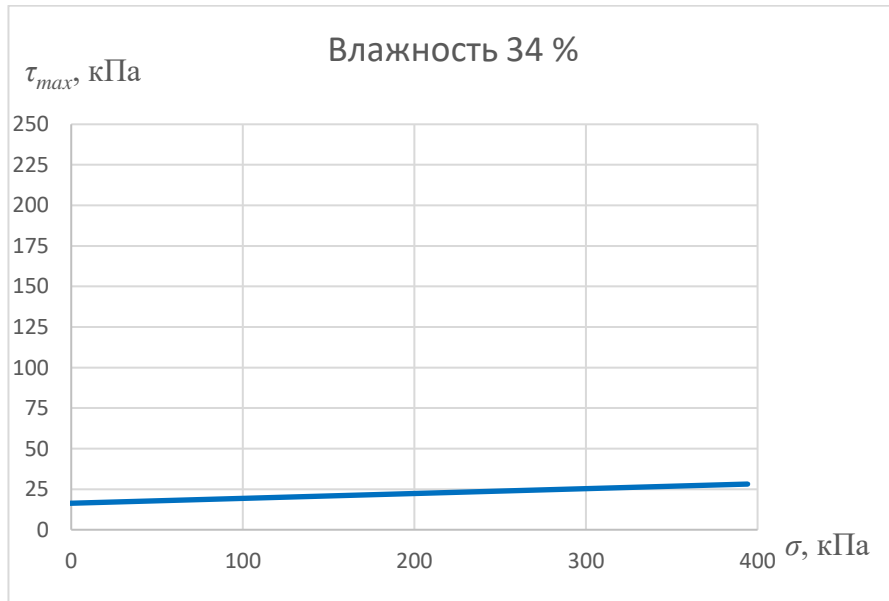
Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 30%	98	29	6	19
	196	40		
	294	51		
Паста 32%	98	20	5	12
	196	26		
	294	35		



Результаты лабораторных определений прочностных свойств грунта с заданной влажностью

Влажность	$\sigma$ , кПа	$\tau$ , кПа	$\varphi$ , °	$c$ , кПа
Паста 34%	98	20	2	17
	196	22		
	294	25		



Результаты определения удельного электрического сопротивления грунтов с заданной влажностью

Влажность, %	$\rho$ , Ом*м
20	9,85
24	8,21
26	6,76
28	6,81
34	6,62