

Санкт-Петербургский государственный университет

*КАРАМ Жорж Симонович*

**Выпускная квалификационная работа**

*Анализ изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов под влиянием токов катодной защиты подземных трубопроводов*

Уровень образования: бакалавриат

Направление: 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа: СВ.5018.2019 «Геология»

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

Рецензент: Главный  
специалист по ПКЗ,  
ЗАО «Трубопроводные  
системы и технологии»,  
к.г.-м.н. Яблучанский  
Анатолий Игнатьевич

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Основные сведения о коррозии .....	4
1.1 Причины и процесс коррозии металлов .....	4
1.2 Катодная защита подземных металлических сооружений от коррозии.....	8
Глава 2. Электроповерхностные явления в глинистых грунтах. ....	13
2.1 Двойной электрический слой. ....	14
2.2 Электрокинетические явления .....	16
Глава 3. Описание объекта исследования. ....	22
3.1 Основные сведения.....	22
3.2 Распространение, залегание и стратиграфия нижнекембрийских глин сиверской свиты. ....	23
Глава 4. Основные результаты исследования.....	27
Заключение.....	40
Список литературы.....	41

## Введение

Эксплуатация подземных металлических сооружений (нефтепроводы, газопроводы, магистральные водопроводы, стальные конструкции опор мостов и др.) сопряжена с рисками возникновения повреждений вследствие возникновения коррозии. В целях предотвращения коррозионных отказов применяется комплексная защита от электрохимической коррозии, включающая активную катодную. Длительная эксплуатация подземных металлических сооружений приводит к старению и разрушению защитных покрытий. Вследствие этого подавление электрохимической коррозии требует значительного увеличения величины защитного тока катодной защиты. На трубопроводах, эксплуатируемых более 50 лет, выходная сила тока на станциях катодной защиты может достигать до сотни ампер, а плотность защитного тока достигать десятков  $A/m^2$  (Бурлуцкий и др., 2020), что может способствовать изменению свойств дисперсных грунтов, вмещающие металлические сооружения, которые в свою очередь могут располагаться в условиях сложной инженерно-геодинамической обстановки, например, на оползневых склонах, а также под различными зданиями и сооружениями. Изменение физико-механических свойств грунтов в результате катодной поляризации может негативным образом сказаться на устойчивости склонов и осадке зданий и сооружений, а также повысить коррозионную активность грунта, что в свою очередь приведет к повышению рисков возникновения аварий при эксплуатации инженерных сооружений. Таким образом, необходимо провести подробный анализ изменения прочностных и деформационных свойств грунтов, подвергшихся катодной поляризации.

Целью работы является анализ изменения физико-механических свойств глинистых грунтов под действием катодной поляризации подземных металлических сооружений.

Автор выражает благодарность Бурлуцкому Станиславу Борисовичу, Лаздовской Марине Артуровне, Евенковой Татьяне Дмитриевне, Кропотовой Ксении Сергеевне и Орловскому Александру Андреевичу за содействие и помощь в проведении требуемых исследований и написании работы.

# Глава 1. Основные сведения о коррозии

## 1.1 Причины и процесс коррозии металлов

Коррозия металлов происходит, когда металлические материалы взаимодействуют с окружающей средой химически или электрохимически, что приводит к их самопроизвольному разрушению. Простые металлы, их сплавы, а также металлические изделия и конструкции могут выступать в качестве металлов. Коррозия металлов чаще всего происходит в различных жидкостях, газах и грунтах. (Жук, 1978).

Коррозия металлов — это гетерогенный процесс взаимодействия металла с жидкой или газообразной средой, который происходит в зоне контакта между металлом и окружающей средой. Это делает коррозию распространенным процессом (Жук, 1978).

Классификация коррозионных процессов в основном осуществляется по механизму. Выделяют химическую и электрохимическую коррозию (Жук, 1978).

При химической коррозии металл взаимодействует с коррозионной средой, в роли которой выступает раствор электролита. Окисление металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают в одном акте. В отличие от химической коррозии, при электрохимической коррозии ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают не в одном акте, а их скорости зависят от электродного потенциала металла, примером может послужить коррозия стали в морской воде (Жук, 1978).

Основной причиной коррозии металлов является их термодинамическая неустойчивость, то есть стремление металлов переходить из металлического состояния в ионное (Жук, 1978).

Энергия Гиббса считается по следующей формуле:

$$G = U + PV - TS$$

Где:  $U$  — внутренняя энергия,  $P$  — давление среды,  $V$  — объём,  $T$  — абсолютная температура среды,  $S$  — энтропия.

Изменение энергии Гиббса позволяет определить, может ли произойти процесс коррозии. Если  $\Delta G < 0$ , то это значит, что процесс может протекать и будет это делать самопроизвольно. В случае, когда  $\Delta G > 0$ , процесс не может протекать самостоятельно. При  $\Delta G = 0$  система находится в состоянии химического равновесия. В ходе самопроизвольного процесса, свободная энергия только уменьшается.

**Таблица 1.** Металлы и изменение свободной энергии при переходе 1 моль в ионное состояние.

Реакция	Изменение свободной энергии при переходе 1 моля металла в ионное состояние, кДж/моль	
	с выделением водорода (pH = 0)	с поглощением кислорода (pH = 7)
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+}$	- 160,8	- 239,5
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$	- 74,9	- 153,7
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$	- 71,6	- 150,3
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	- 48,6	- 127,3
$\text{Pd} \rightarrow \text{Pd}^{2+}$	+ 95,3	+ 16,5
$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+}$	+ 114,7	+ 36,0
$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+}$	+ 144,5	+ 65,7

Исходя из данных, указанных в таблице 1, можно сделать вывод, что только платина, палладий и золото являются термодинамически устойчивыми металлами, то есть не подвергаются коррозии. Однако производить трубопроводы из таких металлов экономически невыгодно, они добываются в ограниченном количестве и используются в других целях. Тогда встаёт вопрос о том, как сделать так, чтобы и железо, из которого делают трубопроводы, было термодинамически устойчивым.

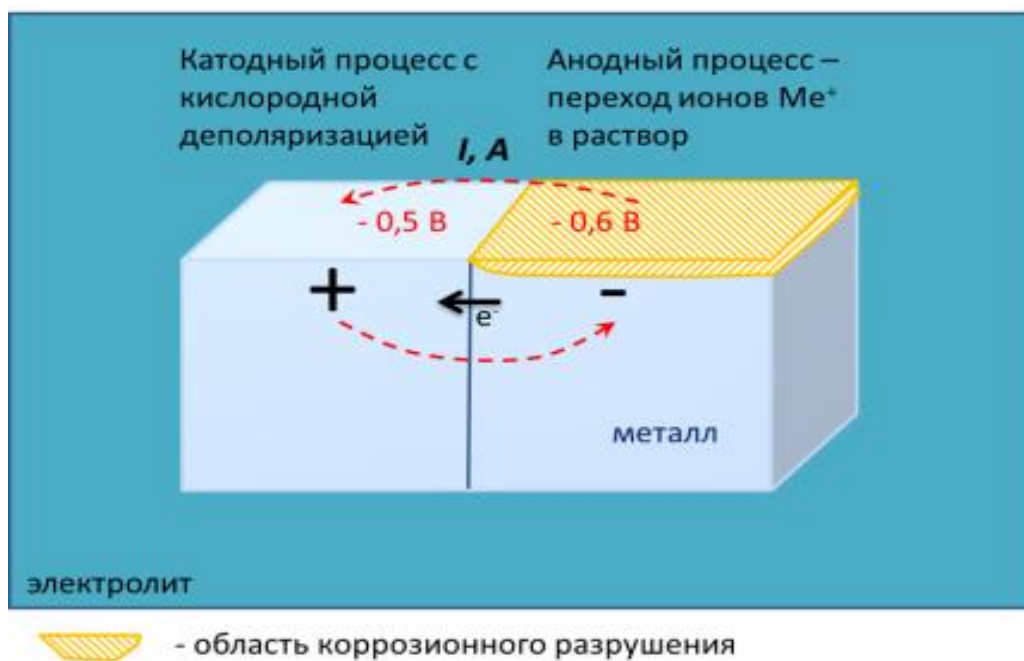
### Подземная коррозия

Рассмотрим процесс подземной коррозии поподробнее. Различные подземные металлические сооружения, трубопроводы и коммуникации, заглубленные и полузаглубленные в грунт резервуары, электрические бронированные кабели подвергаются коррозионному разрушению. Как правило, она имеет **электрохимический** механизм. Мальцева Г. Н. пишет: “наличие влаги, солей и щелочей в воздухопроницаемых грунтах способствует формированию короткозамкнутых гальванических элементов на металлических поверхностях подземных конструкций. Эти элементы разделяют поверхность на катодные и анодные участки, каждый из которых обладает определенным потенциалом. Именно по этой причине отмечается электрохимическая гетерогенность таких поверхностей, где происходят эти процессы. Выделяются следующие причины возникновения электрохимической неоднородности:

- неоднородность металлической фазы;
- неоднородность защитных пленок на поверхности металла;
- неоднородность жидкой фазы;

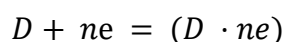
- неоднородность внутренних напряжений в металле;
- неоднородность физических условий;
- наличие несплошных окисных пленок, пористость защитных пленок, неравномерное распределение на поверхности продуктов коррозии;
- различие в концентрациях собственных ионов металла в электролите, различных солей, ионов водорода, кислорода и других окислителей”. (Мальцева, 2001)

При работе коррозионного микрогальванического элемента (рисунок 1) одновременно протекают анодный и катодный процессы. При анодном процессе происходит переход ионов металла в раствор в виде гидратированных ионов и образование некомпенсированных электронов на анодных участках (Мальцева, 2001). Уравнение реакции:



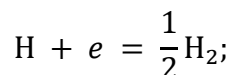
**Рисунок 1.** Схема образования локальных коррозионных токов в металле, помещенного в электролит (Бурлуцкий и др., 2020).

Мальцева Г.Н. пишет: “Образовавшиеся некомпенсированные электроны перетекают по металлу от анодных участков к катодным. Катодный процесс – ассимиляция электронов какими-либо ионами или молекулами, находящимися в растворе (деполяризаторами), и способными к восстановлению на катодных участках” (Мальцева, 2001). Уравнение реакции:

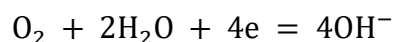


Мальцева Г.Н. пишет: “наибольшее значение в большинстве случаев электрохимической коррозии металлов имеют катодные реакции водородной и кислородной деполяризации” (Мальцева, 2001).

Водородная деполяризация:



Кислородная деполяризация:



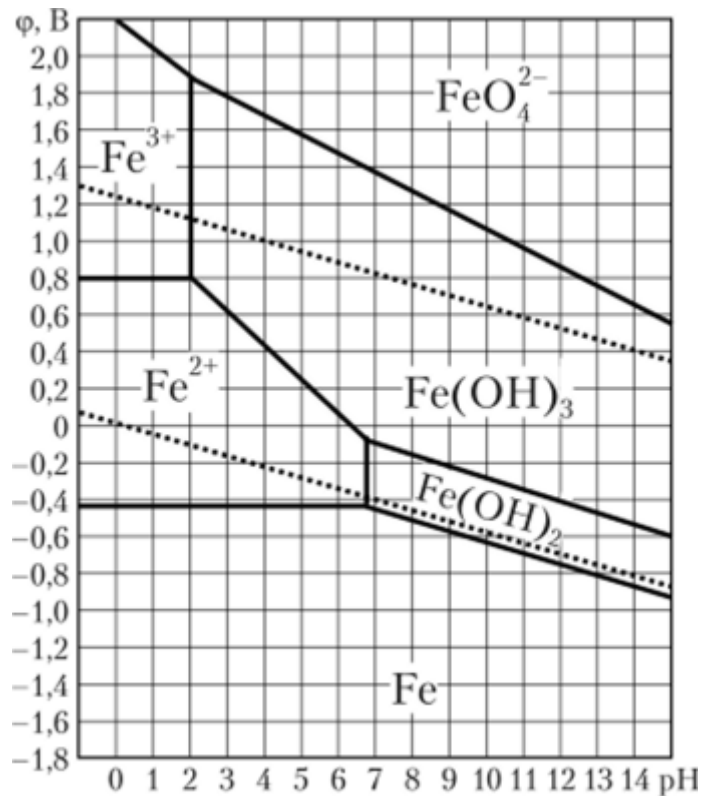
Коррозия металлических конструкций в нейтральных средах, грунте и почве, морской воде, атмосферных условиях протекает именно вследствие катодной реакции ионизации кислорода. Процесс коррозии с участием в качестве катодного деполяризатора молекулярного кислорода называют коррозией с кислородной деполяризацией.

Для борьбы с **подземной коррозией** сооружений широко используют следующие способы:

- Защитные изолирующие покрытия. Это основной метод защиты. Например, на трубопроводы наносят битумное покрытие. Применяют также покрытия на основе липких поливинилхлоридных и полиэтиленовых лент. В последнее время для защиты магистральных газонефтепродуктопроводов применяется заводское покрытие из экструдированного полиэтилена.

- Катодная защита от внешнего источника постоянного тока или протекторная защита.

В нашем случае важно знать при каких условиях окисляется железо. Данной проблемой занимаются уже большое количество времени, а важный вклад внес бельгийский химик Марсель Пурбе (1904—1998), он создал диаграммы Пурбе. Диаграмма Пурбе — мощнейшее средство предсказания направления химических реакций соединений данного элемента. Из нее можно определить условия большинства кислотно-основных и окислительно-восстановительных реакций соединений данного элемента без учета взаимодействия с посторонними ионами. По ней можно предсказать процессы диспропорционирования и контрпропорционирования разных форм, возможность выделения ими водорода и кислорода. Сопоставляя диаграммы Пурбе для двух элементов, можно предсказать их окислительно-восстановительные реакции (рисунок 2). Диаграмма Пурбе строится в координатах потенциал  $\varphi$  (В) – рН.



**Рисунок 2.** Диаграмма Пурбе для системы «железо — вода» (Никольский, 1965).

Из диаграммы следует, что потенциал, который нужно поддерживать для того, чтобы железо Fe не переходило в окисленное состояние, будет варьировать от -1,8 В до -0,4 В. В роли воды будет выступать дисперсный грунт.

По сведениям Ростехнадзора, более 40% доли отказов трубопроводных систем происходят из-за коррозионного разрушения трубного металла. Наиболее эффективным методом активной защиты для предотвращения разрушений от коррозионного воздействия на металлические трубопроводы является **катодная защита**.

### 1.2 Катодная защита подземных металлических сооружений от коррозии.

Катодная защита внешними источниками тока (электрический метод) сложная и трудоемкая, но она мало зависит от удельного сопротивления грунта и имеет неограниченный энергетический ресурс. В качестве источников постоянного тока, как правило, используются преобразователи различной конструкции, питающиеся от сети переменного тока. Преобразователи позволяют регулировать защитный ток в широких пределах, обеспечивая защиту трубопровода в любых условиях.

В качестве источников питания установок катодной защиты для используются станции 220 В. Защитный ток, накладываемый на трубопровод от преобразователя и

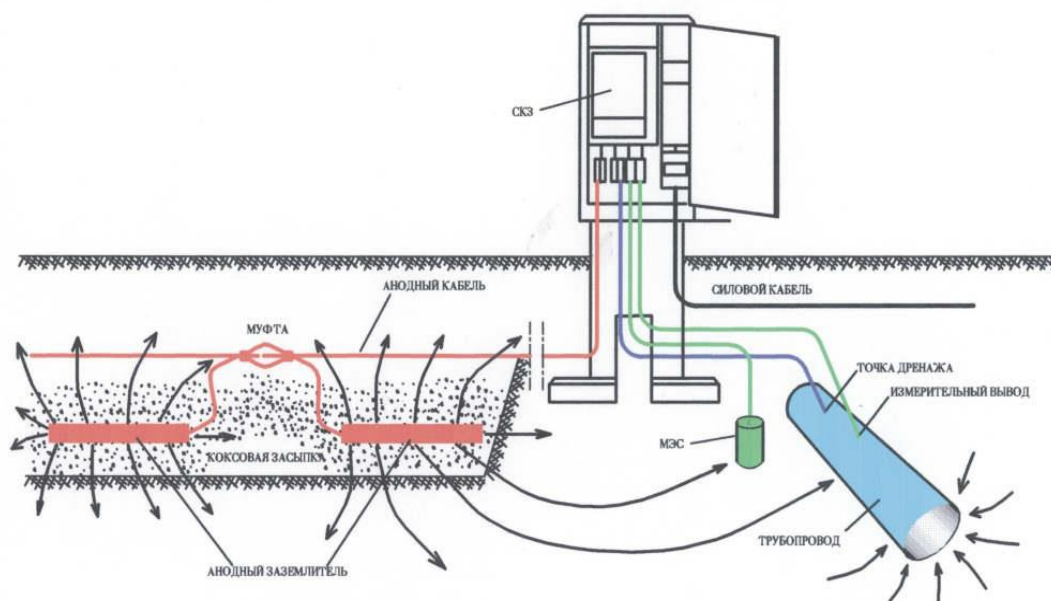


создающий разность потенциалов «труба-земля», распределяется неравномерно по длине трубопровода. Отрицательный полюс источника тока установки катодной защиты присоединяется к защищаемому от коррозии подземному металлическому сооружению, положительный подключается к анодному заземлению (рисунок 3).

Значение разности потенциалов достигает максимума по абсолютной величине в точке, где источник тока подключен к трубе, а затем по мере удаления от этой точки падает.

Катодная защита является одним из методов борьбы с коррозией металлов в агрессивных химических средах. Она основана на переводе металла из активного состояния в пассивное и поддержании этого состояния при помощи внешнего катодного тока. Для защиты подземных трубопроводов от коррозии по трассе их залегания сооружаются станции катодной защиты. В их состав входят источник постоянного тока (защитная установка), анодное заземление, контрольно-измерительный пункт, соединительные провода и кабели.

### КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ



**Рисунок 3.** Схема катодной защиты подземного трубопровода (ismith.ru). МЭС – медно-сульфатный электрод сравнения. СКЗ – станция катодной защиты.

В большинстве своем грунты являются нейтральными или очень слабощелочными средами, при процессе электролитической диссоциации воды (расщепление воды на катионы и анионы) среда становится более коррозионно-агрессивной, это, в свою очередь, усложняет процесс защиты от коррозии, так как по диаграмме Пурбе (рисунок 2), диапазон не окисленного состояния Fe сужается, то есть возникает вероятность того, что придется

перенастраивать установку катодной защиты на иной потенциал. Этот процесс будет возникать постоянно, это является проблемой, решение которой ищут уже долгие годы.

При включении источника ток стекает с анодного заземления. Распространяется по окружающей среде, натекает на сооружение, тем самым поляризует металл. Величина защитного потенциала регламентирована для разных видов металлических сооружений прописана в ГОСТ 9.602-2016. В Таблице 1 приведены защитные потенциалы металла сооружения относительно насыщенного медносульфатного электрода сравнения (ГОСТ 9.602-2016).

Анализируя данные, представленные в Таблице 2 делаем вывод, что минимальный поляризационный потенциал относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения без омической составляющей должен быть  $-0,85-0,95$  В в зависимости от температуры поверхности сооружения, максимальный потенциал без омической составляющей варьирует от  $-1,1$  до  $1,2$  В в зависимости от типа сооружения и температуры поверхности. Выход за эти ограничения может привести к некачественной защите от коррозии, в результате этого могут возникнуть коррозионные разрушения, которые в отдельных случаях могут привести к аварии на объекте.

**Таблица 2.** Защитные потенциалы металла сооружения относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения (ГОСТ 9.602-2016).

Сооружения и условия их эксплуатации	Минимальный защитный потенциал <sup>1)</sup> относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения <sup>2)</sup> , В		Максимальный защитный потенциал <sup>1)</sup> относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения <sup>2)</sup> , В	
	Поляризационный потенциал (без омической составляющей)	Суммарный (с омической составляющей)	Поляризационный потенциал (без омической составляющей)	Суммарный (с омической составляющей)
Действующие стальные сооружения до их реконструкции <sup>3)</sup> :				
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) не выше 40 °С				
	– 0,85	– 0,9	– 1,15	– 2,5
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) свыше 40 °С; сооружения при опасности биокоррозии	– 0,95	– 1,05	– 1,15	– 3,5
Вновь построенные и реконструированные сооружения:				
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) не выше 40 °С	– 0,85	– 0,95	– 1,2	– 3,5
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) свыше 40 °С, не имеющие теплоизоляции	– 0,95	– 1,05	– 1,1	– 3,5
<p><sup>1)</sup> Здесь и далее под минимальным и максимальным значениями потенциала подразумевают его значения по абсолютной величине.</p> <p><sup>2)</sup> Электроды сравнения обеспечивают стабильность потенциала по отношению к образцовому электроду сравнения по ГОСТ 17792 в пределах <math>\pm 15</math> мВ.</p> <p><sup>3)</sup> Показатели относятся к сооружениям, для которых проектными решениями не был предусмотрен контроль поляризационного потенциала. Допускается оценивать защищенность только по величине потенциала с омической составляющей, который для действующих стальных сооружений с температурой поверхности (транспортируемого продукта) не выше 40 °С, с покрытием на основе битумной мастики не отрицательнее минус 2,5 В относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения.</p>				

Использование катодной защиты широко распространено на территории Российской Федерации, все подземные газопроводы и нефтепроводы активно защищаются от коррозии этим методом, а это тысячи километров трубопроводов, которые помещены в грунт. Как новые, так и старые металлические сооружения подвергаются именно этому методу защиты, из этого следует, что большое количество времени – а именно десятки лет установки катодной защиты создают внешнее электрическое поле, из-за которого только в глинистых грунтах возникают различные электрокинетические явления, такие как электроосмос и электрофорез.

Выводы к главе 1.

1. Подземные металлические сооружения, такие как газопроводы, нефтепроводы, мосты, фундаменты зданий и сооружений и другие объекты во время своей

эксплуатации подвергаются электрохимической коррозии, от которой в основном используют активную и пассивную защиту.

2. Основным методом активной защиты подземных металлических сооружений является катодная защита, суть которой заключается в катодной поляризации сооружения постоянным электрическим током.
3. Благодаря протеканию постоянного электрического тока в глинистых грунтах возникают электроповерхностные явления.

## Глава 2. Электроповерхностные явления в глинистых грунтах.

Глинистый грунт представляет из себя грунт, который имеет ряд особенностей и свойств, не характерных для других типов грунтов. Для того, чтобы понять, почему и как электрокинетические явления возникают, а затем изменяют глинистые грунты, необходимо разобраться, что такое и чем характеризуется глинистый грунт.

К глинистым грунтам относятся тонкодисперсные образования, содержащие не менее 3% глинистых частиц и проявляющие набухаемость и пластичность при увлажнении. По составу выделяются супеси, суглинки и глины (Трофимов и др., 2015).

Гранулометрический состав глинистых грунтов многообразен. Твердая компонента глинистых грунтов является полидисперсной системой. У супеси это глинисто-пылеватопесчаная система с содержанием глинистых частиц 3-10%, а у глин – песчано-глинистопылеватая или песчано-пылеватоглинистая, с содержанием тех же частиц 30-60% и даже более (Трофимов и др., 2015).

Минеральный состав грунтов, как и гранулометрический, разнообразен. Они состоят из обломочных (песчаных и пылеватых) агрегатов и зерен, в большинстве кварцевых, и тонкодисперсных частиц глинистых материалов (Трофимов и др., 2015).

Тонкодисперсная составляющая глинистых грунтов является наиболее сложной по составу. В основном она представлена глинистыми минералами, такими как гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, смешаннослойные и хлорит. Именно эти минералы обеспечивают специфические свойства глинистых грунтов, такие как высокая гидрофильность, липкость, возможность набухания, ионный обмен и т.д. (Трофимов и др., 2015).

Так как минералы находятся в дисперсном состоянии, то электроповерхностные явления могут протекать в глинистых грунтах, это приводит к различным физико-химическим явлениям в связи с наличием двойного электрического слоя (ДЭС) на границах между фазами (Злочевская, Королев, 1988).

При взаимодействии между твердыми минеральными частицами и водой или растворами, образуется множество различных адсорбционных центров на поверхности частиц в системе "глинистая порода - водный раствор электролитов". Природа этих центров зависит как от кристаллохимии поверхности, так и от взаимодействующего раствора. Заряд частиц определяется статистическим распределением ионных групп на поверхности (Злочевская, Королев, 1988).

Избыток ионов одного знака или “заряд” поверхности вызывает в силу электростатического притяжения соответствующую ориентировку ионов противоположного знака, образуя **двойной электрический слой (ДЭС)**.

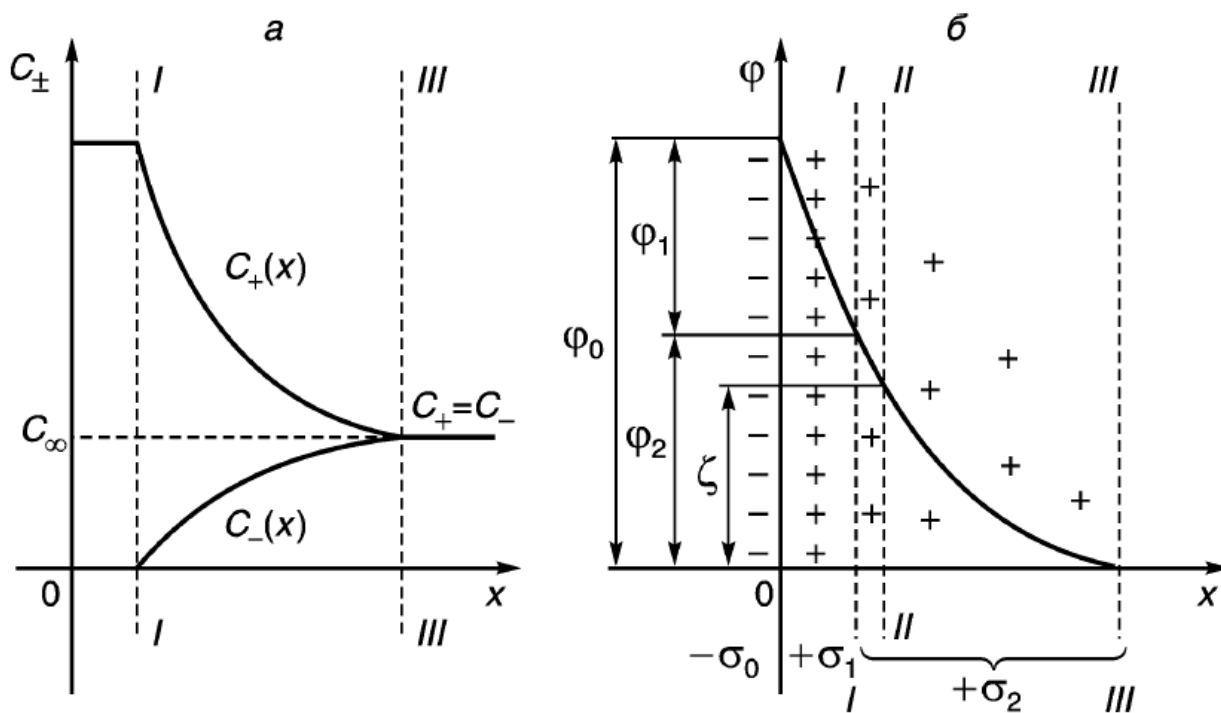
## **2.1 Двойной электрический слой.**

Двойной электрический слой – система противоположных по знаку зарядов, которая находится на границе двух фаз: жидкой и твердой. ДЭС возникает в результате контакта этих двух фаз, после которого заряды перераспределяются. Каждой фазе соответствуют заряды с одноименным знаком.

Появление ДЭС может быть объяснено двумя факторами: ионизацией поверхностных молекул твердых частиц и избирательной адсорбцией поверхностными молекулами одного из ионов электролита, находящегося в растворе. Первый путь возникновения ДЭС связан с диссоциацией поверхностных молекул дисперсной фазы на ионы под воздействием жидких сред. Прочно связанные с частицей ионы образуют заряд частицы, в то время как слабо связанные ионы выходят в дисперсионную среду. Частично эти свободные ионы под действием электростатических сил притягиваются к поверхности частицы, образуя ДЭС (Баранов, Фролов, 2002).

Существует второй способ образования ДЭС, который связан с адсорбцией ионов из раствора на поверхности частиц твердой фазы. Ионы, похожие на те, что уже есть в частице твердой фазы, лучше всего адсорбируются, что приводит к заряду частицы, к которой притягиваются ионы с противоположным зарядом, образующие ДЭС (Баранов, Фролов, 2002).

Ученые в 19 и 20 веках предложили несколько схем строения двойного электрического слоя (ДЭС), однако в настоящее время наиболее распространена теория Штерна. Эта теория объединила схемы Гельмгольца-Перрена и Гюи-Чепмена, учитывая конечный размер реальных ионов и то, что центры ионов не могут находиться на поверхности твердого тела ближе, чем на расстоянии, равном ионному радиусу. Штерн также учел взаимодействие ионов с поверхностью ионообменного материала. Согласно его теории, первые слои противоионов притягиваются к заряженной поверхности под влиянием электрического поля и поля адсорбционных сил. Это может привести к удержанию части противоионов на поверхности на расстоянии порядка 1-2 молекул, образуя плоский конденсатор (Баранов, Фролов, 2002).



**Рисунок 4.** Схема строения двойного электрического слоя по О. Штерну: а - изменение концентрации катионов  $C^+$  и анионов  $C^-$  вблизи поверхности; б - падение электрического потенциала в функции расстояния от поверхности  $x$  и распределение избыточных ионов; I - I - граница адсорбционного слоя; II - II - плоскость скольжения жидкости; III - III - граница диффузного слоя и свободного раствора (внешняя граница ДЭС) (Королев, 2022).

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о структуре ДЭС в различных системах, что позволяет выделить типы различных ДЭС. Так, в зависимости от количества участвующих в данной системе фаз, двойные электрические слои можно подразделить на простые (в двухфазной водонасыщенной системе) и сложные (в системах из трех и более фаз). В зависимости от толщины поверхностных пленок или слоев воды следует различать неразвитый, или тонкий, ДЭС, когда из-за незначительной толщины пленки (например, в концентрированном растворе) отсутствует какая-либо периферийная часть двойного слоя (например, диффузная), и развитый, или толстый, ДЭС, отвечающий полностью сформированным составляющим его слоям, протяженным вглубь объема жидкости. Различают два типа ДЭС: свободные и перекрывающиеся. Они определяются в зависимости от того, насколько близко находятся противоположные границы раздела фаз друг к другу, так что их ДЭС начинают взаимодействовать. Взаимодействие может привести к отталкиванию, если ДЭС имеют одинаковый заряд, или к притяжению, если ДЭС имеют противоположный заряд (Королев, 2022).

ДЭС можно классифицировать на основе геометрии поверхностей раздела фаз и объемной конфигурации. В результате, они делятся на плоские ДЭС (возникающие вблизи плоских границ раздела фаз), сферические ДЭС (вокруг сферических границ раздела фаз или границ близких к сферам), цилиндрические ДЭС, а также на ДЭС более сложной формы, такие как ДЭС на шероховатой или пористой поверхности (Королев, 2022).

В зависимости от параметров внешнего электрического поля, можно выделить равновесные ДЭС, которые возникают в нулевом или постоянном электрическом поле, и неравновесные или поляризованные ДЭС, которые возникают при наличии переменного электрического поля. Различные сочетания этих типов ДЭС приводят к разнообразию видов двойных электрических слоев в природных дисперсных структурах. Это существенно влияет на сложность и специфику электроповерхностных явлений, проявляющихся в таких системах (Королев, 2022).

Электрический заряд на поверхности частиц дисперсных грунтов, а также градиент концентрации противоионов, компенсирующих поверхностный заряд в ДЭС, играют решающую роль в определении электроповерхностных и капиллярно-осмотических свойств грунтов, особенно в высокодисперсных глинистых грунтах. В то же время, структура ДЭС в отсутствие внешнего электрического поля имеет влияние на такие явления, как адсорбция, ионный обмен, структурообразование, взаимная коагуляция частиц и их агрегативная устойчивость в дисперсных грунтах (Грунтоведение, 2005).

Таким образом, возникновение электрокинетических явлений обусловлено диффузным строением двойного электрического слоя. Разноименность зарядов фаз приводит к перемещению противоионов вместе с жидкой фазой (электроосмос), а в случае дисперсной системы – к перемещению частиц дисперсной фазы (электрофорез).

## **2.2 Электрокинетические явления**

Протекание электрокинетических явлений обусловлено существованием двойного электрического слоя на границе раздела фаз.

Электрокинетические явления – это процессы, возникающие при перемещении фаз под воздействием электрического поля. К ним относятся электрофорез - перемещение частиц дисперсной фазы в дисперсной среде, а также электроосмос - перемещение дисперсионной среды через пористую перегородку под воздействием постоянного напряжения.



Уравнение Гельмгольца-Смолуховского является основным уравнением теории электрокинетических явлений. Оно было выведено на основе представления двойного электрического слоя как плоского конденсатора и связывает скорость перемещения фаз при электрофорезе или электроосмосе с разностью потенциалов между обкладками этого конденсатора. Обкладки конденсатора разделяет слой дисперсионной среды толщиной  $\delta$ , на которых сосредоточены ионы с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ . Ионы под действием электрической силы  $F$  перемещаются относительно друг друга, формула силы (Шубенкова, 2016).

$$F = \sigma \times H$$

где  $F$  – электрическая сила, действующая на  $1 \text{ см}^2$  поверхности обкладки конденсатора;  $\sigma$  – плотность заряда (число зарядов на  $1 \text{ см}^2$  поверхности);  $H$  – градиент потенциала (численно равен напряженности электрического поля  $E$ ) (Шубенкова, 2016).

*Электроосмос* – это процесс движения жидкости в капиллярно-пористой (дисперсной) системе под действием приложенной к ней разности электрических потенциалов. Причиной электроосмоса является наличие ДЭС на поверхности твердой фазы в дисперсной системе. Если к такой системе приложить разность электрических потенциалов (пропускать постоянный электрический ток), то катионы диффузной части ДЭС начнут двигаться к отрицательному полюсу - катоду, увлекая за собой и молекулы осмотической воды ДЭС. Происходит смещение катионов ДЭС по так называемой плоскости скольжения. Поэтому в такой дисперсной системе возникает макроскопический электроосмотический поток воды, направленный в сторону катода.

Факторы, влияющие на электроосмос в грунтах:

1. Минеральный состав, влияние которого проявляется через дисперсность и гидрофильность составляющих грунт минералов, а также через природу минеральной поверхности, влияние которой обуславливается термодинамическим потенциалом поверхности минерала на величину электроосмотического переноса (Королев, 2015).

2. Дисперсность, увеличение которой приводит к увеличению объема порового пространства, занятого диффузной частью ДЭС. Поскольку ионы диффузной части ДЭС являются ключевым элементом электроосмотического потока воды, то увеличение концентрации этих ионов в единице объема пор увеличивает скорость электроосмоса и коэффициент электроосмоса (Королев, 2015).

3. Состав обменных катионов в глинистых грунтах оказывает неоднозначное влияние, однако оно сказывается на значении коэффициента электроосмоса (Королев, 2015).

4. Влажность глинистых грунтов существенно влияет на параметры электроосмоса и электрокинетический потенциал. По мере увеличения влажности наблюдается заметное движение порового раствора в глине только при влажности близкой к нижнему пределу пластичности, когда присутствует сплошной слой воды в порах грунта, содержащего осмотически поглощенную влагу в пределах диффузной части ДЭС. Увеличение влажности сверх нижнего предела пластичности увеличивает интенсивность электроосмоса, но при превышении влажности набухания электроосмотический перенос снижается в связи с проявлением электрофореза отдельных глинистых частиц в условиях увеличивающегося объема поровой воды (Королев, 2015).

5. Концентрация электролита порового раствора оказывает непосредственное влияние на электроосмотический перенос, с увеличением концентрации электролита происходит сжатие толщи ДЭС (Королев, 2015).

6. До настоящего времени недостаточно изучено влияние pH порового раствора на характер изменения электроосмотического переноса и коэффициента электроосмоса в глинах различного минерального состава и плотности-влажности. Роль pH порового раствора в электроосмосе следует рассматривать как независимую от его кислотности или щелочности. При увеличении концентрации ионов гидроксила в щелочной среде или ионов водорода в кислой среде происходит увеличение электроосмотического переноса. Максимальное значение электроосмотического переноса наблюдается при pH порового раствора около 3 и около 11 (Королев, 2015).

7. Микроорганизмы, живущие в дисперсных грунтах, оказывают существенное влияние на многие физико-химические свойства грунта, а также влияют на электрокинетические свойства частиц грунта, изменяя заряды их поверхности при адсорбции на частицах минералов, отрицательно заряженных клеток или продуктов метаболизма микроорганизмов. Функциональные группы микроорганизмов могут иметь как положительный, так и отрицательный заряды (Королев, 2015).

8. Влияние температуры на параметры электроосмоса дисперсных грунтов различается в каолинистых и монтмориллонитовых глинах при разной влажности. В области низкой влажности глины скорость электроосмотического переноса уменьшается при повышении температуры до 70°C. Однако в монтмориллонитовой глине с более высокой

влажностью, чем влажность полного водопоглощения, этот эффект заменяется обратным: электроосмотический перенос увеличивается с увеличением температуры (Королев, 2015).

9. Воздействие напряженности электрического поля от постоянного тока на электроосмотическую фильтрацию воды в глинистых грунтах имеет сложную зависимость от значения напряженности в диапазоне от 0,1 до 190 В/см. Коэффициент электроосмоса грунтов монотонно увеличивается от нуля до значений  $E = 1 - 70$  В/см, после чего стабилизируется. При значении  $E$  выше 70 В/см наблюдается резкое увеличение коэффициента электроосмоса в 2-2,5 раза до 120-130 В/см. При дальнейшем увеличении напряженности  $E$  до 130-190 В/см коэффициент электроосмоса остается почти постоянным (Королев, 2015).

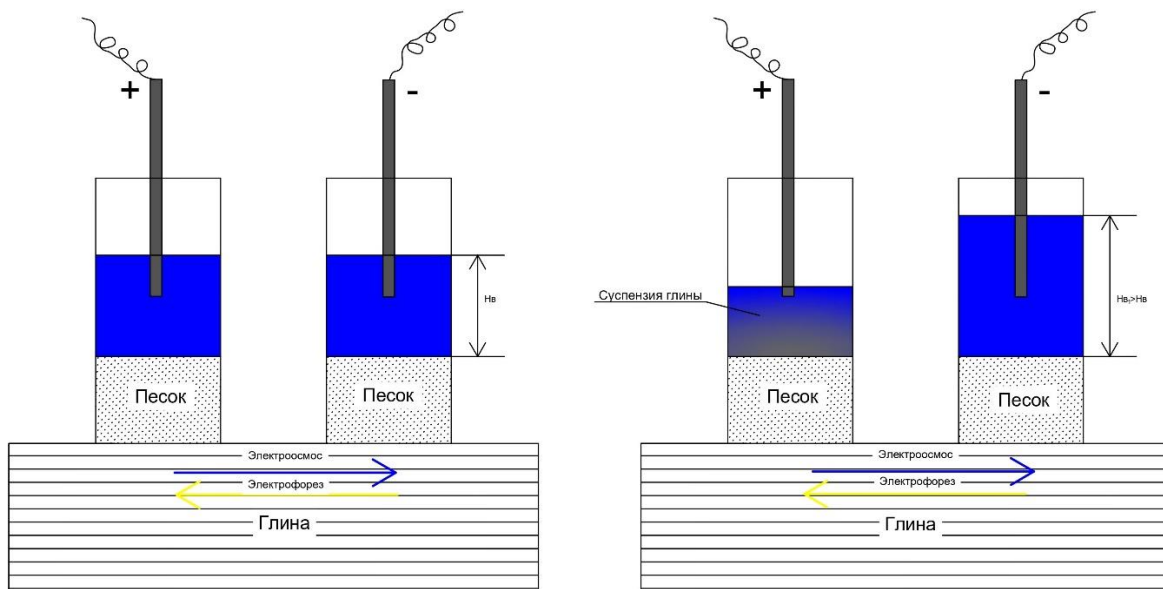
*Электрофорез* — это движение заряженных дисперсных частиц в жидкости под воздействием электрического поля. В грунтах он осуществим только в ограниченных условиях. Появление электрофореза возможно благодаря наличию двойного электрического слоя (ДЭС) вокруг заряженных дисперсных частиц. Если заряд частиц отрицательный, то он компенсируется катионами из ДЭС, так что частицы остаются электрически нейтральными. Однако при наличии постоянного электрического тока, происходит разрыв ДЭС в плоскости скольжения, в результате чего частица приобретает некоторый отрицательный заряд и начинает двигаться к положительному электроду - аноду, именно таким образом возникает электрофорез (Королев, 2015).

Для возможности протекания электрофореза необходимо, чтобы поровый раствор был неподвижным и поры имели достаточную ширину (больше, чем размеры мелких частиц) (Королев, 2015).

Интенсивность потока частиц,двигающихся при электрофорезе, зависит от напряженности электрического поля, электрокинетического потенциала и диэлектрической проницаемости порового раствора, а также обратно пропорциональна его вязкости (Королев, 2015).

Ранее выполненные исследования (Бурлуцкий и др., 2020) показали значительную трансформацию глинистых грунтов в зоне катодной поляризации как в части изменения гранулометрического состава, так и в части изменения различных свойств. Логично предположить, что изменение таких свойств как плотность, пористость, влажность и др. повлечет за собой изменение и физико-механических свойств глинистых грунтов.

На рисунке 5 показан опыт Рейса. Из рисунка видно, что в результате протекания таких электрокинетических процессов как электроосмос и электрофорез. В стакане, где находится катод, увеличилось количество, это связано с явлением электроосмоса. В стакане, где находится анод появилась суспензия глины, так как глинистые частицы под действием электрофореза переместились к аноду.



**Рисунок 5.** Опыт Рейса.

Процесс ускорения коагуляции осадков дисперсных частиц в поле постоянного электрического тока называют *электрокоагуляцией*. Ускорение происходит за счет электродных процессов и увеличения в растворе концентрации многовалентных ионов металлов, слагающих электроны. В этом процессе также важен электрофорез, который усиливает соударения частиц и формирование агрегатов (Королев, 2015).

Существуют две стадии, выделяемые в процессе коагуляции:

- 1) Сближение первоначально удаленных друг от друга частиц;
- 2) Их взаимодействие (слипание) на малых расстояниях.

Под воздействием внешнего электрического поля обе стадии коагуляции меняются: электрофорез сближает частицы около одного из электродов, что способствует протеканию второй стадии - активной коагуляции (Королев, 2015).

## **Выводы к главе 2**

1. В глинистых грунтах существует система зарядов, получившая название двойного электрического слоя (ДЭС), который возникает в результате контакта твердой и жидкой фаз глинистого грунта.

2. В результате взаимодействия глинистых грунтов и электрического поля протекают такие электрокинетические явления как электроосмос и электрофорез, а также возможен процесс электрокоагуляции глинистых частиц.
3. На характер протекания электрокинетических процессов влияют множество внешних факторов, таких как: минеральный состав грунта, дисперсность, состав обменных катионов, влажность, рН порового раствора, напряженность электрического поля, содержание микроорганизмов, температура.
4. Ранее выполненные исследования показали возможность изменения физико-механических свойств грунтов в результате протекания электроповерхностных процессов, основной целью работы является изучение их изменения.

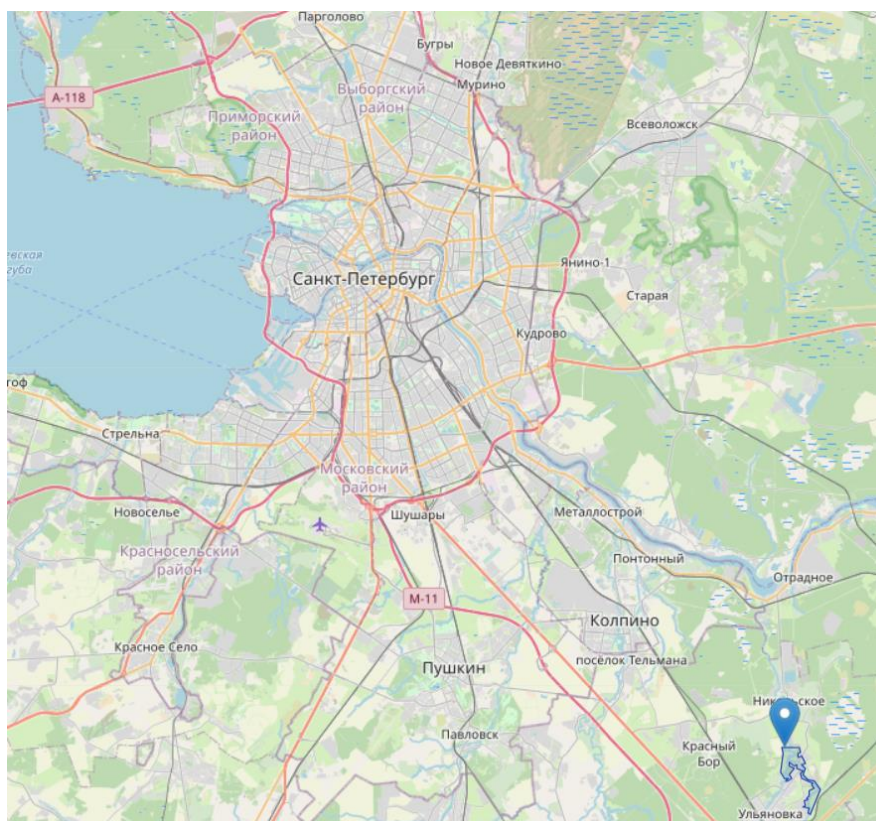
## Глава 3. Описание объекта исследования.

### 3.1 Основные сведения

С целью анализа изменения физико-механических свойств было выполнено физическое моделирование, в котором исследуемый образец грунта подвергается катодной поляризацией электрическим током. В качестве объекта исследования были выбраны “синие” кембрийские глины сиверской свиты. Этот грунт был выбран из-за трёх основополагающих факторов:

1. Кембрийские глины сиверской свиты достаточно однородны, что дает возможность изучить изменение свойств путем сравнения исходных образцов с измененными.
2. В глинистых грунтах хорошо протекают электрокинетические процессы (электроосмос и электрофорез), возникающие вследствие наложения внешнего электрического поля.
3. Глины сиверской свиты хорошо обнажаются на юге Ленинградской области, что делает простым процесс пробоотбора и транспортировки в лабораторию для дальнейшего моделирования и изучения.

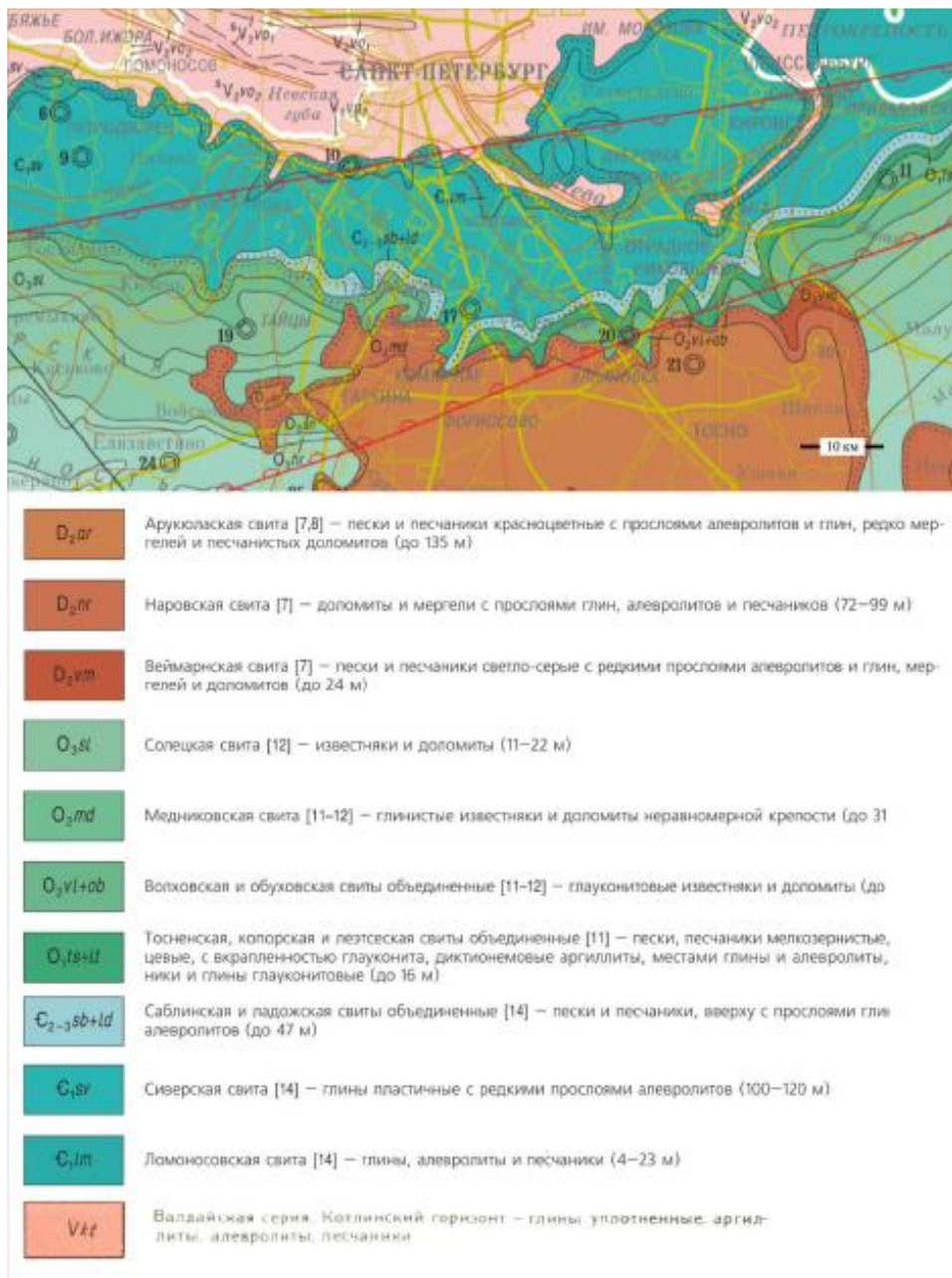
Цельный образец грунта ненарушенного состояния отбирался в городе Никольский, в Ленинградской области. На Рисунке 6 показано примерное место пробоотбора, которое находится на оползне у левого берега реки Тосны.



**Рисунок 6.** Примерное местоположение точки пробоотбора образца грунта (geotree.ru).

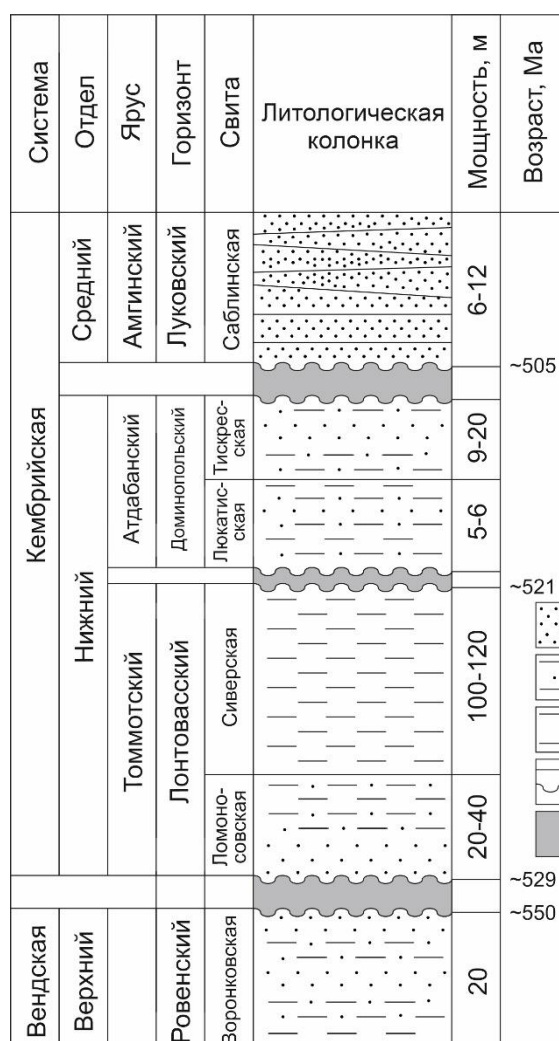
### 3.2 Распространение, залегание и стратиграфия нижекембрийских глин сиверской свиты.

Нижекембрийские отложения выходят на дневную поверхность узкой полосой в пределах Балтийской моноклизы, расположенной на северо-западе Восточно-Европейской платформы (рисунок 7). Они простираются от северного берега Эстонии до юго-восточного берега Ладожского озера, где перекрываются красноцветными песчаниками франского яруса верхнего девона (Вербицкий и др., 2012). На рисунке 8 показано положение свиты стратиграфическом разрезе отложений нижнего кембрия Балтийской моноклинали.





**Рисунок 7.** Фрагмент государственной геологической карты Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35, (N-35), О-36. (Вербицкий В. Р. и др., 2012).



**Рисунок 8.** Сводный стратиграфический разрез отложений нижнего кембрия Балтийской моноклинали, по (Подковыров и др., 2017) и (Ивлева и др., 2016), с изменениями. 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – глины; 4 – стратиграфические контакты (а – согласный, б – несогласный); 5 – стратиграфические перерывы.

Сиверская свита залегает на ломоносовской свите без видимых следов перерыва и сложена довольно однородными глинами голубовато-зеленовато-серыми алевритистыми, гидрослюдистыми, редко монтмориллонитовыми. В нижней части разреза заключены редкие прослои (2–10, реже до 25 см мощностью) песчаников мелкозернистых кварцевых и алевролитов. Глины в различных точках разреза могут иметь разную окраску, они местами коричневые, фиолетово-серые, в кровле часто выветрелые – до белых каолинитовых (Вербицкий и др, 2012). Мощность свиты достигает 100-120 м в наиболее полных разрезах, однако в юго-восточном направлении она уменьшается до 70 м. Также



она имеет свое неформальное название: «горизонт синих глин». Которое обусловлено их ярким серозеленовато-голубым цветом, отличающим их от перекрывающих толщ. Встречаются пятнисто-полосчатые глины с чередующимися зеленовато-голубыми и фиолетово-бурыми прослоями, в которых наблюдаются конкреции и отдельные кристаллы пирита. Также есть следы ползания червеобразных на плоскостях напластования. Минеральный состав глины хлорит-иллитовый, хотя монтмориллонит присутствует в небольшом количестве. Ближе к верху глины часто бывают выветрелые белесовато-зеленые с преобладанием каолинита. В прослоях свиты встречаются мелкозернистые кварц-полевошпатовые песчаники и алевролиты с примесями пирита и глауконита. Цемент песчаников может быть глинисто-кремнистым или карбонатным. В глинах прослеживаются тонкие горизонтальные и косые слои. Химический состав этих глин немного отличается от ломоносовских.: SiO<sub>2</sub> — 57-61 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 15-20 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 5-8%, K<sub>2</sub>O — 4-6,5%, MgO — 2,5-4%, Na<sub>2</sub>O — 1-2%, TiO<sub>2</sub>, CaO— менее 1%, Na<sub>2</sub>O — менее 0,5%, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — менее 0,1% (Шараев, 2022).

Синие глины образовались во время максимальной фазы трансгрессии теплого мелководного моря в нижнем кембрии, связанной с каледонским циклом орогенеза, который начался в раннем кембрии и унаследовал от позднего докембрия особенности тектонической и палеогеографической ситуации. Глинистые породы нижнего кембрия прошли несколько циклов прогрессивного и регрессивного литогенеза, что сильно повлияло на их состояние, степень дезинтеграции и физико-механические свойства, а также на проницаемость (Дашко, 2014).

Синие глины подверглись катагенетическим преобразованиям, которые возникли в результате комплекса следующих процессов: 1) уплотнение осадков под давлением перекрывающих пород; 2) действие тектонических сил в области пересечения Русской платформы и Балтийского щита; 3) изменения термодинамических и физико-химических условий в глубинах пород и образование цементационных связей при повышении концентраций солей в поровых растворах (Дашко, 2000).

В палеозое перекрывающие отложения кембрийских, силурийских и девонских общей толщиной 300-350 метров нагружали кембрийские глины в пределах 60-70 кг/см. Однако с течением времени глины оказались в зоне размыва, что постепенно снижало нагрузку на них. В четвертичный период ледниковый покров эродировал все палеозойские отложения, а ледниковые воды размывали непосредственно кембрийские глины. Толщина ледникового покрова могла достигать 1000 метров, поэтому в период оледенения временная нагрузка на кембрийские глины достигала 80-90 кг/см. В послеледниковый

период кембрийские глины северо-западной части Русской платформы находились под нагрузкой от 1-2 до 10-20 кг/см под покровом четвертичных отложений толщиной от 5-10 до 50-100 метров (Дашко, 2000).

Таким образом, кембрийские глины были подвергнуты нагрузке два раза: первая, меньше величиной, но более длительная, произошла в палеозое, а вторая, гораздо более интенсивная, но кратковременная, произошла во время ледникового периода. В течение длительного геологического периода эти породы были разгружены, что привело к разрушению структуры под воздействием гидратации (Ломтадзе, 1958).

Синие глины характеризуются массивной микротекстурой, переходящей к сланцеватой, это происходит из-за того, что основная глинистая масса породы ориентирована одинаково. Структура глин пелитовая (Ломтадзе, 1958).

Микротекстура синих глин массивная, переходная к сланцеватым, так как основная глинистая масса породы оптически ориентирована одинаково, структура пелитовая или микролепидобластовая. В естественном залегании они имеют большую влажность и тугопластичную консистенцию (Ломтадзе, 1958)

Синие глины имеют весьма однородный гранулометрический состав. Содержание глинистых фракций в них всегда превышает 30%, а иногда может достигать почти 60%. Пылеватые фракции присутствуют в диапазоне от 40 до 50-54%, тогда как песчаные фракции не значительны. Следовательно, с точки зрения гранулометрического состава, можно классифицировать синие глины как алевролитовые или тяжелые алевролитовые глины. В составе синих глин найдено 17 минералов. Основная часть породы состоит из тонкочешуйчатой серицитоподобной слюды. Там также встречаются мусковит (1%), бурые слюды (0,2%), кварц (14,6%) и полевые шпаты (3%). Хлорит, глауконит, карбонат, пирит, бурые гидроокислы железа, турмалин, циркон, апатит, амфибол, эпидот и рутил присутствуют в качестве незначительных примесей (Ломтадзе, 1958).

В фракции 0,05-0,01 мм, легкие минералы составляют 99,25%, тогда как тяжелые минералы составляют только 0,75%. В группе легких минералов основную массу занимает кварц, тем временем пирит является основным тяжелым минералом. Минеральный состав мелкодисперсной части синих глин отличается от состава крупнодисперсной части. Исследования синих глин с месторождения Саблинского показали, что мелкодисперсная часть состоит из гидрослюды и монтмориллонита с незначительным количеством кварца. В верхних горизонтах этих глин преобладают гидрослюды, а на большей глубине - монтмориллониты (Ломтадзе, 1958).

#### Глава 4. Основные результаты исследования

Отобранный монолит глины сиверской свиты был доставлен в инженерно-геологическую лабораторию СПбГУ. Для того, чтобы собрать установку, необходимо было придать монолиту форму цилиндра, так как было необходимо поместить в него наш исследуемый образец, процесс подготовки монолита показан на Рисунке 9. Для установки были необходимы две металлические пластины, два провода, источник тока, пластиковый цилиндр, марля и, самое главное, монолит глины сиверской свиты в форме цилиндра.



**Рисунок 9.** Подготовка монолита кембрийской глины для проведения физического моделирования.

Далее был произведен сбор установки, моделирующей работу системы электрохимической защиты от коррозии. На дно цилиндра была помещена пластина, выступающая в роли катода, затем в цилиндр был помещен образец грунта, к которому с верхнего торца была помещена вторая пластина, выступающая как анод, обе пластины соединялись с регулируемым источником постоянного тока. В качестве электродов использовались две стальные пластины круглого сечения диаметром 13 см. Общий вид установки приводится на рисунке 10.



**Рисунок 10.** Установка физического моделирования.

Поляризация образца постоянным током величиной 56-87 мА происходила непрерывно в течение 57 суток. Значение силы тока постепенно уменьшалось, как видно на Рисунке 10, начальное значение силы тока было равно примерно 87 мА, далее оно постепенно уменьшалось, конечно значение составляло 56 мА. Ежедневно проводился мониторинг значений силы тока.

После окончания поляризации образец глинистого грунта был вскрыт для изучения физико-механических характеристик. Также были выделены две зоны (рисунок 11). Зона 1 – нижняя часть монолита грунта, находится возле катода, характеризуется пониженной влажностью, большей цементацией, распадается на отдельные. Зона 2 – верхняя зона,

находится ближе к аноду, в отличие от грунта из зоны 1 более увлажненная, пластичная, менее сцементированная. Длина зоны 1 – 9 см, зоны 2 – 11 см.



**Рисунок 11.** Монолит грунта после физического моделирования. Красной линией обозначена область зоны 1, красной – зоны 2.

Были определены гранулометрический состав, плотность  $\rho$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), плотность частиц грунта  $\rho_s$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), плотность скелета грунта  $\rho_d$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), влажность  $w$  (%), пористость  $n$  (%), влажность на границе раската  $w_p$  (%) и текучести  $w_L$  (%), число пластичности  $I_p$  (%), показатель текучести  $I_L$  (ед.), водородный показатель  $pH$ , а также угол внутреннего трения  $\varphi$  (°) и удельное сцепление  $C$  (кПа).

Результаты исследований представлены в таблице 3 и 4.

**Таблица 3.** Физико-механические свойства грунта до и после физического моделирования.

Характеристики грунта	Исходный грунт	Грунт из зоны 1	Грунт из зоны 2
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,96	1,98	1,97
Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,79	2,79	2,78
Плотность скелета грунта $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1,48	1,51	1,43
Влажность $w$ , %	32,02	31,23	38,06
Пористость $n$ , %	46,85	45,85	48,75
Влажность на границе раската $w_p$ , %	21,00	34,64	27,76
Влажность на границе текучести $w_L$ , %	47,00	69,01	47,67
Число пластичности $I_p$ , %	26,00	34,37	19,91
Показатель текучести $I_L$ , ед.	0,42	-0,10	0,52
Водородный показатель рН	7,0	9,5	9,0
Угол внутреннего трения $\varphi$ , °	3 / 5*	12 / 9*	10
Удельное сцепление $C$ , кПа	21 / 8*	26 / 1*	16

\* - слева указаны значения, полученные методом трехосного сжатия, справа – методом одноплоскостного среза.

**Таблица 4.** Гранулометрический состав грунта до и после физического моделирования.

Песчаная фракция				Пылеватая фракция		Глинистая фракция
1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,002 мм	<0,002 мм
Исходный грунт						
0,00%	0,00%	0,27%	4,14%	36,36%	36,37%	22,86%
Грунт из зоны 2						
0,07%	0,07%	0,6%	6,08%	27,07%	29,67%	36,44%
Грунт из зоны 1						
1,53%	3,33%	4,83%	6,13%	24,94%	29,09%	30,13%

Определение *плотности* грунта происходило методом режущего кольца. Было выбрано кольцо для намёрзлых пылевато-глинистых грунтов. Плотность грунта и плотность частиц грунта практически не подверглись изменениям.



Необходимо отметить, что изменение *влажности* наблюдалось в обоих образцах. Перейдем к рассмотрению образца из зоны 1. В то время как ожидалось увеличение влажности в данном образце, произошло уменьшение влажности. Такой результат свидетельствует о наличии конкретных физико-химических процессов, происходящих в данном образце. Вероятной причиной является электроосмотическое движение воды в порах грунта. Этот процесс может привести к заполнению пор влагой, что, в итоге, приводит к увеличению показателя влажности. Однако, физико-химические процессы, связанные с цементацией частиц в грунте, такие как повышение рН и образование минерала портландита, могут оказать противоположное воздействие на показатель влажности, что в итоге может привести к его уменьшению. Перейдем к рассмотрению образца из зоны 2. На этот раз наблюдалось существенное увеличение показателя влажности. Это связано с электроосмотическим движением влаги. В результате данного процесса поры грунта заполняются водой, мигрирующей в сторону катода. В данном случае цементации не произошло, так как водородный показатель порового раствора не достиг высоких значений, необходимых для минералооб]разования.

Изменения *пористости* грунта наблюдались в обоих образцах. Рассмотрим образец из зоны 1, где значение незначительно уменьшилось, что связано с процессом цементации частиц грунта. Пористость грунта, отобранного в зоне 2, увеличилась на 2,1%. Такой характер изменения провоцирует электроосмотическое движения воды, за счет электроосмотической миграции которой происходит увеличение объема пор.

Изменение *влажности на границе раската, влажности на границе текучести и числа пластичности* также наблюдалось в обоих образцах. У образца из зоны 1 увеличение всех параметров произошло за счет цементации частиц, увеличения дисперсности и рН. Характер изменения параметров у образца из зоны 2 немного иной, в данном случае произошло увеличение влажности на границе текучести, однако влажность на границе раската осталась практически той же, что и у исходного образца, вследствие чего число пластичности уменьшилось. Такой характер изменений связан, скорее всего, с изменением гранулометрического состава, емкость обмена, состав и концентрация порового раствора, степень дисперсности (Лысенко, 1980). Однако на данный момент точную зависимость параметров пластичности от изменения тех или иных свойств грунта проследить невозможно, поэтому это может стать предметом дальнейших исследований.

Изменения *показателя текучести* носят различный характер. У образца из зоны 1 его значение уменьшилось с 0,42 до -0,10, что связано, скорее всего, с цементацией частиц

грунта, в то время у образца из зоны 2 произошло увеличение показателя с 0,42 до 0,52, это является следствием увеличения влажности.

Увеличение *водородного показателя* прослеживается в образцах из обеих зон. У грунта из зоны 1 оно более характерное, так как он находится непосредственно у катода. Такой характер изменения связан с протеканием реакции кислородной деполяризации у катода, при которой происходит выделение  $\text{OH}^-$  группы, что и делает среду более щелочной – соответственно увеличивает рН. По результатам замеров рН были определены значения 9 и 9,5 в зависимости от образца, однако с помощью рентгенофазового анализа удалось определить, что образовался такой минерал как портландит, что происходит в средах, в которых рН превышает 12,5. Таким образом, выходит, что значение рН у образца из зоны 1 в определенный момент времени достигало 12,5, что говорит об увеличении на минимум 78%.

*Гранулометрический состав* образцов был определен в инженерно-геологической лаборатории СПбГУ ареометрическим методом в соответствии с ГОСТ 12536-2014. Результаты анализа приведены в таблице 4.

Из таблицы видно, что показатель претерпел сильные изменения. В образце из зоны 1 на 8% увеличилось количество глинистой фракции, в то же время количество песчаной фракции также увеличилось на 11%, однако содержание пылеватой фракции уменьшилось на 17%. Такие изменения связаны с несколькими процессами, происходящими во время физического моделирования. Следствием такого явления как электрокоагуляция является увеличение количества песчаной фракции, а увеличение содержания глинистых частиц связано с диспергированием частиц. По сути, пылеватые частицы преобразовались в частицы других размеров благодаря двум вышеупомянутым явлениям. Образец из зоны 2 имеет схожие изменения в гранулометрическом составе. Здесь преобладает *диспергирование*, так как количество глинистой фракции увеличилось на 14%, а песчаной всего лишь на 2%.

Для определения *угла внутреннего трения* и *удельного сцепления* был проведен быстрый одноплоскостной срез исходного грунта и образца из зоны 1. В таблице 3 приведены результаты испытаний, значения которых незначительно отличаются от трехосного сжатия. Скорее всего, причиной является консолидация, которая практически отсутствует при быстром срезе. За счет этого сцепление и угол внутреннего трения уменьшаются.



Так как при быстром одноплоскостном дренированном срезе происходит потеря влажности образца, то было принято решение совершенствовать метод исследования и провести консолидированно-недренированное **трехосное сжатие**, в этом случае влага, выделяющаяся в результате действия нагрузки, остается в системе.

Для испытания методом **трехосного сжатия** были отобраны шесть образцов грунта, три из катодной зоны (зона 1) и три из зоны 2. Также для анализа изменения характеристик испытаниям были подвергнуты три образца исходного грунта.

Испытания методом трехосного сжатия проводились с целью определения таких механических свойств как угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$ .

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов в камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное вертикальное напряжение;

$\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – минимальные, они же промежуточные главные горизонтальные напряжения.

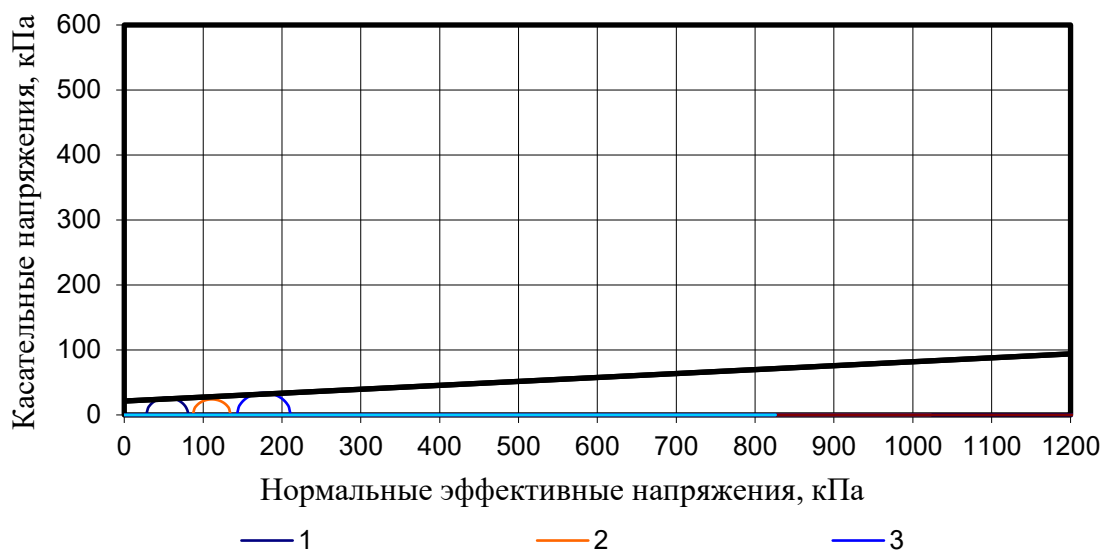
Испытание было проведено по схеме консолидированно-недренированного (КН). Такая схема была выбрана так как в рамках исследования необходимо определить прочностные характеристики, такие как угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$ .

Эффективное напряжение консолидации выбиралось в соответствии с таблицей 1 в ГОСТ 12248.3-2020. Для наших образцов оно составляло 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа.

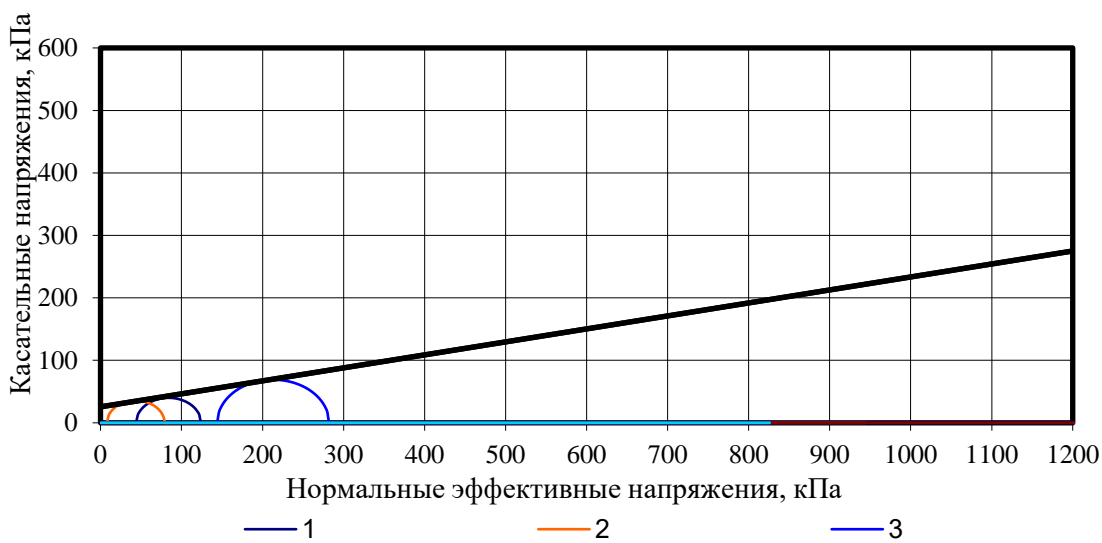
Процедура испытаний выполнена в соответствии с порядком, установленным в ГОСТ 12248.3-2020.

Результаты трехосных испытаний: угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$ , приведены в таблице 3.

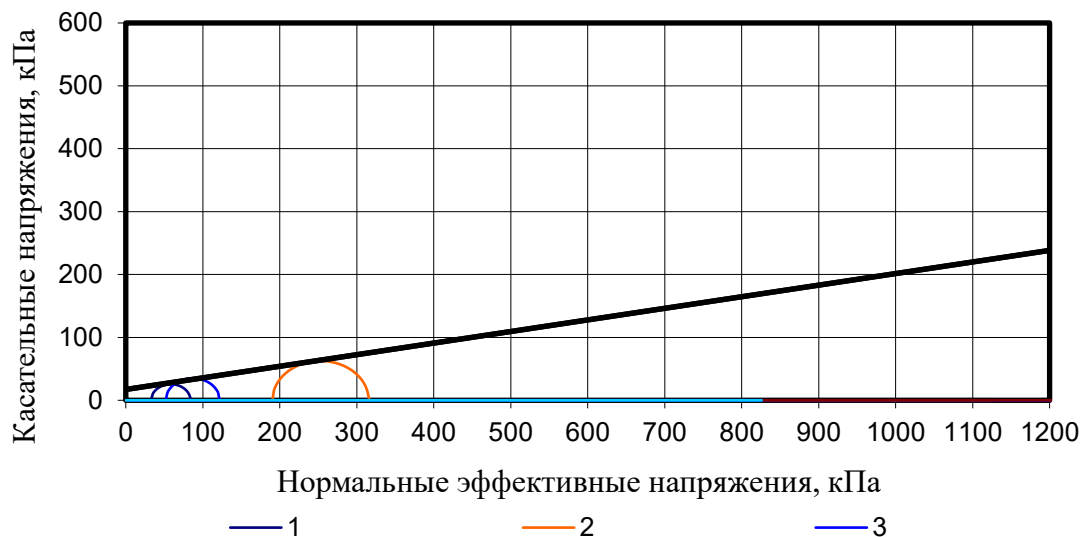
На рисунках 12, 13 и 14 приведены диаграммы прочности Кулона-Мора, построенные по результатам трехосного сжатия образцов глины сиверской свиты. Построение было выполнено в программе Excel.



**Рисунок 12.** Диаграмма прочности Кулона-Мора, построенная по результатам трехосного сжатия исходного грунта.



**Рисунок 13.** Диаграмма прочности Кулона-Мора, построенная по результатам трехосного сжатия грунта, измененного в процессе физического моделирования и отобранного из зоны 1.



**Рисунок 14.** Диаграмма прочности Кулона-Мора, построенная по результатам трехосного сжатия грунта, измененного в процессе физического моделирования и отобранного из зоны 2.

По сравнению с исходным грунтом механические свойства исследуемых образцов подверглись сильным изменениям.

Угол внутреннего трения у образца из зоны 1 увеличился с  $3^\circ$  до  $12^\circ$ , у образца из зоны 2 увеличился с  $3^\circ$  до  $10^\circ$ . Это связано, прежде всего, с увеличением количества песчаной фракции.

Удельное сцепление у образца из зоны 1 увеличилось с 21 кПа до 26 кПа, что связано, скорее всего, с цементацией частиц грунта в связи с образованием минерала портландит. У образца из зоны 2 удельное сцепление уменьшилось с 21 кПа до 16 кПа. Уменьшение сцепления связано с многочисленными факторами, среди которых присутствие свободных легкорастворимых солей или высокоминерализованных поровых растворов, что приводит к малой мощности пленок связанной воды. При выщелачивании гидрофильность засоленных глин восстанавливается, пленки связанной воды утолщаются, удельное сцепление резко понижается. С повышением пористости – влажности водонасыщенных глинистых грунтов сопротивление сдвигу также уменьшается (Лысенко, 1980).

В рамках исследований прошлого года было проведено схожее физическое моделирование, описанное в данной работе. Были получены образцы с измененными характеристиками, однако в меньшем количестве. В связи с чем на определение деформационных свойств был отправлен образец грунта не из катодной зоны (зона 1), а из зоны 2.

Образцы были доставлены в лабораторию ЗАО “ЛенТИСИЗ”, где было проведено исследование грунта на одноосное сжатие. Для исследования был отобран образец из зоны 2 и образец исходного грунта. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ. Также были определены некоторые физические свойства, представленные в таблице 5.

**Таблица 5.** Физические характеристики образцов.

Характеристики грунта	Исходный грунт	Грунт из зоны 2
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,94	1,97
Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,78	2,78
Плотность скелета грунта $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1,50	1,43
Влажность $w$ , %	29,10	38,06
Коэффициент пористости $e$ , ед.	0,853	0,978
Влажность на границе раската $w_p$ , %	26,80	27,76
Влажность на границе текучести $w_L$ , %	48,20	47,67
Число пластичности $I_p$ , %	21,40	19,91
Показатель текучести $I_L$ , ед.	0,11	0,52

Из деформационных свойств были определены компрессионный модуль деформации, одометрический модуль деформации и коэффициент сжимаемости, результаты исследования приведены в таблице 7.

Расчет деформаций проводился в интервале (0,1;0,3) МПа.

Коэффициент бокового давления был рассчитан по следующей формуле:

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}$$

Где  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации, 0,42.

$$\beta = 1 - \frac{2 \cdot 0,42^2}{1 - 0,42} = 0,39$$

Коэффициент сжимаемости,  $m_0$ , МПа<sup>-1</sup> считался по следующей формуле:

$$m_0 = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1}$$

Где:

$e_1, e_2$  – коэффициент пористости при нагрузке 0,1 МПа и 0,3 МПа соответственно;

$p_1, p_2$  – 0,1 МПа и 0,3 МПа соответственно.

Одометрический модуль деформации  $E_{oed}$ , МПа, считался по формуле:

$$E_{oed} = \frac{1 + e}{m_0}$$

Где:

$e$  – коэффициент пористости недеформированного грунта.

Компрессионный модуль деформации  $E_K$ , МПа, считался по формуле:

$$E_K = \frac{1 + e}{m_0} \cdot \beta$$

Для того, чтобы вычислить вышеперечисленные величины, нужно подставить соответствующие значения из таблицы 6 в формулы, коэффициент бокового давления  $\beta$  общий для обоих образцов, его значение также рассчитано выше.

**Таблица 6.** Значения коэффициента пористости грунтов при определенной нагрузке.

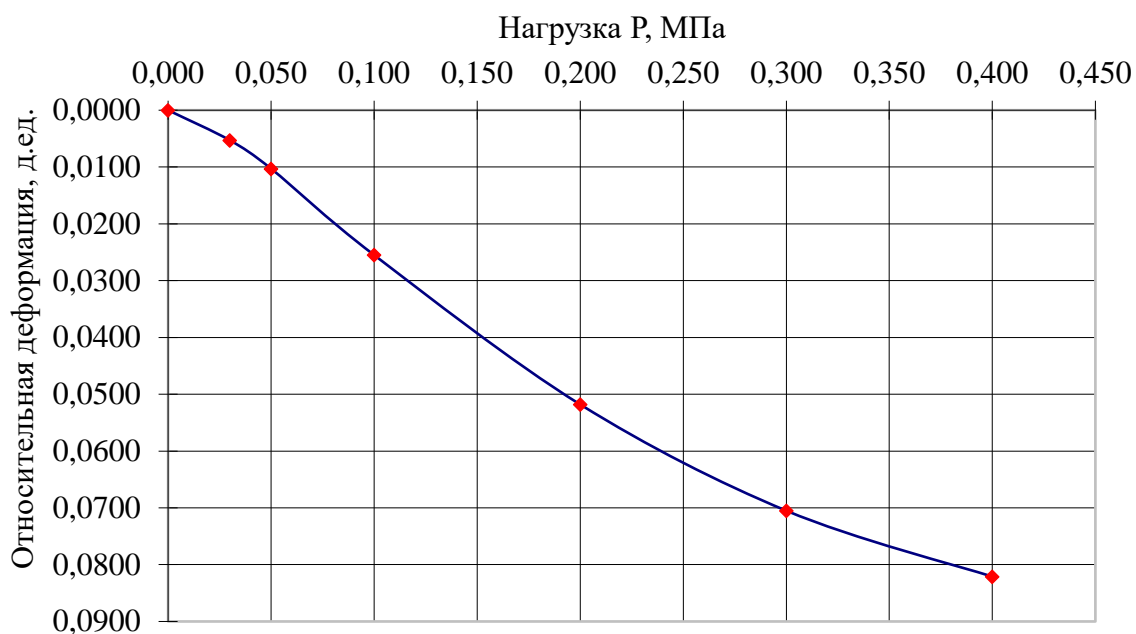
	Исходный грунт	Грунт из зоны 2
Нагрузка P, МПа	Коэффициент пористости, д. ед.	Коэффициент пористости, д. ед.
0,10	0,8057	0,8706
0,30	0,7224	0,7551

Результаты расчетов приведены в таблице 7.

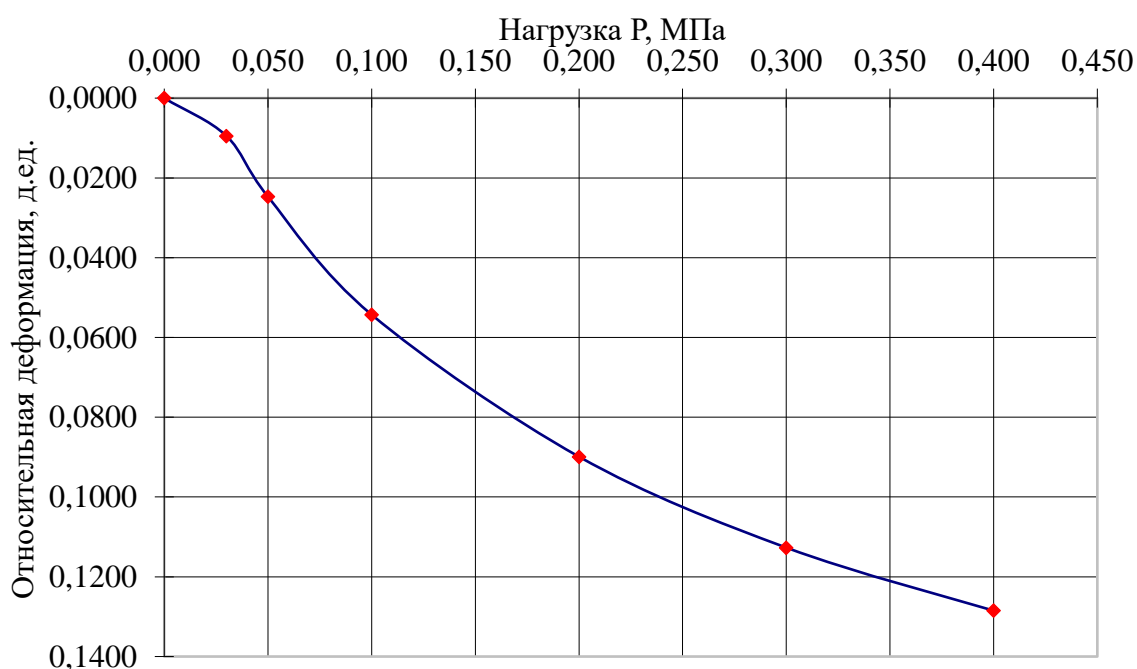
**Таблица 7.** Деформационные свойства грунтов.

Свойство	Исходный грунт	Образец из зоны 2
Коэффициент сжимаемости, $m_0$ , МПа <sup>-1</sup>	0,417	0,578
Модуль одометрический $E_{oed}$ , МПа	4	3
Модуль компрессионный $E_K$ , Мпа	1,56	1,17

Также по результатам испытаний были построены кривые тарировки компрессионного прибора (рисунок 15 и рисунок 16).



**Рисунок 15.** Кривая тарировки компрессионного прибора для исходного грунта.



**Рисунок 16.** Кривая тарировки компрессионного прибора для грунта из зоны 2.

Анализ результатов изменения деформационных свойств показал уменьшение компрессионного модуля деформации, что свидетельствует об ухудшении деформационных свойств. Таким образом, устойчивость грунта к вертикальным сжимающим нагрузкам уменьшилась, что связано, скорее всего, с увеличением коэффициента пористости,

#### **Выводы к главе 4.**

1. Характер изменения физических свойств исследуемого грунта довольно разный. Некоторые параметры, такие как плотность, плотность частиц грунта и плотность скелета грунта практически не подверглись изменениям, другие же – влажность, пористость, влажность на границе раската, влажность на границе текучести, число пластичности, показатель текучести, рН подверглись сильным изменениям.
2. Гранулометрический состав грунта значительно изменился. У обоих образцов, подвергшихся катодной поляризации, уменьшилось количество пылеватой фракции и увеличился процент содержания песчаной и глинистой фракций.
3. Прочностные свойства грунтов, подвергшихся физическому моделированию, в общем, улучшились. Только у образца из зоны 2 удельное сцепление незначительно уменьшилось.
4. Деформационные свойства грунта из зоны 2 ухудшились, относительные деформации увеличились.

## Заключение

Подземные металлические сооружения, такие как газопроводы, нефтепроводы, мосты, фундаменты зданий и сооружений и другие объекты во время своей эксплуатации подвергаются электрохимической коррозии, от которой в основном используют пассивную и активную защиту, основным методом которой является катодная защита.

В результате взаимодействия глинистых грунтов и электрического поля протекают такие электрокинетические явления как электроосмос и электрофорез, а также электрокоагуляция глинистых частиц. Вследствие чего происходит изменение физических, физико-химических и физико-механических свойств. В результате выполненных исследований выявлено увеличение показателей прочностных свойств кембрийской глины в результате катодной поляризации. В то же время наблюдается уменьшение значений деформационных свойств.

В результате катодной поляризации в тонкодисперсных породах происходит образование слоев техногенного глинистого грунта, расположенных в непосредственной близости к поверхности катодно-защищаемого подземного металлического сооружения. В зависимости от удаления от поверхности сооружения (зона 1 или зона 2) изменения свойств сильно варьируют, что в свою очередь влияет на прочность и деформируемость грунта.

Мощность слоя техногенного грунта, образованного в результате физического моделирования, составляет порядка 9-11 см, однако в реальных условиях работы электрохимической защиты подземных металлических сооружений, эксплуатируемых длительное время (десятки лет), она может быть иной. Это стоит исследовать в дальнейшем.

Техногенно-измененные глинистые грунты также могут изменить качество оснований для различных зданий и сооружений, конструкций, мостов, дорог и др., что в свою очередь может привести к непредвиденным осадкам и деформациям.

В рамках будущих исследований планируется комплексное изучение изменений свойств и структуры грунтов, с целью полного объяснения и интерпретации полученных результатов.



## Список литературы

1. Баранов В.Я., Фролов В.И. Электрокинетические явления. Учебное пособие.-М.: РГУ нефти и газа, 2002.- 53 с.
2. Бурлуцкий С.Б., Еремеева А.А. Коррозия и защита от коррозии конструкционных материалов и сооружений. Издательство СПбГУ, 2020. 37 с
3. Вербицкий, В. Р., Вербицкий, И. В., Васильева, О. В. и др. (2012). Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35 (Псков), (N-35), О-36 (Санкт-Петербург). Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
4. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.
5. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости.
6. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
7. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик
8. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
9. Грунтоведение / Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С., под ред. В. Т. Трофимова. – М.: Издательство МГУ, 2005. 1024 с.
10. Дашко, Р.Э. Геотехническая диагностика коренных глин Санкт-Петербургского региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи). / Р.Э. Дашко // Реконструкция городов и геотехническое строительство. - 2000. - № 1. -С. 95-100.
11. Дашко, Р.Э. Геотехнические аспекты исследований нижнекембрийских синих глин Санкт-Петербурга как основания сооружений. / Р.Э. Дашко, А.А. Коробко // Жилищное строительство - 2014. - №9. – С.19-22.
12. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
13. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. -М.: Издательство МГУ, 1988. -177 с.
14. Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Ершова В.Б. и др. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочных цирконов из верхневендско-нижнекембрийских

- отложений востока Балтийской моноклизы // Докл. РАН. 2016. Т. 468, № 4. С. 441–446.
15. Королёв В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – М.: Издательство МГУ, 2015. 468 с.
  16. Королёв В.А. Лабораторные работы по электроповерхностным явлениям в грунтах / Учебное пособие. – М., ООО «Самполиграфист», 2022.– 136 с.\
  17. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины русской платформы, записки Горного института. 1958. № 2 Том 34. С. 154.
  18. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. – М.: Недра, 1980. – 272 с.
  19. Мальцева Г. Н. Под редакцией д. т. н., профессора С. Н. Виноградова. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2000. - с.: 55.
  20. Никольский Б. П. Справочник химика. Том 3. Химическое равновесие и кинетика свойства растворов. Электродные процессы. Химия, Москва-Ленинград, 1965 г., 1005 стр.
  21. Подковыров, В.Н., Маслов, А.В., Кузнецов, А.Б., Ершова, В.Б., 2017. Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда – нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали. Стратиграфия 25, 3–23.
  22. Шараев Д. В. Особенности инженерно-геологического строения толщи кембрийских глин на примере карьера в г. Никольское Ленинградской области, ВКР, с.38.
  23. Шубенкова, Е. Г. Физическая и коллоидная химия: практикум: в 2 ч. / Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016.