

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПБГУ)

Институт наук о Земле

Кафедра грунтоведения и инженерной геологии

ШАРАЕВ Дмитрий Васильевич

Выпускная квалификационная работа

**ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ТОЛЩИ
КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН НА ПРИМЕРЕ КАРЬЕРА В Г. НИКОЛЬСКОЕ**

Основная образовательная программа бакалавриата

«Геология»

Научный руководитель: к. г.-м. н.,
доцент БУРЛУЦКИЙ Станислав Борисович

Рецензент: к. г.-м. н.,
доцент КУЛИКОВА Наталья Владимировна

Санкт-Петербург

2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОЛЩИ НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ ГЛИН.....	5
1.1. Распространение, залегание и стратиграфия	5
1.2. Литологическая характеристика	6
1.3. Геохимическая характеристика.....	8
1.4. История геологического развития.....	9
1.5. Гляциодислокации.....	10
1.6. Гидрогеология.....	11
1.7. Практическое использование	14
2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОЛЩИ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН	16
2.1. Гранулометрический состав	16
2.2. Физические свойства	17
2.3. Механические свойства.....	19
2.4. Характеристика глин в зонах трещиноватости.....	20
2.5. Геодинамические особенности.....	23
2.6. Использование синих глин в качестве основания и среды для строительства сооружений	24
3. СТРОЕНИЕ ТОЛЩИ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН В КАРЬЕРЕ В Г. НИКОЛЬСКОЕ.....	25
3.1. Общая информация.....	25
3.1.1. Информация о кирпичном заводе и продукции.....	25
3.1.2. Информация о карьере	27
3.2. Полевое исследование синих глин в карьере.....	28
3.3. Изменение свойств глин по разрезу карьера.....	29
3.2.1. Химический состав	29
3.2.2. Гранулометрический состав	31
3.2.3. Минералогический состав.....	32
3.2.4. Физические свойства	34
3.2.5. Трещиноватость и оползневые процессы.....	36
3.4. Сравнение свойств глин в карьере и в разрезе всей толщи	36
Заключение.....	38
Список использованной литературы	39

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается рост населения Санкт-Петербургской городской агломерации. Возникающий спрос на строительство новых жилищных массивов и инфраструктурных объектов требует поставок больших объёмов строительных материалов компаниям-застройщикам (ЛСР.Стеновые, 2022). Соответственно, растёт необходимость в добыче больших объёмов сырья для производства стройматериалов. Одним из наиболее востребованных видов строительных материалов являются керамические изделия: клинкер, кирпичи, плитка и др.

Основное сырьё для их изготовления — глина, вода и различные добавки (песок, древесные опилки и пр.). Каждое предприятие, выпускающее стройматериалы, имеет собственные составы добавок, зависящие от технологии изготовления и особенностей глинистого сырья. Наиболее часто используемым сырьём в пределах Ленинградской области являются нижнекембрийские «синие» глины, добываемые открытым способом. Даже в однородной с первого взгляда толще могут быть выделены интервалы разреза, в пределах которых глины будут удовлетворять технологическим критериям. В то же время глинистое сырьё, добытое из другой части разреза, им не соответствует, созданная из него керамическая продукция не выдерживает нормативные нагрузки.

До сих пор вопросами выделения перспективных уровней разреза, из которых целесообразна добыча глинистого сырья, занимаются технологи керамических предприятий. С точки зрения геологии детализация разреза всей толщи синих глин под нужды строительной промышленности не производилась. Существенный вклад в поиск решения этой проблемы может внести изучение особенностей геологического и инженерно-геологического строения толщи нижнекембрийских глин. Последнее связано с тем, что помимо сырья глины являются основанием для многих сооружений на юге Санкт-Петербурга и в Ленинградской области. Отдельный интерес представляет изучение оползневых процессов, негативно влияющих на инфраструктуру.

Объектом данного исследования стала толща нижнекембрийских глин на крупном искусственном обнажении — карьере в г. Никольское Ленинградской области. Карьер разрабатывается компанией «ЛСР. Стеновые материалы», ей же принадлежит расположенный рядом завод по производству керамики.

Целью исследования является выделение интервалов в разрезе синих глин для решения технологических задач, основанное на различных особенностях строения толщи.

Для этого мной были поставлены и выполнены следующие задачи:

1. Анализ литературных данных о строении толщи нижнекембрийских «синих» глин, их свойств и связанных с ними геодинамических процессов.
2. Визуальное изучение толщи, отбор образцов и лабораторные исследования
3. Определение особенностей в строении толщи глин
4. Выделение интервалов разреза, наиболее пригодных для производства керамики

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к выделению особенностей строения толщи глин. Её изучение производилось с инженерно-геологической, гидрогеологической, минералогической, геохимической, структурно-геологической точек зрения.

1. ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОЛЩИ НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ ГЛИН

1.1. Распространение, залегание и стратиграфия

Нижнекембрийские отложения выходят на дневную поверхность узкой полосой в пределах Балтийской моноклизы, расположенной на северо-западе Восточно-Европейской платформы (рис. 1). Они простираются от северного берега Эстонии до юго-восточного берега Ладожского озера, где перекрываются красноцветными песчаниками франского яруса верхнего девона (Вербицкий и др., 2012).

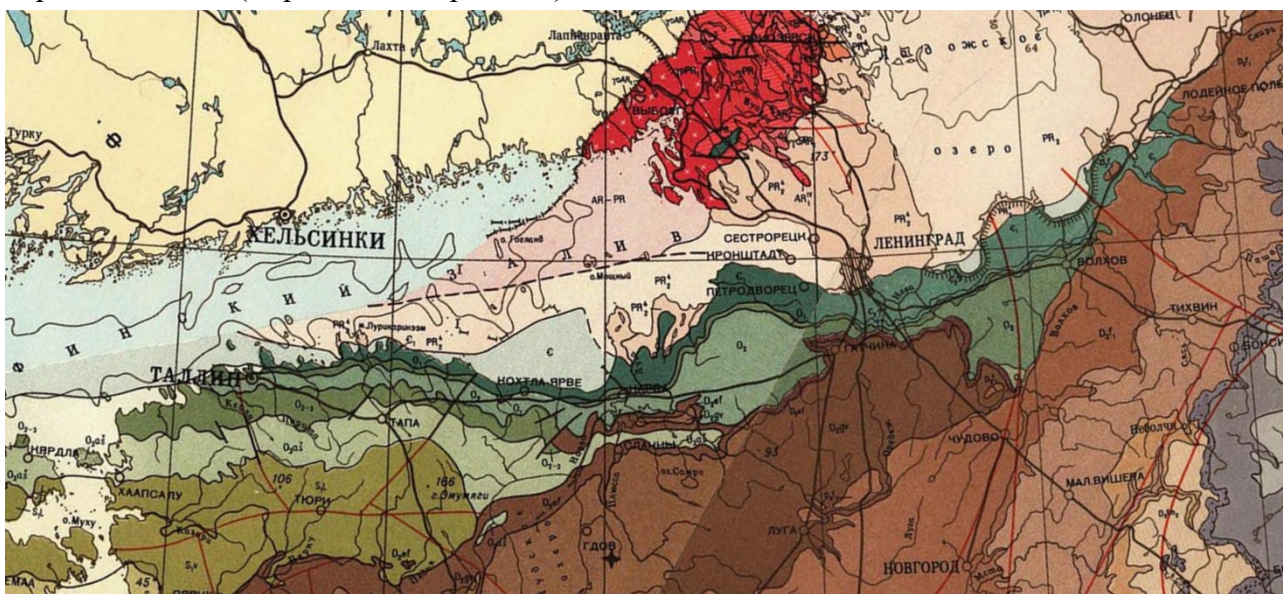


Рис. 1. Распространение нижнекембрийских отложений Балтийской моноклизы. Фрагмент геологической карты СССР масштаба 1:2 500 000, 1983.

В рельефе эта полоса проявлена как понижение перед Балтийско-Ладожским уступом (глинтом). Будучи легко размываемыми породами, глины являются основанием уступа, выполненным прочными известняками среднего ордовика.

Нижнекембрийские породы повсеместно залегают с разрывом (или без видимых следов разрыва) на песчано-глинистых отложениях василеостровской и воронковской свит верхнего венда. В сумме верхневендские и нижнекембрийские отложения слагают первый структурный ярус плитного комплекса Восточно-Европейской платформы (Селиванова и Кофман, 1971).

Мощность нижнекембрийских толщ составляет менее 150 м. Они полого погружаются в юго-юго-восточном направлении, углы падения в среднем составляют чуть меньше 1° (2-8 м/км). Постепенно они выклиниваются; по скважинным данным уже в районе г. Ржев их мощность составляет менее 5 м (Селиванова и Кофман, 1971).

С размывом породы перекрываются среднекембрийскими отложениями амгинского и майского ярусов, ордовикскими известняками, а также более поздними образованиями.

Нижнекембрийские толщи представлены ломоносовской, сиверской, люкатиской и тискреской свитами (Вербицкий и др., 2012). Взаимоотношения между ними показаны на сводном стратиграфическом разрезе (рис. 2).

Широкое практическое применение имеют только отложения сиверской свиты. Тем не менее, для получения полной картины условий их осадкообразования и свойств необходимо рассмотреть смежные с ними покрывающие и перекрывающие толщи.

1.2. Литологическая характеристика

В целом нижнекембрийские толщи представлены морскими и прибрежно-морскими песчано-глинистыми осадками. Различия в их литологическом составе обусловлены сменами гидродинамического режима бассейна осадконакопления и климатическими изменениями.

Ломоносовская свита сложена неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и глинами. Мощность её изменяется в пределах от нескольких метров до 40-45 м. В нижней части разреза преобладают песчаники и алевролиты преимущественно кварцевого состава (60-80%), зёрен полевых шпатов значительно меньше.

Цемент контактовый, глинисто-кварцевый, с пятнами карбоната и пирита. В тяжёлой фракции встречаются циркон, амфибол, дистен, пирит, глауконит, сидерит и анкерит. Песчаники серые, иногда с розоватым оттенком, с прослеживаемой тонкой горизонтальной и косой слоистостью. Выше по разрезу содержание глинистого материала постепенно возрастает; тонкие глинистые прослойки переходят в отдельные пропластки. Глины серовато-зелёные,

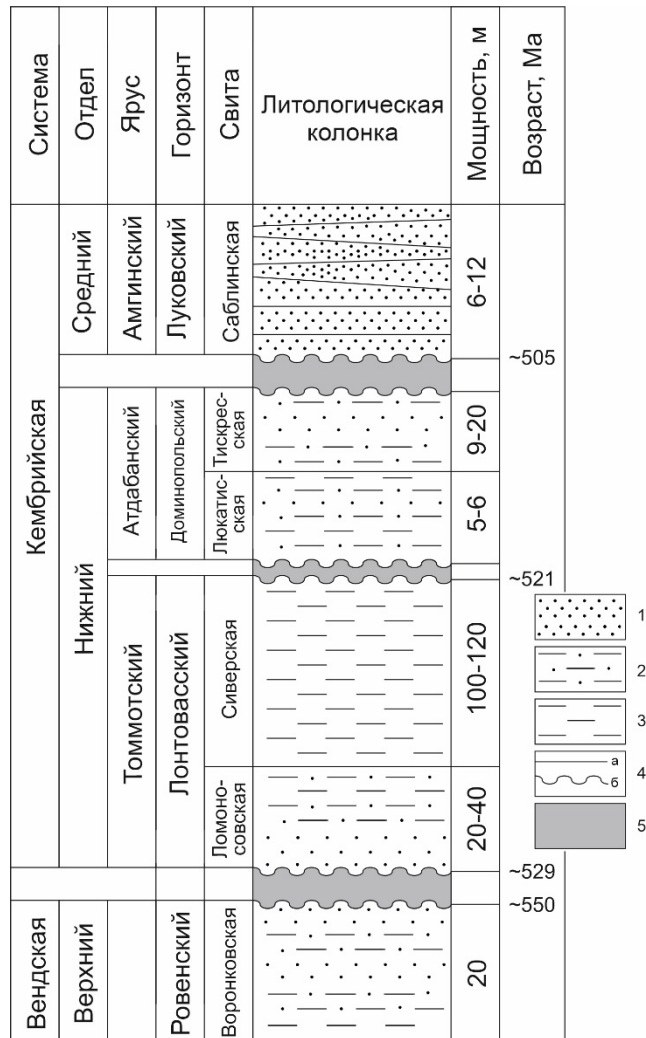


Рис. 2. Сводный стратиграфический разрез отложений нижнего кембрия Балтийской моноклинали, по (Подковыров и др., 2017) и (Ивлева и др., 2016), с изменениями. 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – глины; 4 – стратиграфические контакты (а – согласный, б – несогласный); 5 – стратиграфические перерывы.

песчано-алевритистые, содержат примазки органического вещества и тонкокристаллического пирита. По минеральному составу глины состоят из иллита, хлорита, смешаннослойных минералов иллит-сметитового ряда; присутствует примесь каолинита, гидроокислов железа, сидерита. Химический состав глин следующий: SiO_2 — 58-62 %, Al_2O_3 — 9-20 %, Fe_2O_3 — 4-8%, K_2O — 2-4%, MgO — 0,6-4%, Na_2O — 1-2%, P_2O_5 — 0,1-1,6%, TiO_2 , CaO , — менее 1-2%, MnO , Cr_2O_3 — менее 0,1-0,2 % (Горохов и др., 1994).

Сиверская свита залегает на Ломоносовской свите без видимых следов перерыва. Согласно современной геологической литературе (Подковыров и др., 2017), свита представлена довольно однородными глинами алевритистыми с редкими прослоями песчаников и алевролитов. Мощность свиты в наиболее полных разрезах составляет 100-120 м, она сокращается в юго-восточном направлении до 70 м. Неформальное название свиты — «горизонт синих глин» — обусловлено их ярким серозеленовато-голубым цветом, отличающим их от перекрывающих толщ. Местами глины песчанистые, пятнисто-полосчатые (чередование прослоев зеленовато-голубых и фиолетово-бурых оттенков). Присутствуют конкреции и одиночные кристаллы пирита, на плоскостях напластования часты бурые пиритизированные следы ползания червеобразных. По минеральному составу глины хлорит-иллитовые, в значительно меньшей степени присутствует монтмориллонит. Ближе к кровле глины часто выветрелые, белесовато-зелёные с преобладанием каолинита. Наблюдаемые в прослоях свиты мелкозернистые песчаники и алевролиты кварц-полевошпатовые, с вкраплениями пирита и глауконита. Цемент песчаников глинисто-кремнистый, реже — карбонатный. Прослеживается тонкая горизонтальная и косая слойчатость. По химическому составу глины несколько отличаются от ломоносовских: SiO_2 — 57-61 %, Al_2O_3 — 15-20 %, Fe_2O_3 — 5-8%, K_2O — 4-6,5%, MgO — 2,5-4%, Na_2O — 1-2%, TiO_2 , CaO — менее 1%, Na_2O — менее 0,5%, MnO , Cr_2O_3 , P_2O_5 — менее 0,1% (Вербицкий и др., 2012).

Люкатиская и тискреская свиты распространены лишь на юго-западе Ленинградской области и в Эстонии. Люкатиская свита сложена переслаивающимися глинами, алевролитами и глинистыми тонкозернистыми песчаниками. Внизу свиты преобладают глины голубовато-зеленовато-серые, похожие на сиверские, но отделённые от них горизонтом с окатанными глинистыми гальками. По составу они гидрослюдистые с включениями зерен глауконита, текстура неоднородная, алевритовая тонкослойчатая, с пиритизированными пленками по напластованию. В верхней части свиты уже преобладает алевролит-песчаный материал. Песчаники преимущественно кварцевые, местами с примесью полевых шпатов (20-25%) и

слюды (8-12%). Мощность свиты составляет в пределах Российской территории 5-6 м, в Эстонии — до 20 м (Suuroja и Vingisaar, 1997).

Тискреская свита сложена светло-серыми алевролитами и мелкозернистыми песчаниками с редкими тонкими прослойками голубоватых глин. В наиболее полных разрезах на западе свита представлена двумя пачками: нижней линзовидной и верхней косослойчатой. Песчаники и алевролиты нижней пачки по составу полевошпатово-кварцевые, выше — преимущественно кварцевые с малой примесью полевых шпатов (от 2-5 до 10%). Глины в прослоях иллит-сметтитовые, с незначительным содержанием каолинита и реже хлорита. Местами в песчаниках и алевролитах встречаются гороховидные прослои, плотнотцементированные доломитом. Тискреская свита залегает согласно на люкатиской, мощность её до 9 м под г. Кингисепп и до 20 м в Эстонии (Ylo и Petersell, 2005)

1.3. Геохимическая характеристика

Химический состав глин по разрезу не является постоянным. Анализ его изменения позволит сделать более достоверные выводы об обстановках осадконакопления. Эволюция химического состава глин ломоносовской и сиверской свит по разрезу показаны на (рис. 3). Данные получены по скважине «Коровье-8», расположенной на правом берегу р. Сясь (Подковыров и др., 2017).

СИА — индекс химического изменения, равный $100 \cdot Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$. Значения СИА для глинистых пород выше 85 свидетельствуют об интенсивном выветривании с формированием латеритов и каолинистых кор выветривания. СИА в интервале 70-85 говорит об умеренном химическом

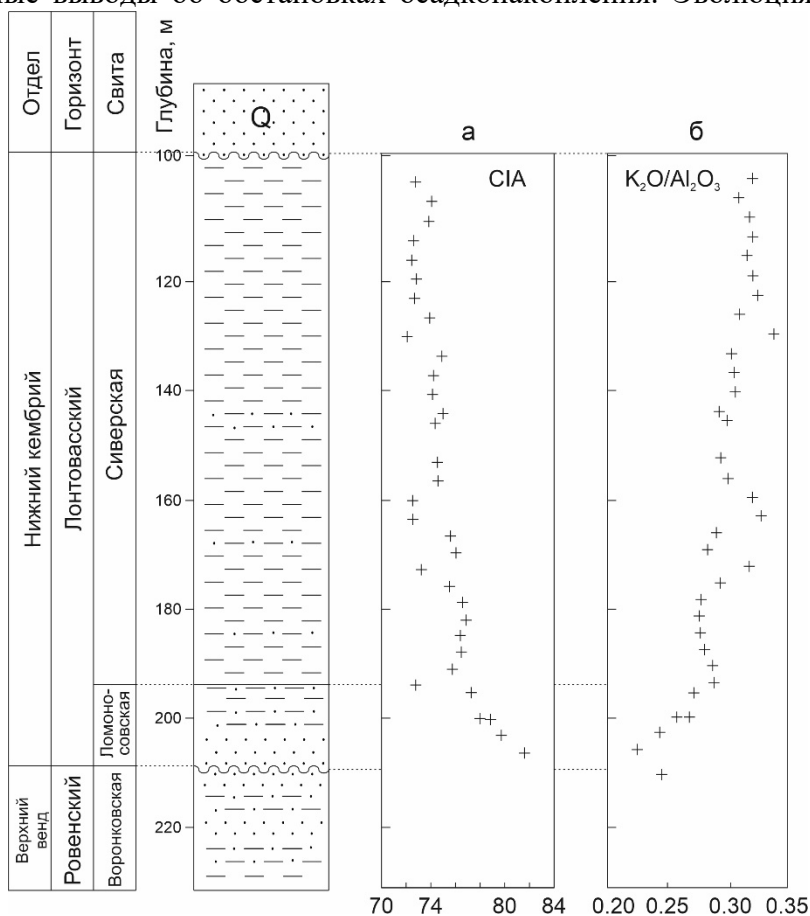


Рис. 3. Вариации отношений оксидов в глинах ломоносовской и сиверской свит в скважине «Коровье-8».

выветривании с образованием гидрослюдистых кор выветривания. CIA в пределах 60–70 соответствуют слабому, преимущественно физическому выветриванию, происходившему в областях сноса обломочного материала (Nesbitt и Young, 1982).

Калиевый модуль K_2O/Al_2O_3 несёт информацию о распределении катионов K^+ и Al^{3+} среди породообразующих минералов. Значения менее 0,30 свидетельствуют о преобладании хлорита и иллита (гидрослюд), более 0,30 — иллита и полевого шпата, хлорит проявлен в меньшей степени (Скляров, 2001).

Исходя из данных на (рис. 3), в основании нижнего кембрия можно наблюдать довольно резкое снижение CIA и рост калиевого модуля, замедлившиеся к началу формирования глини сиверской свиты. Вероятно, именно в это время происходила смена континентальных обстановок сначала на прибрежно-морские, затем на эпиконтинентальные морские. При этом глубина бассейна увеличивалась не линейно, происходили локальные частичные регрессии, однако общий тренд сохранялся.

1.4. История геологического развития

Таким образом, начало раннего кембрия ознаменовало собой новый этап развития морского бассейна. Во время верхневендских трансгрессий преобладало алевро-песчаное терригенное осадконакопление с примесью хемогенного материала (карбонатный цемент, стяжения сидерита). На фоне предкембрийской регрессии мелководного бассейна на суше происходило слабое усиление химического выветривания материнских пород (Балтийского щита), вероятно связанное с незначительной гумидизацией климата (Подковыров и Котова, 2020).

Начиная с лонтовасской трансгрессии в более глубоком морском бассейне накапливается преимущественно глинистый материал. Наблюдаемое снижение CIA вверх по разрезу (рис. 3) свидетельствует о смене умеренных обстановок на умеренно-нивальные, что объясняет крайне малую долю карбонатного вещества в разрезе нижнекембрийских свит. Отдельные отступления моря фиксировались в накоплении песчаных прослоев в сиверской свите; о сезонности климата в это время говорит тонкая горизонтальная слойчатость, косая наблюдается реже, но позволяет сделать вывод о повышенной гидродинамике моря. Кварц-полевошпатовый состав песчаников сиверской свиты свидетельствует о преобладании физического выветривания в областях сноса; преимущественно кварцевые песчаники ломоносовской свиты — о совокупности процессов химического и физического выветривания.

Наблюдаемое чередование красновато-бурых и сине-зелёных прослоев в интервалах разреза глин сиверской свиты говорит о чередовании окислительных и восстановительных обстановок накопления осадка; в целом же преобладают последние (Рейнек и Сингх, 1981).

Накопление толщ ломоносовской и сиверской свит произошло за 4-8 млн лет, что является довольно малым временным промежутком для формирования 120-150 м глинистого осадка (рис. 2). На сиверскую свиту пришёлся максимум трансгрессии нижнекембрийского моря, наступавшего с востока на запад. В это же время закладывается бассейн Балтийской синеклизы (Вербицкий и др., 2012).

Примерно 521 млн лет назад произошла регрессия лонтовасского моря. Выведенные на дневную поверхность глины активно выветриваются, что прослеживается повышенным содержанием каолинита в прикровельной части. С доминопольского времени атдабанского века раннего кембрия происходит развитие бассейна Балтийской синеклизы: трансгрессии нового морского бассейна происходили с юго-запада на северо-восток, что прослеживается в закономерном убывании мощностей люкатиской и тискреской свит в восточном направлении. В мелководном море накапливались алевро-песчано-глинистые осадки. Относительно большое содержание полевых шпатов свидетельствует о продолжении преобладания физического выветривания на суше над химическим в условиях умеренного климата (Подковыров и др., 2017). Цементация песчаников и алевролитов тискреской свиты доломитом в верхней части разреза говорит о повышении температуры и переходе к тропическому климату (Фролов, 1992).

Со среднего кембрия начинается новый этап геологического развития территории, слабо затронувший нижнекембрийские толщ. Максимальная глубина погружения отложений этого времени составила около 1000-1400 м. Окончательно выведены на поверхность они были, вероятно, уже в кайнозойе, возможно в результате четвертичной ледниковой экзарации.

1.5. Гляциодислокации

Воздействие ледников сказалось на условиях залегания многих толщ осадочного чехла Балтийской синеклизы. Глины нижнего кембрия, являясь наиболее пластичными породами, служат основанием для гляциодислокаций различного типа. В пределах Ленинградской области описаны проявления складчато-надвиговых и диапироподобных структур гляциотектонического происхождения (Левков, 1980). Так, в Ломоносовском районе

расположен знаменитый памятник природы ледникового происхождения — Дудергофские высоты (рис. 4).

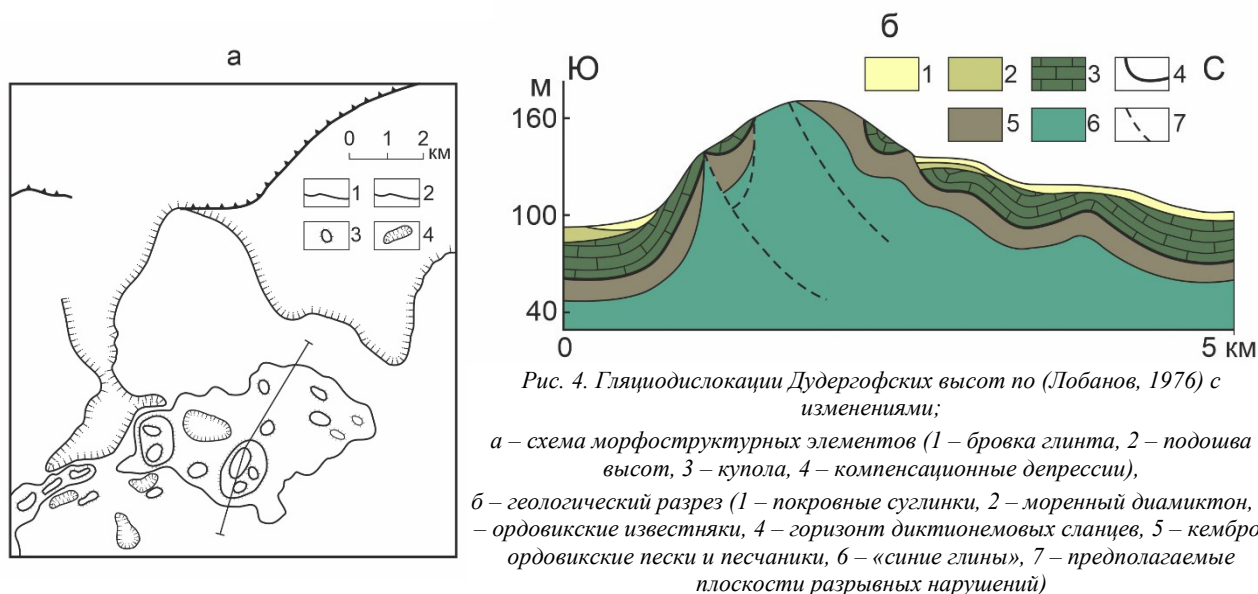


Рис. 4. Гляциодислокации Дудергофских высот по (Лобанов, 1976) с изменениями;

а – схема морфоструктурных элементов (1 – бровка глинта, 2 – подошва высот, 3 – купола, 4 – компенсационные депрессии),
 б – геологический разрез (1 – покровные суглинки, 2 – моренный диамиктон, 3 – ордовикские известняки, 4 – горизонт диктинемовых сланцев, 5 – кембро-ордовикские пески и песчаники, 6 – «синие глины», 7 – предполагаемые плоскости разрывных нарушений)

Причиной формирования подобных структур во время оледенений является смена пластичных пород ложа на твёрдомёрзлые (известняки ордовика) при движении ледника. Текущая масса льда при поступательном движении выдавливала пакеты осадочных пород по пластичному ослабленному прослою, формируя напорные гряды (Астахов, 2020).

1.6. Гидрогеология

Рассматриваемые отложения принадлежат Прибалтийско-Ладожскому району Московского артезианского бассейна, как отдельное гидрогеологическое подразделение они выделяются в нижнекембрийский водоупорный горизонт (Сидоренко и др., 1967). Нижележащие песчаники и алевриты верхнего венда – нижнего кембрия, как и вышележащие песчаники кембрия – ордовика, относят к водоносным горизонтам (рис. 5).

Московский артезианский бассейн является гидрогеологической структурой II порядка. В её пределах региональным водоупором является толща глин верхневендского возраста. При этом нижнекембрийский водоупорный горизонт также является достаточно мощным и широко распространенным (кроме юго-западной части бассейна) по площади. По большому счёту он отвечает критериям регионального водоупора, но ввиду незначительной мощности водоносных песчано-алевритовых отложений верхневенд-нижнекембрийского возраста, залегающих между двумя водоупорами, выделение их в отдельные региональные гидрогеологические подразделения не производится.

Исходя из условий распространения региональных водоупоров и их значимости, в пределах Московского артезианского бассейна выделяется два водоносных этажа:

1. Архейско-вендский (AR-V) водоносный этаж включает в себя рифейский и вендский водоносные комплексы, содержащие порово-трещинно-пластовые воды, а также гидравлически связанную с ними архей-нижнепротерозойскую водоносную зону трещиноватости в кристаллических породах фундамента.

2. Верхневендско-четвертичный (V₂-Q) водоносный этаж включает в себя залегающий в основании верхневендский водоупорный горизонт и вышезалегающую толщу с чередованием водоносных, относительно водоупорных и водоупорных горизонтов терригенных и карбонатных пород палеозой-мезозойского возраста. Повсеместно распространены перекрывающие отложениями четвертичного водоносного комплекса.

Водоносные горизонты содержат разные типы скоплений вод — порово-пластовые, трещинно-пластовые и карстовые.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Гидрогеологические структуры		Геолого-структурная характеристика	Преимущественная направленность неотектонических движений	Абсолютная отметка поверхности Земли (м)	Гидрогеологический разрез			Показатели водообильности		Минерализация (г/дм ³), состав воды и практическое применение	Гидрогеодинамическая характеристика	
Бассейн	Район				Глубина эрозионного вреза (м)	Этаж	Комплекс, горизонт, зона	Мощность, м	Характерные дебиты скважин, дм ³ /с		Водопроницаемость, м ² /сут	Региональный базис дренирования
МОСКОВСКИЙ	ПРИБАЛТИЙСКО-ЛАДОЖСКИЙ	ПРИБАЛТИЙСКО-ЛАДОЖСКАЯ МОНОКЛИНАЛЬ	ПОДНЯТИЕ	50–170 30–40	V ₂ -Q	Q	5–30	0,01–0,1	5–10	0,2–1,0 HCO ₃ , Ca, Mg	ФИНСКИЙ ЗАЛИВ И ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ)	до 200
						O-S	до 120	0,5–3 (до 13)	100–500 (до 5000)	0,5–1,0 HCO ₃ , Ca, Mg		
						Є-O	до 60	0,1–3,0	100–200	0,3–0,9 HCO ₃ , Ca, Na		
						C ₁	до 120					
						V ₂ -C ₁	до 45	0,01–0,5 (до 3)	5–10 (до 100)	0,1–3,5 HCO ₃ , Ca, Na		
						V ₁	100–120					
						V	50–70	0,01–1,0	50–100	7–15 Cl, Na		
AR-V	AR-PR ₁	до 50			10–15 Cl, Na							

Рис. 5. Характеристика гидрогеологических структур архея – нижнего палеозоя Прибалтийско-Ладужского района.

Рассмотрим характеристику подземных вод водоносных горизонтов, разделённых нижнекембрийским водоупором синих глин.

Подземные воды верхневендско – нижекембрийского водоносного горизонта напорные, напор возрастает от побережья Финского залива к юго-востоку, достигая отметок 800-1200 м в районе Валдайской возвышенности. Средний удельный дебит скважин, наоборот, снижается в юго-восточном направлении: от 1,5 л/с на северо-западе бассейна до 0,2-0,4 л/с в восточных и центральных районах Московского бассейна.

По составу воды пресные гидрокарбонатного и хлоридно-гидрокарбонатного натриево-кальциевого состава с минерализацией 0,1-0,7 г/л. Общая минерализация растёт к югу и востоку, помимо этого изменяется химический состав вод. К югу от г. Санкт-Петербург — хлоридные натриевые воды с минерализацией 1,2-3,5 г/л, к востоку от оз. Ильмень — 20 г/л. Далее к юго-востоку солёные воды сменяются рассолами с минерализацией выше 100 г/л в районе г. Крестцы. На востоке Новгородской области скважинами в г. Пестово установлено, что при глубине залегания 1000-1400 м температура подземных вод составляет 40-45 °С при минерализации 140-187 г/л. С этим отмечается содержание брома более 250 мг/л (Вербицкий и др., 2012).

Практическое значение воды данного водоносного горизонта имеют в Сланцевском и Кингисеппском районах Ленинградской области, где используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Активная их эксплуатация вызвала региональную депрессионную воронку площадью около 6 тыс. км², однако в последнее время отмечается восстановление уровня подземных вод (Гидроспецгеология, 2021). В районе городов Псков и Новгород тёплые лечебные бромные воды используются для бальнеолечения. Южнее, в Тверской области, подземные воды этого горизонта обладают промышленной концентрацией брома.

Подземные воды кембро-ордовикского водоносного горизонта приурочны к разновозрастным алевро-песчаным породам кембрия и нижнего ордовика, залегающим над нижекембрийским водоупором синих глин. Воды горизонта в основном напорные, безнапорные и слабонапорные наблюдаются лишь в пределах приглинтовой полосы. К югу и востоку от глинта напор увеличивается до 300-400 м, достигая в области наибольшего погружения 900-1000 м и более в районе городов Валдай, Кувшиново, Пестово, Бологое.

Питание горизонта осуществляется путем перетекания вод из вышележащего ордовикского водоносного комплекса. Речные долины и сам глинт являются основными областями естественной разгрузки горизонта, где наблюдаются нисходящие (реже восходящие) родники с дебитом от 0,06 до 4 л/с; в районе г. Сланцы осуществляется

искусственная разгрузка вод горизонта за счет шахтного водоотлива. Удельный дебит скважин в среднем составляет 0,7-1,0 л/с.

В пределах Ижорско-Волховского подрайона горизонт содержит пресные гидрокарбонатные кальциевые воды. С погружением пород на юго-востоке появляются хлоридные натриевые воды, сначала соленые, а восточнее — в районе городов Валдай, Кувшиново, Пестово, Бологое распространены рассолы с минерализацией 100-175 г/л с содержанием брома до 250-400 мг/л. В нижнем течении рек Волхов и Сясь распространены солоноватые воды (1-4 г/л) сульфатного натриево-кальциевого состава и сульфатного магниево-кальциево-натриевого состава. минерализацией 0,1-0,7 г/л.

Практическое значение подземные воды горизонта имеют вдоль северной границы глинта, где содержатся пресные воды. Так же, как и воды верхневендско – нижнекембрийского горизонта, они используются для бальнеолечения, к юго-востоку концентрации брома достигают промышленных значений. Характерной особенностью вод в «пресной» зоне является их радиоактивность (420-740 кБк/м³), обусловленная выщелачиванием катионов радиоактивных элементов из диктионемовых сланцев (Вербицкий и др., 2012).

Таким образом, горизонт синих глин разделяет подземные воды двух водоносных горизонтов со схожими гидродинамическими характеристиками, но различным химическим составом.

1.7. Практическое использование

В настоящее время легкоплавкие синие глины сиверской свиты используются в качестве сырья для изготовления керамической продукции, а также как основание и среда для строительства сооружений. Ранее они использовались для приповерхностного захоронения химических отходов ввиду минимальной проницаемости, однако сейчас эти работы законсервированы (Зернова, 2021). Помимо этого, обоснована возможность глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в пластах синих глин (Rumynin, 2011).

В Ленинградской области кембрийские глины добываются открытым способом в карьерах Красный Бор и Никольское, расположенных в Тосненском районе; чуть южнее Никольского карьера начинает разрабатываться новый. Помимо широкого спектра керамики, глина используется для производства строительных смесей, а также как компонент в химической промышленности. Уникальный цвет и сорбирующие свойства глины нашли применение в косметической промышленности, а её пластичность — в изготовлении материалов для художественных и поделочных работ (рис. 6).



Рис. 6. Примеры различной продукции из кембрийской глины. Слева — смесь для проведения косметических процедур, справа — игрушки, выполненные из обожжённой синей глины. Фото с сайта rikabu.ru.

2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОЛЩИ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН

Первые исследования инженерно-геологических свойств синих глин проводились ещё в первой половине XX века П.А. Земятченским (Земятченский, 1937). В середине века их изучением продолжили заниматься В.В. Охотин, А.К. Ларионов, Ю.А. Лиманов и многие др. В конце века установлено, что кембрийские глины имеют структурную трещиноватость и зональное строение по разрезу (Плечкова и Дашко, 1996). На сегодняшний день активное их использование в качестве основания и среды для сооружений требует более детального рассмотрения инженерно-геологической характеристики всей толщи.

2.1. Гранулометрический состав

Неотъемлемой характеристикой, отвечающей за прочность структурных связей тонкодисперсного грунта, является гранулометрический состав. Согласно работам (Плечкова и Дашко, 1996), процентное содержание фракций по глубине толщи глин не изменяется. Результаты анализа гранулометрического состава представлены в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения содержания фракций по глубине

Глубина, м	Содержание фракций (мм), в %					Примечания
	Песчаная	Пылеватая		Глинистая		
	> 0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	0,002-0,001	<0,001	
2,0-10,0	1,5	26	33	12	31	Без диспергатора
10,5-20,0	0	27	30	10	33	
2,0-10,0	0,8	32	8	23	33	С диспергатором
10,5-20,0	0,2	30	7	25	38	

При использовании диспергатора существенно снижается содержание мелкой пылеватой фракции, при этом наблюдается небольшой рост крупной пыли. Преобладание фракции с диаметром <0,001 мм над фракцией 0,002-0,001 мм свидетельствует об относительно низкой прочности кристаллических решёток глинистых минералов.

На снимках сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) видно, как преобладающие в массе мелкие пластинчатые глинистые частицы наряду с более крупными кристаллами глины облекают изометричные пылеватые зёрна, образуя турбулентную микроструктуру (Осипов и др., 1989) (рис. 7). Подобное взаимное расположение зёрен может вызывать анизотропию прочих свойств, несмотря на кажущуюся однородность блоков глины. Удельная поверхность глин составляет 5,86 м²/г (Чиркст и др., 2001).

Таким образом, согласно классификации (Охотин, 1933), исследуемый грунт является глиной пылеватой, что подтверждается работами других исследователей (Савина, 2018).

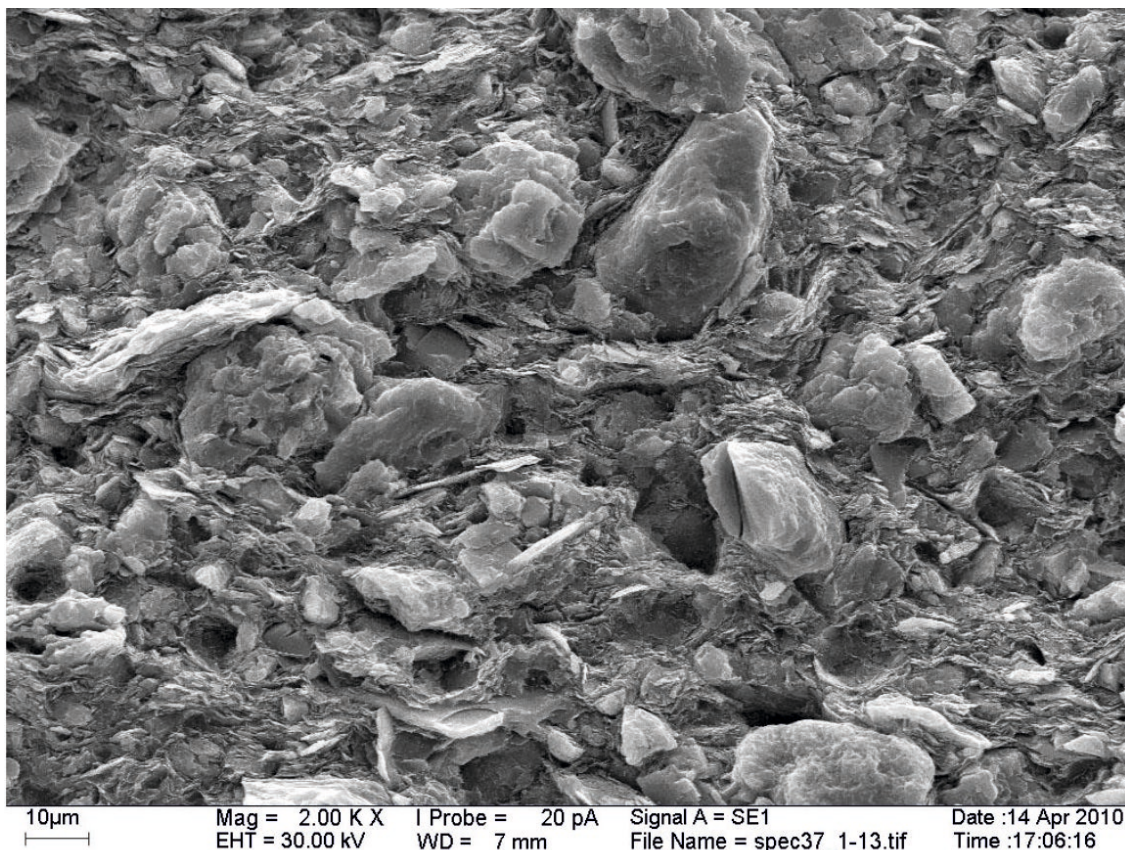


Рис. 7. Турбулентная микроструктура синей кембрийской глины на снимке сканирующего электронного микроскопа. (Осипов and Соколов, 2013)

2.2. Физические свойства

Синие глины характеризуются как нормально уплотнённые; естественная влажность варьирует от 20-23% в приповерхностных частях разреза до 15-18% на глубине 20 м и более. Плотность глин, наоборот, с глубиной возрастает: в верхней части разреза она равна 1,96-2,08 г/см³, на глубине достигает постоянных значений 2,12-2,28 г/см³ (Плечкова и Дашко, 1996).

Для глин отмечаются следующие пределы: пластичности 17-27, текучести 37-50; число пластичности в верхней части разреза равно 20-30, на глубине — 16-22. Пористость составляет в среднем 30%.

Подробные данные о закономерном (зональном) изменении физических свойств от глубины от поверхности представлены в таблице 2 и на рисунке 8. На их основании И.Л. Плечкова и Р.Э. Дашко выделяют 3 зоны изменения состояния: верхнюю —

максимального разуплотнения и обводнения, среднюю с переходными характеристиками и нижнюю — естественного физического состояния.

Таблица 2. Изменение физических свойств кембрийских глин по глубине.

Зоны	Глубина от поверхности, м	Влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Пределы пластичности		Число пластичности I_p	Показатель текучести I_L
				Нижний W_p	Верхний W_L		
Максимального разуплотнения и влажности	0-2	21,5-27,0	1,96-2,05	20,0-23,2	42,0-52,0	18,8-30,0	0,08-0,13
	2-8	20,0-23,0	2,08-2,19	17,0-25,0	37,0-50,0	20,0-30,0	0,06-0,15
	8-15	8,0-15,0	2,09-2,20	19,0-21,0	42,0-48,0	22,0-28,0	-0,14-0
Переходная	15-20	15,0-19,5	2,10-2,22	19,0-22,0	40,0-44,0	17,8-21,9	< 0
Квазипостоянной влажности и плотности	20-26	15,5-18,0	2,15-2,28	19,0-24,0	36,0-46,0	16,6-22,0	< 0
	26-40	15,5-18,0	2,14-2,22	19,0-24,0	36,0-46,0	16,6-22,0	< 0
	> 40	15,5-18,0	2,14-2,22	19,0-24,0	36,0-46,0	16,6-22,0	< 0

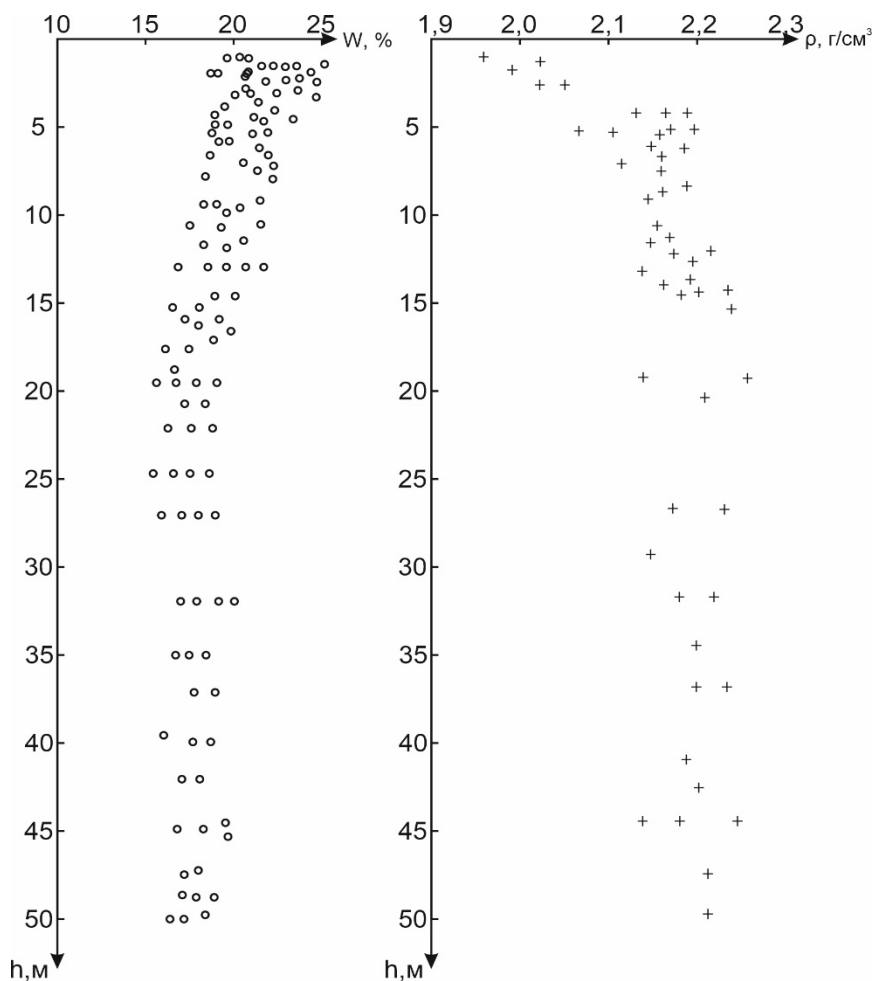


Рис. 8. Характер изменения влажности W и плотности ρ синих глин по глубине h их разреза

Зональность кембрийских глин связана с их повышенной трещиноватостью в пределах верхней части разреза. Из рис. 8 видно, что на глубине около 15 м инфильтрация влаги и разуплотнение пород прекращается.

Наиболее вероятной причиной образования экзогенной трещиноватости является снятие нагрузки после Валдайского оледенения. При этом дизъюнктивные зоны могли образовываться раньше и распространяться глубже, но тугопластичные (в контексте геологического времени) глины под действием литостатического давления нового оледенения их залечивали.

2.3. Механические свойства

Трещиноватость верхней части разреза глин обуславливает блочную структуру массива пород; это оказывает влияние на зональность механических свойств. И.Л. Плечковой и Р.Э. Дашко было проведено множество испытаний кембрийских глин, результаты которых представлены ниже.

Таблица 3. Изменение прочностных характеристик синих глин с глубиной. По (Плечкова и Дашко, 1996)

Зоны	Глубина от поверхности, м	Средний размер блоков, м	Прочность образца (сцепление и угол внутреннего трения)			
			При трёхосных испытаниях		При испытаниях методом одноплоскостного среза	
			С, МПа	φ, °	С, МПа	φ, °
Максимального разуплотнения и влажности	0-2	0,08-0,25	0,035-0,050	0	0,055-0,075	0-3
	2-8	0,25-0,40	0,075-0,117	0-2	0,110-0,145	6-8
	8-15	0,30-0,45	0,22-0,34	6-8	0,34-0,40	6-8
Переходная	15-20	0,40-0,60	0,34-0,45	6-8	0,40-0,50	6-8
Квазипостоянной влажности и плотности	20-26	0,40-0,85	0,40-0,52	6-8	0,48-0,55	6-9
	26-40	0,60-0,90	0,57-0,68	8-10	0,60-0,68	8-12
	> 40	1,00-1,40	0,70-0,82	8-10	0,75-0,82	8-12

Убывающая с глубиной трещиноватость обуславливает постепенное увеличение среднего размера блоков породы (таблица 3). Ниже 40 м от кровли глин размер блоков зависит исключительно от трещин эндогенного (тектонического и литогенетического) происхождения.

Прослеживается закономерное убывание сцепления и угла внутреннего трения с глубиной, связанное с ростом связности и упрочнением блоков глины. При этом присутствуют различия прочностных характеристик при их определении в условиях трёхосного сжатия (в стабилометре) и плоскостного сдвига без возможности бокового распора. Примерно до глубин переходной зоны прочностные характеристики, определённые в стабилометре, ниже, чем при

испытаниях в срезном приборе. Это связано со снижением интенсивности микротрещиноватости блоков глины в верхней части разреза. Ниже переходной зоны она принимает постоянные значения.

Изменения относительной деформации разрушения синих глин, измеренные при трёхосных испытаниях, в зависимости от глубины отбора представлены на рисунке 9. При убывающей ϵ с глубиной отмечается, что характер разрушения образцов до переходной зоны хрупко-пластический, ниже — исключительно хрупкий (Плечкова и Дашко, 1996).

Модуль общей деформации, определённый по компрессионным испытаниям, колеблется от 10,0-22,2 МПа в верхней части (до 10 м) до 83,3-104,2 МПа на глубине более 20 м. Модуль общей деформации при одноосном сжатии на соответствующих глубинах увеличивается с 6,5-9,5 МПа до 30,0-42,0 МПа.

Таким образом, при определении деформационно-прочностных характеристик синих глин необходимо учитывать изменения её макро- и микротрещиноватости с глубиной (Дашко и Волкова, 2004).

2.4. Характеристика глин в зонах трещиноватости

В кембрийских глинах выделяются зоны трещины нетектонического и тектонического происхождения. К первым относят литогенетические трещины, образующиеся из-за уплотнения осадка при диа- и катагенезе; и трещины выветривания, которые формируются в результате комплексного взаимодействия различных агентов в верхней части разреза; они часто закладываются на месте ранее существовавших слабых зон. Рассмотренная выше повышенная микротрещиноватость обусловлена именно этими процессами (Фролов, 1992).

Среди тектонических трещин выделяют собственно тектонические (разломные зоны), образующиеся при движении блоков земной коры относительно друг друга, и гляциотектонические. Различают тангенциальную (движение минеральных масс и дислокации

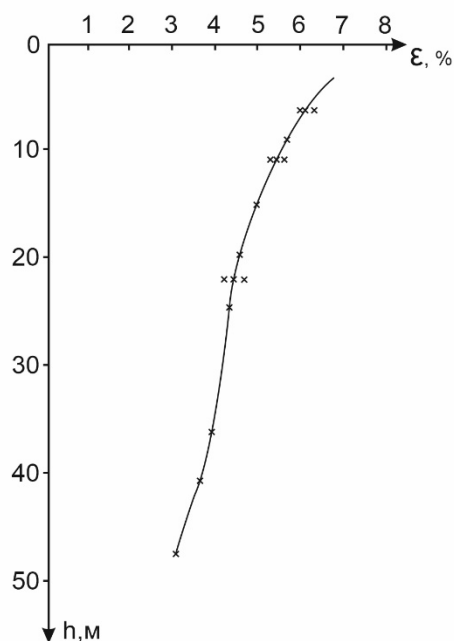


Рис. 9. Характер изменения относительной деформации разрушения синих глин в зависимости от глубины отбора образца

под действием горизонтальных напряжений, например, рис. 4) и радиальную (вертикальные перемещения — гидро- и гляциоизостазия) гляциотектонику (Астахов, 2020).

Последняя может быть причиной формирования трещин расширения пород при разгрузке. Снятие давления последнего ледникового покрова вызвало общий подъём территории, в результате произошло разуплотнение глин в верхней части (Рис. 8). Подобное может происходить при горных выработках, прорыве плотин и др (Arnould, 2006).

Описанная ранее зональность толщи синих глин связана с экзогенными трещинами выветривания и разуплотнения. Для полноты картины необходимо рассмотреть свойства глин в разломных зонах тектонического происхождения. Выделены они были в результате анализа радонометрических обследований Ленинградской области — повышенные концентрации радона свидетельствуют о его миграции по разломным зонам с глубинных горизонтов фундамента (Савоненков и др., 2012).

Изменения физических и механических свойств синих глин по глубине в зависимости от их принадлежности к разломным зонам представлены в таблице 7. В обоих случаях наблюдается уменьшение влажности и увеличение плотности с глубиной. Однако в разломных зонах интенсивность изменений значительно выше. Кроме того, прослеживаются участки с аномально повышенной влажностью — до 37%. Состояние глин в обоих случаях оценивается как твёрдое или полутвёрдое.

Характер изменений механических свойств иной. Угол внутреннего трения изменяется вне зависимости от тектонической зоны. Сцепление же в приповерхностной зоне одинаково и составляет около 0,035-0,078 МПа, при этом с увеличением глубины в зоне вне тектонических разломов его рост с глубиной намного больше, чем в разломной зоне.



Рис. 10. Трещины в кембрийской глине, карьер Красный Бор (Arnould, 2006).

Таблица 4. Характеристика изменения физических и механических свойств синих глин по глубине в зависимости от их структурно-тектонического положения.
По (Плечкова и Дашко, 1996)

Зона	Глубина от поверхности, м	Физические свойства					Прочностные характеристики по данным трёхосных и одноосных испытаний		Модуль общей деформации E, МПа	
		Влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Пределы пластичности		Число пластичности I _p	Показатель текучести I _L	Сцепление C, МПа		Угол внутреннего трения φ , °
				Нижний W _p	Верхний W _L					
Вне тектонического нарушения	0-2	21,4-24,0	1,96-2,05	44,8	18,1	26,7	0,12-0,22	0,035-0,050	0	15,0-20,0
	2-8	20,0-23,0	2,08-2,19	48,5	20,7	27,8	0,08-0,025	0,075-0,117	0-2	19,0-24,0
	8-15	16,0-21,0	2,10-2,22	45,6	19,5	26,1	0,06-0,13	0,22-0,34	6-8	20,0-25,0
Разломная зона	0-3	22,8-30,0 (до 37,0)	1,97-2,06	38,2-44,0	21,4-23,5	16,6-20,6	0,06-0,08	0,034-0,078	0	1,5-2,2
	3-5	20,7-26,5 (до 37,0)	1,98-2,11	40,3-47,2	20,3-23,9	19,9-26,6	0,005-0,15	0,027-0,089	0-4	3,0-6,6
	5	20,5-24,7	2,00-2,10	19,1-42,1	21,2-23,1	17,9	< 0	0,15-0,19	0-6	6,2-10,5

Особенно интенсивно в зонах тектонических нарушений снижается модуль общей деформации глин (полученный по результатам одноосных испытаний). Если в приповерхностной части глин разломных зон он равен 1,5-2,2 МПа, то глины вне её имеют 15,0-20,0 МПа. В обоих случаях с глубиной он возрастает, но различия остаются.

Пониженные деформационные и прочностные параметры позволяют сделать вывод о повышенной дезинтегрированности синих глин в разломных зонах. Оценка условий строительства и эксплуатации сооружений в них требует привлечения специализированных геомеханических моделей (Оловянный, 2012)

2.5. Геодинамические особенности

Основными геодинамическими процессами, происходящими с нижнекембрийскими глинами при строительстве и эксплуатации сооружений, являются оползневые явления. По данным (Голубев и др., 2021), на территории Ленинградской области за второй квартал прошлого года наблюдалось 8 проявлений оползневых процессов, 5 из которых связаны с синими глинами в Тосненском районе. Минимум 4 из них оказали негативное воздействие на объекты инфраструктуры и придомовые территории.

Образование оползней связано с речной эрозией подмываемых берегов и давлением сооружений на грунт. Наиболее изучены структурно-пластические оползни на прибрежных склонах рек Тосна и Саблинка. Пластичные синие глины в их основании накапливают сдвиговые деформации и провоцируют изменение напряжённого состояния склона. Развитие оползней усугубляется разуплотнённой зоной с повышенной влажностью в верхней части разреза кембрийских глин. Как показывают данные электротомографии (Савина и Бурлуцкий, 2018), поверхность скольжения проходит именно по прикровельной части глинистой толщи.

Для предупреждения оползневых процессов, связанных с кембрийскими глинами, могут быть использованы следующие меры (по Коробко и Дашко, 2015):

1. Террасирование и выполаживание откосов
2. Лесопосадки на склонах
3. Борьба с речной эрозией подмываемых берегов

2.6. Использование синих глин в качестве основания и среды для строительства сооружений

Нижнекембрийские глины служат основанием и вмещающей средой подземных сооружений в южных районах г. Санкт-Петербург и в некоторых районах Ленинградской области. В частности, в г. Пушкин и Никольское при строительстве и эксплуатации зданий наблюдались неравномерные деформации, разрушения глинистых грунтов, разнообразные протечки, приводившие к разрушению хозяйственных объектов, неравномерным осадкам, гниению фундамента (Коробко и Дашко, 2015).

С целью предотвращения возможных негативных последствий многие авторы (Дашко и др., 2011) предлагают использовать дифференцированный подход к оценке условий строительства и эксплуатации сооружений, для которых синие глины могут служить основанием либо средой. При этом проведённые инженерно-геологические районирования территории предглинтовой низменности производят учёт глубины залегания синих глин от дневной поверхности (Коробко и Дашко, 2015), но не конкретного их положения в разрезе сиверской свиты. Эти исследования базируются на том, что гранулометрический состав толщи постоянен вне зависимости от глубины (Плечкова и Дашко, 1996), а зональность свойств грунта зависит от трещиноватости.

Однако, литогеохимические исследования свидетельствуют об изменениях гидродинамического режима сиверского бассейна (Подковыров и Котова, 2020) и условий осадконакопления, что в свою очередь оказывает влияние на размер частиц поступаемого в бассейн обломочного материала. То есть, предположение о том, что изменения физических и механических свойств синих глин с глубиной от поверхности зависят лишь от трещиноватости, является некорректным. Необходимо учитывать гранулометрический состав конкретных стратиграфических интервалов разреза сиверской свиты.

Таким образом, дифференцированный метод оценки инженерно-геологических условий требует выделения в разрезе синих глин зон не только по изменению физических или деформационно-прочностных характеристик, но и по изменению гранулометрического состава.

3. СТРОЕНИЕ ТОЛЩИ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН В КАРЬЕРЕ В Г. НИКОЛЬСКОЕ

Вариации гранулометрического состава по разрезу, в частности, отлично прослеживаются в искусственных обнажениях нижнекембрийских глин — на карьерах, где расчленение толщи решает технологические задачи.

3.1. Общая информация

3.1.1. Информация о кирпичном заводе и продукции

Никольский карьер является вторым карьером синих глин в г. Никольское Тосненского района Ленинградской области (Рис. 11). Его разработка началась в 1990-х годах. До 2011 года потребителем сырья являлось предприятие «Нефрит-Керамика», после — новопостроенный кирпичный завод компании «ЛСР. Стеновые материалы». Месторождение глин называется Чекаловским.

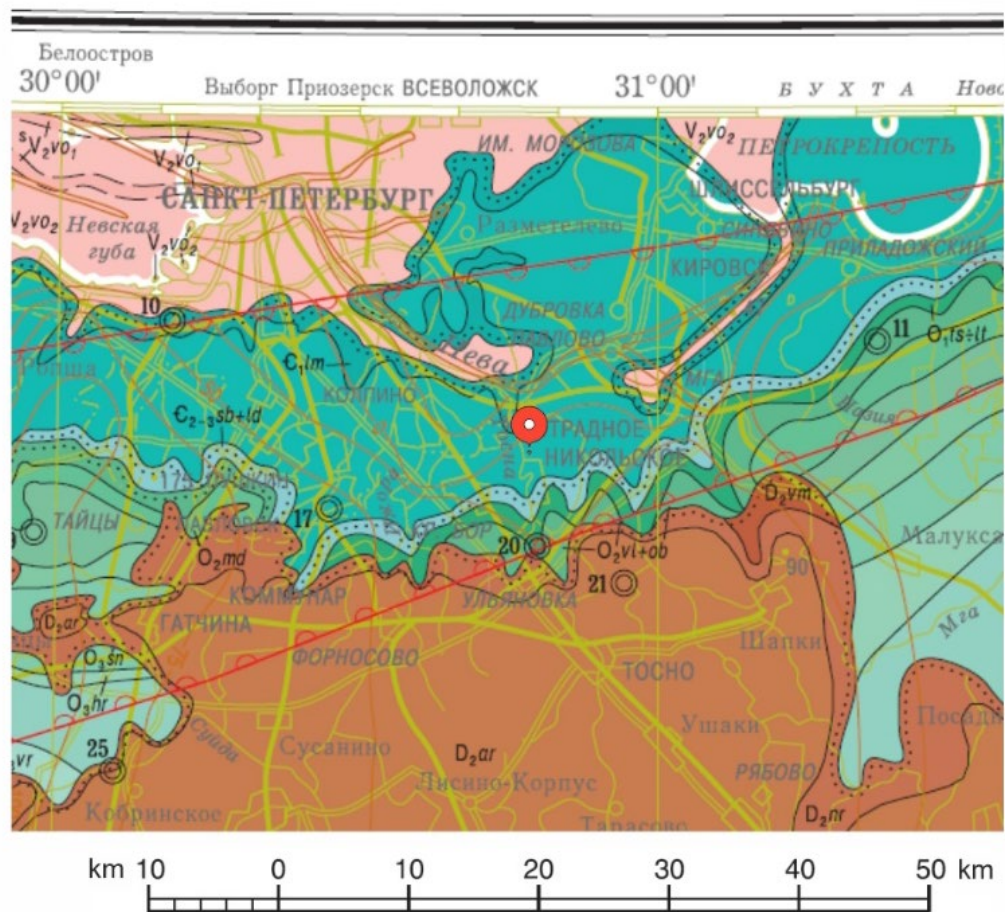


Рис. 11. Расположение Чекаловского месторождения на геологической карте

Изначально проектировалось, что кирпичный завод будет иметь 3 производственные линии. На стадии ввода их в эксплуатацию выяснилось, что рентабельность второй линии низкая; для производства предполагаемой продукции компанией был выкуплен Рябовский кирпичный завод, выпускающий камни керамические рядовые полнотелые.

Линия КП-1 (конвейер передачи) Никольского завода изготавливает кирпич рядовой пусто- и полнотелый, камень рядовой поризованный. Сырьём служит кембрийская глина, песок и древесные опилки.

Линия КП-3 изготавливает клинкер фасадный и тротуарный, а также лицевой кирпич. Сырьём также служит кембрийская глина, песок, древесные опилки и другие виды глины из различных регионов: Воронежской, Курской, Белгородской областей, из Великобритании и др. Для окраски фасадной поверхности изделий используются ангобы — тонкие цветные слои глинистого состава, наносимые на кирпич до обжига (рис. 12). В качестве красящих добавок используются оксиды Cr, Mn, Zn, V. Изделия третьей линии требуют больших затрат, соответственно продукция отличается высокой ценой.



Рис. 12. Ангобированные фасадные кирпичи в лаборатории завода. Фото автора.

Технология производства керамики состоит из следующих этапов: формовка – садка – сушка – обжиг – выставка изделия. Приёмно-сдаточные испытания выполняются на всех этапах изготовления кирпичей согласно (ГОСТ 530-2012).

Согласно техническим условиям предприятия, к глинистому сырью установлены следующие требования:

- эффективная удельная радиоактивность менее 370 Бк/кг,
- содержание включений >0,315 мм не более 1%,
- содержание свободного кремнезёма не более 60%,
- содержание карбонатов по массе не более 1%,
- содержание магнитной фракции (пирита, магнетита) менее 0,35 %,
- число пластичности не менее 7,

- содержание водорастворимых солей (загипсованность) в водной вытяжке из глинистого сырья не должно превышать 10 мг-экв на 100 г.

При этом содержание тонкодисперсных фракций $<0,315$ мм не регламентируется, но организация всё же проводит анализ гранулометрического состава по технологическим критериям

3.1.2. Информация о карьере

Никольский карьер имеет прямоугольную в плане форму: длина составляет чуть более 1 км, ширина — около 450 м. Карьер состоит из пяти уступов и вскрыши, мощность каждого уровня (кроме нижнего) — 6,0-6,5 м. Таким образом, глубина карьера порядка 36-40 м, и он захватывает не менее 30 м интервала разреза сиверской свиты (рис. 13). На бортах карьера активно идут процессы оползания уступов, затрудняющие добычу сырья.

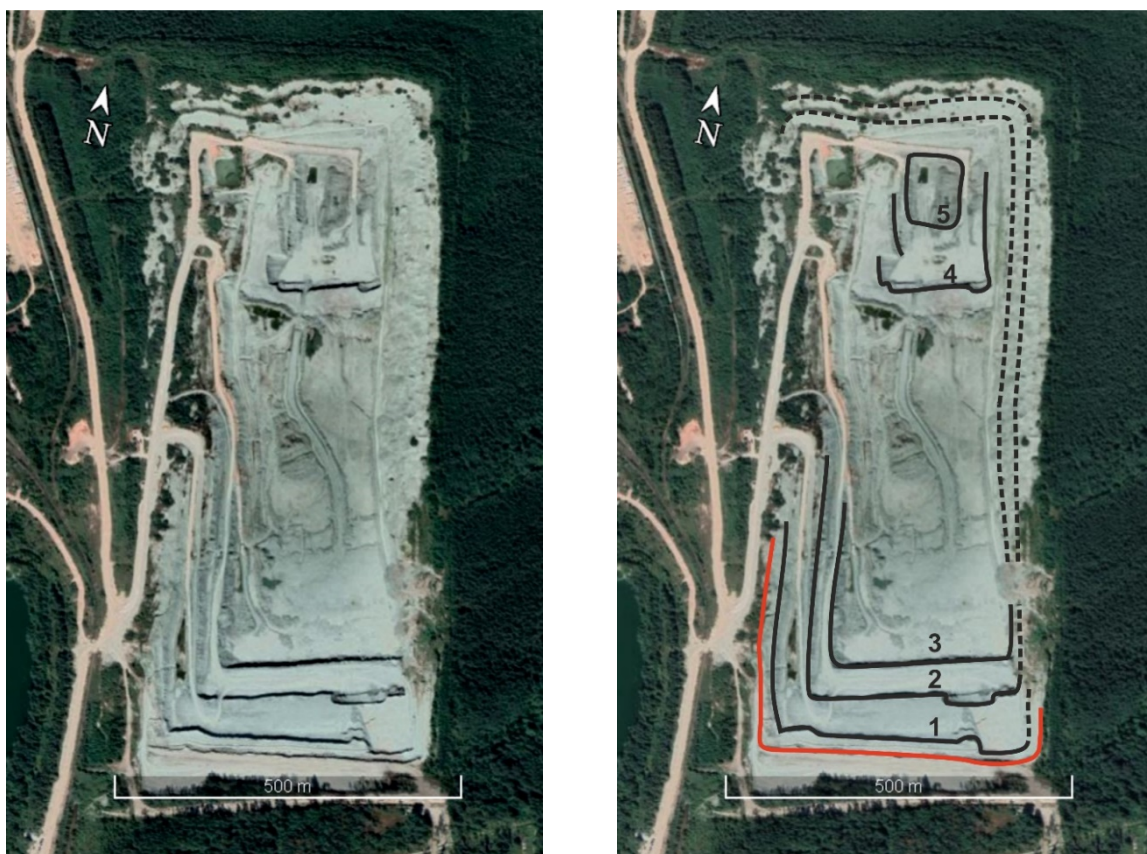


Рис. 13. Никольский карьер на космическом снимке Google Earth. Слева - до дешифровки, справа - после. Цифрами обозначена кровля соответствующего уровня (номер уступа). Красная линия - вскрышный уступ.

Сырьё для производства керамической продукции добывают из 2 и 3 уровня; кирпичи, изготовленные из глины других уровней (1 и 4) по той же технологии, не проходят приёмно-сдаточные испытания, хотя сырьё соответствует установленным ТУ. Поиск решения данной проблемы потребовал использования различных методов, в том числе и инженерной геологии.

3.2. Полевое исследование синих глин в карьере

Непосредственные наблюдения *in situ* дали идею выделения зон в «однородной» толще синих глин, поскольку отличия прослеживались невооружённым глазом.

Как было подмечено ранее в пункте 1.2. прикровельная часть толщи (первый уровень) отличается белесоватым цветом, связанным с повышенным содержанием каолинита. Контакт с вышележащими породами слабо заметный — диамиктон основной морены осташковского оледенения состоит преимущественно из голубоватого глинистого материала. Визуально он отличается только по отсутствию трещиновато-блочной структуры.

Ниже по разрезу, в верхах второго уступа присутствуют тонкие (до 5 мм) прослойки и конкреции песчаника. Залегание пород субгоризонтальное (пункт 1.2.), но присутствуют и крутые наклонные участки (рис. 14).

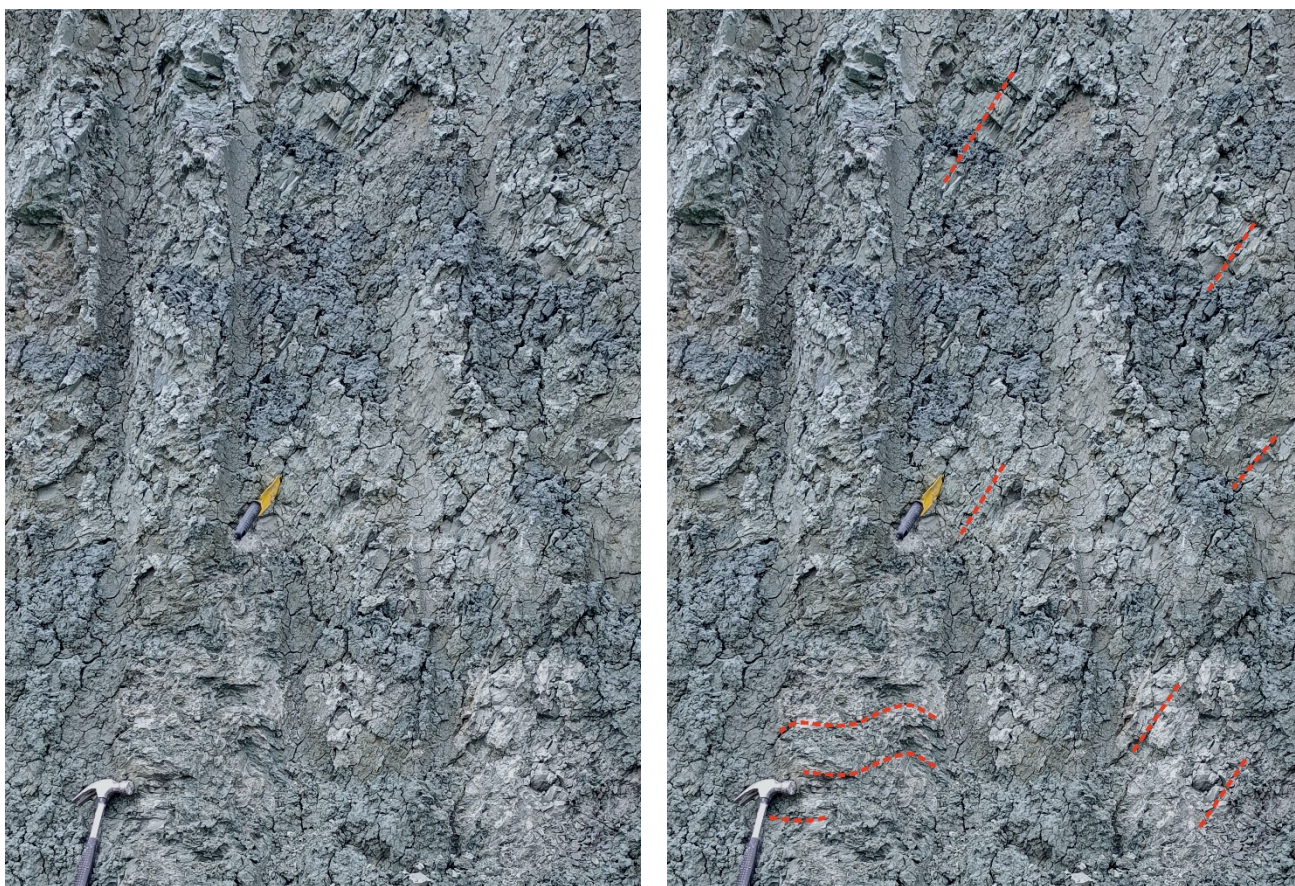


Рис. 14. Наклонное залегание синих глин. Фото автора.

Местами в глинах присутствуют минеральные образования красновато-бежевого цвета. Их расположение либо совпадает со слоистостью, либо перпендикулярно ей. Значительно реже они в породах обнаруживаются секрети. Встречаются лилово-серые прослойки. Глины третьего уровня карьера по многим характеристикам похожи на глины второго уровня: повсеместно

встречается диагенетический пирит и пиритизированные следы ползания червеобразных. Алевро-песчаные прослои отсутствуют. Трещиноватость пород аналогична представленной на рис. 10, залегание пород исключительно горизонтальное (рис. 15).



Рис. 15. Трещины в глинах на 3 уровне карьера. Фото автора

На 4 уровне заметно большое количество песчаных прослоев, их мощность достигает 7 см; также заметно наличие прослоев глины фиолетово-бурого цвета. Встречаются конкреции с нитевидными

образованиями на поверхностях напластования (рис. 16). Последний уровень карьера отличается пятнисто-полосчатой фиолетовой и зеленовато-голубой окраской.

Из каждого уровня карьера были отобраны образцы грунта на глубине примерно 0,5-0,7 м г для последующего лабораторного изучения изменения их свойств по разрезу.



Рис. 16. Фотографии образцов, отобранных из 4 уровня карьера. Сверху - косая слоистость в алевро-песчаном прослое. Справа - нитевидные структуры на поверхности напластования. Фотографии автора



3.3. Изменение свойств глин по разрезу карьера

3.2.1. Химический состав

Химический состав глин в пределах каждого уровня определён методом рентгеноспектрального анализа (РСА) испытательным центром «ООО Акцепт» по заявке компании «ЛСР. Стеновые материалы». Данные представлены в таблице 5.

Таблица 5. Изменения химического состава синих глин по разрезу, мас. %

Уровень	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃
1	59,88	18,05	6,27	5,81	3,10	0,86	0,68	0,26	0,05	0,04	0,02	0,02
2	59,95	18,29	6,38	5,70	3,00	0,87	0,45	0,18	0,06	0,04	0,01	0,01
3	59,03	18,85	6,55	5,88	3,01	0,88	0,44	0,18	0,05	0,05	0,02	0,02
4	59,75	18,06	6,32	5,79	2,86	0,84	0,30	0,19	0,05	0,04	0,01	0,01
5	58,33	18,87	7,30	5,72	3,06	0,83	0,32	0,23	0,06	0,04	0,01	0,01

Из таблицы видно, что в целом химический состав глин меняется по разрезу не сильно. Содержание кремнезёма варьирует в узких пределах 58-59%, глинозёма — 18-19 %. При этом 2, 3 и 5 уровни имеют относительно повышенное содержание Al_2O_3 . Пятый уровень отличается повышенным содержанием Fe_2O_3 , с чем может быть связана фиолетово-бордовая пятнистая окраска пород.

Значения CIA близки к 1, вероятно это объясняется тем, что образцы глин были отобраны из выветрелой приповерхностной части. Калиевый модуль составляет 0,30-0,32, что позволяет отнести глины к верхам разреза сиверской свиты (Рис. 3).

3.2.2. Гранулометрический состав

Гранулометрический состав глины из каждого уровня был определён ареометрическим методом согласно действующей нормативной документации (ГОСТ 12536-2014). Работы проведены с использованием разделяющей добавки (пирофосфат натрия $Na_4P_2O_7$) и без неё. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6. Гранулометрический состав глин из разных уровней карьера

уровень карьера	Фракция, мм						
	песок крупный	песок средний	песок мелкий	песок тонкий	пыль крупная	пыль мелкая	глина
	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
Без добавления пирофосфата							
1	4,96	4,93	10,94	9,85	21,53	37,81	9,98
2	1,59	3,31	7,59	6,78	23,07	17,3	40,37
3	1,48	3,14	6,71	10,08	20,82	21,34	36,43
4	0,64	1,05	2,06	4,17	24,73	59,46	7,89
5	1,55	2,23	2,13	57,38	1,57	2,1	33,03
С добавлением пирофосфата							
1	4,96	4,93	10,94	3,55	26,26	24,68	24,68
2	1,59	3,31	7,59	3,64	24,64	11,01	48,23
3	1,48	3,14	6,71	3,83	24,98	18,74	41,11
4	0,64	1,05	2,06	5,22	25,78	45,25	20,00
5	1,55	2,23	2,13	2,85	16,25	27,27	47,72

Первое представление о возможных результатах дали различия грунтовых суспензий в цилиндрах (рис. 17). Основные изменения наблюдаются в содержании мелкой пыли и глинистых частиц. 2, 3 и 5 уровни обладают повышенным содержанием глинистых частиц —

41-48 %, на 4 уступе преобладает мелкая пылеватая фракция, а первый уступ в целом характеризуется более грубым материалом. Преобладание глинистой фракции 2, 3 и 5 уровней отлично коррелирует с несколько повышенной концентрацией в них глинозёма.

Вероятно, различия в глинистой фракции повлияли на характеристики изготавливаемой керамической продукции — поэтому обожжённые кирпичи из глин 1 и 4 уровня не выдерживали испытаний. Также, исходя из результатов, можно отметить важность добавления в грунтовую суспензию стабилизатора (*Инструкция...*, 1971).

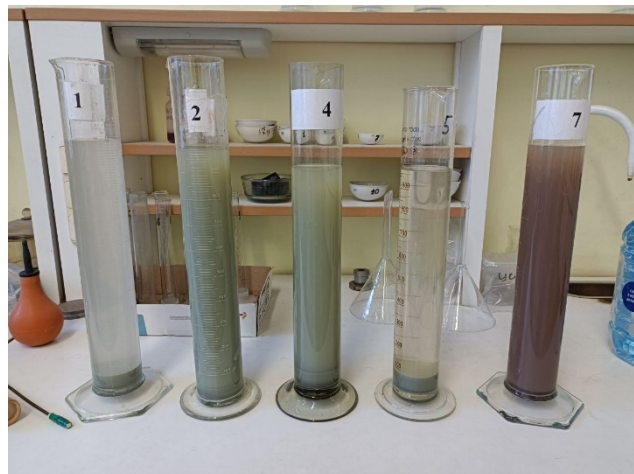


Рис. 17. Цилиндры спустя 11 часов после начала проведения измерений реометром.

3.2.3. Минералогический состав

Вхождение в состав тонкодисперсных глин тех или иных минеральных фаз было определено рентгенофазовым анализом (РФА) в ресурсном центре СПбГУ. Для проведения эксперимента глина в держателе была помещена в порошковый дифрактометр Rigaku «MiniFlex II», оснащённый высокоскоростным энергодисперсионным детектором отражённых рентгеновских лучей DTEX/ULTRA. Измерения проводились с монохроматическим $\text{CuK}\alpha$

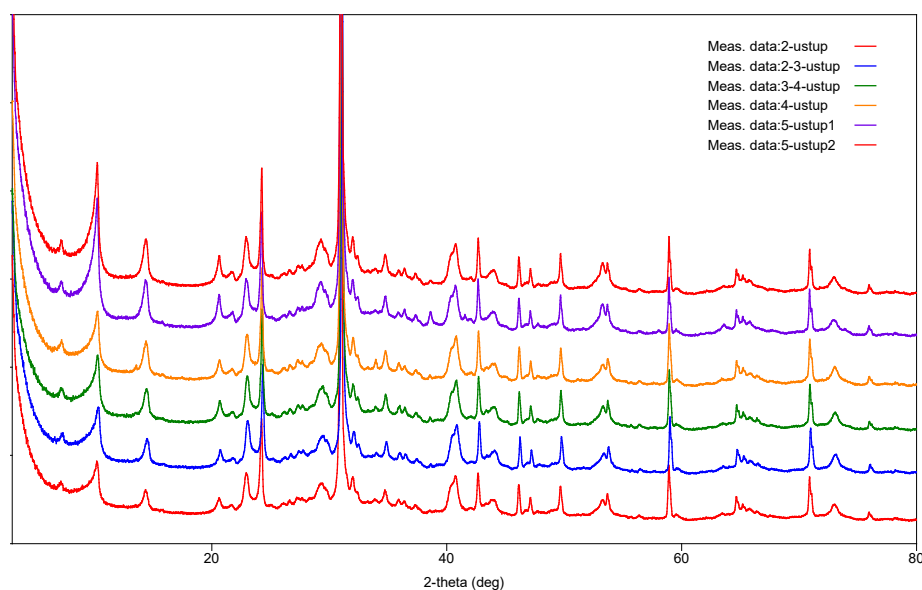


Рис. 18. Пики минеральных фаз в синей глине. Верхней красной линии соответствует глина из 1-го уровня, ниже - 2 уровень и т.д. Пятый уступ был снят дважды.

излучением при 30 кВ и 15 мА. На основании обработанных в программе PDXL материалов были получены дифрактограммы для глин из пяти уровней (рис. 18).

Схожесть минерального состава различных уровней синих глин прослеживается отчётливо; в связи с этим выделение фаз производилось только для последнего измерения. Результаты представлены на рисунке 19.

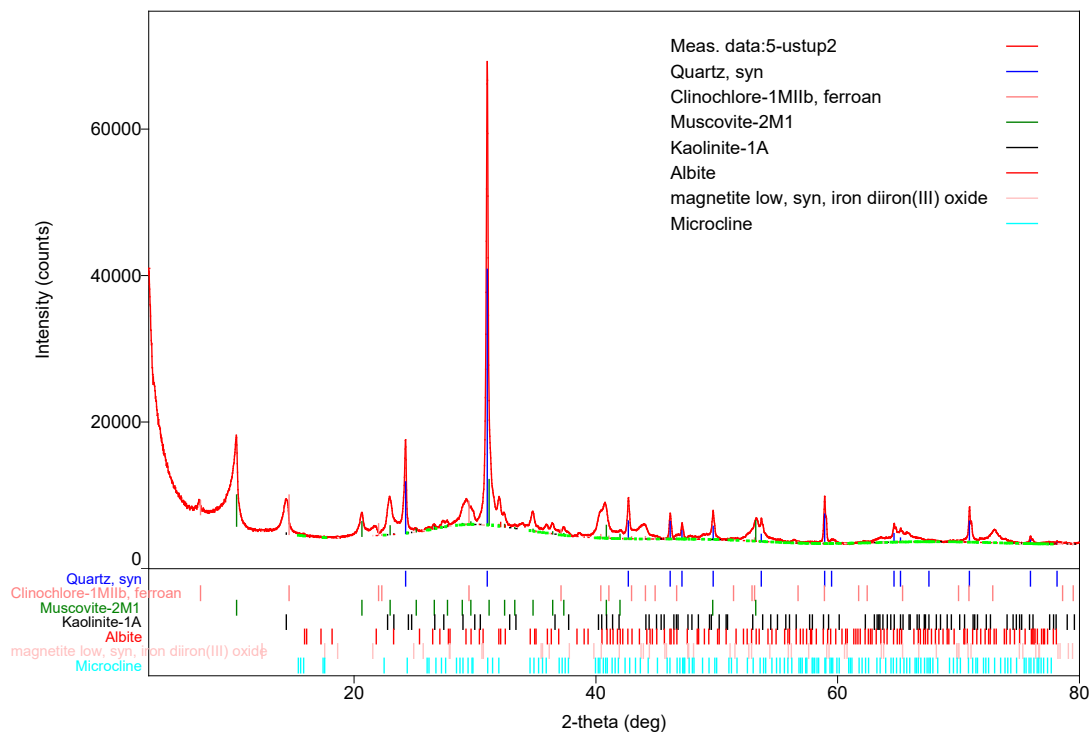


Рис. 19. Выделенные минеральные фазы синих глин на дифрактограмме.

Таким образом, собственно глинистая фаза состоит из клинохлора (хлорита), каолинита и иллита (представлен как Muscovite-2M1). Трудности разделения иллита и мусковита на дифрактограмме связаны с их идентичной кристаллографической структурой (Kubliha и др., 2017) (рис. 20). Отличия между двумя минеральными фазами заключаются в дефиците межслоевых катионов калия в иллите. Этот факт и обуславливает непрочность кристаллических связей, что проявляется в размере кристаллов: кристаллы мусковита могут достигать 1 м, в то время как кристаллиты иллита обычно меньше 10-20 мкм (Рис. 7).

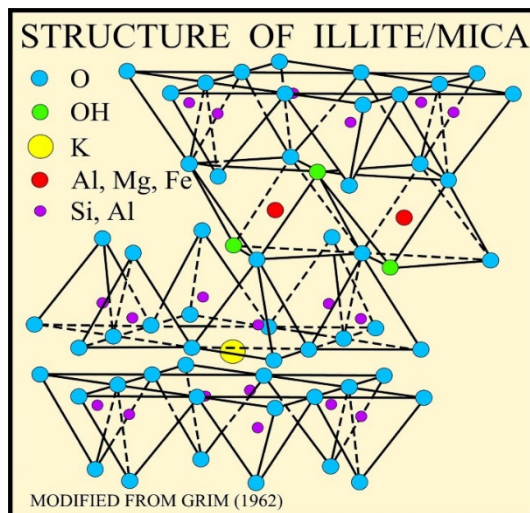


Рис. 20. Структура иллита/мусковита.

Другой примечательной особенностью является постепенное снижение интенсивности пиков каолинита в глинах от 1 к 5 уровню карьера, что говорит о закономерном уменьшении его концентрации вниз по разрезу. Это ещё раз подтверждает его элювиальную природу.

Песчаные и пылеватые фракции представлены обломками кварца, микроклина и кислого плагиоклаза, магнетита, возможно, мусковита. Об их концентрациях по данным рентгенофазового анализа судить не представляется возможным.

3.2.4. Физические свойства

Определение физических свойств грунтов происходило согласно (ГОСТ 5180-2015). Результаты определений представлены в таблице 7.

Из неё видно, что в общих чертах данные схожи со значениями физических показателей, полученными предыдущими исследователями (см. таблицу 2). Серьёзно отличаются определения плотностей грунта: мной они производились методом режущего кольца по блокам породы. Отсекая часть глины, расположенную вне кольца, получить завышенные значения плотностей породы не представляется возможным. Вероятно, это связано с тем, что я исследовал не весь трещиноватый массив глин определённого уровня, а отдельные уплотнённые блоки.

Плотность частиц соответствует характерным плотностям глинистых минералов. Пористость, как и указывалось ранее, составляет около 30%. Повышенная пористость для 3 и 5 грунтов, возможно, связана с малой глубиной и длительным воздействием агентов выветривания на грунт в месте отбора, несмотря на то что карьер относительно молодой. Гигроскопическая влажность колеблется в незначительных пределах.

Пределы пластичности идентичны с указанными ранее, отрицательный показатель текучести свидетельствует о твёрдом состоянии глин. 4 уровень, где преобладает пылеватая фракция, имеет соответственно более низкое число пластичности, относящее его к суглинкам.

Таблица 7. Изменение физических свойств по разрезу глин сиверской свиты

Уступ	Плотность ρ , г/см ³	Влажность W, %	Плотность частиц ρ_s , г/см ³	Плотность скелета ρ_d , г/см ³	Пористость n, %	Гигроскопическая влажность W _Г , д. ед.	Предел пластичности		Число пластичности I _p , ед.	Показатель текучести I _L , ед.
							Нижний W _p , д. ед.	Верхний W _L , д. ед.		
1	2,34	19,79%	2,80	1,97	29,50%	0,0127	0,23	0,42	0,18	-0,18
2	2,37	20,72%	2,81	1,99	29,22%	0,0125	0,28	0,49	0,20	-0,37
3	2,21	22,98%	2,84	1,80	36,67%	0,0123	0,24	0,47	0,22	-0,05
4	2,33	21,93%	2,79	1,91	31,58%	0,0123	0,28	0,42	0,14	-0,39
5	2,13	23,27%	2,81	1,73	38,52%	0,0136	0,34	0,54	0,20	-0,53

3.2.5. Трещиноватость и оползневые процессы

В карьере на бортах всех уровней (кроме вскрышного) в нижнекембрийских глинах наблюдались трещины субвертикального и субгоризонтального направлений, наклонные наблюдались реже (Рис. 15). Разрывы сплошности пород составляют до 3 см.

Происхождение трещин вероятно, комплексное. Если обратить внимание на расположение плоскостей минеральных образований относительно слоистости, то также будут заметны два преимущественных направления — вдоль и поперёк слоистости. Их образование, возможно, связано с выветриванием глин в пост-сиверское время; но при дальнейшем погружении бассейна в палеозое они залечились поровыми растворами на стадии раннего катагенеза. В наиболее крупных — развились секреции (рис. 21).



Рис. 21. Секреции в нижнекембрийской глине.
Фото автора.

Трещиноватая, обводнённая кровля глин на контакте с четвертичными отложениями является отличной смазкой для скольжения крупных блоков пород, в результате чего на карьере наблюдаются консеквентные оползневые процессы. На рисунке 13 в южной части восточного борта карьера заметен недавно произошедший оползень. Они развиваются на неэксплуатируемых участках, где не происходит добычи разуплотнённой и влажной глины, и отсутствует мониторинг за состоянием стенок карьера. Оползни ограничивают глубину разработки месторождения глин, а также могут стать причиной аварий на карьере; последние требуют выполнения предупреждающих мероприятий.

3.4. Сравнение свойств глин в карьере и в разрезе всей толщи

Крупные пласты глин, будучи легко размываемыми, выходят на дневную поверхность лишь по берегам рек. Анализ скважинных данных не позволяет получить объёмной картины, поскольку невозможно проследить структурно-текстурные особенности пород по латерали. Только карьеры глин представляют собой крупные искусственные обнажения, где заметны и вертикальные, и латеральные изменения свойств пород.

Сравнительная характеристика свойств глин в карьере и вне показала, что некоторые особенности строения толщи не выделяются даже при узкоспециализированных исследованиях (Подковыров и др., 2017), (Коробко и Дашко, 2015). Например, изменения

гранулометрического состава и натурные наблюдения показывают, что песчаные и алевритовые прослои не редки в толще глин, а сама она местами переходит в глинистые алевриты, уступающие по своим пластическим свойствам.

В то же время многие элементы её строения довольно подробно описаны в литературе. Минеральный и химический состав глин изменяются в малых пределах, намного более значительны изменения с глубиной физических и механических характеристик, обусловленные трещиноватостью и изменениями гранулометрического состава.

Гляциодислокации, выделенные специалистами в области четвертичной геологии и описанные в характерных конкретных разрезах, прослеживаются и на карьере, но в меньшем масштабе. Оползни также развиты в пределах карьера.

Таким образом, практически все свойства синих глин как толщи (за исключение нижнего контакта), и все процессы с ними связанные, проявлены в пределах довольно глубокого искусственного обнажения — Никольского карьера. Их подробное изучение позволит построить более качественные модели поведения синих глин, которые могут быть использованы там, где непосредственное наблюдение недоступно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования были обобщены сведения о толще нижнекембрийских синих глин сиверской свиты. Проанализировано их положение в региональной структуре, литологические и геохимические характеристики, уточняющие историю геологического развития региона в низах кембрия. Также учтено влияние оледенений на залегание пород и их свойства, дана гидрогеологическая характеристика водоупорного горизонта непосредственно синих глин, выше- и нижележащих водоносных горизонтов. Рассмотрены инженерно-геологические свойства глин и их зональность по разрезу.

По итогам полевых и лабораторных исследований глин в карьере, были установлены следующие особенности их строения:

1. В верхней, прикровельной части глины сильно дислоцированы, реже — смяты, и обладают повышенной трещиноватостью, влажностью, содержанием каолинита. С глубиной данные параметры убывают до определённой постоянной величины.

2. Гранулометрический состав глин изменяется независимо от глубины залегания, он определяется только условиями осадконакопления. 1 и 4 уровни карьера характеризуются повышенным содержанием пылеватых фракций, на 4 уровне часты песчаные прослои.

3. Минералогический состав глин постоянен, химический изменяется в узких пределах: 2, 3 и 5 уровни отличаются несколько повышенным содержанием глинозёма Al_2O_3 , а 5 уровень — содержанием окислов железа Fe_2O_3 .

4. По физическим свойствам глины характеризуются как уплотнённые, твёрдые, с пористостью в пределах 30%. Влажность пород сильно зависит от конкретного места отбора проб грунта.

Таким образом, для производства керамики наиболее перспективна добыча глин из 2 и 3 уровня, поскольку они обладают повышенным содержанием глинистых частиц, трещиноватостью и сравнительной однородностью. Глины 1 и 4 уступов сильно алевритистые, местами переходят в суглинки. Добыча сырья из 5 уступа требует вскрыши четвёртого, что понижает рентабельность его разработки.

Комплексное исследование синих глин в карьере позволило не только подтвердить установленные ранее закономерности зонального изменения свойств от глубины залегания, но и выявить литологические различия в самом разрезе сиверской свиты нижнего кембрия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Arnould, M., 2006. Discontinuity networks in mudstones: A geological approach. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 65, 413–422. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0060-3>
- Gorokhov, I.M., Clauer, N., Turchenko, T.L., Melnikov, N.N., Kutuavin, E.P., Pirrus, E., Baskakov, A. V., 1994. Rb-Sr systematics of Vendian-Cambrian claystones from the east European Platform: implications for a multi-stage illite evolution. *Chem. Geol.* 112, 71–89. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90105-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90105-8)
- Kubliha, M., Trnovcová, V., Ondruška, J., Štubňa, I., Bošák, O., Kaljuvee, T., 2017. Comparison of dehydration in kaolin и illite using DC conductivity measurements. *Appl. Clay Sci.* 149, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.012>
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climate и plate motions inferred from major element chemistry of lutites.
- Rumynin, V.G., 2011. Study of Physical, Mechanical, Flow, и Solute Transfer Properties of Clay Formations with Respect to the Design of Underground Storage Facilities for RW Disposal. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1306-2_22
- Suuroja, K., Vingisaar, P., 1997. The bedrock geological map of Estonia, scale 1 : 400 000. Explanatory note.
- Ylo, S., Petersell, V., 2005. Estonian soils macro- и micronutrient content dependence from the local bedrock и transported by ice fennoscian material.
- Астахов, В.И., 2020. Четвертичная геология суши. Санкт-Петербург.
- Вербицкий, В.Р., Вербицкий, И. В. Васильева, О.В., Саванин, В.В., Кямря, В.В., Мазуркевич, К. Н. Кротова-Путинцева, А. Е. Семёнова, Л.Р., Богданов, Ю.Б., Петров, Б.В., Максимов, А.В., Горбачев, Н.Р., Иванова, Т.А., Енгальчев, С.Ю., Жамойда, В.А., Мохов, В.В., Суслов, Г.А., Журавлева, О.Ю., Михайлов, М.В., Русецкая, Г.А., Бутаков, П.М., Вербицкая, Н. В. Галитарова, А.С., 2012. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (тре- тье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35 – Псков, (N-35), О-36 – Санкт-Петербург. Объяснительная записка. Санкт-Петербург.

- Гидроспецгеология, Ф., 2021. ФГБУ Гидроспецгеология [WWW Document]. URL geomonitoring.ru/
- Голубев, С.А., Заботкин, А.А., Атюнина, М.А., 2021. Информационная сводка о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации. Центр государственного мониторинга состояния недр и региональных работ 345.
- Дашко, Р.Э., Александрова, О.Ю., Котюков, П.В., Шидловская, А.В., 2011. Особенности Инженерно - Геологических Условий Санкт-Петербурга. Развитие Городов И Геотехническое Строительство 1–47.
- Дашко, Р.Э., Волкова, А.В., 2004. Геомеханический анализ коренных глин Санкт-Петербурга как трещиновато-блочной среды. Записки Горного института 156, 118–122.
- Земятченский, П.А., 1937. Месторождения глин СССР. Описание, свойства, состав и применение. Ленинград.
- Зернова, Л., 2021. Красный Бор. Свалка.
- Инструкция по проведению гранулометрического анализа грунтов ускоренным методом, 1971. . Москва.
- Коробко, А.А., Дашко, Р.Э., 2015. Инженерно-геологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах предглинтовой изменности (Санкт-Петербургский регион). Санкт-Петербург.
- Левков, Э.А., 1980. Гляциотектоника. Минск.
- Лобанов, И.Н., 1976. О природе дислокаций Дудергофских высот в окрестностях Ленинграда. Геотектоника 51.
- ЛСР.Стеновые, 2022. Документация ЛСР [WWW Document]. URL lsrstena.ru/o-kompanii/dokumenty
- Межгосударственный совет по стандартизации метрологии и сертификации (МГС), 2015а. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- Межгосударственный совет по стандартизации метрологии и сертификации (МГС), 2015b. Гост 5180-2015 Грунты. Методы Лабораторного Определения Физических

Характеристик. Россия.

Межгосударственный совет по стандартизации метрологии и сертификации (МГС), 2013.

ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Россия.

Оловянный, А.Г., 2012. Механика горных пород. Моделирование разрушений. КОСТА, Санкт-Петербург.

Осипов, В.И., Соколов, В.Н., 2013. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. ГЕОС, Москва.

Осипов, В.И., Соколов, В.Н., Румянцева, Н.А., 1989. Микроструктура глинистых пород. Недра, Москва.

Охотин, В.В., 1933. Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. ЛенГосТрансИздат, Ленинград.

Плечкова, И.Л., Дашко, Р.Э., 1996. Инженерно-геологический анализ и оценка синих нижнекембрийских глин предглинтового района г. Санкт-Петербург. Санкт-Петербург.

Подковыров, В.Н., Котова, Л.Н., 2020. Литогеохимия И Условия Формирования Отложений Верхнего Венда И Нижнего Кембрия Северо-Запада Балтийской Моноклинали *. Вестник Спбгу 600–619.

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. <https://doi.org/10.7868/s0869592x16060065>

Рейнек, Г.-Э., Сингх, И.Б., 1981. Обстановки Терригенного Осадконакопления (С Рассмотрением Терригенных Кластических Осадков) 439.

Савина, И.В., Бурлуцкий, С.Б., 2018. Анализ влияния природных факторов на изменение параметров прочностных свойств нижнекембрийских глин в Ленинградской области. Санкт-Петербург.

Савоненков, В.Г., Андерсон, Е.Б., Шабалев, С.И., 2012. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. Санкт-Петербург.

Селиванова, В.А., Кофман, В.С., 1971. Геология СССР. Том I Ленинградская, Новгородская и Псковская области 1, 504.

Сидоренко, А.В., Роговская, Н.В., Толстихин, Н.И., Фомин, В.М., 1967. Гидрогеология СССР. Том 3 - Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Недра, Москва.

Скляр, Е.В., 2001. Интерпретация геохимических данных. Москва.

Фролов, В.Т., 1992. Литология. Книга 1.

Чиркст, Д.Э., Литвинова, Т.Е., Черемисина, О.В., Стрелецкая, М.И., Иванов, М.В., Мироненкова, Н.А., 2001. Разработка физико-химических основ и опытной технологии дезактивации грунтов от загрязнения радионуклидами цезия и стронция. Записки Горного института 149.