ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 624.131.7

Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ

Р.Э.ДАШКО, Г.А.ЛОХМАТИКОВ✉
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы корректности инженерно-геологической и гидрогеологический оценки верхнекотлинских глин, которые служат как основание либо вмещающая среда сооружений различного назначения. Утверждается, что верхнекотлинские глины необходимо рассматривать как трещиновато-блочную среду, и, следовательно, их анализ как абсолютного водоупора полностью исключается. Наличие в нижней части разреза венских отложений высоконапорного вендского водоносного комплекса вызывает перетекание этих минерализованных вод через трещиноватую толщу глин, способствуя развитию деформаций подъема тоннелей, а также коррозии их обделок, природа которой определяется не только химическим составом и физико-химическими особенностями вод, но и биохимическим фактором – наличием богатого микробного сообщества. Впервые было исследовано влияние перетекания минерализованных вод вендского комплекса на негативное преобразование блоков глин. По результатам экспериментов было установлено снижение показателей их сопротивления сдвигу за счет трансформации структурных связей и микробной деятельности при сохранении физического состояния. Для Санкт-Петербургского региона проведена типизация разреза верхнекотлинских глин по сложности условий наземного и подземного строительства. Трещиноватость коренных глин, возможность перетекания напорных подземных вод через трещиноватую толщу и последующее снижение прочности блоков, а также активная коррозия подземных несущих конструкций должны учитываться при проектировании уникальных и типовых наземных и подземных сооружений и быть включены в нормативные документы.

***Ключевые слова*:** верхнекотлинские глины; трещиновато-блочная среда; вендский водоносный комплекс; перетекание подземных вод; деформации тоннелей; типизация разреза; снижение прочности глин; микроорганизмы; биокоррозия

Поступила: 16.12.2021 ***Принята: 07.04.2022*** ***Онлайн: 31.05.2022*** ***Опубликована: 13.07.2022***

Введение. Рост этажности наземных зданий и сооружений, активное использование подземного пространства по мере развития мегаполиса поднимает вопрос о корректном анализе коренных глинистых отложений Санкт-Петербургского региона, которые оцениваются в нормативных документах как надежное основание. Данные породы используются как среда для устройства подземных сооружений, прежде всего транспортного назначения – перегонных тоннелей и подземных станций метрополитена [1-3], а также потенциально рассматриваются как геологическая формация для изоляции особо опасных промышленных отходов, в том числе радиоактивных [4].

Практический опыт строительства и эксплуатации подземных и наземных сооружений, взаимодействующих с верхнекотлинскими глинами венда, показывает, что достоверность инженерно-геологического, геотехнического и гидрогеологического [5] анализа этих образований требует нетривиального подхода [6-8] к оценке специфики формирования их трещиноватости и учета структурно-тектонических условий [9, 10], а также преобразования таких отложений под действием природных и техногенных факторов [11, 12], связанных с особенностями освоения и использования подземного пространства в пределах Санкт-Петербургского региона, городской инфраструктуры, а также вне ее.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.13

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190
© Р.Э.Дашко, Г.А.Лохматиков, 2022

Обсуждение. ***Инженерно-геологическая и гидрогеологическая оценка коренных глин венда.*** На рассматриваемой территории к коренным глинистым отложениям венда относятся породы верхневасилеостровской свиты котлинского горизонта верхнего венда (верхнекотлинские глины). Эти образования принадлежат к прибрежно-морским фациям и характеризуются как зеленовато-серые гидрослюдисто-каолинитовые глины высокой степени литификации с повышенным содержанием алевритовой фракции и тонким чередованием пылеватых и глинистых прослоев. До середины 20 в. эти отложения датировались как нижнекембрийские и назывались ляминаритовыми глинами по органическим остаткам водорослей *Laminarites*, которые часто прослеживаются на поверхностях напластования [13].

Изучение коренных глин верхнего венда, а также их трещиноватости было активно начато в середине 20 в. специалистами Санкт-Петербургского горного университета [14-16].

Специфика формирования трещиноватости коренных глин верхнего венда согласуется с геологической историей развития Санкт-Петербургского региона, которая может быть разделена на четыре этапа (рис.1).

- Этап прогрессивного литогенеза продолжался более 300 млн лет вплоть до позднего карбона, в течение которого на описываемой территории наблюдалось гравитационное уплотнение и дегидратация морских отложений под давлением до 9-10 МПа. На этом этапе происходило формирование прочных структурных связей, а также субгоризонтальных литогенетических трещин [17]. В процессе тектонической активизации региона наблюдалось образование субвертикальных, либо крутопадающих трещин и деление глинистых пород на блоки (тектоническая трещиноватость).
- С конца каменноугольного периода начался продолжительный континентальный этап развития региона вплоть до плейстоцена – регрессивная стадия литогенеза. В этот период глины были выведены на дневную поверхность, шла их дополнительная гидратация, раскрытие ранее существовавших сомкнутых трещин и формирование трещин физического выветривания. С позднего неогена началось активное развитие речных долин в регионе, заложенных преимущественно по тектоническим разломам, причем углы бортов долин в разрезе глинистых пород составляли, как правило, 12-16° (редко до 18°). На этом этапе шло образование трещин упругого отпора, субпараллельных бортам долины, а также оползневых. В настоящее время эти речные палеодолины заполнены четвертичными отложениями, глубина их вреза в глинистые породы венда может достигать 90 м (Васильевский о-в, площадь Мужества).
- Третий этап начался в раннечетвертичном времени с наступлением материкового оледенения. В этот период в ходе ледниковых и межледниковых фаз коренные глины испытывали значительные циклические нагрузки, достигавшие на разных стадиях 10-30 МПа. Помимо тектонических и нетектонических трещин, по мере движения ледника шло развитие трех систем гляциотектонических трещин, одна из которых совпадает с направлением его наступления, а две других – перпендикулярны [18, 19].

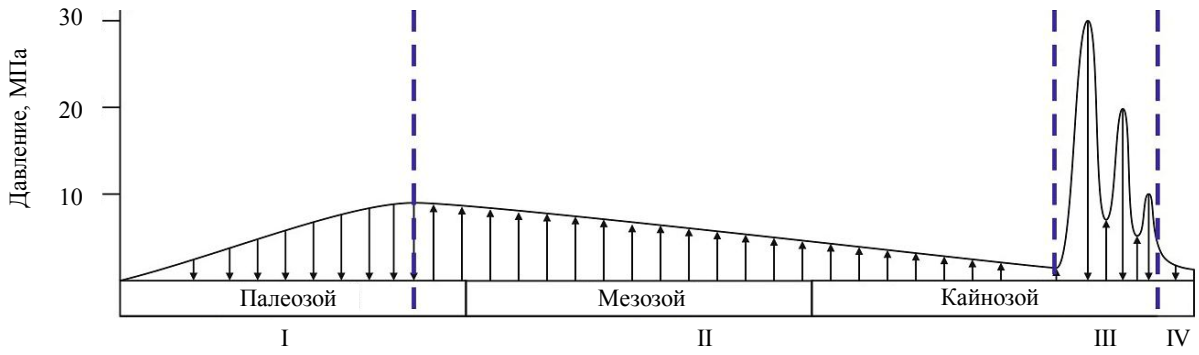


Рис.1. Схематичное изображение временных этапов (I-IV) формирования коренных глин венда Санкт-Петербургского региона

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190
DOI: 10.31897/PMI.2022.13
© Р.Э.Дашко, Г.А.Лохматиков, 2022

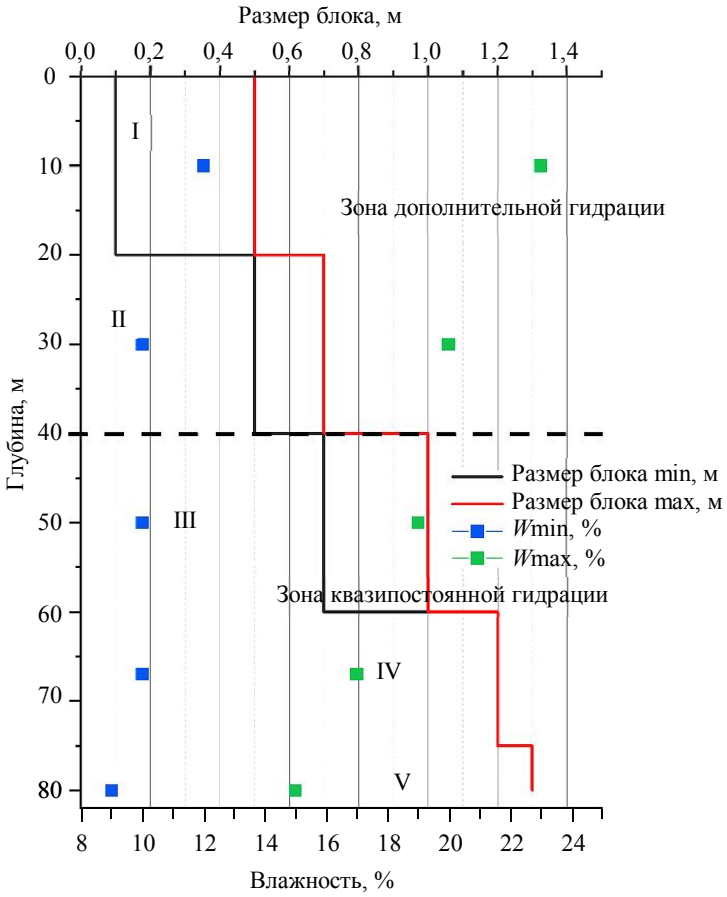


Рис.2. Инженерно-геологическая зональность толщи верхнекотлинских глин Санкт-Петербургского региона

I-V – подзоны

• На четвертом этапе, в голоцене, развитие трещиноватости происходило преимущественно в связи с разгрузкой отложений, современной тектонической активностью и, в меньшей степени, на локальном и объектном уровне при проходке подземных выработок. Многофакторные исследования истории геологического развития региона, в том числе обработка инженерно-геологической информации глубоких скважин, дали возможность установить основные отличительные черты строения толщ коренных глин in situ – их зональность. При этом, в зависимости от структурно-тектонических условий, следует дифференцированно рассматривать особенности трещиноватости глин полного разреза вне участков разломов и в пределах погребенных долин, где выраженная зональность отчетливо нарушается. Так, вне зон тектонических нарушений и погребенных долин толща верхнекотлинских глин была разделена на пять подзон (рис.2) [15].

Вне зависимости от глубины заложения сооружения, подход к анализу коренных глин как трещиновато-блочной среде сохраняется. Необходимо отметить, что на участках дизъюнктивных нарушений, к которым часто приурочены палеодолины, наблюдается рост интенсивности макро- и микротрещиноватости и, соответственно, уменьшение размеров блоков пород. Согласно подсчетам авторов, до 60 % территории Санкт-Петербурга попадает в зону влияния погребенных долин, при этом расчеты по отдельным островам показывают, что распределение палеоврезов неодинаково (табл.1).

Таблица 1

Территория палеодолин в дельтовой (островной) части Санкт-Петербурга

Острова	Площадь, занятая палеодолинами, %
Адмиралтейский (-1, -2 и Ново-)	75
Казанский	67
Безымянный	54
Петровский	52
Спасский	49
Васильевский, Декабристов	43
Петроградский, Аптекарский, Заячий, Кронверкский	26
Крестовский	26
Каменный	
Коломенский	Вне палеодолин
Матисов	

Вне палеодолин глубина залегания кровли верхнекотлинских глин достигает 20-30 м. Поскольку более половины площади мегаполиса находится в области их влияния, использование отложений венда в качестве несущего горизонта для свайных фундаментов зданий и различных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.13

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190
© Р.Э.Дашко, Г.А.Лохматиков, 2022

сооружений существенно ограничено по площади. Так, строительство жилых домов комплекса «Васильевский квартал» в 2010 г. было одним из первых случаев, когда верхнекотлинские глины были использованы как несущий горизонт для свайного фундамента многоэтажного здания (рекомендации Р.Э.Дашко). Необходимость такого решения была продиктована наличием в разрезе моренных грунтов со слабой несущей способностью, имеющих пластический характер деформирования и разрушения из-за высокого уровня контаминации органическими соединениями абиотической и биотической природы. Поскольку такие ледниковые грунты широко распространены в разрезе контаминированной подземной среды мегаполиса, а в строительстве наблюдается повышение этажности зданий и рост глубины подземного контура зданий, использование верхнекотлинских глин в качестве несущего горизонта свайных фундаментов находит все более широкое применение [15, 20].

Инженерно-геологическая типизация разреза верхнекотлинских глин. Анализ и оценка состояния и физико-механических свойств верхнекотлинских глин как по глубине разреза, так и по площади проводится с учетом степени их трещиноватости, позволяющей выделить ряд характерных разрезов различной степени сложности при освоении и использовании подземного пространства (рис.3).

Как известно, породы верхнего венда прослеживаются под четвертичной толщей в северных и центральных районах Санкт-Петербурга, а также северной части Предглинтовой низменности. Ввиду особенностей инженерно-геологических условий мегаполиса эти отложения широко использовались и используются как вмещающая среда для тоннелей и станций метрополитена, а также глубоких канализационных коллекторов. В настоящее время, благодаря применению специальных проходческих щитов с активным пригрузом, проходка большинства станций неглубокого заложения и перегонных тоннелей проводится в четвертичных ледниковых отложениях.

Авторами предлагается выделение двух зон (вне и в области влияния погребенных долин) и четырех подзон (рис.3) в зависимости от степени их трещиноватости, влияющей на инженерно-геологические особенности глин: «фоновая» подзона (минимальная трещиноватость), подзона тектонических нарушений, а также в пределах зоны палеодолин – склоновые части и тальвеги. Ввиду того, что анализ проводился в первую очередь для типового гражданского строительства, глубина заложения свай была условно ограничена 30-40 м. Однако для уникальных сооружений она может значительно превышать эту величину [21].

Фоновая подзона является наиболее благоприятной с точки зрения использования как основания наземных сооружений, так и вмещающей среды для подземных, она характеризуется наименьшей степенью дезинтегрированности коренных глин, зональным строением и закономерным снижением влажности, ростом плотности, прочности и модуля деформации с глубиной. Водопроницаемость с учетом фоновой трещиноватости составляет около 10^{-3}-10^{-4} м/сут, в верхней зоне

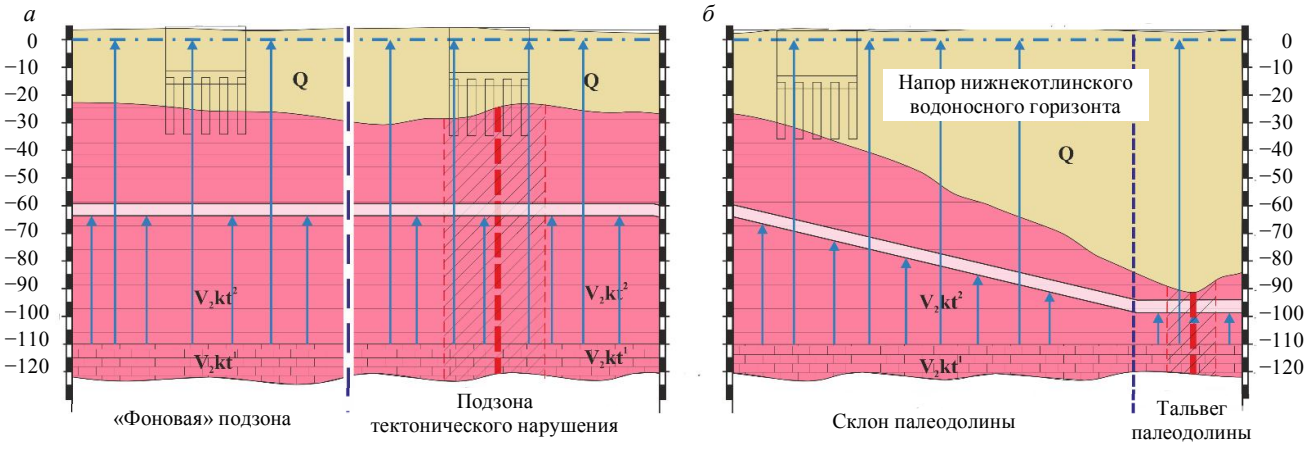


Рис.3. Схематизация коренных глин верхнего венда с выделенными типовыми разрезами вне (*а*) и в пределах (*б*) погребенных долин

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

с наибольшей трещиноватостью коэффициент фильтрации может возрастать до 10^{-2} м/сут. При устройстве глубоких фундаментов уникальных зданий следует принимать во внимание локальный рост трещиноватости толщи коренных глин в процессе производства работ по созданию буронабивных свай. Опыт строительства и начального этапа эксплуатации уникального высотного здания в городе убедительно свидетельствует об активном восходящем перетекании подземных вод вендского водоносного комплекса через трещиноватую глинистую толщу верхнего венда и по боковой поверхности свай [22]. Вместе с тем, в ходе проектирования данного здания в соответствии с нормативными документами верхнекотлинские глины рассматривались как абсолютный водоупор, и комплексное воздействие высоконапорных вод (напоры более 100 м) не было принято во внимание. В подвале уникального здания были оборудованы зумпфы, из которых ведется постоянная откачка минерализованных вод [22].

В *подзоне тектонических нарушений* степень трещиноватости пород существенно выше, в связи с чем зональность изменения свойств с глубиной практические не прослеживается, показатели прочности и деформационных свойств оказываются существенно ниже, чем для фоновой подзоны. Обработка результатов изысканий по разрезу участка строительства Охта-центра показала, что изменения интенсивности трещиноватости по глубине не наблюдается и не было зафиксировано закономерного роста показателей прочности образцов верхнекотлинских глин [10, 23, 24]. Важную роль в устойчивости как подземных, так и наземных сооружений, построенных в этой зоне, будет играть повышенная проницаемость коренных глин и соответственно перетекание напорных вод вендского водоносного комплекса.

Помимо гидродинамического давления на несущие конструкции, подземные воды будут оказывать негативное влияние за счет физико-химических условий (величина Eh имеет отрицательные значения), химического состава – воды хлоридные натриевые с минерализацией 3-5 г/дм^3, редко до 7 г/дм^3. Кроме того, эти воды содержат богатое микробное сообщество – согласно ранее проводившимся косвенным исследованиям [25, 26], а также согласно результатам проведенного метагеномного анализа 16S рРНК были выявлены представители 115 родов бактерий. Доминирующими оказались протеобактерии, на долю которых пришлось около 80 % суммарной ДНК, выделенной из проб. Отрицательные значения окислительно-восстановительного потенциала определяют доминирующее положение таксонов анаэробных бактерий: сульфатредуцирующих, ответственных за присутствие сероводорода в этих водах, аммонифицирующих, продуцирующих аммиак, который в форме иона аммония NH_4^+ присутствует в водоносном горизонте. Существование железобактерий, главным образом железовосстанавливающих, способствующих трансформации Fe^0 в Fe^{2+}, а также редукции Fe^{3+} в Fe^{2+}, провоцирует коррозию сталей. В воде действуют также анаэробные формы водород-генерирующих бактерий, а также факультативные группы: денитрифицирующие и водород-окисляющие. Следует подчеркнуть, что денитрификаторы способствуют образованию молекулярного азота N_2. Меньшая численность отмечена для факультативных аэробов – силикатных и тионовых бактерий. Наличие таких таксонов микроорганизмов дает возможность прогнозировать вероятность развития биокоррозии подземных конструкций. Генерация сероводорода весьма опасна для бетонов и металлов [9, 27, 28]. Активную коррозию сталей и чугунов вызывают железобактерии [29, 30], а также водородобразующие, которые способствуют при генерации молекулярного водорода резкому повышению хрупкости сталей (наводораживание) [31]. Силикатные группы бактерий утилизируют кремнезем и разрушают силикатные минералы, в том числе цементные [32, 33], а тионовые бактерии вырабатывают серную кислоту, усиливая развитие коррозии бетонов и металлов [31].

В качестве примера можно привести результаты изменения химического состава вод верхней зоны вендского водоносного комплекса по скважинам гидрогеологического мониторинга, заложенных в верхней 10-метровой толще верхнекотлинских глин, которые отражают преобразование состава подземных вод после ее взаимодействия с железобетонными буронабивными сваями (табл.2). В пьезометре П4, расположенном ниже по фильтрационному потоку, влияние такого активного взаимодействия значительно, а в пьезометре П8 вне зоны фильтрационного потока не отмечается.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.13

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190
© Р.Э.Дашко, Г.А.Лохматиков, 2022

Таблица 2

Состав вод верхней зоны вендского водоносного комплекса по мониторинговым скважинам уникального здания

Показатель	Значения показателей по пьезометрам		Показатель	Значения показателей по пьезометрам	
	П4	П8		П4	П8
Eh, мВ (in situ)	−154,2	Не опр. −35,4 (фон)	SO_4^{2+}, мг/дм^3	54	< 10
pH (in situ)	10,5	7,8	NO_2^-, мг/дм^3	0,09	< 0,02
Na^+, мг/дм^3	722	716	NO_3^-, мг/дм^3	0,23	< 0,1
K^+, м/дм^3	44	31	Кремниевая кислота (по Si), мг/дм^3	0,34	0,41
Ca^{2+}, мг/дм^3	14	85	ХПК, мгО/дм^3	460	230
Mg^{2+}, мг/дм^3	8,5	85	Перманганатная окисляемость, мгО/дм^3	76	13
NH_4^+, мг/дм^3	1,4	3,6	$БПК_5$, мгО/дм^3	79	43
Fe^{2+}, мг/дм^3	0,053	0,06	Нефтепродукты, мг/дм^3	0,25	0,27
$Fe_{общ}$, мг/дм^3	9,1	13,2	Алюминий, мг/дм^3	0,20	0,25
HCO_3^-, мг/дм^3	306	233	F^-, мг/дм^3	0,86	0,72
Cl^-, мг/дм^3	992	1390	Сухой остаток, мг/дм^3	2050	2470

Как следует из анализа табл.2, фиксируется существенное снижение величины Eh, что связано с повышением содержания органической составляющей в воде за счет разрушения полимербетонов свай и пластификаторов бетонов – ускорителей его твердения. Это положение подтверждается ростом ХПК в два раза и перманганатной окисляемости почти в шесть раз. Выщелачивание бетонов отразилось в содержании ионов кальция и магния. Щелочноземельные элементы присутствуют в воде в форме тонких взвесей состава $Ca(OH)_2$ и $Mg(OH)_2$ при высоких значениях pH (в данном случае более 10). При отборе пробы воды из П4 отмечалось выделение малорастворимого газа. Исходя из результатов метагеномного анализа, можно предполагать наличие молекулярного азота и водорода. Кроме того, при активном взаимодействии подземных вод со сваями отмечается повышение $БПК_5$ почти в два раза, что связано с ростом активности аэробных микроорганизмов.

Подзоны склоновой части и тальвега погребенной долины часто занимают достаточно большую площадь, поскольку глубина палеоврезов в ряде случаев может достигать 90 м при относительно небольших углах наклона бортов долины – до 18°. Эта зона характеризуется повышенной трещиноватостью, в том числе за счет существования древних оползней, развитие которых происходило параллельно процессу формирования речной долины. Кроме того, следует учитывать изменение положения палеокровли в пространстве и постепенный рост мощности четвертичных отложений, что ограничивает строительство наземных сооружений в этой зоне. Устройство и эксплуатация подземных сооружений в данной зоне осложняется повышенной трещиноватостью, что предопределяет рост гидродинамического давления вендского водоносного комплекса в зависимости от положения тоннелей по отношению к его кровле.

Подзона тальвега погребенной дол а ы – наиболее сложная с точки зр б ия проходки и последующего функционирования подземных сооружений. Проведенные обследования ряда перегонных тоннелей метрополитена показали, что в этой зоне гидродинамическое действие вендского водоносного комплекса наибольшее за счет снижения мощности глин (рис.3) и роста градиентов напора, в ряде случаев за счет противодавления



Рис.4. Коррозия обделок тоннелей – железобетонной (*а*) и чугунной (*б*) (фото Е.Ю.Шатской)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

наблюдается снижение деформаций оседания или даже подъем тоннелей. Активная фильтрация таких агрессивных вод способствует разрушению гидроизоляции и деструкции материалов обделок за счет активно протекающей биокоррозии железобетонов и чугунов [34, 35] (рис.4).

Необходимо отметить, что при залегании кровли глин на глубине менее 30-40 м следует учитывать контаминацию верхней части разреза, в том числе микробную пораженность, при этом наличие тектонического разлома резко увеличивает проницаемость глин за счет трещиноватости и, следовательно, глубину контаминации. Дельтовое положение мегаполиса, низкие отметки земной поверхности, широкое развитие болот в допетербургское время, а также длительный период освоения данной территории (более пяти веков) привело к контаминации подземной среды на значительную глубину и по площади [36].

Трещиноватая толща коренных глин обладает способностью к аккумуляции микроорганизмов на поверхности трещин, что неоднократно подтверждалось результатами их исследований, в различных районах мегаполиса. Изучение суммарной величины микробного белка (МБ) по методу М.Бредфорда позволило установить, что его содержание в верхней зоне глин венда превышает 1000 мкг/г в Адмиралтейском, Приморском, Василеостровском и других районах. В основании Исаакиевского собора, где коренные глины залегают на глубине более 40 м (склон погребенной долины) содержание МБ составило более 1600 мкг/г, в то время как его фоновые значения не превышают 30 мкг/г.

Проведенные испытания на одноосное сжатие, а также одноплоскостной срез по неконсолидированно-недренированной (НН) схеме образцов верхнекотлинских глин с Театральной площади (данная территория была освоена более 300 лет), несмотря на их значительную плотность (2,09-2,17 г/см^3), дали очень низкие показатели прочности и деформационной способности – угол внутреннего трения снизился до минимальных значений (0-2°), сцепление в образце ($c_о$) составило 0,18 МПа (без учета трещиноватости), модуль деформации – 11 МПа. В ходе испытаний на одноосное сжатие образцы показывали пластический и близкий к нему характер деформирования и разрушения. Принимая во внимание, что коэффициент структурного ослабления по Г.Л.Фисенко (λ) достигает 0,5, величина сцепления массива ($c_м$) с учетом трещиноватости снижается до 0,09 МПа и менее ($c_м = \lambda c_о$).

Преобразование верхнекотлинских глин вследствие взаимодействия с водами вендского водоносного комплекса. В ходе перетекания минерализованных вод через трещиноватую толщу глинистых пород их воздействие распространяется не только на подземные конструкции, но также на блоки глин. Суммарный эффект процесса перетекания минерализованных вод на глины венда был смоделирован авторами в лабораторных условиях. Для этих целей использовались верхнекотлинские глины венда, отобранные с глубины около 70 м из забоя строящейся подземной выработки вспомогательного назначения на юго-западе Санкт-Петербурга вне тектонических разломов, а в качестве взаимодействующего раствора – воды вендского комплекса. В ходе опыта не допускалось набухание или уплотнение образцов путем подбора давления. Было реализовано подобие анаэробной обстановки, фиксируемой in situ в водоносном горизонте, периодически вода в уплотнителях обновлялась. Во время эксперимента на поверхности воды формировалась пленка оранжевых и бурых слизистых образований окиси железа, в то время как в самой воде отмечалось образование большого количества черной взвеси гидротроилита. По завершению опыта определялось давление набухания и образцы глин испытывались в одноплоскостном срезном приборе по схеме НН. После длительного взаимодействия глин с водой исследовался их гранулометрический состав методом лазерной дифракции на приборе LA-950 Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer, а также некоторые параметры физических свойств (влажность и плотность).

Часть образцов глин до и после опыта были отданы для микробиологических исследований методом посевов на питательные среды. После 80 дней физического моделирования процесса взаимодействия вод вендского комплекса с блоками верхнекотлинских глин визуально фиксировалось изменение цвета образцов на серовато-сизый, образцы были покрыты черной пленкой гидротроилита, быстрой окислявшейся на воздухе. Вода из уплотнителей обладала стойким запахом сероводорода, образцы имели слабый запах асфальта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.13

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190
© Р.Э.Дашко, Г.А.Лохматиков, 2022

Результаты эксперимента. По итогам эксперимента физические свойства глин остались практически неизмененными – влажность увеличилась с 13,6 до 14,7 %, образцы сохранили свое физическое состояние (твердую консистенцию). Плотность глин не изменилась и составила 2,21 г/см^3. Исследования гранулометрического состава образцов верхнекотлинских глин показали небольшой рост содержания глинистой фракции и тонкой пыли: < 0,002 мм (40,49 % до опыта и 42,39 % после опыта); 0,002-0,01 мм (42,45 и 50,26 %); 0,01-0,05 мм (16,90 и 7,03 %); > 0,05 мм (0,16 и 0,32 %).

Отмечалась анизотропия проявления давления набухания верхнекотлинских глин в горизонтальном (вдоль слоистости) и вертикальном (перпендикулярно слоистости) направлениях – 0,11 и 0,24 МПа соответственно, что определяет невозможность смыкания и залечивания трещин в процессе фильтрации вод через трещиноватую среду в массиве. Коэффициент анизотропии набухания составляет в среднем 2,1.

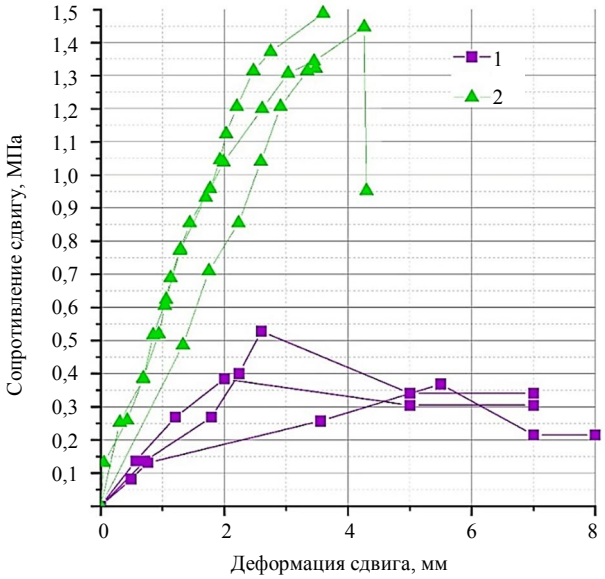


Рис.5. Характер взаимосвязи изменения величины сопротивления сдвигу от деформаций сдвига

1 – верхнекотлинские глины после опыта;
2 – неизменные верхнекотлинские глины

Наиболее значительные изменения наблюдаются для показателей сопротивления сдвигу– за короткий период сцепление образцов снизилось в три раза (с 1,06 до 0,35 МПа по данным одноплоскостных срезных испытаний по схеме НН), угол внутреннего трения уменьшился на 3 град (с 14 до 11 град). Характер деформирования образцов до и после взаимодействия с минерализованными водами вендского комплекса показан на рис.5, изменение характера разрушения образцов свидетельствует о преобразовании природы структурных связей.

Сравнение результатов выделения микроорганизмов из образцов верхнекотлинских глин верхнего венда до и после 80 дней их взаимодействия с водами нижнекотлинского горизонта показало значительное возрастание численности большинства групп микроорганизмов под влиянием подземных вод (табл.3). На основании выполненных посевов на питательные среды в образцах выделены следующие таксоны бактерий: сульфатредуцирующие, аммонификаторы, железобактерии (главным образом железовосстанавливающие), а также актиномицеты и силикатные.

После анализа материалов посевов, а также органолептических изменений образцов глин можно сделать вывод, что основная микробная активность приходится на сульфатредуцирующие бактерии, а также железоредуцирующие, с их деятельностью связано появление сероводорода и образование гидротроилита, в том числе за счет преобразования сидерита, небольшое содержание которого фиксируется в этих глинах. Наблюдаемая активизация деятельности аммонификаторов может сопровождается выделением аммиака, который в водной среде находится в форме иона NH_4^+. Появление запаха «асфальта» в образцах обязано деятельности актиномицетов, которые благодаря способности утилизировать широкий спектр источников углерода и азота играют заметную роль в формировании новых органических соединений. Силикатные бактерии способствуют разрушению силикатных минералов в глинах и бетонах.

Таблица 3

Результаты бактериологического анализа образцов до и после взаимодействия с водами вендского водоносного комплекса

Проба	Силикатные бактерии	Актиномицеты	Железобактерии	Аммонификаторы	Сульфатредуцирующие бактерии
№ 1 (до эксперимента)	10^2	10^3	10^3	10^2	10^5
№ 2 (после эксперимента)	10^4	10^5	10^4	10^4	Более 10^6

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обсуждение результатов. Анализируя полученные данные, можно сделать выводы относительно влияния процесса взаимодействия минерализованных вод вендского комплекса с верхнекотлинскими глинами венда на их состав, состояние и свойства в результате выполненного эксперимента.

• Изменение гранулометрического состава – увеличение содержания глинистой и тонкой пылеватой фракций вызвано диспергацией микроагрегатов размером от 0,01 мм до 0,05 мм, что обуславливается химическим воздействием натриевых вод, а также биохимической деятельностью аммонифицирующих бактерий (катионы NH_4^+ и Na^+ относятся к диспергаторам).

• Незначительный рост влажности связан с достижением состояния полного водонасыщения и увеличением содержания тонкодисперсных фракций.

• Негативные изменения свойств наблюдаются для показателей сопротивления сдвигу. Трехкратное снижение сцепления главным образом предопределяется биохимической деятельностью микроорганизмов: трансформация прочных структурных связей произошла за счет разрушения силикатов одноименными бактериями, а также преобразования цементирующего сидерита в гидротроилит как результата деятельности сульфат- и железовосстанавливающих бактерий.

Выводы

1. В статье рассмотрено формирование трещиноватости верхнекотлинских глин верхнего венда на основе анализа временных этапов образования данных пород в периоды прогрессивного и регрессивного литогенеза в Санкт-Петербургском регионе, в том числе за счет тектонических процессов, на этапе континентального развития территории в результате физического выветривания, в период материковых оледенений при действии циклических нагрузок, а также за счет гляциотектоники.

2. На основе комплексных исследований и обработки инженерно-геологической информации установлено зональное строение глин in situ. Выделены две зоны и четыре подзоны, которые различаются по степени дезинтегрированности согласно размеру блоков, а также величине влажности и плотности. Отмечается, что зональное строение коренных глин существует только вне зон тектонических разломов. В пределах влияния дизъюнктивных нарушений, в том числе на участках погребенных долин, зональность строения толщи по трещиноватости (блочности) нарушается. Для территории Санкт-Петербурга проведена типизация особенностей разреза верхнекотлинских глин с учетом относительного размера площади, занятой погребенными долинами в островной части города.

3. С учетом трещиноватости коренных глин верхнего венда рассмотрены последствия перетекания высоконапорных минерализованных вод вендского водоносного комплекса через толщу относительного водоупора с позиции развития гидродинамического давления, воздействия физико-химических условий, химического состава и их биохимических особенностей. Приведены примеры разрушения чугунных и железобетонных обделок на основании ранее опубликованных работ, описаны тенденции в разрушении буронабивных свай фундаментов уникального высотного здания, а также выполнена оценка негативной трансформации блоков верхнекотлинских глин при их взаимодействии с минерализованными водами вендского водоносного комплекса. Установлены закономерности изменения гранулометрического состава, микробиологической пораженности глин, существенного снижения их сопротивления сдвигу в результате преобразования характера структурных связей.

4. Результаты многолетних исследований верхнекотлинских глин Санкт-Петербургского региона, используемых как среда либо основание, можно рекомендовать для инженерных изысканий, а также при проектировании наземных и подземных сооружений, прежде всего уникальных, для оценки влияния минерализованных вод вендского водоносного комплекса на длительную устойчивость сооружений и конструкционных материалов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Безродный К.П., Лебедев М.О.* О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 649-653. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649

2. *Лавренко С.А., Королев И.А.* Исследование процесса разрушения кембрийских глин резанием при проходке выработок метро Санкт-Петербурга // Горный журнал. 2018. № 2. С. 53-58. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.08

3. *Yungmeyster D.A., Isaev A.I.* Rationale for the parameters of bore hammer for tunneling the service roadways in cambrian clays // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. Vol. 33. Iss. 1. P. 920-925.

4. *Ерзова В.А., Румынин В.Г., Никуленков А.М., Владимиров К.В., Судариков С.М.* Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. 2022. С. 1-18 (Online first). DOI: 10.31897/PMI.2022.27

5. *Gusev V.N., Maliukhina E.M., Volokhov E.M. et al.* Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction) // International Journal of Civil Engineering and Technology (discontinued). 2019. Vol. 10. № 2. P. 635-643.

6. *Протосеня А.Г., Вербило П.Э.* Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 51-57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51

7. *Protosenya A.G., Karasev M.A., Verbilo P.E.* The prediction of elastic-plastic state of the soil mass near the tunnel with taking into account its strength anisotropy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss.11. P. 682-694.

8. *Volokhov E.M., Kireeva V.I.* Analysis of the results of field studies of geomechanical processes in construction of large transport tunnels with the use of a mechanized tunnelboring complex with work face earth pressure balance in the special conditions of voids compensation in the rock massif // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. Iss. 20. P. 5811-5821.

9. *Chaminé H.I., Afonso M.J., Trigo J.F. et al.* Site appraisal in fractured rock media: coupling engineering geological mapping and geotechnical modelling // European Geologist Journal. 2021. Vol. 51. P. 30-38. DOI: 10.5281/zenodo.4948771

10. *Davidson J., Castelletti M., Torres I.* Pile driving prediction for monopile foundations in London clay // Proceedings of the XVII ECSMGE, 1-6 September 2019. Reykjavík, Iceland. ECSMGE, 2019. P. 1-9. DOI: 17ecsmge-2019-Y-XXXX

11. *Rosone M., Ziccarelli M., Ferrari A., Farulla C.A.* On the reactivation of a large landslide induced by rainfall in highly fissured clays // Engineering Geology. 2018. Vol. 235. P. 20-38. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.01.016

12. *Vitone C., Guglielmi S., Pedone G., Cotecchia F.* Effects of micro-to meso-features on the permeability of fissured clays // Géotechnique Letters. 2019. Vol. 9. Iss. 4. P. 369-376. DOI: 10.1680/jgele.18.00237

13. *Подковыров В.Н., Котова Л.Н.* Литогеохимия и условия формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 3. С. 600-619. DOI: 10.21638/spbu07.2020.310

14. *Бажин Н.П., Петров В.А., Карташов Ю.М., Баженов А.И.* Результаты исследования физико-механических свойств кембрийских глин // Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ: Труды ВНИМИ. 1964. Вып. LIII. С. 49-63.

15. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. СПб: Институт «Гореконструкция», 2015. 382 с.

16. *Ломтадзе В.Д.* Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины Русской платформы // Записки Ленинградского горного института. 1958. Т. 34 (2). С. 154-188.

17. *Багринцева К.И.* Трещиноватость осадочных пород. М.: Недра, 1982. 256 с.

18. *Коробко А.А.* Инженерно-геологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности: Санкт-Петербургский регион: Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. 20 с.

19. *Feeser V.* On the mechanics of glaciotectonic contortion of clays // Glaciotectonics: forms and processes. Various meetings of the glaciotectonics work group. 1988. P. 63-76.

20. *Деменков П.А., Голдобина Л.А., Трушко О.В.* Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 480-486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480

21. *Ilyukhina E., Lakhman S., Miller A., Travush V.* Structures of the high-rise building «Lakhta center» in Saint-Petersburg // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. Vol. 15. № 3. P. 14-39. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-3-14-39

22. *Травуш В.И., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О. и др.* Анализ результатов геотехнического мониторинга башни «Лахта Центра» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 15-21.

23. *Жукова А.М.* Инженерно-геологические и гидрогеологические особенности оценки условий строительства и эксплуатации высотных зданий (на примере локальной зоны правобережья р. Невы) // Записки Горного института. 2010. Т. 186. С. 13-17.

24. *Жукова А.М.* Инженерно-геологическое обоснование строительства высотных зданий в г. Санкт-Петербурге: Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный университет, 2011. 20 с.

25. *Котюков П.В.* Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге (на примере перегонных тоннелей «Елизаровская – Ломоносовская», «Обухово – Рыбацкое»): Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова, 2010. 20 с.

26. *Шатская Е.Ю.* Инженерно-геологическое обоснование условий строительства и эксплуатации подземных транспортных сооружений в пределах исторической части Санкт-Петербурга: Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова, 2010. 20 с.

27. *Dashko R.E., Kotiukov P.V.* Fractured clay rocks as a surrounding medium of underground structures: The features of geotechnical and hydrogeological assessment // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, St. Petersburg, Russia. OnePetro, 2018. P. 241-248. DOI: 10.1201/9780429462078-25/

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

28. *Hilpmann S., Drobot B., Steudtner R. et al.* Uranium (VI) reduction by a sulphate-reducing microorganism in Opalinus Clay pore water // Tage der Standortauswahl. 2021. P. 147.

29. *Emerson D.* The role of iron-oxidizing bacteria in biocorrosion: a review // Biofouling. 2018. Vol. 34. Iss. 9. P. 989-1000. DOI: 10.1080/08927014.2018.1526281

30. *Kalajahi S.T., Rasekh B., Yazdian F. et al.* Corrosion behaviour of X60 steel in the presence of sulphate-reducing bacteria (SRB) and iron-reducing bacteria (IRB) in seawater // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2021. Vol. 56. Iss. 6. P. 543-552. DOI: 10.1080/1478422X.2021.1919840

31. *Loto C.A.* Microbiological corrosion: mechanism, control and impact – a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 92. Iss. 9. C. 4241-4252. DOI: 10.1007/s00170-017-0494-8

32. *Efe D., Ertan B., Savas M., Orhan F.* Isolation and Identification of Bacteria with silicium dissolution ability from boron clay // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2019. Vol. 10. Iss. 9. P. 26-29.

33. *Fomina M.*, *Skorochod I.* Microbial Interaction with Clay Minerals and Its Environmental and Biotechnological Implications // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 10. № 861. DOI: 10.3390/min10100861

34. *Černoušek T., Shrestha R., Kovářová H. et al.* Microbially influenced corrosion of carbon steel in the presence of anaerobic sulphate-reducing bacteria // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2020. Vol. 55. Iss. 2. P. 127-137. DOI: 10.1080/1478422X.2019.1700642

35. *Chen H., Kimyon Ö., Ramandi H.L. et al.* Microbiologically influenced stress corrosion cracking responsible for catastrophic failure of cable bolts // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 131. № 105884. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105884

36. *Ковязин В.Ф., Скачкова М.Е., Дьячкова И.С.* Историко-культурная оценка урбанизированных территорий как часть кадастровой, землеустроительной и оценочной деятельности // Геодезия и картография. 2020. № 12. С. 57-62. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-966-12-57-62

***Авторы*: Р.Э.Дашко,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-2469-0910* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Г.А.Лохматиков,** *аспирант, kriptoforan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9134-3022* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0