

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ
ОТХОДОВ

УДК 624.131.3624.131.6

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН ПРИ ОБОСНОВАНИИ
ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ© 2022 г. М. В. Вилькина^{1,*}, А. М. Никуленков¹, В. Г. Румынин¹¹ Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
В.О., Средний пр., 41, оф. 519, г. Санкт-Петербург, 199004 Россия

*E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 16.01.2022 г.

Принята к публикации 19.01.2022 г.

В статье исследуется фильтрационная неоднородность кембрийских глин применительно к задаче окончательной изоляции отходов на полигоне “Красный Бор”. Свойства глин изучались лабораторными методами на монолитных образцах, отобранных из борта карьера и в кернах скважин. Кроме того, фильтрационная неоднородность глин исследовалась в поле (*in situ*) при помощи пакерных поинтервальных нагнетаний с применением методики Люжона. Визуальное обследование обнажений в карьере “ЛСР” показало, что глинистый массив имеет блочную структуру. Блоки отделены друг от друга системой ортогональных трещин, ориентированных в субгоризонтальном и субвертикальном направлениях. Размеры блоков увеличиваются с глубиной от первых сантиметров, достигая нескольких десятков метров на глубине 20 м. В то же время, в кернах многочисленных скважин при проведении инженерно-геологических изысканий раскрытые трещины обнаружены не были. Лабораторные исследования показали, что средний коэффициент фильтрации кембрийских глин по напластованию имеет величину 8.8×10^{-7} м/сут, а в крест напластованию 9.0×10^{-8} м/сут. Значение фильтрационной анизотропии устойчиво для всех образцов и в среднем составляет 9.5. Проведенные поинтервальные нагнетания в скважинах позволили установить, что в естественных условиях блочная система находится в сомкнутом состоянии, т.е. глинистый массив выступает в роли непроницаемого водопора. При нагнетании в изолированные интервалы с избыточным давлением более 4 литостатических величин происходит раскрытие системы трещин. Коэффициент фильтрации трещин в раскрытом состоянии может достигать 0.5 м/сут. Однако при снижении избыточного давления трещины смыкаются обратно, и глинистый массив вновь начинает выполнять функцию фильтрационного барьера. Таким образом, в зависимости от внешних условий, кембрийские глины могут проявлять свойства как непроницаемого барьера, так и фильтрующей среды.

Ключевые слова: синие кембрийские глины, фильтрационные свойства, трещиноватая система, пакерные нагнетания, токсичные отходы, полигон Красный Бор

DOI: 10.31857/S0869780922020096

ВВЕДЕНИЕ

На территории Тосненского района Ленинградской области с 1969 г. располагается полигон токсичных промышленных отходов “Красный Бор”. Толща “синих” кембрийских глин, которая выходит на дневную поверхность, была выбрана в качестве среды для размещения опасных отходов.

Мощность кембрийских глин на участке исследования достигает 90 м, от дневной поверхности их отделяют четвертичные отложения мощностью от 3 до 8 м. В основании кембрийских глин залегает регионально выдержанный слой кембрийских песчаников, который образует на-

порный ломоносовский водоносный горизонт (рис. 1).

За период эксплуатации с 1969 по 2014 гг. на территории полигона были организованы 70 выемок грунта (карт), вмещающие более 1.7 млн т высокотоксичных отходов (рис. 2). Промышленные отходы на полигон принимались как в жидком, так и в твердом состоянии. На сегодняшний момент 5 карт с жидкими отходами остаются открытыми, остальные засыпаны грунтом.

При создании полигона считалось, что выбранное место удовлетворяет необходимым требованиям: отсутствует возможность подтопления территории в паводок, отсутствует централизо-

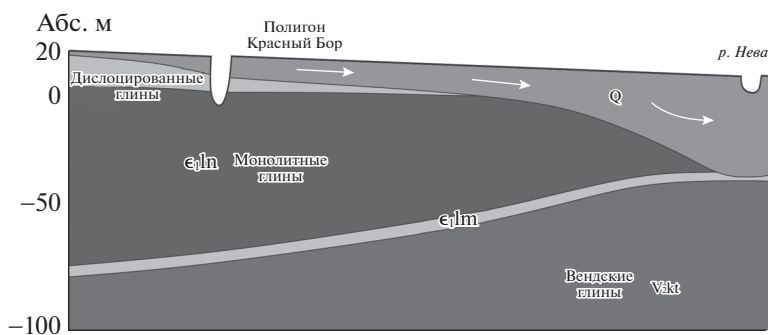


Рис. 1. Локальный разрез через площадку полигона “Красный Бор”.



Рис. 2. Схема расположения карт-накопителей полигона “Красный Бор”.

ванное водоснабжение из близлежащих водоемов, целевой горизонт глин обладает достаточной мощностью и залегает близко от поверхности. Но уже на этапе строительства был выявлен ряд проблем, который затруднил стабильную работу полигона и поставил под угрозу безопасность окружающей среды. В частности, возникли проблемы с организацией санитарной защитной зоны надлежащего радиуса, появился риск подтопления территории атмосферными осадками и талыми водами, сказались наличие большого зеркала жидких отходов с открытой поверхностью и т.д. В последние годы эксплуатации участились пожары в связи с нарушением условий хранения высокотоксичных отходов.

В 2014 г. было принято решение о прекращении работы полигона и его полной рекультивации. Одна из главных задач рекультивации — не допустить распространения загрязнений из карт-накопителей в окружающую среду. В качестве проекта рекультивации было решено перерабо-

тать жидкое содержимое открытых карт, а затем накрыть полигон сверху горизонтальным непроницаемым экраном, дополнительно создав по периметру противофильтрационную завесу, опущенную до кровли кембрийских глин.

В такой постановке вопрос о фильтрационных свойствах кембрийских глин начинает играть ключевую роль для оценки долговременной безопасности рекультивируемого полигона.

Кембрийские глины достаточно хорошо изученная среда. Подземное строительство в южной части г. Санкт-Петербург, проходка тоннелей метрополитена, отработка карьеров, создание подземных газовых хранилищ и другие специализированные работы послужили основным источником информации о свойствах кембрийских глин. Региональное обобщение физико-механических свойств кембрийских глин было проведено В.Д. Ломтадзе [7]. Значительный вклад в исследование фильтрационных свойств, трещиновато-блочной структуры кембрийских глин и

роли микробиологических процессов внесла Р.Э. Дашко [3, 4, 6]. Барьерные свойства кембрийских глин активно изучались В.Г. Румыниным для задач создания пунктов окончательной изоляции радиоактивных отходов в глинистых формациях [8–10]. Информация о влиянии токсичных отходов на сорбционную способность, а также на минеральный состав кембрийских глин применительно к условиям полигона “Красный Бор” приводится в работе Е.В. Часовниковой¹.

Однако, несмотря на многочисленные исследования кембрийских глин, их использование в качестве природного барьера до сих пор остается предметом научных дискуссий. Существует два взгляда на барьерные свойства кембрийских глин.

Например, Р.Э. Дашко и др. рассматривают толщу кембрийских глин как блочную среду, которая, по их мнению, мало пригодна для изоляции отходов. Исследователи делают вывод о высокой проницаемости синих глин по трещинам, аргументируя это наличием соединений гидроксидов железа или гипса на стенках блоков [3], негативным влиянием микробной порожности, приуроченной к трещинам [4], результатами полевых испытаний, а также оценивают коэффициент фильтрации трещиноватых зон по результатам наливов в карьерах до 0.01–0.5 м/сут [4, 6].

Другая группа исследователей из Санкт-Петербургского государственного университета, не отрицая наличия блочной структуры массива кембрийских глин, тем не менее полагает, что трещины в кембрийских глинах находятся в сомкнутом состоянии, поскольку в естественном сложении они испытывают на себе литостатическое давление. Кроме того, глины обладают набухающими свойствами, что обуславливает “залечивание” трещин при их контакте с водой. Также исследования показали, что при контакте нефтепродуктов промхимотходов с кембрийскими глинами на поверхности породы образуется пленка, которая усиливает закупоривающую роль (см. сноску 1).

На региональной гидрогеологической модели были оценены барьерные свойства кембрийских глин по разнице напоров между ломоносским и кембро-ордовикским водоносными горизонтами [10]. Было показано, что для поддержания существующей разницы напоров между горизонтами, коэффициент фильтрации разделяющего слоя (кембрийских глин) не должен превышать значения 1×10^{-5} м/сут. Таким образом, в

региональном масштабе кембрийские глины можно рассматривать как водоупорную толщу.

В настоящее время глинистые формации находятся в центре внимания специалистов в области обращения с отходами не только в России, но и за рубежом. Так, национальные программы обращения с радиоактивными отходами Бельгии, Франции и Швейцарии во многом ориентированы на геологическое, инженерно-геологическое и гидрогеологическое изучение именно глинистых толщ: Rupelian Boom Clay (Мол, Бельгия), Callovo-Oxfordian clayey siltstone/silty clay (Бюр, Франция) и Aalenian Opalinus Clay (западная Швейцария). Именно они должны послужить средой для создания хранилищ радиоактивных отходов (РАО) [12, 13, 16]).

Многочисленные исследования указывают на то, что глины являются сложным материалом. Их геохимические и механические свойства могут изменяться во времени под действием внешних природных и техногенных факторов. Так, например, зарубежные исследователи указывают на то, что при проходке глин вокруг выработок образуются зоны разуплотнения (EDZ), которые в конечном счете могут приводить к увеличению коэффициента фильтрации этой зоны в среднем на порядок [14].

Для обоснования необходимых и достаточных проектных решений по локализации загрязнения в пределах полигона “Красный Бор” был проведен комплекс специализированных полевых и лабораторных исследований фильтрационной неоднородности кембрийских глин. Эти исследования можно рассматривать как очередной шаг в многолетней истории изучения барьерных свойств кембрийских глин.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение блочной структуры массива. Трещиноватость глин исследовалась путем описания систем трещин в обнажениях карьера “ЛСР”, а также в керне скважин, пробуренных на полигоне “Красный Бор”.

После визуального осмотра обнажений были выделены основные системы трещин и проведены замеры элементов их залегания. Устанавливались угол падения и азимут простирания для каждой из выделенных систем. Кроме того, оценивалась степень раскрытости трещин и размеры монолитных блоков, которые формируют системы трещин.

При бурении скважин в монолитах глин фиксировались глубина обнаружения трещины, степень ее раскрытости, минеральное заполнение трещин и угол падения. Однако возможность отбора ориентированного керна в процессе бурения

¹ Часовникова Е.В. и др. Исследование изменений состава и свойств кембрийских глин при их взаимодействии с жидкими промхимотходами на опытном полигоне “Красный Бор” с целью прогноза охраны окружающей среды. НИИЗК ЛГУ. Промежуточный отчет, 1978.

отсутствовала, поэтому азимут простирания трещин не определялся.

Изучение коэффициента фильтрации глин в лаборатории. В лаборатории коэффициент фильтрации монолитов глин определялся методом фильтрационной консолидации и методом прямой фильтрации.

Расчет коэффициента фильтрации методом фильтрационной консолидации основан на теории консолидации Терцаги [11]. В водонасыщенном состоянии уменьшение объема пор происходит за счет оттока несжимаемой жидкости. Таким образом, скорость осадки грунта контролируется скоростью оттока жидкости, т.е. коэффициентом фильтрации. Многочисленные испытания на консолидацию глинистых грунтов позволили К. Терцаги установить следующее эмпирическое соотношение:

$$k = c_v m_v \gamma_w, \quad (1)$$

где k — коэффициент фильтрации, м/с; γ_w — удельный вес воды, Н/м³; m_v — коэффициент объемной сжимаемости, м²/Н (или Па); c_v — коэффициент консолидации, м²/с.

Значение параметра c_v отражает скорость, с которой насыщенная глина подвергается уплотнению при воздействии возрастающей нагрузки. Как правило, такие эксперименты проводят в одометрах. В Российской Федерации определение коэффициента консолидации c_v регламентировано ГОСТ 12248.3-2020².

Величина коэффициента относительной сжимаемости m_v также определяется по результатам многоступенчатого компрессионного испытания согласно выражению (2)

$$m_{v,i} = \frac{\Delta e_i}{\Delta \sigma' (1 + e_{i-1})}, \quad (2)$$

где m_v — коэффициент объемной сжимаемости, м²/Н (или Па); $\Delta \sigma'$ — приращение вертикального эффективного напряжения при нагружении на i -ом шаге, Н/м² (или Па); Δe_i — изменение коэффициента пористости при нагружении на i -ом шаге, д.е.; e_{i-1} — коэффициент пористости на $i - 1$ шаге, д.е.

Коэффициент фильтрации глинистых грунтов в лаборатории также может быть определен прямым путем, т.е. посредством пропускания воды под давлением через тело образца. Как правило, такие эксперименты проводят в трехосных приборах, создавая обжимающее давление идентичное литостатическому давлению в соответствии с той глубиной, на которой находился образец. Верхний и нижний торцы образца используются

для фильтрации жидкости под давлением. Данный эксперимент идентичен фильтрационным опытам, проводимым Дарси, и может быть для тонкодисперсных (глинистых) пород описан базовым уравнением:

$$k = \frac{Q}{(I - I_0)F}, \quad I > I_0, \quad (3)$$

где k — коэффициент фильтрации, м/с; Q — расход воды через образец при заданном градиенте, м³/с; I — градиент потока, м/м; I_0 — начальный градиент, м/м; F — площадь поверхности торцевой части образца, м².

Проведение фильтрационных экспериментов через образцы пород регламентируется ГОСТ 25584-2016³. Особенности фильтрации жидкости в слабопроницаемых породах, а также методика определения коэффициентов фильтрации подробно рассматривается в трудах И.А. Брилинга, В.М. Гольдберга, Н.П. Скворцова [1, 2].

Изучение коэффициента фильтрации глин в полевых условиях. Изучение коэффициентов фильтрации низкопроницаемых пород полевыми методами — задача нетривиальная. В случае, если коэффициент фильтрации исследуемых пород составляет менее 1×10^{-4} м/сут, рекомендуется использовать лабораторные методы определения.

Между тем хорошо известно, что лабораторные методы могут давать нерепрезентативные результаты ввиду нарушенной структуры опробуемого образца, а также влияния масштабных эффектов. Особенно остро вопрос достоверности определяемых параметров лабораторными методами стоит применительно к трещиновато-блочным средам.

В этой связи, для изучения масштабного эффекта и роли трещин в фильтрационной неоднородности глинистого массива, были проведены поинтервальные нагнетания согласно методике Люжона [17] — изучение трещин массива пород путем ступенчатого нагнетания жидкости с постоянным расходом. Сначала давление ступеней нарастает, а затем, напротив, снижается. Таким образом, в одном интервале проводят нагнетания с 5–6 ступенями давлений. По результатам полевых опробований строятся графики в координатах давления нагнетаемой жидкости P от объема поглощенной жидкости Q в опробуемом интервале при заданной ступени давления.

Для интерпретации графиков P – Q на качественном уровне можно обратиться к работе [15], получившей широкое распространение в конце XX века. В ней приводится ряд эталонных графиков, отвечающих типовым гидродинамическим

² ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. <https://docs.cntd.ru/document/566409062>

³ ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. <https://docs.cntd.ru/document/1200141112>

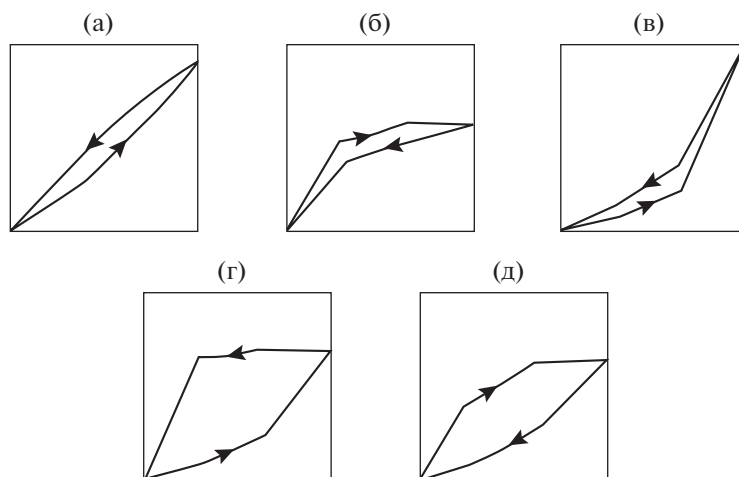


Рис. 3. Пять эталонных графиков для анализа пакерного опробования по графику зависимости среднего расхода нагнетаемой жидкости (ось ординат) от величины давления в скважине (ось абсцисс). Стрелками показана последовательность изменения расхода от ступени к ступени.

обстановкам (рис. 3): ламинарный режим движения в опробуемых породах (а), турбулентный режим движения (б), расширение трещин (в), размыв трещин (г) и заполнение пустот (д). Следовательно, сопоставляя эталонные графики с фактическими, можно сделать вывод о режиме фильтрации и о поведении трещиноватой системы при ее нагрузке различными давлениями.

Количественная интерпретация пакерных нагнетаний для определения коэффициента фильтрации вмещающих пород может быть проведена по формуле Мойе [18]:

$$k = \frac{Q\rho g}{2\pi l_w \Delta P} \left(1 + \ln \frac{l_w}{2r_w} \right), \quad (4)$$

где k — коэффициент фильтрации, м/с; Q — стабилизированный расход жидкости на конец ступени, м³/с; ρ — плотность нагнетаемой жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; l_w — длина интервала опробования, м; ΔP — изменение давления в скважине, Па.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнажения кембрийских глин были визуально обследованы в бортах карьера “ЛСР”, который расположен в 480 м западу от полигона “Красный Бор”. Оработка карьера производится на трех уровнях: на абсолютных отметках +15, 0 и –10 м. Отвод поверхностных и талых вод осуществляется дренажными канавами, собирающими воду в пруду на дне карьера.

В бортах карьера глины имеют блочную структуру и разбиты системой ортогональных трещин. Одна система трещин простирается преимущественно на северо-запад с субвертикальным паде-

нием. Вторая субвертикальная система трещин ортогональна по отношению к первой. Третья система трещин ориентирована в субгоризонтальной плоскости. Таким образом, три системы трещин формируют блочную структуру массива кембрийских глин.

По результатам измерений установлено, что размеры блоков имеют выраженную тенденцию к увеличению с глубиной. Так, на верхней берме шаг сетки трещиноватости может сгущаться до 5–10 см (рис. 4), в то время как на нижней берме он увеличивается до нескольких десятков метров.

Иная картина наблюдается при бурении скважин на полигоне “Красный Бор” — в процессе изысканий не было выявлено каких-либо открытых трещин в кембрийских глинах. Между тем, в процессе изысканий было отмечено, что в монолитных кернах, поднятых из ствола скважины, при хранении на поверхности достаточно быстро могут формироваться трещины. Данные эффекты могут начать активно проявляться уже спустя первые сутки или даже часы.

В качестве примера на рис. 5а приведена фотография монолита, поднятого из скв. 135 с глубины 85 м. В керне присутствуют следы древних пластичных деформаций (складки), однако никаких открытых трещин в монолите не зафиксировано. На рис. 5б приведен тот же самый монолит, спустя две недели его хранения на поверхности. Хорошо видно, что монолит разделился на блоки по системе ортогональных трещин. Отметим, что раскрытие трещин происходит не только в монолитах глубоких скважин, но и в кернах, поднятых из приповерхностных интервалов. На рис. 5в приведена фотография керна с глубины 4 м из скв. 8П. Трещины в монолите глины проявились



Рис. 4. Система ортогональных трещин кембрийских глин в борту карьера на абс. отметках от 0 до +15 м.

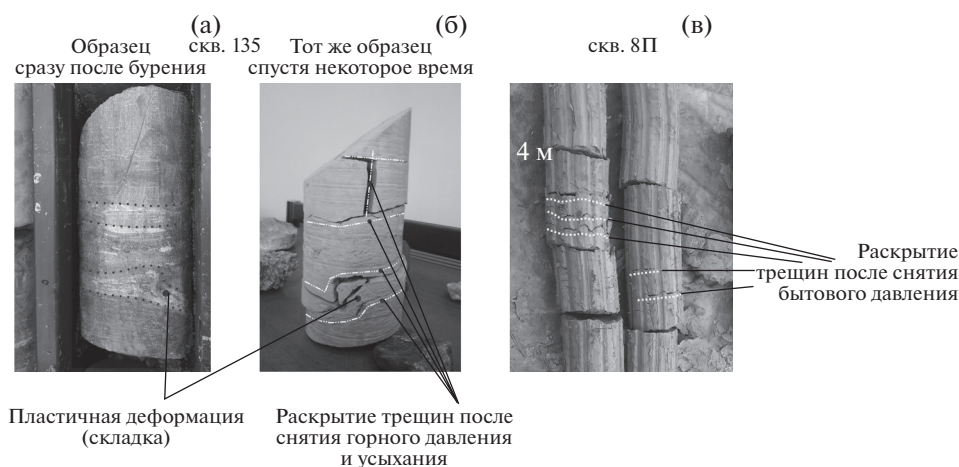


Рис. 5. Формирование трещин в монолитных образцах керна при хранении на поверхности.

спустя несколько часов после пребывания на поверхности.

Таким образом, можно говорить о зависимости свойств трещиновато-блочной среды кембрийских глин от условий ее залегания. Наиболее вероятно, что раскрытие трещин связано с целым рядом факторов:

- снятие литостатического давления с массива глин при отработке карьера приводит к образованию трещин отпора;
- кембрийская глина является сильно набухающей и может изменять свой объем на 28% в зависимости от влажности. На открытой поверхности в бортах котлована глины подвергаются циклическому увлажнению под действием дождей и осушению под действием солнца, что также является причиной раскрытия систем трещин;
- на открытой поверхности глины регулярно подвергаются промерзанию. Морозное пучение и

морозобойные трещины являются дополнительным негативным фактором.

Как показало обследование монолитов кембрийских глин из пробуренных скважин, в естественном сложении система трещин находится в сомкнутом состоянии. Этому способствуют литостатическое давление вышележающего слоя четвертичных отложений, постоянный влажностный режим, а также фактор глубины залегания глин — они расположены ниже глубины сезонного промерзания пород.

Изучение коэффициентов фильтрации глин в естественном сложении проводилось в лабораторных и полевых условиях. Монолиты глин отбирались на различной глубине из ряда скважин, расположенных вокруг полигона «Красный Бор» (см. рис. 1).

На первом этапе в лаборатории определялись водно-физические и деформационные свойства

Таблица 1. Таблица механических характеристик кембрийских и вендских глин

Место	Возраст	Номенклатурный вид грунта (ГОСТ 25100)	Плотность грунта, г/см ³	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность			Коэффициент пористости, д.е.	Угол внутреннего трения, °	Удельное сцепление, кПа	Модуль деформации, МПа	Относительная деформация набухания
					Естественная, %	На границе раскатывания, д.е.	На границе текучести, д.е.					
Красный Бор	$\epsilon_1 \text{In}$	глина твердая, дислоцированная	2.09	2.74	20	21	45	0.58	15	80	27	0.28
ЛАЭС-2	$V_2 \text{kt}$	глина твердая аргиллитоподобная	2.16	2.75	16	21	35	0.48	19	92	26	0.2

кембрийских глин. Основные параметры приведены в табл. 1. Для сравнения в таблице приводятся характеристики вендских глин, которые были отобраны в основании новой очереди Ленинградской атомной станции (ЛАЭС-2) в г. Сосновый Бор. Несмотря на различие в возрасте, кембрийские и вендские глины имеют схожий генезис, минералогический состав, а глубина залегания кембрийских глин в “Красном Бору” сопоставима с глубиной залегания вендских глин на ЛАЭС-2. Вероятно этим и обусловлено то, что инженерно-геологические характеристики двух сред оказались практически идентичными (см. табл. 1).

Коэффициенты фильтрации монолитных образцов кембрийской глины исследовались в лабораторных условиях методом фильтрационной консолидации, а также прямой фильтрацией через образец при создании больших гидравлических градиентов (от 100 до 300). Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Коэффициент фильтрации кембрийских глин варьирует в диапазоне от $n \times 10^{-6}$ до $n \times 10^{-8}$ м/сут. Определения методом фильтрационной консолидации хорошо согласуются с коэффициентом фильтрации, полученным при фильтрации прямым способом в плоскости напластования (горизонтальной плоскости). Песчаные прослои и вкрапления в глину являются причиной фильтрационной анизотропии. Лабораторные эксперименты показали, что коэффициент фильтрации поперек напластования (вертикально) в среднем в 9.5 раз ниже, чем вдоль напластования (горизонтально). Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют о том, что опробуемые монолиты обладают крайне низкими коэффициентами фильтрации.

Для сопоставления полученных значений в табл. 2 приводятся результаты аналогичных исследований на образцах вендских глин с площадки ЛАЭС-2. Несмотря на практически идентичные механические характеристики грунтов, коэффициент фильтрации кембрийских глин оказался на порядок ниже, чем в вендских глинах.

Поэтому можно предположить, что механические характеристики глинистых грунтов не контролируют их фильтрационные свойства. Лабораторные опыты не выявили влияния начального градиента (I_0) на характер фильтрации воды через образцы: графики функции $Q(I)$ (3) проходят через начало координат ($I_0 = 0$), т.е. фильтрация происходит при всех значениях напорного градиента. Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют об очень низких коэффициентах фильтрации кембрийских глин.

Однако остаются опасения, что опробуемые монолиты не являются репрезентативными и состоят только из блоков, не включая трещины. Для оценки масштабного эффекта были проведены поинтервальные нагнетания в кембрийские глины (*in situ*) по методике Люжона. Нагнетания проводились в четырех скважинах, расположенных по периметру полигона. Расположение нагнетательных скважин указано на рис. 2, а геологический разрез и опробуемые интервалы приведены на рис. 6.

В каждой скважине нагнетания проводились в трех интервалах: первый интервал оборудован на верхний слой дислоцированных глин, второй и третий – на монолитные. Для этого гидрогеологическая скважина поэтапно разбуривалась на глубину 6, 8 и 10 м. Чтобы предотвратить влияние четвертичных песков и суглинков на ход эксперимента, скважина была оборудована кондуктором до кровли дислоцированных глин. Завершив проходку скважины до необходимой глубины, в ее ствол погружался пакер, и таким образом изолировал ствол, чтобы мощность опробуемого интервала составляла 1 м (рис. 7).

Результаты полевого опробования скважины 12П приведены в табл. 3 и на рис. 8.

В качестве примера на рис. 8 приведены индикаторные графики $Q - \Delta P$ нагнетания воды в скв. 12П. Из этих графиков видно, что на начальных этапах при небольших давлениях не происходит поглощения воды в опробуемый интервал. Чувствительности расходомеров не хватает, что-

Таблица 2. Результаты определения коэффициента фильтрации кембрийской глины

№ скважины	Интервал опробования, м		По консолидации	Коэффициент фильтрации, м/сут		
	от	до	коэффициент фильтрации, м/сут	вдоль	поперек	анизотропия
Кембрийские глины, Красный Бор						
1п	5.3	6	1.0E–06	1.4E–06	1.1E–07	12.7
	6.8	8.7	6.3E–07	5.4E–07	6.5E–08	8.3
	9.6	9.9	2.0E–06	1.6E–06	1.3E–07	12.3
6п	6.6	7	5.0E–06	1.6E–06	1.9E–07	8.4
	7.9	8.3	1.6E–06	1.0E–06	9.2E–08	10.9
	9.2	9.6	4.0E–06	6.6E–07	7.4E–08	8.9
8п	5.7	6	2.5E–06	8.4E–07	9.5E–08	8.8
	7.9	8.3	1.6E–07	1.2E–06	1.1E–07	10.9
	9.3	9.7	2.5E–06	5.2E–07	8.8E–08	5.9
12п	5.1	7.5	6.3E–07	8.0E–08	1.3E–08	6.2
	7.3	7.8	6.3E–06	8.4E–07	7.3E–08	11.5
	9.1	9.6	2.0E–06	3.2E–07	3.4E–08	9.4
Вендские глины, Сосновый Бор						
4/10	51.8	52.1	—	4.0E–06	6.0E–07	6.7
4/10	69.2	69.5	—	1.9E–05	1.4E–06	13.6
5/10	48.6	49	—	6.0E–06	1.3E–06	4.6
111а	13.8	14	1.5E–06	—	—	—
111а	29.2	29.6	1.9E–05	—	—	—
111а	42.5	43	2.7E–05	—	—	—
250	13	13.1	4.8E–05	—	—	—
250	14.4	14.5	6.5E–06	—	—	—
250	15.8	15.9	5.0E–06	—	—	—
Статистика			По консолидации	Коэффициент фильтрации, м/сут		
			коэффициент фильтрации, м/сут	вдоль	поперек	анизотропия
Среднее	Кембрийские		2.4E–06	8.8E–07	9.0E–08	9.5
	Вендские		1.8E–05	9.7E–06	1.1E–06	8.3
Дисперсия	Кембрийские		1.4E–06	4.0E–07	3.2E–08	1.8
	Вендские		1.4E–05	6.2E–06	3.3E–07	3.5
Коэффициент вариации	Кембрийские		80%	56%	51%	23%
	Вендские		99%	84%	40%	57%

бы рассчитать коэффициент фильтрации. Можно лишь оценить, что коэффициент фильтрации составляет менее 1×10^{-4} м/сут. По мере увеличения давления ситуация не меняется. Однако при достижении определенного давления (P_d) происходит раскрытие трещин, и начинается поглощение воды в опробуемом интервале.

На графиках (см. рис. 8) приведены значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по формуле (4), в которой принято $l_w = 1$ м, $2r_w = 0.07$ м,

$\rho = 1000$ кг/м³, $g = 9.81$ м/с, $1 \text{ Па} = 10^{-5}$ атм. Размерность коэффициента k пересчитана в м/сут.

Давление раскрытия трещин зависит от глубины опробования и в среднем составляет для кембрийских глин около 4 литостатических давлений. При максимальных приложенных давлениях коэффициент фильтрации трещин варьирует от 0.1 до 0.5 м/сут.

При обратном снижении ступеней давления в поведении трещиноватой системы наблюдается

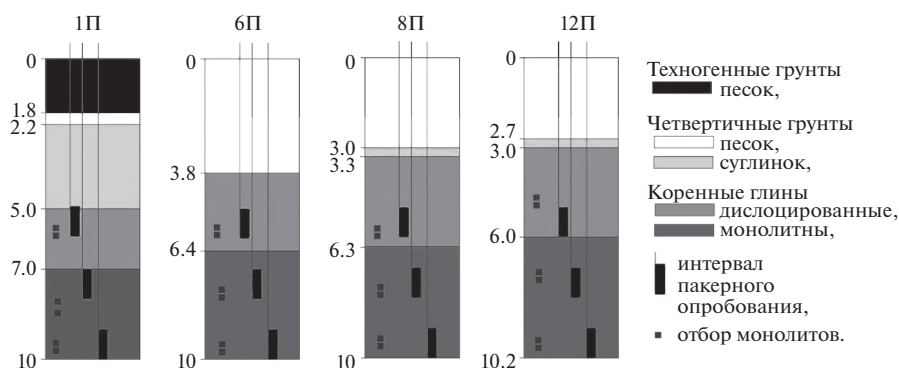


Рис. 6. Глубины отбора образцов и интервалы нагнетаний в кембрийские глины.

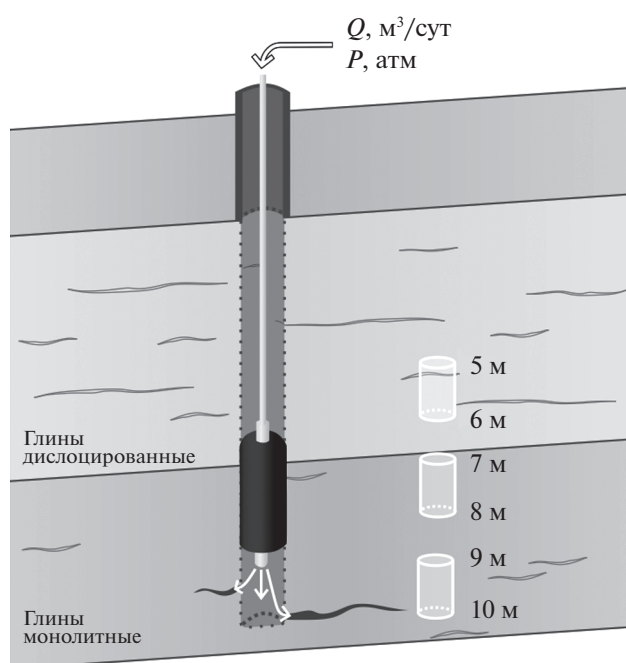


Рис. 7. Схема нагнетательных испытаний в зоне дислоцированных и монолитных глин.

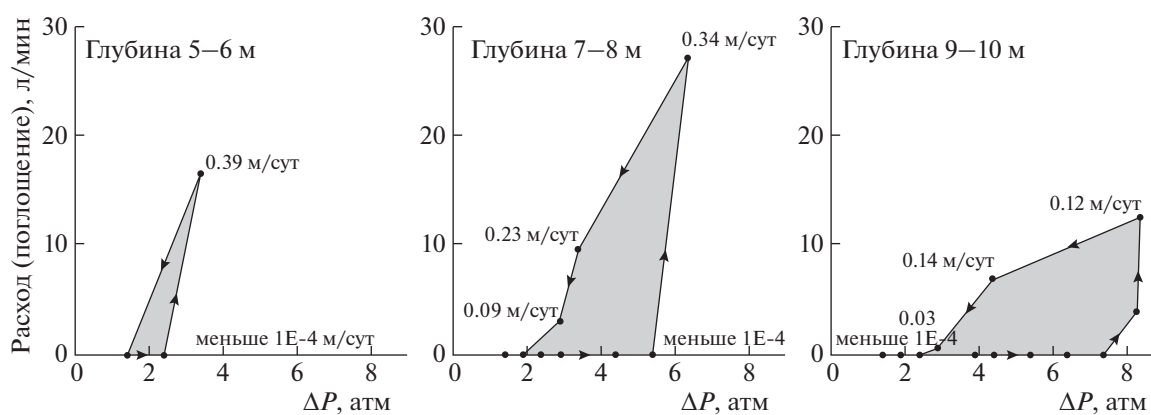


Рис. 8. Гистерезис кривых роста и снижения давлений в скв. 12П.

Таблица 3. Результаты определения коэффициента фильтрации кембрийской глины в скв. 12П

Интервал	P , атм*	V , л	t , с	k , м/сут	P_d^* (P_c^*), атм
5–6 м	1	0	180	<1E–4	3 (1.5)
	2	0	180	<1E–4	
	3	5	18	0.39	
	1	0	180	<1E–4	
7–8 м	1	0	180	<1E–4	5.2 (2.0)
	2	0	180	<1E–4	
	2.5	0	180	<1E–4	
	4	0	180	<1E–4	
	5	0	180	<1E–4	
	6	5	11	0.34	
	3	5	31	0.23	
	2.5	3	57	0.09	
	1.5	0	180	<1E–4	
	1	0	180	<1E–4	
9–10 м	1	0	180	<1E–4	8 (2.0)
	2	0	180	<1E–4	
	3.5	0	180	<1E–4	
	4	0	180	<1E–4	
	5	0	180	<1E–4	
	6	0	180	<1E–4	
	7	0	180	<1E–4	
	7.9	3	46	0.04	
	8	5	24	0.12	
	4	5	43	0.14	
	2.5	0.5	50	0.03	
	2	0	180	<1E–4	
	1.5	0	180	<1E–4	

* – указано значение, зафиксированное на манометре. За статический уровень воды в скв. принята глубина 2 м.

Таблица 4. Макрокомпонентный состав подземных вод

Компонент	Концентрация, мг/л	
	Ломоносовский горизонт	Грунтовый горизонт
Натрий	710	3.4
Кальций	58	6.4
Калий	29	1.72
Железо	0.33	2.1
Магний	68	3.9
Сульфат-ионы	51	<1
Хлорид-ионы	640	58
pH	7.9	6.1

гистерезис. Трещины смыкаются обратно при значительно меньших давлениях, по сравнению с теми, которые необходимо было создать для их раскрытия. Это свидетельствует о наличии пластичных деформаций, которые происходят в глине в момент раскрытия трещин в условиях естественного залегания. В лабораторных компрессионных испытаниях образцов кембрийских глин отмечается преобладание упругих деформаций [7].

Необходимо отметить, что, несмотря на гистерезис (см. рис. 8), во всех опробуемых интервалах при снижении давления нагнетания происходило смыкание трещин (P_c – давление смыкания), т.е. среда вновь становилась слабопроницаемой.

Результаты нагнетаний по остальным скважинам показали идентичные результаты.

В целом, анализируя результаты полевых нагнетаний, можно утверждать, что в условиях естественного сложения, трещиноватая система кембрийских глин находится в сомкнутом состоянии, а природный массив выполняет функции фильтрационного барьера.

Дополнительным подтверждением этому могут служить результаты бурения глубокой скважины (скв. 135). Она прошла всю толщу кембрийских глин (95 м) и вскрыла фильтром ломоносовский водоносный горизонт (см. рис. 1). Было зафиксировано, что уровни подземных вод в глубоком ломоносовском горизонте установились на 4.5 м ниже, чем в грунтовом горизонте. Гидрохимический отбор проб воды показал, что состав двух горизонтов является контрастным по отношению друг к другу (табл. 4). Разрыв напоров и гидрохимическая контрастность двух водоносных горизонтов свидетельствуют об отсутствии гидравлической взаимосвязи между ними.

ВЫВОДЫ

Подводя итог исследованиям фильтрационной неоднородности кембрийских глин в районе полигона токсичных отходов “Красный Бор”, отметим следующее:

- массив кембрийских глин является трещиновато-блочной средой;
- глины могут проявлять различные свойства в зависимости от условий, в которых они находятся;
- в естественных условиях залегания трещины находятся в сомкнутом состоянии и не фильтруют воду; средние значения коэффициента фильтрации кембрийских глин по напластованию составляют 8.8×10^{-7} м/сут, а вкrest напластования 9.0×10^{-8} м/сут; величина анизотропии устойчива и составляет около 10;
- отсутствует связь между механическими и фильтрационными свойствами глин.

Изучение структуры трещин в обнажениях карьера “ЛСР” свидетельствует о том, что при снятии бытового давления с кровли кембрийских глин, а также при циклическом увлажнении и высушивании глин происходит раскрытие трещиноватой системы. Коэффициент фильтрации пород в таких условиях может достигать 0.5 м/сут. Наблюдения за кернами глин, поднятыми из скважин на поверхность, показывают, что раскрытие системы трещин происходит достаточно быстро: в течение нескольких часов или суток.

Способность глины изменять свои фильтрационные свойства необходимо учитывать при проектировании и проведении земляных работ во время возведения противофильтрационной завесы вокруг полигона “Красный Бор”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брилинг И.А.* Фильтрация в глинистых породах. М.: Изд-во ВИЭМС, 1984. 61 с.
2. *Гольдберг В.М., Скворцов Н.П.* Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Изд-во Недра, 1986. 160 с.
3. *Дашко Р.Э., Еремеева А.А.* Анализ и оценка повышения безопасности захоронения низкоактивных отходов в нижнекембрийских синих глинах западной части Ленинградской области // Записки Горного института. Т. 154. 2004. С. 131–135.
4. *Дашко Р.Э., Коробко А.А.* Геотехнические аспекты исследований нижнекембрийских глин Санкт-Петербурга как основания сооружений // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 19–22.
5. *Еремеева А.А.* Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка условий захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области: дисс. канд. геол.-мин. наук. СПб., 2002. 212 с.
6. *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.-мин. наук. СПб., 2015.
7. *Ломтадзе В.Д.* Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины русской платформы // Записки Ленинградского горного института им. Г.В. Плеханова. 1958. Т. 34. С. 154–188.
8. *Румынин В.Г., Никуленков А.М.* Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад Русской платформы) // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 191–196.
9. *Румынин В.Г.* Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 43–54.
10. *Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф. и др.* Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2002. 246 с.
11. *Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958. 607 с.
12. *Arnould M.* Discontinuity networks in mudstones: a geological approach. Implications for radioactive wastes isolation in deep geological formation in Belgium // Bull. of Eng. Geol. and the Envir. 2006. V. 65. P. 413–422.
13. *Bock H., Blümling P., Konietzky H.* Study of the micro-mechanical behaviour of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground engineering disciplines // Bull. of Eng. Geol. and the Envir. 2006. V. 65. P. 195–207.
14. *Blumling P., Bernier F., Lebon P., Derek Martin C.* The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behavior and influence on performance assessment // Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C. 2007. V. 32 (8–14). P. 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.034>
15. *Houlsby, A.C.* Routine interpretation of the Lugeon water-test // Quarterly Journal of Engineering Geology. 1976. V. 9 (4). P. 303–313. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1976.009.04.03>
16. *Huysmans M., Dassargues A.* Stochastic analysis of the effect of spatial variability of diffusion parameters on radionuclide transport in a low permeability clay layer // Hydrogeol. Journ. 2006. V. 14. P. 1094–1106.
17. *Lugeon M.* Barrages et géologie // Bulletin Technique de La Suisse Romande. 1932. V. 58. № 19–20. P. 225–240.
18. *Moye D.G.* Diamond drilling for foundation exploration // Civil Engineering Transactions. Institution of Engineers of Australia. 1967. V. 9. № 1. P. 95–100.

THE STUDY OF THE FLOW HETEROGENITY OF THE CAMBRIAN BLUE CLAY IN SCOPE OF HAZARDOUS WASTE DISPOSAL

M. V. Vilkina^{a,*}, A. M. Nikulenkova^a, and V. G. Rumynin^a

^a St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Srednii pr., 41, St. Petersburg, 199004 Russia

*E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

The present article studies the flow heterogeneity in the Cambrian blue clay in scope of hazardous toxic waste disposal at the Krasny Bor site. The clay properties were studied both in monoliths sampled in open-pit mine and bore cores by a number of laboratory methods. To investigate the flow characteristics of clays the in-situ Lugeon (or packer) tests were also performed. The visual analysis of the open-pit mine outcropping proved the Cambrian clays to have the block structure. The blocks are separated one from another by the orthogonal

fracture system in subhorizontal and subvertical plane directions. The size of the blocks increases with depth, starting with centimeters and reaching several meters at a depth of 20 meters. Meanwhile, numerous borehole core examination during the engineering geological survey shows the absence of the fractures aperture, which could be a conductive zone. The laboratory method such as flow cells tests estimated the hydraulic conductivity of the clays to be 8.8×10^{-7} and 9.0×10^{-8} m/day in along and across bedding directions, respectively. The mean flow anisotropy value remains consistent across all samples and is 9.5. The results of the Lugeon tests allowed us to conclude about the closed state of the fracture system under natural conditions i.e., the clay massif acts as an aquitard. The water injection into an isolated interval with a pressure of four lithostatic values causes opening of the fracture system. In this case the hydraulic conductivity of the fracture system may reach up to 0.5 m/day. When an isolated with packers interval is decompressed, the fractures close in so the clays act as a flow barrier again. Therefore, depending on the environmental conditions the Cambrian blue clays may play the role of the flow hampering barrier or a conductive layer.

Keywords: *Cambrian blue clay, hydraulic conductivity, flow parameters, fracture system, Lugeon tests, waste disposal, Krasny Bor site*

REFERENCES

1. Briling, I.A. *Fil'tratsiya v glinistyykh porodakh* [Filtration in clay deposits]. Moscow, VIEMS Publ., 1984, 61 p. (in Russian)
2. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P. *Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh* [Permeability and filtration in clays]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 160 p. (in Russian)
3. Dashko, R.E., Ereemeeva, A.A. *Analiz i otsenka povysheniya bezopasnosti zakhoroneniya nizkoaktivnykh otkhodov v nizhnemembriiskikh sinikh glinakh zapadnoi chasti Leningradskoi oblasti* [Analysis and estimation of promoting safe disposal of low-active waste in low Cambrian blue clay of the western part of Leningradskaya oblast]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2004, vol. 154, pp. 131–135. (in Russian)
4. Dashko, R.E., Korobko, A.A. *Geotekhnicheskie aspekty issledovaniy nizhnemembriiskikh glin Sankt-Peterburga kak osnovaniya sooruzhenii* [Geotechnical aspects of the study of low Cambrian clay in St.Petersburg as the basement of engineering structures]. *Zhishchnoye stroitel'stvo*, 2014, no. 9, pp. 19–22. (in Russian)
5. Ereemeeva, A.A. *Inzhenerno-geologicheskaya i geoekologicheskaya otsenka uslovii zakhoroneniya promyshlennykh otkhodov v nizhnemembriiskikh glinakh Leningradskoi oblasti* [Engineering geological and geoecological assessment of industrial waste disposal conditions in low Cambrian clay]. Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss., St. Petersburg, 2002, 212 p. (in Russian)
6. Korobko, A.A. *Inzhenerno-geologicheskii analiz i otsenka uslovii stroitel'stva i ekspluatatsii sooruzhenii razlichnogo naznacheniya v predelakh Predgintovoy nizmennosti (Sankt-Peterburgskii region)* [Engineering geological analysis and assessment of construction and operation conditions for engineering structures of different purpose within Predgintovaya depression (St. Petersburg region). Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss., St. Petersburg, 2015 (in Russian)
7. Lomtadze, V.D. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva nizhnemembriiskikh glin severo-zapadnoi okrainy Russkoi platformy* [Physico-mechanical properties of low Cambrian clay in the northwestern edge of the Russian platform]. *Zapiski Gornogo instituta*, 1958, vol. 34, pp. 154–188. (in Russian)
8. Rumynin, V.G., Nikulenkov, A.M. *Zonal'nost' fizicheskikh svoystv kotlinskikh glin vendskoi sistemy (severo-zapad Russkoi platformy)* [Zonality in physical properties of kotlin clay of Vendian system (the northwest of the Russian platform)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 197, pp. 191–196. (in Russian)
9. Rumynin, V.G. *Opyt izucheniya glinistyykh tolshch i kristallicheskikh massivov kak geologicheskikh sred dlya okonchatel'noi izolyatsii RAO* [Experience in the study of clay and hard rock massifs as geological environment for final disposal of RW]. *Radioaktivnye otkhody*, 2017, no. 1, pp. 43–54 (in Russian)
10. Rumynin, V.G., Pankina, E.B., Yakushev, M.F. et al. *Otsenka vliyaniya atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye ob'ekty* [Assessment of impact of nuclear power industry on groundwater and adjacent natural bodies]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 2002, 246 p. (in Russian)
11. Terzaghi, K., Pek, R. *Mekhanika gruntov v inzhenernoi praktike* [Soil and rock mechanics in engineering practice]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nym materialam, 1958, 607 p. (in Russian)
12. Arnould, M. Discontinuity networks in mudstones: a geological approach. Implications for radioactive wastes isolation in deep geological formation in Belgium, France, Switzerland. *Bull. of Eng. Geol. and the Envir.*, 2006, vol. 65, pp. 413–422.
13. Bock, H., Blümling, P., Konietzky, H. Study of the micro-mechanical behaviour of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground engineering disciplines. *Bull. of Engin. Geol. and the Envir.*, 2006, vol. 65, pp. 195–207.
14. Blumling, P., Bernier, F., Lebon, P., Derek Martin C. The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behavior and influence on performance assessment, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.034>
15. Housby, A.C. Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1976, no. 9 (4), pp. 303–313. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1976.009.04.03>
16. Huysmans, M., Dassargues, A. Stochastic analysis of the effect of spatial variability of diffusion parameters on radionuclide transport in a low permeability clay layer. *Hydrogeol. Journ.*, 2006, vol. 14, pp. 1094–1106.
17. Lugeon, M. Barrages et géologie. *Bulletin Technique de La Suisse Romande*, 1932, vol. 58, no. 19–20, pp. 225–240.
18. Moye, D.G. Diamond drilling for foundation exploration. *Civil Engineering Transactions*, Institution of Engineers of Australia. 1967, pp. 95–100.