

UDC 624.131

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4560

Шифр специальности ВАК: 1.6.7

Классифицирование торфов по чувствительности к механическим техногенным воздействиям

В.В. Крамаренко, В.Ю. Молоков✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ vik3011347@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Проблемы, связанные с ухудшением несущей способности торфяных грунтов в результате техногенных воздействий, весьма актуальны при обустройстве объектов нефтегазовой отрасли на заболоченных территориях Западной Сибири. Отдельно взятые классификации по недренированной прочности и чувствительности не раскрывают особенностей поведения слабых грунтов в основании сооружений, поэтому в работе предлагается иная схема их классификации, позволяющая оценить изменение физико-механических свойств при нарушении их естественной структуры в ходе инженерно-геологических изысканий. **Цель:** классифицирование торфов территорий Томской, Новосибирской и Омской областей по показателям недренированной прочности и чувствительности к механическим техногенным воздействиям. **Объект:** торфяные грунты Западной Сибири. **Методы** исследования в соответствии с действующими стандартами включали лабораторные методы определения зольности, влажности, степени разложения, полевые испытания для определения недренированной прочности и коэффициента чувствительности грунтов; полученная информация проанализирована в программных комплексах Excel и Statistica. **Результаты.** Проведен обзор отечественных и зарубежных классификаций по показателю чувствительности грунтов, а также методов определения применяемых для его расчета характеристик; предложена схема классифицирования изменения прочностных показателей при механических воздействиях на торфяные грунты. Приведены результаты экспериментальных данных полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств наиболее распространенных видов торфа, оценена их изменчивость после техногенных воздействий по предложенной схеме на примерах известных классификаций, применяемых при строительстве дорог, трубопроводов и для прогноза проходимости техники по болотным массивам. Рекомендована сфера применения предложенной схемы – инженерно-геологические изыскания для проектирования, строительства, ремонта и реконструкции сооружений.

Ключевые слова: торф, чувствительность грунтов, недренированная прочность, вращательный срез, классификация торфа по прочности

Благодарности: исследование выполнено с применением оборудования и приборов Центра коллективного пользования Томского политехнического университета.

Для цитирования: Крамаренко В.В. Молоков В.Ю. Классифицирование торфов по чувствительности к механическим техногенным воздействиям // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 231–243. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4560

UDC 624.131

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4560

Peat classification by sensitivity to mechanical technogenic impacts

V.V. Kramarenko, V.Yu. Molokov✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ vik3011347@tpu.ru

Abstract. Relevance. The problems associated with the weakening of the bearing capacity of peat soils because of technogenic impacts are very relevant in the development of oil and gas industry facilities in the wetlands of Western Siberia. Separately taken classifications according to undrained strength and sensitivity do not reveal the peculiarities of the behavior of weak soils at the base of structures. Therefore, the authors have proposed a different scheme of their classification. It allows assessing the change in physical and mechanical properties when their natural structure is violated during engineering and geological surveys. **Aim.** Peat classification in the territories of Tomsk, Novosibirsk and Omsk regions according to indicators of undrained strength and sensitivity to mechanical technogenic impacts. **Object.** Peat soils of Western Siberia. **Methods.** In accordance with current standards, the research methods included the laboratory methods for determining ash content, humidity, degree of decomposition, field tests to determine the undrained strength and sensitivity coefficient of soils, the information obtained was analyzed in Excel and Statistica software packages. **Results.** The authors have carried out the review of Russian and foreign classifications in terms of soil sensitivity, as well as methods for determining the characteristics used to calculate it and proposed a classification scheme for changes in strength indicators under mechanical influences on peat soils. The article presents the results of experimental data from field and laboratory studies of the physico-mechanical properties of the most common types of peat, their variability after technogenic impacts is estimated according to the proposed scheme using examples of well-known classifications used in the construction of roads, pipelines and for predicting vehicle cross-country ability in swampy areas. The scope of application of the proposed scheme – engineering geological survey for the design, construction, repair and reconstruction of structures – is recommended.

Keywords: peat, soil sensitivity, undrained shear strength, vane test, peat strength classification

Acknowledgements: The study was carried out using the equipment and devices of the Center for Collective Use of Tomsk Polytechnic University.

For citation: Kramarenko V.V., Molokov V.Yu. Peat classification by sensitivity to mechanical technogenic impacts. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 231–243. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4560

Введение

В Западной Сибири широко распространены слабые грунты – торфа, сапропели, илы, а также иольдиевые глины, чрезвычайно остро реагирующие на техногенные воздействия. Правильный прогноз их поведения под механическими нагрузками позволит предотвратить серьезные проблемы, связанные с потерей несущей способности, катастрофическими и неравномерными осадками оснований. В связи с этим особый интерес вызывают показатели чувствительности, характеризующие изменение физико-механических свойств слабых грунтов, структура которых нарушена в результате снятия верхнего слоя залежи при разработке, выторфовке, глубоком рыхлении и фрезеровании с промывкой водой под напором верхних слоев залежи при рекультивации земель, после динамических нагрузок от проходящей техники.

Целью работы была оценка чувствительности торфов территорий Томской, Новосибирской и Омской областей к механическим воздействиям. Задачи включали: обзор классификаций грунтов по показателю чувствительности и методов определения характеристик для расчета чувствительности; проведение полевых испытаний методом вращательного среза и лабораторных определений состава и физических свойств торфов; анализ результатов и классифицирование торфов по показателям чувствительности и прочности по предложенной авторами схеме.

Общие сведения о чувствительности грунтов

Показателем чувствительности грунта S_t д. ед., согласно ГОСТ 25100-2020 [1], называется отно-

шение сопротивления недренированному сдвигу глинистых грунтов ненарушенного c_{ur} и нарушенного сложения c_{ur} (или отношение сопротивления грунта вращательному срезу к его остаточному сопротивлению – $S_t = c_u/c_{ur}$). Показатель применяется к содержащим органику слабым грунтам, в основном к «быстрым» или «текучим» иольдиевым глинам (Quick clays/Leda clay/Champlain Sea clay). R. Söderblom [2] предположил, что Quick это шведский термин «*kivicklera*», происходящий от старого скандинавского слова «*queck*» – живое, который упомянул Törnsten еще в 1767 г. Изначально термин применялся для глин, консистенция которых изменялась от твердого до жидкого состояния под разными механическими воздействиями. В работе [3] текучими называются глины с показателем чувствительности 50 д. ед. и более, с недренированной прочностью нарушенного грунта не более 0,4 кПа при пенетрации конуса с углом 60° и весом 60 г на глубину 20 мм. Чувствительность может увеличиваться с ростом содержания органических веществ, действующих как диспергирующие агенты, поглощающие положительные ионы с поверхностей минералов, что ведет к росту отрицательного заряда на поверхности глинистых частиц и увеличению диффузного двойного слоя, ослабляя связи между ними. Схема формирования высокочувствительных глин в морских и пресных водах приведена в табл. 1 [3]. Алгоритм с пресными водами менее изучен и не исключает возможность образования иольдиевых глин в условиях Западной Сибири.

Таблица 1. Схема формирования текучих глин

Table 1. Scheme of quick clay formation

Не набухающие глинистые грунты и мука горных пород (кварц, полевые шпаты, горнблендит) Non-swelling clay minerals and rock flour (quartz, feldspar and hornblende)			
Отложения в пресных водах Deposition in fresh-water		Отложения в морских водах Deposition in sea water	
Отсутствие многовалентных ионов приводит к высокому электрокинетическому потенциалу и ориентированной структуре Absence of multivalent ions results in high electro-kinetic potential and orientated structure	Адсорбция многовалентных ионов Fe^{3+} и Al^{3+} приводит к низкому электрокинетическому потенциалу и хлопьевидной структуре Adsorption of multivalent ions, Fe^{3+} and Al^{3+} results in low electrokinetic potential and flocculated structure	Низкий электрокинетический потенциал приводит к хлопьевидной структуре Low electro-kinetic potential resulting in flocculated structure	
		Выщелачивание мягкими водами, например, Na^+ Leaching with soft groundwater (e.g. Na^+)	Выщелачивание жесткими водами (Ca^{2+} , Mg^{2+}) Leaching with hard groundwater (Ca^{2+} , Mg^{2+})
Низкая чувствительность. Нормальные глины с низким влагосодержанием Low sensitivity. Normal clays with low water content	Низкая чувствительность. Нормальные глины с высоким влагосодержанием Low sensitivity. Normal clays with high water content	Высокая чувствительность. Иольдиевые глины High sensitivity. Quick clays	Низкая чувствительность. Нормальные глины Low sensitivity. Normal clays
	Комплексные связи многовалентных ионов с дисперсной органической субстанцией Complex bonding of multivalent ions by organic dispersive substances	Высвобождение ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+}) путем химического выветривания Release of (Ca^{2+} , Mg^{2+}) through chemical weathering	Комплексные связи многовалентных ионов с органической дисперсной субстанцией Complex bonding of multivalent ions by organic dispersive substances
	Высокая чувствительность Иольдиевые глины High sensitivity Quick clays		Высокая чувствительность Иольдиевые глины High sensitivity Quick clays

Показатель чувствительности характеризует тиксотропные свойства грунтов при потере связности. Согласно Рекомендациям [4], тиксотропией называется способность тонкодисперсных систем под влиянием механических воздействий (встряхивание, размешивание, удар, вибрация) или ультразвуковых волн и электрического тока разжижаться, переходя в золь, а после устранения причин разжижения постепенно застывать, частично или полностью восстанавливая во времени структурные связи, и переходить в гель. В ГОСТ Р 56353-2022 [5] также даны определения динамическим процессам разрушения структурных связей – тиксотропии, разжижению, плавунности, виброползучести, дилатансии/контракции и формула для определения коэффициента уплотняемости при разжижении $Rs = \Delta e / (e_0 - e_{min})$, где Δe – уменьшение коэффициента пористости при уплотнении после разжижения; e_0 – начальный коэффициент пористости грунта (в естественном залегании); e_{min} – коэффициент пористости в предельно плотном сложении после стандартного уплотнения по методике, приведенной в ГОСТ 22733 [6].

Чувствительные грунты реагируют на сейсмические нагрузки – согласно Национальному строительному кодексу Канады [7], особенно опасны грунты класса F, включающие в себя «разжижающиеся грунты, быстрые и высокочувствительные глины». В СП 14.133330.2018 [8] также выделяется IV группа грунтов, склонных к разжижению при динамических воздействиях. Механизмы и типы реакций чувствительных грунтов приведены в табл. 2 [9].

Анализ литературы показал, что чувствительность и структурная прочность присущи сформировавшимся в морских и континентальных условиях глинистым, органическим и органоминеральным грунтам, по-разному проявляясь в результате механических воздействий. Прочностные свойства торфяных грунтов ранее были детально изучены Л.С. Амаряном, И.Е. Евгеньевым, В.Д. Казарновским, М.А. Шапошниковым, А.О. Landva, H. Kanmuri, N.D. Marachi, G. Mesri, T. Ogino, H. Oikawa, M. Tsushima, T. Mitachi, I. Miyakawa, J. Radforth, V.G. Sodha, K.V. Helenelund, V. Thakur. Показатели чувствительности торфа изучались реже, в основном для целей прогноза проходимости техники при разработке месторождений.

Таблица 2. Механизмы и типы реакций чувствительных глин

Table 2. Mechanisms and types of reactions of sensitive clays

Механизм Mechanism	Тип реакций Type of reaction	Верхний предел чувствительности Upper limit of sensitivity	Преобладающий тип грунтов Predominant soil type
Метаустойчивое расположение частиц Metastable particle arrangements	Физические Physical	Слегка чувствительные Slightly quick (8–16)	Все глинистые грунты All clay soils
Пылеватые глины со связным скелетом Silt skeleton-bond clay	Физические Physical	Очень чувствительные Very sensitive (4–8)	Смесь глинисто-пылевато-песчаная Clay-silt-sand mixtures
Вымывание солей Leaching of salts	Физико-химические Physicochemical	Сверхчувствительные Extra quick (>64)	Гляциальные и постгляциальные морские глины Glacial and postglacial marine clays
Цементация Cementation	Химические Chemical	Сверхчувствительные Extra quick (>64)	Все грунты, содержащие потенциально цементирующие компоненты All soils containing potential cementing components
Ионный обмен Ion exchange	Физико-химические Physico-chemical	Слегка чувствительные Slightly quick (8–16)	Выщелоченные и выветрелые глины Leached and weathered clays
Выветривание Weathering	Химические Chemical	Средне чувствительные Medium sensitive (~4)	Все грунты, величина магнитуды зависит от минерального состава All soils, magnitude of effect depends on mineralogy
Тиксотропные нагрузки Thixotropic load	Физико-химические Physico-chemical	Слегка чувствительные Slightly quick (<16)	Глины Clays
Присутствие диспергирующих веществ Dispersing agent addition	Физико-химические Physico-chemical	Сверхчувствительные (>64) Extra quick (>64)	Глины, особенно содержащие органическое вещество или залежи органических грунтов Clays, particularly organic-bearing or organic deposit associated

Обзор методов определения показателей расчета чувствительности грунтов

Изначально как количественную меру чувствительности грунта К. Терцаги применил отношение пикового значения предела прочности на одноосное сжатие образца с ненарушенной и нарушенной структурой [10], а также составил шкалу, по которой можно дифференцировать грунты по чувствительности (рис. 1). Метод одноосного сжатия широко применяется [11–13], но необходимо отметить, что для слабых грунтов он малопригоден. Для расчета чувствительности применяется недренированная прочность, процедур её определения много, это вращательный срез, пенетрация/зондирование, одноосное сжатие и забытые методы определения связности грунтов [14–31].

Основным показателем для расчета чувствительности слабых грунтов является недренированная прочность грунта в нарушенном (c_{ud}) и естественном состоянии (c_u), определенная методом вращательного среза крыльчатками в полевых [14–16] или мини-крыльчатками и карманными сдвигомерами в лабораторных условиях [17–19]. Полученные в результате испытаний показатели прочности позволяют определить строительный тип грунта, рассчитать несущую способность основания сооружений, определить толщину насыпи и выбрать способ ее отсыпки, проходимость техники и чувствительность к нагрузкам.

Лабораторные пенетрационные методы и статическое зондирование также широко применяются

для определения недренированной прочности и чувствительности грунтов [20–23]. В работах [24, 25] приводятся также данные испытаний на коническом пластометре Кп-3 и различных пенетрометрах [25–27]. Бойченко отмечал, что при испытаниях грунтов конусом достигается оценка структурной прочности (связности) путем сравнения консистенции грунта в ненарушенном и нарушенном состояниях (или сопоставлением полной влажёмкости (w_p) и влажности нарушенного грунта при той же консистенции (w_s): $S=(w_p-w_s)/w_p$) при условии, что механическая сопротивляемость нарушенного грунта равна его сопротивляемости в естественном состоянии [27]. Коэффициент структурной связности определяется в специальном устройстве под нагрузкой 2 кг по отношению диаметров после и до расплющивания образца по методике, приведенной в [28]. Подобный показатель пластичности определяется на кулачковом пластиметре И.Д. Беловидова и Н.Г. Горячкина как отношение диаметра образца после деформации d к его исходному диаметру d_n : $K=d/d_n$ при данной влажности [29]. Структурную связность [30, 31], или «коэффициент структурной прочности» [32], вычисляют также по отношению минимального давления расплющивания образца ненарушенного сложения к минимальному давлению расплющивания образца нарушенного сложения при одинаковой влажности и пористости. Для просадочных грунтов В.И. Крутовым [33] предложен коэффициент сни-

жения структурной прочности $K_c = (C_e/C_b) \cdot (\phi_e/\phi_b)$, где C_e и C_b – сцепление лессовой породы при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии, соответственно, ϕ_e и ϕ_b – углы трения в тех же состояниях. Особый интерес вызывают исследования [34–37] по выявлению чувствительных и текучих глин и их физико-механических характеристик полевыми методами.

Показатели, применяемые для расчета чувствительности, методы их определения и подготовки образцов весьма разнообразны, а их выбор определяет консистенция глинистых и органоминеральных грунтов, а также процентное содержание органики органических грунтов. Необходимо отметить, что чаще всего для расчета показателей чувствительности применяется метод вращательного среза при помощи крыльчатки, позволяющий быстро привести грунт в нарушенное состояние.

Обзор классификаций чувствительности грунтов к механическим воздействиям

Наиболее распространенные классификации по чувствительности (рис. 1) грунтов приведены в работах [1, 2, 3, 38–42]. Классификация по удельному сопротивлению пенетрации дана в ГОСТ 34276-2017 [43]. По результатам испытаний вращательным срезом в полевых условиях составлены классификации слабых грунтов [44–46].

Классификации глин и органических грунтов различаются широким диапазоном чувствительности выделяемых разновидностей (рис. 1). A.W. Skempton с соавторами [38] доказали, что большинство глин, за исключением переуплотненных и содержащих крупнообломочные включения, теряют часть своей прочности при реструктуризации, и предложили свою классификацию по чувствительности. Rosenqvist [39] описал теорию образовании иольдиевых глин при вымывании солей из морских отложений, а позже значительно расширил диапазон значений их классификации [39]. Похожую детальную систематизацию привели W. Shannon и S. Wilson в [40]. R. Holtz сравнил классификацию USA [41], где редко встречаются текучие глины, и шведскую систему, где чувствительные глины типичны. J. Bowles [42] предложил классификацию, в которой грунты нечувствительны при $S_t < 4$ и чрезвычайно чувствительны при $S_t > 8$.

Ученые SGI [3] представили шкалу чувствительных глин Швеции (рис. 1), в работе отмечено, что показатель чувствительности от 2 до 4 широко распространен среди нормально уплотненных глин, но также часто S_t встречается в интервале значений от 4 до 8.

Söderblom [2] классифицировал чувствительные глины в зависимости от объема работ при подготовке образца, необходимой для их полной ре-

структуризации, – превращения в жидкость. Он выделил быстрые и медленные текучие глины и предложил шкалу с баллами скорости реструктуризации от 1 до 10. Масштаб шкалы был установлен на основе визуального осмотра образцов глины высотой 40 мм и диаметром 50 мм после 250 падений в чашке Casagrande. Söderblom предположил, что только глину с показателем чувствительности $S_t > 50$ (рис. 1) и баллом скорости реструктуризации > 8 следует называть текучей. Работа Söderblom показывает, что чувствительность глин – это свойство, которое развивается постепенно и зависит от способа и объема подготовки: количества перемешиваний, ударов, поворотов и т. д.

Анализ классификаций по показателю чувствительности показал, что для его расчетов применяется недренированная прочность в естественном и нарушенном состоянии. Немаловажное значение имеет подготовка грунта с нарушенной структурой, которая может проводиться в массиве при вращательном срезе, в испытательных приборах в ходе ручного или механического перемешивания, имеющая свои нюансы. Эти особенности учтены только в классификации Söderblom [2].

Методы исследования грунтов

Для практического решения поставленных задач по оценке чувствительности были изучены наиболее представительные виды торфа месторождений Клюквенное, Плотниковское, Васюганское, Челбак-2, Таган, Усть-Кандинское, а также безымянных болотных массивов территорий нефтегазовых месторождений Томской, Новосибирской и Омской областей. В ходе исследования были определены: плотность (ρ), плотность твердых частиц (ρ_s), плотность сухого грунта (ρ_d), влажность (w), коэффициент пористости (e), зольность (D_{as}), ботанический состав и степень разложения (D_{dp}). Согласно [15] в массиве определена недренированная прочность торфа до и после разрушения структурных связей. Ход работ соответствовал требованиям норматива: крыльчатку вдавливали в торф, затем вращали ручку с угловой скоростью 0,2–0,3 градусов в секунду; зафиксировав максимальное значение индикатора, продолжали вращение с угловой скоростью 2–3 градуса в секунду до условной стабилизации значений крутящего момента. После 3–5 полных оборотов крыльчатки, достаточных для разрушения структурных связей торфа, фиксировали значение индикатора. В ГОСТ Р 59996-2022 [18] отмечено, что нарушение структуры достигается после 5–10 оборотов крыльчатки для глинистых грунтов. Для торфов пластичных, битуминозных с высокой степенью разложения также потребовалось больше оборотов до стабилизации остаточных значений недренированной прочности.



Рис. 1. Классификации грунтов по показателю чувствительности S_t (кПа)
Fig. 1. Classification of soils by sensitivity S_t (kPa)

Так как разные виды торфа отличаются разнообразием свойств и требуют особого подхода, первые 2–3 испытания на каждом новом объекте делали пробными в разных точках. Испытание торфа проводилось через 0,3–0,5 м на всю мощность залежи, рядом в скважинах отбирались пробы для определения показателей состава, степени разложения, зольности и физических свойств. По результатам полевых испытаний были рассчитаны характеристики c_u и c_{ud} , а также показатели чувствительности ($S_t = c_u/c_{ud}$) и разница величин максимальной и установившейся прочности ($S_t' = c_u - c_{ud}$).

Результаты и обсуждение

Результаты исследований ботанического состава, степени разложения, показателей физических и прочностных свойств для наиболее представительных видов торфа приведены в табл. 2. Все торфа малозольные ($D_{as} < 7\%$), слабо- и среднеразложившиеся. Величина сопротивления сдвигу в естественном состоянии у исследованных торфов изменяется от 6,2 до 44,6 кПа, в нарушенном – от 1,9

до 14,5 кПа, в (табл. 3) приведены модальные значения показателей.

На (рис. 1) приведены графики с размещенной по возрастанию недренированной прочностью торфа с ненарушенной (верхняя кривая) и нарушенной структурой (нижняя кривая): сфагново-мочажинного, сфагнового (представленный пушицево-сфагновым, фускум- и магелланикум-торфами), осоково-гипнового и древесно-осокового видов. На графиках видно, что недренированная прочность грунта с нарушенной структурой с ростом того же показателя в естественном состоянии слабо увеличивается у сфагновых видов или совсем не возрастает у более прочных торфов: древесно-осокового и осоково-гипнового (рис. 2), а также у травяного, осокового и гипнового. Необходимо отметить, что именно эти виды менее склонны к быстрому восстановлению прочности из-за потери внутренних связей при разрушении разложившейся древесины, спутанных как войлок коротких корешков осок и слабых мелких остатков гипновых мхов.

Таблица 3. Характеристика прочностных свойств торфов

Table 3. Characteristics of strength properties of peats

Группа торфа Peat group	Вид торфа Peat species	Степень разложения $D_{dp}, \%$ Decomposition degree $D_{dp}, \%$	Влажность $w, \%$ Water content $w, \%$	Плотность частиц $\rho_s, \text{г/см}^3$ Particle density $\rho_s, \text{g/cm}^3$	Коэффициент пористости e Void ratio e	Недренированная прочность, кПа Untrained shear strength, kPa		Показатель чувствительности S_t Sensitivity S_t		Тип торфа по классификациям Peat type by classifications		
						в естественном состоянии c_u undisturbed structure c_u	в нарушенном состоянии c_{ur} disturbed structure c_{ur}	$S_t = c_u/c_{ud}$	$S_t' = c_u - c_{ud}$	для дорожного строительства [45] for road construction embankments	для строительства трубопроводов [46] for pipeline construction	по проходимости техники [44] by vehicle passability
Древесно-травяная Woody-grass	Древесно-осоковый Low-moor wood-sedge	30,7	460	1,53	10,4	22,5	6,5	3,5	16,0	1B	1B	1D
Травяная Grass	Травяной Grass	25,0	520	1,54	9,87	26,5	11,1	2,4	15,4	1B	1A,B	1C
	Осоковый Low-moor sedge	31,1	570	1,52	10,8	17,9	5,1	3,5	12,8	1,2 B	1B	2D
Травяно-моховая Grass-moss	Осоково-гипновый Sedge-hypnum	25,0	540	1,65	11,7	14,1	5,2	2,7	8,9	1,2 B	1B	2D
	Пушицево-сфагновый High-moor Eriophorum-Sphagnum	15,0	1040	1,60	19,8	11,4	6,5	1,8	4,9	1,2 B	1B	3D
Моховая Moss	Фускум Sphagnum fuscum	9,7	950	1,58	16,4	14,2	8,6	1,7	5,6	1,2 B	1B	2C
	Магелланикум Sphagnum magellanicum	16,7	1310	1,61	22,3	13,1	5,4	2,4	7,7	1,2 B	1B	2D
	Сфагново-мочажинный Bog-depression Sphagnum	15,0	700	1,43	12,1	8,9	2,4	3,7	6,5	2C	2C	3D
	Гипновый Low-moor Hypnum	30,0	360	1,87	10,2	20,9	7,96	2,6	12,9	1B	1B	1C



Рис. 2. Недренированная прочность торфов (пиковые значения прочности – верхняя кривая, в нарушенном состоянии – нижняя)

Fig. 2. Undrained strength of peats (peak strength – upper curve, remolded strengths – lower one)

Очень низкими значениями прочности как в нарушенном, так и в естественном состоянии характеризуются сфагново-мочажинные торфа. Верховые сфагновые торфа отличаются более высокой прочностью, обоюдным ее ростом в естественном и нарушенном состояниях с небольшим разрывом значений благодаря прочности волокнистых остатков мхов. Если более разложившиеся, небольшие по размеру частицы других торфообразователей после нарушения строения теряют большую часть структурных связей, длинные волокна сфагновых мхов часто остаются ненарушенными. Поэтому минимальная разница между c_u и c_{ud} отмечена у пушицево-сфагнового, сфагново-мочажинного, фускум- и магелланикум-торфа (табл. 2), что свидетельствует о хорошем сцеплении частиц и прочности тканей торфов с волокнистой и губчатой структурой даже в нарушенном состоянии.

Таким образом, проведенные исследования методом вращательного среза показали, как ослабляются прочностные характеристики при нарушении структуры у разных видов торфа. С увеличением недренированной прочности в естественном состоянии, рост показателя с нарушенной структурой c_{ud} отмечен только у верховых сфагновых торфов, а у остальных видов подобные изменения незначительны или отсутствуют. По классификации ГОСТ 25100, таблица В.8 [1] все разновидности по S_t можно отнести к среднечувствительным, а по значениям $S_t' = c_u - c_{ud}$ видно, насколько резко ослабевает прочность древесно-осокового, травяного, осокового и гипнового торфов низинного типа, но не ясно, какова она до и после воздействия.

В настоящее время эти изменения в нормативах при расчетах оснований и систематиках грунтов не отражены, а информативность классификации

грунтов по чувствительности S_t без знания их исходной и остаточной прочности весьма сомнительна, как и классификация по прочности без показателя чувствительности.

Классифицирование торфов по чувствительности к механическим воздействиям

По мнению авторов, для комплексной оценки чувствительности к нарушению структуры торфов наиболее полезны и просты будут классификации, объединяющие показатели c_u и c_{ud} . Чтобы более точно описать изменение прочностных характеристик и поведение слабых грунтов в основании сооружений предлагается схема (табл. 4), в основе которой заложены известные частные классификации [44–46], выделяющие строительные типы грунтов по недренированной прочности.

Приведем оценку изменения прочностных свойств древесно-осокового торфа (табл. 3): $c_u = 22,5$ кПа и $c_{ud} = 6,5$ кПа, разница $S_t' = 16$ кПа. Первая классификация для строительства дорожных насыпей из работы [45] делит слабые грунты на 4 строительных типа: к 1 типу относятся торфа, которые сжимаются и не выдавливаются под нагрузкой от насыпи; 2 тип – выдавливаются только при быстрой нагрузке и уплотняются при медленной; 3 тип – слабые грунты выдавливаются в любом случае; а для 1, 2 типов требуется проведение дополнительных испытаний для уточнения. Типы грунта, определяемые по недренированной прочности в естественном состоянии обозначены нами цифрами; а после разрушения структуры торфа – буквами. Древесно-осоковый торф из более прочного 1 типа после нарушения структуры сразу переходит в тип В, резко теряя прочность.

Таблица 4. Классифицирование торфов по чувствительности к техногенным воздействиям

Table 4. Peats classification by sensitivity to technogenic impacts

Классификация Classification	Сопротивление недренированному сдвигу c_u , кПа Undrained shear strength c_u , kPa	Тип торфа Peat type	
		естественного сложения c_u undisturbed structure c_u	нарушенного сложения c_{ud} disturbed structure c_{ud}
1. Классификация для дорожного строительства [45] 1. Classification for road construction [45]	>20	1	A
	20–10	1, 2	A, B
	10–3	2	B
	<3	3	C
2. Классификации для строительства трубопроводов [46] 2. Classifications for pipeline construction [46]	>10	1	A
	5–10	2	B
	<5	3	C
3. Классификация по проходимости техники [44] 3. Classification by vehicle passability [44]	>18 (условия легкие) (easy conditions)	1	A
	12–18 (условия средние) (average conditions)	2	B
	8–12 (условия тяжелые) (difficult conditions)	3	C
	<8 (условия особые) (special conditions)	4	D

Красным шрифтом выделены наиболее неблагоприятные грунты по прочности в целом в обоих состояниях.
The most strength difficult soils in both states are in red.

Вторая классификация для строительства трубопроводов, характеризующая тип болот, приведена в ВСН 51-3-85 [46]. В данной системе также определяют типы торфяных оснований в зависимости от максимального сопротивления грунта срезу c_u : 1 тип – болота до минерального дна целиком заполненные плотным торфом, который является надежным основанием для трубопроводов; 2 тип – болота заполнены торфом устойчивой консистенции с водными прослойками и мощностью торфяных пластов между ними более двух диаметров трубопроводов, такой торф можно использовать как несущее основание для трубопроводов; 3 тип – болота заполнены разложившимся торфом или водой с органическими остатками, с водными прослойками и толщиной торфа между ними не менее двух диаметров трубопровода, такой торф нельзя использовать как основание трубопровода. Древесно-осоковый торф относится к типу 1В и представляет собой надежное основание, представленное прочным торфом, который частично теряет несущую способность при нарушении структуры, но в основании трубопроводов его использовать можно.

Согласно классификации Л.С. Амаряна [44], по проходимости техники по болотам (табл. 4) древесно-осоковый торф относится к типу 1D, т. е. из типа с легкими условиями сразу переходит в тип с условиями особыми – по таким топам возможен проезд плавучей гусеничной техники или машин с арочными многокатковыми шинами или проезд в зимнее время, за исключением теплых зим. При

снятии верхнего слоя удаляются корневища деревьев и кустарничков, служившие своеобразной арматурой, повышающей несущую способность залежи. Эти аспекты необходимо учитывать при проведении работ на болотах: избегать длительных остановок техники на подобных участках и воздерживаться от передвижения.

В (табл. 3) для исследованных видов торфа кроме характеристик физических, прочностных свойств и показателей чувствительности определены строительные типы по прочности и чувствительности, согласно приведенным в (табл. 4) классификациям. Красным шрифтом выделены наиболее неблагоприятные грунты по прочности в целом в обоих состояниях.

Нужно отметить, что по таблице В.8 ГОСТ 25100-2020 [1] древесно-осоковый торф характеризуется как среднечувствительный, по таблице В.7 – низкой прочности, переходящий в грунт чрезвычайно низкой прочности [1]. Из-за широкого диапазона значений c_u (0–>300 кПа) последней классификации сложно детализировать прочность слабых грунтов, так как все они относятся к грунтам низкой, очень низкой и чрезвычайно низкой прочности.

Заключение

Предложенный подход к оценке чувствительности грунтов при помощи известных и проверенных временем классификаций позволит проектировщикам учитывать изменчивость физико-механических характеристик грунтов от естественного до изме-

ненного состояния при воздействиях, выявлять неблагоприятные чувствительные грунты и более тщательно оценивать их поведение при расчетах по несущей способности и деформациям оснований сооружений. В сравнении с показателями чувствительности S_t и S'_t , нужно отметить большую информативность и содержательность предложенной схемы, которая характеризует исходное и нарушенное состояние грунта по недренированной прочности, его чувствительность к воздействиям и оценивает неблагоприятность условий в целом.

Область использования предложенной схемы не ограничена слабыми грунтами и может применяться для различных показателей, изменяющихся при механических (статических и динамических), температурных воздействиях, обводнении/осушении, специальной подготовке образцов в зависимости от прогнозируемых условий – при максимальной плотности и оптимальной влажности, предварительной консолидации, улучшении свойств и многих других вариациях состояний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 39 с.
2. Söderblom R. Organic matter in Swedish clays and its importance for quick clay formation Proceedings. – Stockholm: Swedish geotechnical institute, 1974. – 100 p.
3. Quick clay in Sweden / K. Rankka, Y. Andersson-Sköld, C. Hultén, R. Larsson, V. Leroux, T. Dahlin. – Linköping: Swedish geochemical institute, 2004. – 145 p.
4. Рекомендации по методике испытаний сильносжимаемых грунтов в основаниях нефтепромысловых резервуаров. – М.: НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова, 1987. – 49 с.
5. ГОСТ Р 56353-2022. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. – М.: Стандартинформ, 2022. – 44 с.
6. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Стандартинформ, 2016. – 48 с.
7. Searle Ch. Straw bale building and the national building code of Canada // McMaster University: site. URL: https://www.eng.mcmaster.ca/sites/default/files/uploads/straw_bale_building_and_the_national_building_code_of_canada.pdf (дата обращения: 14.07.2023).
8. СП 14.133330-2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. – М.: Стандартинформ, 2018. – 22 с.
9. The Great Alaska Earthquake of 1964 // National Research Council (U.S.). Committee on the Alaska Earthquake. – Washington: National Academy of Sciences, 1968. – Q. 6. – P. 8–16.
10. Terzaghi K. Ends and means in soil mechanics // Engineering Journal. – 1944. – P. 608–13.
11. ASTM D2166/D2166M-16. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2166> (дата обращения: 14.07.2023).
12. ГОСТ 26447-85. Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 22 с.
13. ГОСТ 12248.2-2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 36 с.
14. ASTM D2573/D2573M-18. Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2573> (дата обращения: 14.07.2023).
15. ГОСТ 20276.5-2020. Грунты. Метод вращательного среза. – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
16. DIN EN ISO 22476-9-2021. Geotechnical investigation and testing – field testing. – Part 9: Field vane test: German Institute for Standardization, 2021.
17. ASTM D4648/D4648M-24. Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4648> (дата обращения: 14.07.2023).
18. ГОСТ Р 59996-2022 Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Морские исследования грунтов. – М.: Стандартинформ, 2020. – 113 с.
19. Кулачкин Б.И. Рекомендации по методике испытаний сильно-сжимаемых грунтов в основаниях нефтепромысловых резервуаров. – М.: НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова, 1987. – 49 с.
20. Schmertmann J.H. Guidelines for cone penetration test: performance and design. – Washington: Federal highway administration offices of research and development, 1977. – 145 p.
21. Robertson P.K., Campanella R.G. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach // Canadian Geotechnical Journal. – 2009. – Vol. 46. – № 11. – P. 1337–1355.
22. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – М.: Стандартинформ, 2012. – 38 с.
23. ASTM D5778-07: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. – West Conshohocken: PA. Publ., 2012. – 21 p. URL: <https://www.astm.org/Standards/D5778> (дата обращения: 14.07.2023).
24. Волярович М.П., Баргов А.А. Исследование вязко-пластических свойств верхового и низинного видов торфа в широком интервале влажности // Труды КТИ. – 1960. – № 11. – С. 227–241.
25. Руководство по исследованию грунтов с повышенным содержанием органических веществ. ВНДМ-02-72. – М.: Гос. ком. Совета Министров РСФСР по делам стр-ва "Госстрой РСФСР", Росглавнистройпроект, 1972. – 54 с.
26. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск: Наука и техника, 1975. – 319 с.

27. Бойченко П.О. Определение пределов пластичности, консистенции и коэффициента структурной прочности связных грунтов методом конуса // Некоторые методы определения физико-механических свойств грунтов. – Л.: Изд-во Ленинградского государственного университета, 1950. – С. 5–32.
28. Литвинов И.М. Исследование грунтов в полевых условиях. Инструкция по определению структурной связности пластичных глинистых грунтов. – М.: Машстройиздат, 1950. – 156 с.
29. Беловидов И.Д., Горячкин В.Г. Классификация консистенций переработанного торфа сырца и метод определения границ нормально-пластической консистенции торфа // Труды Московского торфяного института. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – Вып. 8. – С. 35–49.
30. Руководство по определению прочности илов и заторфованных грунтов / под ред. Л.Д. Сапрыгиной. – М.: Стройиздат, 1978. – 49 с.
31. Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов. – М.: НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова, 1978. – 31 с.
32. Маккавеев А.А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 74 с.
33. Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. – Киев: Будивельник, 1982. – 224 с.
34. Evaluating geoparameters of Maine sensitive clay by CPTU. Proceedings / P.W. Mayne, P. Paniagua, B. DiBuò, S.S. Agaiby // 5th Intl. Symposium on Cone Penetration Testing. – Bologna, 2022. – P. 552–558. URL: <https://www.researchgate.net/publication/361417529> (дата обращения: 14.07.2023).
35. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests / B. Di Buò, P.W. Mayne, P. Paniagua, S.S. Agaiby // XVIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – 2024. – P. 412–418. URL: <https://www.researchgate.net/publication/383848959> (дата обращения: 14.07.2023).
36. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests / P. Paniagua, P.W. Mayne, B. Di Buò, Sh. Agaiby // XVIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – 2024. – P. 352–356. URL: <https://www.researchgate.net/publication/383848885> (дата обращения: 14.07.2023).
37. Mayne P., Greig J., Cargill E. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests // Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. – Barcelona, 2024. – P. 226–233. URL: <https://www.researchgate.net/publication/381932548> (дата обращения: 14.07.2023).
38. Skempton A.W., Northey R.D. The sensitivity of claytechnique // Geotechnique. – 1952. – Vol. 3. – № 1. – P. 30–53.
39. Rosenqvist I.Th. Considerations on the sensitivity of Norwegian quick clays // Geotechnique. – 1953. – Vol. 3. – № 5. – P. 195–200. URL: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1953.3.5.195> (дата обращения: 14.07.2023).
40. Report on Anchorage area soil studies, Alaska to U. S. Army Engineer District, Anchorage, Alaska. – Seattle, Wash.: Shannon and Wilson, 1964. – 249 p.
41. Holtz R.D., Kovacs W.D. Introduction to geotechnical engineering. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1981. – 733 p. URL: <https://dokumen.tips/reader/f/holtz-r-d-kovacs-w-d-an-introduction-to-geotechnical-engineering> (дата обращения: 14.07.2023).
42. Bowles J. Foundation analysis and design. – New York: McGraw Hill, 1996. – 310 p.
43. ГОСТ 34276-2017. Грунты. Методы лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации. – М.: Стандартинформ, 2017. – 46 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293787/4293787736.pdf> (дата обращения: 14.07.2023).
44. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. – М.: Недра, 1990. – 220 с.
45. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976. – 272 с.
46. ВСН 51-3-85. Проектирование промышленных стальных трубопроводов. – М.: Мингазпром, 1985. – 37 с.

Информация об авторах

Виолетта Валентиновна Крамаренко, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kramarenko-v-v@mail.ru

Виктор Юрьевич Молоков, ассистент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vik3011347@vandex.ru

Поступила в редакцию: 05.02.2024

Поступила после рецензирования: 21.05.2024

Принята к публикации: 11.11.2024

REFERENCES

1. State Standard 25100–2020. Soils. Classification. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 39 p. (In Russ.)
2. Söderblom R. Organic matter in Swedish clays and its importance for quick clay formation. Proceedings. Stockholm, Swedish geotechnical institute Publ., 1974. 100 p.
3. Rankka K., Andersson-Sköld Y., Hultén C., Larsson R., Leroux V., Dahlin T. Quick clay in Sweden. Linköping, Swedish geochemical institute Publ., 2004. 145 p.
4. Recommendations on the method of testing highly compressible soils in the bases of oilfield reservoirs. Moscow, Strojizdat Publ., 1987. 49 p. (In Russ.)
5. State Standard 56353–2022. Soils. Laboratory methods for determination of soil dynamic properties. Moscow, Standardinform Publ., 2022. 44 p. (In Russ.)

6. *State Standard 22733-2016. Soils. The method of laboratory determination of the maximum density.* Moscow, Standardinform Publ., 2016. 48 p. (In Russ.)
7. Searle Ch. *Straw Bale Building and the National Building Code of Canada.* McMaster University, 2015. Available at: https://www.eng.mcmaster.ca/sites/default/files/uploads/straw_bale_building_and_the_national_building_code_of_canada.pdf (accessed 14 July 2023).
8. *SP 14.133330–2018. Seismic building design code. Updated edition instead of SNiP II-7-81.* Moscow, Standardinform Publ., 2018. 22 p. (In Russ.)
9. *The Great Alaska Earthquake of 1964. National Research Council (U.S.).* Committee on the Alaska Earthquake, Q. 6, pp. 8–16.
10. Terzaghi K (1944) Ends and means in soil mechanics. *Engineering Journal*, pp. 608–613. <https://mindmapblog2016.wordpress.com/2016/08/23/sensitivitythixotropy-activity-of-clays/> (accessed 14 July 2023).
11. *ASTM D2166/D2166M–16. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.* West Conshohocken, PA, ASTM International Publ., 2016. 16 p. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2166> (accessed 14 July 2023).
12. *State Standard 26447–85. Rocks. Method for determination of mechanical properties for unconfined compressive strength of clay rocks.* Moscow, Izdatelstvo standartov, 1985. 22 p. (In Russ.)
13. *State Standard 12248.2–2020. Soils. Determination of strength characteristics by uniaxial compression method.* Moscow, Standardinform Publ., 2016. 48 p. (In Russ.)
14. *ASTM D2573/D2573M–18. Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils.* West Conshohocken, PA, ASTM International Publ., 2018. 16 p. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2573> (accessed 14 July 2023).
15. *State Standard 20276.5–2020. Rocks. Rotational slice method.* Moscow, Izdatelstvo standartov, 2020. 36 p. (In Russ.)
16. *DIN EN ISO 22476-9-2021. Geotechnical investigation and testing – field testing. Part 9: Field vane test: German Institute for Standardization, 2021.*
17. *ASTM D4648/D4648M–2024. Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil.* West Conshohocken, PA, ASTM International Publ., 2016. 19 p. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4648> (accessed 14 July 2023).
18. *State Standard 59996-2022-2022. Oil and gas industry. Offshore oil and gas facilities. Marine soil research.* Moscow, Izdatelstvo standartov, 2020. 113 p. (In Russ.)
19. Kulachkin B.I. *Recommendations for testing methods of highly compressible soils in the bases of oilfield reservoirs.* Moscow, 1987. 49 p. (In Russ.)
20. Schmertmann J.H. *Guidelines for cone penetration test: performance and design.* Washington, Federal highway administration offices of research and development, 1977. 145 p.
21. Robertson P.K., Campanella R.G. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, vol. 46, no. 11, pp. 1337–1355.
22. *State Standard 19912–2012. Soils. Field test methods: cone penetration test and dynamic probing.* Moscow, Standardinform Publ., 2019. 38 p. (In Russ.)
23. *ASTM D5778-07: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.* West Conshohocken, PA, Publ., 2012. 21 p. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D5778> (accessed 14 July 2023).
24. Volarovich M.P., Bagrov A.A. Study of viscous-plastic properties of upper and lower types of peat in a wide range of moisture. *Proceedings of KTI*, 1960, Iss. 11, pp. 227–241. (In Russ.)
25. *Guidelines for the study of soils with a high content of organic substances. VNMD-02-72.* Moscow, Rosglavniistrojproekt Publ., 1972. 54 p. (In Russ.)
26. Lishivan I.I. *Basic properties of peat and methods of their determination.* Minsk, Nauka i tekhnologii Publ., 1975. 319 p. (In Russ.)
27. Boychenko P.O. *Determination of plasticity, consistency and coefficient of structural strength of connected soils by the cone method.* Leningrad, Leningrad state University Publ., 1950. pp. 5–32. (In Russ.)
28. Litvinov I.M. *Research of soils in field conditions. Instructions for determining the structural connectivity of plastic clay soils.* Moscow, Mashstroyizdat Publ., 1950. 156 p. (In Russ.)
29. Belovidov I.D., Goryachkin V.G. Classification of the consistency of processed raw peat and the method for determining the boundaries of normal plastic consistency of peat. *Proceedings of the Moscow peat Institute.* Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958. Iss. 8, pp. 35–49. (In Russ.)
30. *Guidelines for determining the strength of silts and blocked soils.* Moscow, Stroizdat Publ., 1978. 49 p. (In Russ.)
31. *Recommendations on methods for determining the coefficients of lateral pressure and transverse expansion of clay soils.* Moscow, NII osnovanij i podzemnykh sooruzhenij im. N.M. Gersevanova Publ., 1978. 31 p. (In Russ.)
32. Makkaveev A.A. *Dictionary of hydrogeology and engineering geology.* Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1961. 74 p. (In Russ.)
33. Krutov V.I. *Bases and foundations on subsident soils.* Kiev, Budivelnik Publ., 1982. 224 p. (In Russ.)
34. Mayne P.W., Paniagua P., DiBuò B., Agaiby S.S. Evaluating geoparameters of Maine sensitive clay by CPTU. *Proceedings. 5th Intl. Symposium on Cone Penetration Testing.* Bologna, 2022. pp. 552–558. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/361417529> (accessed: 14 July 2023).
35. Di Buò B., Mayne P.W., Paniagua P., Agaiby S.S. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests. *XVIII Evropan conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 2024, pp. 412–418. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/383848959> (accessed: 14 July 2023).
36. Paniagua P., Mayne P.W., Di Buò B., Agaiby Sh. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests. *XVIII Evropan conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 2024, pp. 352–356. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/383848885> (accessed: 14 July 2023).

37. Mayne P., Greig J., Cargill E. Evaluating undrained shear strength and sensitivity in soft sensitive clay using piezocone and field vane tests. *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Barcelona, 2024. pp. 226–233. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/381932548> (accessed: 14 July 2023).
38. Skempton A.W., Northey R.D. The sensitivity of claysechnique. *Geotechnique*, 1952, vol. 3, no. 1, pp. 30–53.
39. Rosenqvist I.T. Considerations on the sensitivity of Norwegian quick clays. *Geotechnique*, 1953, vol. 3, no. 5, pp. 195–200. Available at: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1953.3.5.195> (accessed 14 July 2023).
40. *Report on Anchorage area soil studies, Alaska to U. S. Army Engineer District, Anchorage, Alaska*. Seattle, Wash., Shannon and Wilson Publ., 1964. 28 p.
41. Holtz R.D., Kovacs W.D. *Introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall Publ., 1981. 733 p. Available at: <https://dokumen.tips/reader/f/holtz-r-d-kovacs-w-d-an-introduction-to-geotechnical-engineering> (accessed: 14 July 2023).
42. Bowles J. *Foundation analysis and design*. New York, McGraw Hill Publ., 1996. 310 p.
43. *State Standard 34276-2017. Soils. Methods of laboratory determination of the specific resistance of penetration*. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 46 p. (In Russ.) Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293787/4293787736.pdf>) (accessed: 14 July 2023)
44. Amaryan L.S. *Strength and deformation of peat soils*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 220 p. (In Russ.)
45. Evgenev I.E., Kazarnovsky V.D. *Roadbed on weak soils*. Moscow, Transport Publ., 1976. 272 p. (In Russ.)
46. *State Standard 51-3-85. Design of field steel pipelines*. Moscow, Ministry of gas industry Publ., 1985. 37 p. (In Russ.)

Information about the author

Violetta V. Kramarenko, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kramarenko-v-v@mail.ru

Viktor Yu. Molokov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vik3011347@yandex.ru

Received: 05.02.2024

Revised: 21.05.2024

Accepted: 11.11.2024