

УДК 624.131.1

**ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА
НА ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ОСТАШКОВСКОЙ МОРЕНЫ НА ТЕРРИТОРИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА (ВНЕ ЕГО ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА)**

Котюков П.В., Ланге И.Ю., Лебедева Я.А.

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,
e-mail:kotyukov_pv@pers.spmi.ru*

В статье приводятся результаты анализа состава и показателей физико-механических свойств глинистых отложений осташковской морены, которые широко распространены в пределах Санкт-Петербурга и рассматриваются в качестве потенциального основания для фундаментов строящихся зданий и сооружений. Исследования проводились на объектах, расположенных в Приморском, Выборгском и Московском районах города на не освоенных ранее участках территории с низкой степенью загрязнения подземного пространства, что позволило свести к минимуму влияние фактора контаминации на возможность негативного преобразования состава и свойств грунтов. Изученные образцы морены отобраны в широком интервале глубин (от 3 до 43 м) и представлены песчанистыми и пылеватыми разностями супесей и суглинков от твердой до текучепластичной консистенции. По результатам обработки материалов изысканий отмечены некоторые особенности их минерального и гранулометрического состава, связанные с условиями их образования. Установлено, что показатели физико-механических свойств данных грунтов слабо зависят от глубины их залегания и определяются, главным образом, суммарным содержанием в них наиболее активных глинистых частиц (размером менее 0,002 мм) и фракции тонкой пыли (0,002–0,01 мм). Особое внимание обращено на параметры механических свойств, которые характеризуют прочность и деформационную способность осташковской морены. На основе выполненного корреляционного анализа сделан вывод о том, что величина сопротивления сдвигу и модуль общей деформации практически не связаны с консистенцией грунтов, а зависят, прежде всего, от специфики их гранулометрического состава, плотности сложения и числа пластичности. С учетом этого предложена типизация глинистых разностей морены по общему содержанию частиц размером менее 0,01 мм. Для каждого выделенного типа грунта приведены средние значения основных показателей физико-механических свойств. Даны рекомендации по использованию полученных корреляционных зависимостей при обработке результатов инженерно-геологических изысканий, выполняемых на рассматриваемой территории.

Ключевые слова: ледниковые отложения, осташковская морена, гранулометрический состав, физические свойства, механические свойства, корреляция, закономерности

**EFFECT OF PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION ON PHYSICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES OF OSTASHKOVO MORaine
AT THE TERRITORY OF SAINT PETERSBURG
(OUTSIDE ITS HISTORICAL CENTER)**

Kotiukov P.V., Lange Yu.I., Lebedeva Ya.A.

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, e-mail:kotyukov_pv@pers.spmi.ru

The article presents the results of the analysis of composition and physical and mechanical properties of the Ostashkovo clay moraine, which are widespread within the territory of St. Petersburg and are considered as a potential basis for the foundations of buildings and structures under construction. Studies were carried out at the Primorsky, Vyborgsky and Moscovsky districts in previously unexplored areas with a low degree of underground space contamination that made it possible to minimize its influence on soils. Studied specimens are collected in a wide interval of depths (from 3 to 43 m) and are represented by silt, silty clay and lean clay with consistency from very soft to very stiff. Some features of their mineral and particle-size distribution associated with conditions of their formation are noted. It was established that physical and mechanical properties of soils are slightly dependent on their depth and are determined mainly by the total content of the most active particles of clay (< 0.002 mm) and silt (0.002–0.01 mm). Special attention is paid to their strength and deformability. It was concluded that shear strength and total strain modulus are practically not related to the consistency of soils, but depend on their grain-size distribution, density and plasticity. Based on a total content of particles < 0.01 mm, the classification of clayey moraine is proposed and, for each soil type, the average values of their properties are given. Recommendations on the use of correlation diagrams in processing of engineering-geological surveys performed at the territory are provided.

Keywords: glacial deposits, Ostashkovo moraine, particle-size distribution, physical properties, mechanical properties, correlation, relationships

Отложения осташковской морены, распространенные на территории Санкт-Петербурга, широко используются в качестве основания для фундаментов различных зданий и сооружений. Почти повсеместно они залегают на небольших глубинах под

маломощным покровом послеледниковых образований, обладают относительно высокой плотностью естественного сложения и достаточной несущей способностью, что делает их пригодными для устройства наиболее экономичных фундаментов из пред-

варительно изготавливаемых свай стандартной длины. Вместе с тем строение толщи морены весьма неоднородно, она может быть сложена глинистыми грунтами различной консистенции (от твердой до текучепластичной), в ней часто встречаются линзы и прослои более слабых грунтов, водонасыщенные пески, к которым приурочены напорные воды, труднопроходимые скопления валунов и гальки, а также останцы и отторженцы коренных пород. Все это определяет значительную изменчивость их показателей физико-механических свойств и обуславливает возможность развития длительных неравномерных осадок зданий и сооружений. В качестве альтернативы морене обычно рассматриваются плотные глинистые породы верхнего венда и нижнего кембрия, обладающие более высокой прочностью и низкой деформационной способностью, параметры которых зависят, главным образом, от степени их трещиноватости [1]. Однако они залегают на гораздо больших глубинах и требуют устройства дорогостоящих фундаментов из буронабивных свай, что не всегда оправдано с экономической точки зрения, поэтому при строительстве на участках с относительно благоприятными инженерно-геологическими условиями основанием для зданий и сооружений чаще всего служат отложения осташковской морены.

Значительное влияние на показатели физико-механических свойств отложений осташковской морены оказывают их минеральный и гранулометрический состав, строение микроагрегатов частиц, природа и сила структурных связей, состав обменных катионов, а также наличие в грунтах газовой фазы, микробиотический фактор и др. [2, 3, 4] К сожалению, только малая часть из этих особенностей может быть установлена при обработке материалов инженерно-геологических изысканий, выполняемых согласно стандартным (обычно минимальным) требованиям нормативных документов, которые прямо не регламентируют необходимость проведения ряда специальных исследований, позволяющих получить более полное представление о компонентном составе, внутренней структуре и степени микробной пораженности отложений. Это обстоятельство затрудняет выявление взаимосвязей между составом и показателями физико-механических свойств грунтов и может являться причиной их кажущегося незакономерного изменения по площади и глубине изучаемого разреза. Вместе с тем

для однотипных в генетическом отношении отложений, распространенных на небольших участках территории с низким уровнем техногенного загрязнения, количество факторов, оказывающих влияние на их показатели свойств, сводится к минимуму. Варьирование их параметров обусловлено, главным образом, изменениями в гранулометрическом составе, физическом состоянии, степени уплотнения и увлажнения, которые можно проследить по данным стандартных изысканий.

Наибольшую ценность при анализе представляет поиск корреляционных зависимостей для показателей механических свойств, поскольку именно они используются в расчетах несущей способности и деформаций грунтовых оснований. В силу того что определение данных параметров относится к самым дорогостоящим видам испытаний, их количество обычно значительно уступает количеству определений гранулометрического состава и показателей физических свойств грунтов. Нередко приходится назначать расчетные параметры механических свойств для несущего слоя всего по 6 испытанным образцам, тогда как для того же слоя, как правило, имеется около 10–15 физических характеристик. Поэтому выявленные взаимосвязи между составом, показателями физических и механических свойств могут быть использованы в тех случаях, когда последних недостаточно либо достоверность их определения вызывает сомнения.

Целью данного исследования является комплексный анализ состава и показателей физико-механических свойств глинистых отложений осташковской морены, распространенных в районе Санкт-Петербурга (вне его исторического центра) и используемых в качестве основания зданий и сооружений, для установления закономерностей их изменения по глубине и площади рассматриваемой территории, а также выявления значимых взаимосвязей между содержанием основных фракций и отдельными параметрами свойств грунтов.

Материалы и методы исследования

Основным фактическим материалом послужили результаты изысканий, выполненные в пределах Приморского, Выборгского и Московского районов города на практически не освоенных ранее участках территории с низкой степенью контаминации компонентов подземного пространства. В ходе исследований материалы изысканий были обобщены, систематизированы и подвер-

лись существенной переработке, в том числе в ряде случаев был произведен пересчет параметров по первичным протоколам испытаний. На этой основе была составлена база данных из более чем 400 образцов осташковской морены, отобранных в широком диапазоне глубин (от 3 до 43 м от поверхности) и представленных различными разновидностями глинистых грунтов. Для каждого выделенного типа грунта выявлялись определенные закономерности изменения их показателей по глубине и площади рассматриваемой территории, а также при помощи корреляционного анализа выполнялся поиск взаимосвязей между их составом и параметрами физических и механических свойств.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенности состава, строения и показатели физико-механических свойств отложений осташковской морены связаны с условиями их образования, а также характером и длительностью постгенетических процессов в послеледниковое время, которые проявлялись преимущественно в виде гипергенеза и затронули только самую верхнюю часть разреза (не более 5–10 м от поверхности) [3, 5, 6]. Влияние гипергенеза рассматривается как положительный фактор, приводящий к формированию в грунтах цементационных связей за счет соединений трехвалентного железа, росту их прочности и снижению деформационной способности. Кроме того, определенное воздействие на отложения осташковской морены оказало длительное хозяйственное освоение территории, начавшееся еще в допетербургский период и сопровождавшееся интенсивной контаминацией его подземного пространства на большую глубину. Данный фактор имеет решающее значение для исторического центра города, и его влияние на свойства грунтов подробно разбирается в ряде статей проф. Р.Э. Дашко [2]. Как отмечалось ранее, образцы морены были отобраны на участках с относительно низким уровнем техногенного загрязнения, что позволило свести к минимуму фактор контаминации и не учитывать его при анализе.

По своему генезису осташковская морена относится к типу основных, или донных, морен, формирование которых происходит в результате медленного вытаивания обломочного материала из ледника с образованием насыщенного водой осадка из смеси частиц различного размера без его значи-

тельного уплотнения гравитационными силами [6]. Возраст осташковской морены (12–23 тыс. лет) недостаточен для завершения процессов литогенеза, приводящих к уплотнению глинистых пород. Несмотря на это, морена имеет высокую плотность естественного сложения, сопоставимую с плотностью залегающих ниже по разрезу высоколитифицированных глин верхнего венда и нижнего кембрия (с возрастом 650–530 млн лет). Этот факт объясняется особенностями гранулометрического состава морены, который близок к составу оптимальных смесей, используемых в строительстве, и подтверждается наблюдениями за процессами быстрого самоуплотнения данных отложений до практически первоначальных значений после их отсыпки в воду при строительстве дамб.

Переходя к анализу гранулометрического состава осташковской морены, необходимо отметить, что изученные образцы представлены различными типами глинистых грунтов, среди которых преобладают супеси пылеватые и песчанистые, а также суглинки легкие и тяжелые пылеватые (по числу пластичности), с весьма значительным варьированием содержания пылевой фракции (от 20 до 80 % и более) и с включениями более крупных частиц вплоть до валунов (рис. 1). Повышенное содержание пылевой фракции (0,002–0,05 мм) в отдельных разностях морены обуславливает их низкую водоустойчивость, размокаемость и склонность к морозному пучению.

Особое внимание обращает на себя некоторое несоответствие количества глинистых частиц (размером менее 0,002 мм), по которым дается наименование грунтов согласно классификации В.В. Охотина, и числа пластичности, служащего основным классификационным признаком по ГОСТ 25100, в сторону занижения величины последнего (рис. 2). Это связано с тем, что фракция размером менее 0,002 мм представлена в морене преимущественно перетолженными низкоактивными глинистыми минералами, относящимися к группе гидрослюдов, которые из-за малоподвижной кристаллической решетки обладают низкой гидрофильностью, пластичностью и слабовыраженной способностью к набуханию [7]. На это указывают и значения показателя коллоидной активности (по А. Скемптону), которые изменяются в интервале от 0,15 до 0,74 и лишь по отдельным пробам превышают величину в 0,75, по которой проводится граница между низко- и среднеактивными глинистыми грунтами.

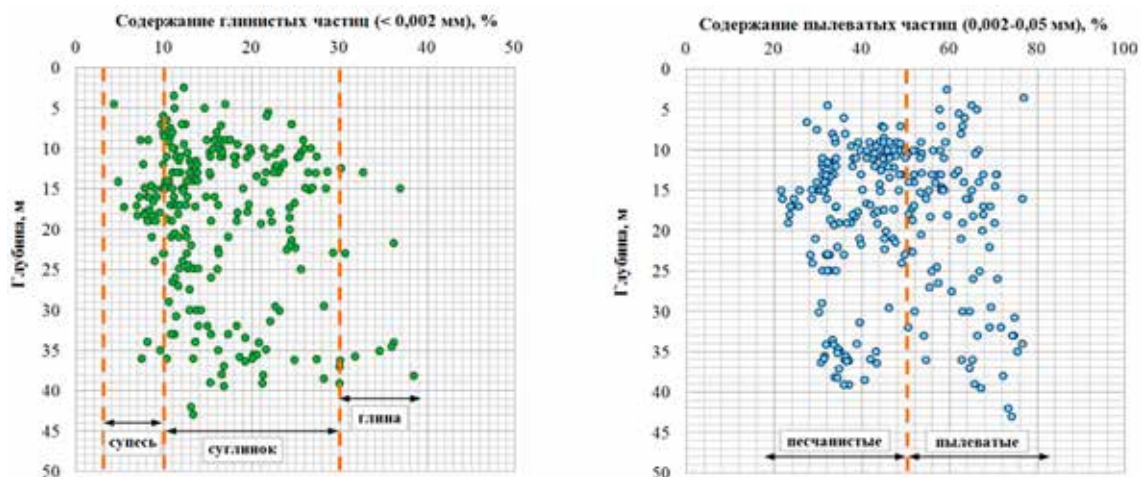


Рис. 1. Содержание глинистых и пылеватых частиц в составе осташковской морены в зависимости от глубины

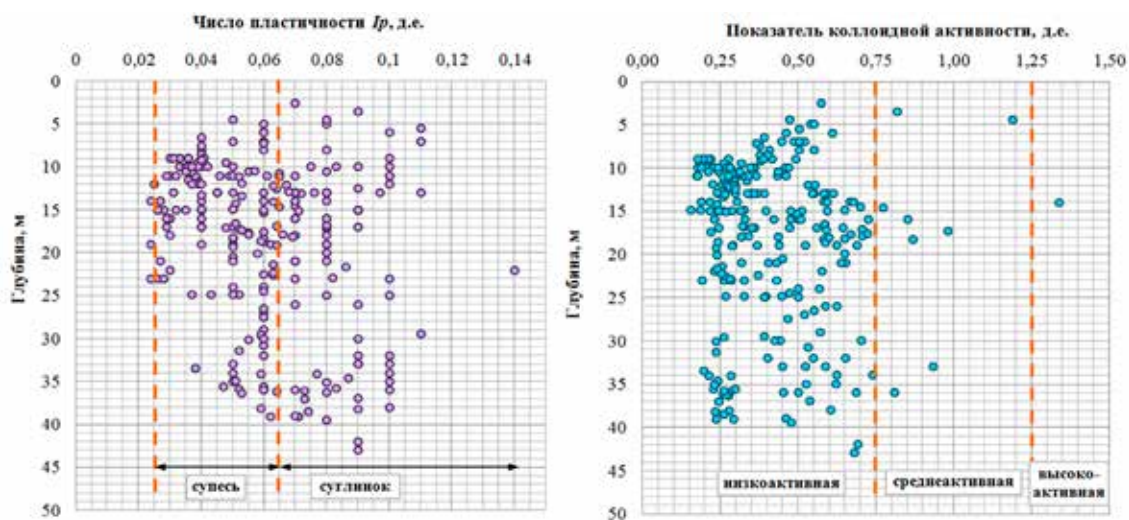


Рис. 2. Характер изменения числа пластичности и показателя коллоидной активности образцов осташковской морены по глубине

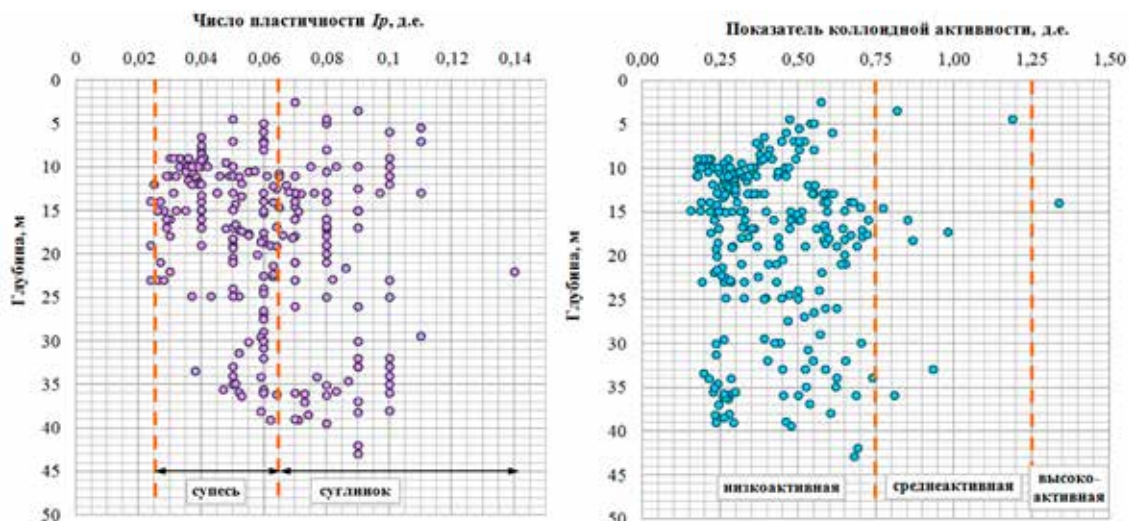


Рис. 3. Изменение влажности и плотности осташковской морены с глубиной

Состав и параметры свойств морены закономерно варьируют по площади и глубине, вследствие чего даже на отметках 40 м от поверхности, где согласно традиционным представлениям должны находиться наиболее плотные разности морены, нередко обнаруживаются грунты, имеющие плотность чуть выше 2 г/см^3 и влажность около 22–25%, в то время как на глубинах 5–10 м и менее величина плотности морены может достигать $2,28 \text{ г/см}^3$ при влажности всего 11–13% (рис. 3). Полученные данные опровергают мнение о том, что плотность морены с глубиной возрастает. Этого не наблюдается ни по отдельным разрезам, ни по всей территории в целом и может быть объяснено тем, что в течение послеледникового времени осташковская морена не испытывала значительного давления от веса вышележащих образований в силу их малой мощности.

Корреляционный анализ показал, что главное влияние на параметры физических свойств осташковской морены оказывает суммарное содержание в ней двух наиболее активных фракций – глинистой (менее $0,002 \text{ мм}$) и тонкой пыли ($0,002\text{--}0,01 \text{ мм}$). Еще опытами В.В. Охотина было доказано, что у этих групп частиц есть общее свойство – способность коагулировать и образовывать восстанавливаемые структурные связи, сравнимые по величине с силами гравитации. Кроме того, в составе фракции тонкой пыли, вероятно, могут присутствовать устойчивые микроагрегаты глинистых минералов, которые не разрушаются при подготовке пробы и при этом частично сохраняют

свою активность, а также проявляют умеренные гидрофильные и пластические свойства при взаимодействии с водой [8–10]. Косвенным подтверждением этому может служить тот факт, что связь между суммарным количеством частиц менее $0,01 \text{ мм}$, величиной влажности и числом пластичности гораздо сильнее, чем связь между указанными параметрами физических свойств и содержанием только глинистых частиц в исследованных образцах (рис. 4).

Общее количество частиц менее $0,01 \text{ мм}$ хорошо коррелирует со значениями влажности и плотности осташковской морены (рис. 5). По всей видимости, увеличение степени дисперсности грунтов приводит к росту количества связей за счет сил межмолекулярного взаимодействия между частицами глинистых минералов, их микроагрегатами и активной частью фракции тонкой пыли, которые стремятся сохранить структуру грунта в состоянии равновесия и оказывают противодействие силам тяжести. Гравитационному уплотнению также препятствует медленный отток воды, удерживаемой поверхностными силами внутри порового пространства грунта [11].

При учете выявленной взаимосвязи между содержанием частиц менее $0,01 \text{ мм}$ и физическими характеристиками морены становится понятным широкий диапазон изменения их значений по глубине (рис. 6). Наиболее высокую плотность и низкую влажность имеют супеси и суглинки с малым содержанием пыли и, соответственно, большим количеством песчаных и крупноблочных частиц.

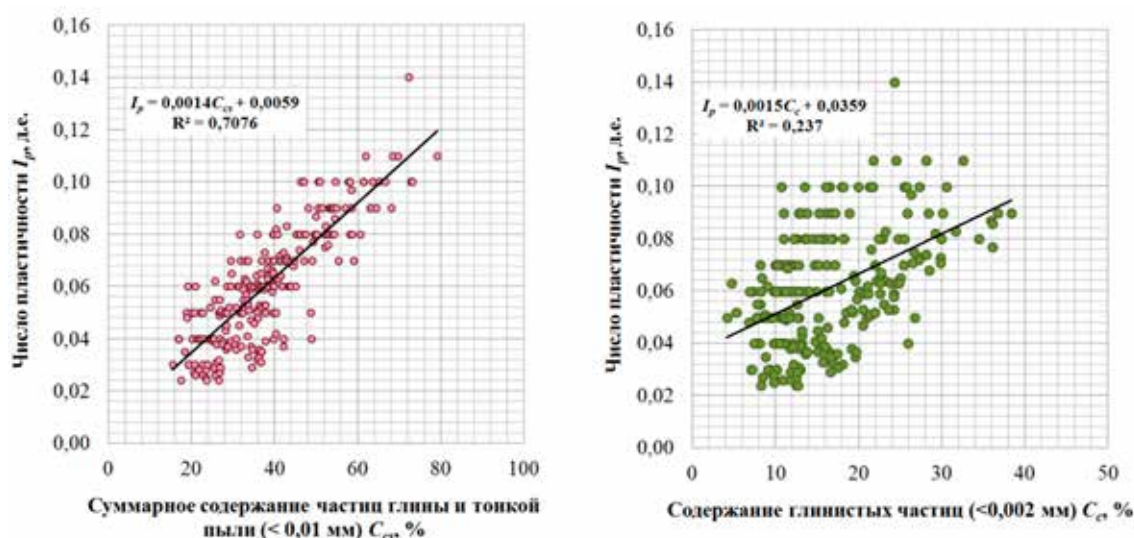


Рис. 4. Связь между числом пластичности и содержанием различных групп частиц в составе осташковской морены

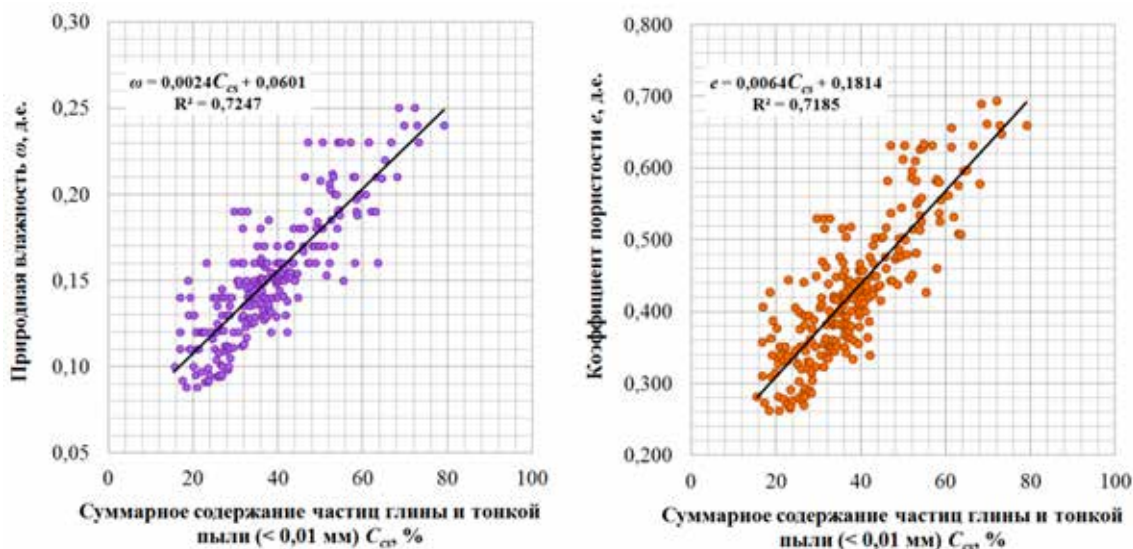


Рис. 5. Связь между влажностью, коэффициентом пористости и содержанием частиц размером менее 0,01 мм в составе осташковской морены

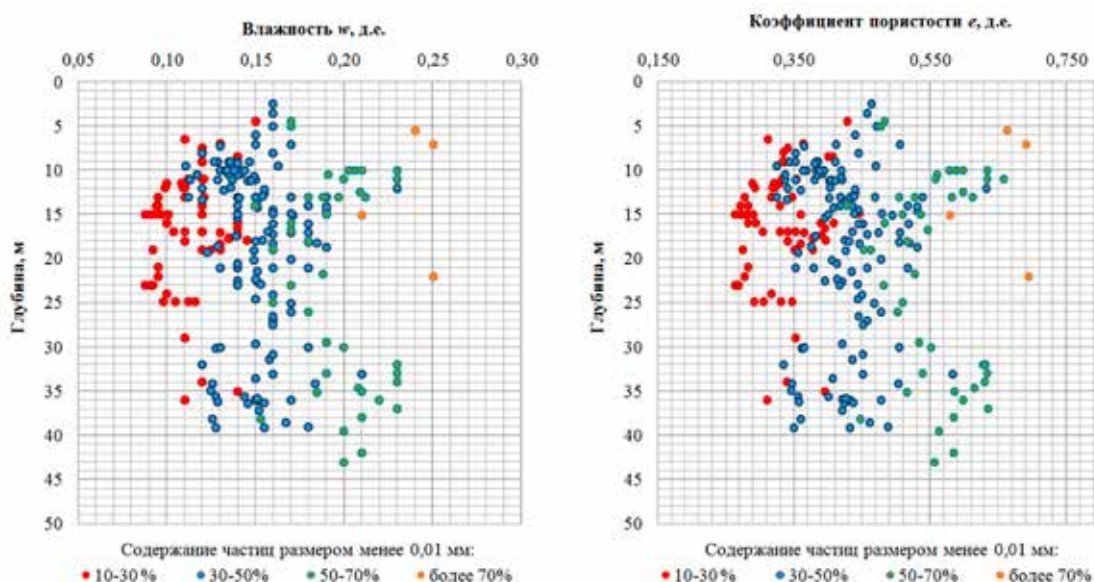


Рис. 6. Диаграмма изменения величины влажности и коэффициента пористости осташковской морены по глубине с разделением на группы по содержанию частиц $<0,01$ мм

Следует отметить, что одним из наиболее важных параметров физических свойств глинистых грунтов принято считать показатель текучести. Он широко применяется не только для оценки их консистенции, но и для назначения ряда коэффициентов при расчетах оснований и фундаментов, поскольку предполагается, что он косвенно характеризует прочность и деформационную способность грунтов. Выполненные исследования показали, что для осташковской морены связь между показателем текучести,

параметрами сопротивления сдвигу и величиной модуля деформации практически отсутствует. Например, глинистые отложения с твердой консистенцией имеют сцепление от 0,01 до 0,03 МПа, что характерно для слабых грунтов с молекулярным типом связей. Вместе с тем у ряда полутвердых и тугопластичных разностей величина сцепления достигает 0,08–0,09 МПа, что, по всей видимости, обусловлено наличием в них цементационных связей за счет соединений трехвалентного железа, образо-

вавшихся на этапе гипергенеза этих отложений. Значения модуля деформации также не зависят от консистенции и варьируют в широких пределах – от 4 до 16 МПа. Несответствие между показателем консистенции и параметрами механических свойств можно объяснить некоторой условностью данного показателя, не отражающего реальное физическое состояние морены, а также недостатками методики его определения – границы текучести и раскатки получают на образцах нарушенного сложения.

По результатам исследований установлено, что наиболее тесно с параметрами механических свойств морены связаны следующие характеристики ее физического состояния: содержание частиц размером менее 0,01 мм, коэффициент пористости (плотность) и число пластичности (рис. 7, таблица). Существенное влияние на получаемые значения параметров механических свойств грунтов оказывают методика их определения, применяемое оборудование и конкретные условия отдельно взятого испытания [12]. Эти факторы трудно ис-

ключить при обработке большого объема данных, что может являться одной из причин широкого разброса показателей, использованных для построения диаграмм. Необходимо отметить, что наиболее прочными являются супеси легкие песчанистые, в которых содержание частиц менее 0,01 мм не превышает 30%. Такие грунты могут обладать достаточно высокой несущей способностью. Вместе с тем обращают на себя внимание низкие значения модуля общей деформации даже для самых плотных разновидностей морены, что можно объяснить пластическим характером их деформирования и отсутствием жестких структурных связей. Кроме того, в таблице приведены значения модуля деформации, полученные по результатам компрессионных испытаний, условия которых, как известно, не соответствуют реальным условиям деформирования грунта в основании зданий и сооружений. Более достоверные показатели механических свойств осташковской морены могут быть получены с помощью трехосных или штамповых испытаний [13].

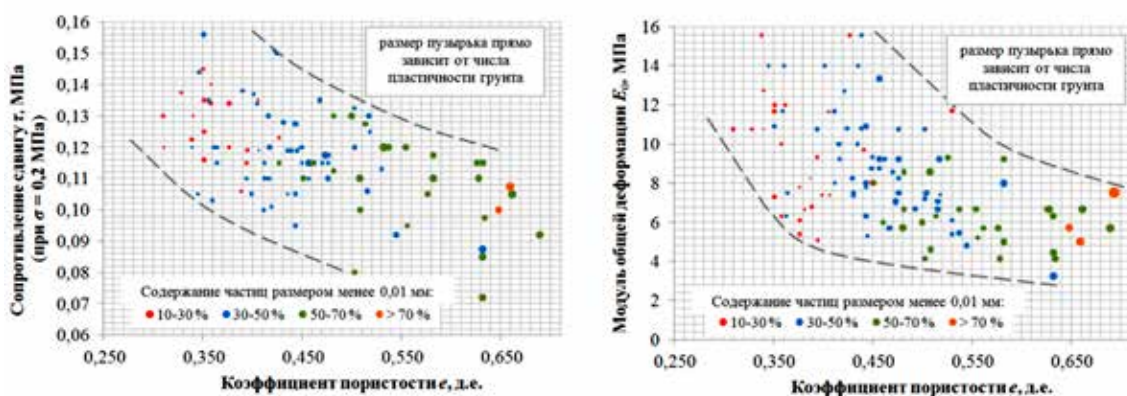


Рис. 7. Показатели механических свойств осташковской морены в зависимости от особенностей гранулометрического состава и параметров физических свойств

Средние значения показателей физико-механических свойств отложений осташковской морены различных гранулометрических типов

Преобладающая разновидность грунта	Кол-во частиц <0,01 мм, %	W, %	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	e, д.е.	I_p , д.е.	I_L , д.е.	τ^* , МПа	E_0^{**} , МПа
Супесь легкая песчанистая	10–30	11,7	2,24	2,68	0,338	0,04	0,09	0,170	9,6
Супесь тяжелая пылеватая	30–50	15,1	2,18	2,69	0,426	0,06	0,33	0,163	9,0
Суглинок легкий пылеватый	50–70	19,9	2,09	2,71	0,559	0,09	0,23	0,151	6,3
Суглинок легкий пылеватый	>70	24	2,03	2,72	0,665	0,11	0,32	0,148	н/д

Примечание: * – определено при $\sigma=0,3$ МПа; ** – рассчитано для интервала нагрузок от 0,1 до 0,3 МПа по данным компрессионных испытаний без поправочного коэффициента m_k .

Выводы

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1) гранулометрический состав и показатели физико-механических свойств глинистых отложений осташковской морены закономерно изменяются по площади рассматриваемой территории и слабо зависят от глубины их залегания в разрезе четвертичной толщи;

2) наибольшее влияние на показатели физических свойств оказывает гранулометрический состав грунтов, прежде всего суммарное содержание в них двух наиболее активных фракций – глинистой и тонкой пыли (частицы размером менее 0,01 мм);

3) показатель текучести морены не связан ни с ее гранулометрическим составом, ни с другими физическими характеристиками и не может использоваться для корреляции с параметрами ее механических свойств;

4) параметры сопротивления сдвигу и величина модуля деформации осташковской морены в наибольшей степени зависят от особенностей их состава, степени уплотнения (коэффициента пористости) и числа пластичности.

Следует добавить, что установленные корреляционные зависимости для осташковской морены должны проверяться и уточняться с помощью экспериментальных исследований и с применением стабилометрических испытаний, которые позволяют получать наиболее достоверные показатели механических свойств глинистых грунтов.

Список литературы

1. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol 254. P. 180-190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.

2. Дашко Р.Э., Горская В.А. Инженерно-геологические и экологические аспекты преобразования моренных грунтов

в подземной среде Санкт-Петербурга для оценки их несущей способности // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 12-1 (54). С. 56-60. DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.224.

3. Benn D., Evans D. *Glaciers and Glaciation*. London: Arnold, a member of the Hodder Headline Group, 2002. 734 p.

4. Clarke B. The engineering properties of glacial tills. *Geotechnical Research*. 2018. Vol. 5. №4. P. 262-277. DOI: 10.1680/jgere.18.00020.

5. Evans D.J.A., Phillips E.R., Hiemstra J.F., Auton C.A. Subglacial till: Formation, sedimentary characteristics and classification. *Earth-Science Reviews*. 2006. Vol. 78. № 1. P. 115-176. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.04.001.

6. Lekstutytė I., Gadeikisa S., Žaržojusa G., Skuodisb Š. Engineering geological and geotechnical properties of till soil of the Middle Pleistocene glacial period. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 68. № 2. P. 101-111. DOI:10.3176/earth.2019.09.

7. Болгарова Д.А. Инженерно-геологическая оценка осташковской морены как несущего горизонта в пределах исторического центра Санкт-Петербурга // *Философия науки*. Научные обзоры, подготовленные в рамках международной научно-образовательной программы. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского горного университета, 2022. С. 104-114.

8. Sokolov V.N., Razgulina O.V., Yurkovets D.I., Chernov M.S. Quantitative analysis of pore space of moraine clay soils by SEM images. *Journal of Surface Investigation*. 2007. Vol. 1. № 4. P. 417-422. DOI: 10.1134/S1027451007040106.

9. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Чернов М.С., Разгулина О.В., Юрковец Д.И. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп – рентгеновский компьютерный микротомограф (РЭМ – РКТ) // *Геоэкология*. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 5. С. 450-456.

10. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Кошелев А.Г. Геоэкология. Влияние особенностей микростроения глинистых грунтов различного генезиса на их деформирование при компрессионных и штамповых испытаниях // *Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2013. № 6. С. 552-559.

11. Lebourg T., Riss J., Pirard E. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis. *Engineering Geology*. 2004. Vol. 73. № 1-2. P. 37-50. DOI: 10.1016/j.enggeo.2003.11.004.

12. Tamošiūnas, T., Skuodis, Š., Žaržojus, G. Overview of the Quaternary sediments deformation modulus dependence on testing methodology. *Baltica*. 2020. Vol. 33. № 2. P. 191-199. DOI: 10.5200/baltica.2020.2.6.

13. Gribulis D., Dundulis K., Gadeikis S., Gadeikiene S. Undrained shear strength of glacial till soils and its determining factors. *Baltica*. 2021. Vol. 34. № 2. P. 246-252. DOI: 10.5200/baltica.2021.2.8.