

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-123-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-123-140)  
УДК 624.138.232.1

EDN: KKRNEO

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ РАСТВОРАМИ НА ОСНОВЕ АКРИЛАТОВ, СИЛОКСАНОВ И ЦЕМЕНТОВ

А.И. МИСЮК<sup>1,✉</sup>А.В. ШАПОШНИКОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наукД.В. АНТОНЕНКО<sup>1,2</sup>О.А. ШУЛЯТЬЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наукВ.В. ОРЕХОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наукК.П. ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Научно-исследовательский, проектно-исследовательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

## Аннотация

**Введение.** Усиление оснований фундаментов методом цементации изучено достаточно хорошо. Развитие технологий и промышленности приводит к производству полимерных материалов (акрилат) и кремний-органических материалов (силоксан), свойства которых позволяют их использовать в строительстве в качестве гидроизоляционных материалов. Способность этих материалов к гелеобразованию и к связыванию частиц делает их интересными для применения с целью улучшения свойств грунтов, в том числе с органическими включениями. Применение для закрепления грунтов с органическими включениями как цементных растворов, так и химических (акрилат, силоксан) в действующей нормативной документации никак не регламентировано.

**Цель.** Изучить возможность закрепления грунтов с органическими включениями растворами на основе цемента, акрилатов и силоксанов.

**Материалы и методы.** В качестве грунтов с органическими включениями в лабораторных исследованиях использовались смеси песка разной крупности с торфом. В качестве крепителей применялись цементные растворы типов И, ИТДВ, ИОТДВ (различаются по степени помола), акрилат, силоксан.

**Результаты.** По результатам исследований для закрепления цементными растворами определены значения прочности в зависимости от количества органических включений, для закрепления акрилатными растворами выявлено отсутствие закрепления грунтов с органикой. При закреплении песков без органики акрилаты связывают частицы грунта, но не придают прочности образцам. Исходный силоксан, используемый в данных работах, не пригоден в качестве крепителя для грунтов.

**Выводы.** При дальнейших исследованиях следует определить области применения и ограничения в применении цементных растворов для закрепления грунтов с органикой, определить влияние акрилатных растворов на грунты и возможность применения их для противодиффузионных мероприятий и мероприятий против разжижения грунтов в сейсмически активных районах. Все выводы, сделанные по результатам лабораторных работ, следует подтвердить в полевых условиях и при численном моделировании.

**Ключевые слова:** закрепление грунтов, химическое закрепление грунтов, цементный раствор, раствор микроцемента, акрилат, силоксан, органическое вещество, грунты с включением органического вещества, прочность образца грунта

**Для цитирования:** Мисюк А.И., Шапошников А.В., Антоненко Д.В., Шулятьев О.А., Орехов В.В., Пятикрестовский К.П. Лабораторные исследования закрепления грунтов с органическими включениями растворами на основе акрилатов, силоксанов и цементов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;43(4):123–140. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-123-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-123-140)

#### **Вклад авторов**

Мисюк А. И. – корректировка программы, проведение экспериментальных работ, анализ и оформление результатов.

Шапошников А. В. – общее руководство работой, корректировка методики проведения работ и программы исследований, анализ результатов, разработка рекомендаций.

Антоненко Д. В. – составление программы исследований.

Шулятьев О. А. – общее руководство работой, корректировка методик, контроль выполнения, анализ результатов и рекомендаций.

Орехов В. В. – обзор зарубежной и отечественной практики, составление программы.

Пятикрестовский К. П. – обзор зарубежной и отечественной практики, анализ результатов.

#### **Финансирование**

Финансирование НИОКР по внутреннему соглашению № 15 от АО «НИЦ «Строительство».

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 11.11.2024*

*Поступила после рецензирования 02.12.2024*

*Принята к публикации 05.12.2024*

## **LABORATORY TESTING STABILIZATION OF SOILS WITH ORGANIC CONSTITUENTS USING ACRYLATE, SILOXANE, AND CEMENT MORTARS**

A.I. MISYUK<sup>1,✉</sup>

A.V. SHAPOSHNIKOV<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. ANTONENKO<sup>1,2</sup>

O.A. SHULYATYEV<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engineering)

V.V. OREKHOV<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engineering)

K.P. PYATIKRESTOVSKY<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engineering)

<sup>1</sup>*Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

<sup>2</sup>*JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation*

#### **Abstract**

*Introduction.* Cement strengthening of the foundations has been studied fairly well. The advancements in technology and industry leads to the production of polymer materials (acrylate) and siloxane materials, the properties of which make them suitable for use in construction as waterproofing agents. Due to their gelation capability and ability to bind particles, these materials obtain high potential for applications aimed

at enhancing soil properties, including those with organic constituents. However, the use of both cement mortars and chemical agents (acrylate, siloxane) for the stabilization of soils with organic constituents currently remains unregulated in existing normative documentation.

*Aim.* To investigate the potential for stabilization of soils with organic constituents using solutions based on cement, acrylates, and siloxanes.

*Materials and methods.* Laboratory studies utilized mixtures of peat and sands of varying granularity as the soil containing organic constituents. Cement mortars of types I, ITDV, IOTDV according to Russian State Standard R 59704-2021 (distinguished by their degree of fineness), as well as acrylate and siloxane were employed as the binding agents.

*Results.* The study determined specific strength values for cement strengthening in relation to the number of organic constituents. Stabilization using acrylate solutions revealed no binding effect on organic soils. In the case of sands devoid of organic content, acrylates were capable of binding soil particles; however, they failed to confer strength to the samples. Furthermore, the siloxane used in this study was found to be unsuitable as a binding agent for soils.

*Conclusions.* Future studies shall define the application and limitations of cement mortars for stabilizing soils containing organic constituents, as well as assess the impact of acrylic solutions on soil and their applicability for anti-permeability measures and soil liquefaction mitigation in seismically active regions. All conclusions drawn from laboratory investigations shall be validated through field studies and numerical modeling.

**Keywords:** soil stabilization, chemical soil stabilization, cement mortar, micro-cement mortar, acrylate, siloxane, organic matter, soils with organic constituents, sample soil strength

**For citation:** Misyuk A.I., Shaposhnikov A.V., Antonenko D.V., Shulyatyev O.A., Orekhov V.V., Pyatikrestovsky K.P. Laboratory testing stabilization of soils with organic constituents using acrylate, siloxane, and cement mortars. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):123-140. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-123-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-123-140)

#### **Authors contribution statement**

Misyuk A.I. – organization and implementation of the test program, experiments, processing and analysis of the results.

Shaposhnikov A.V. – general management, adjustment of methodology and research design, analysis of the results, recommendations.

Antonenko D.V. – development of the research design.

Shulyatyev O.A. – general management, adjustment of methodology, supervision, analysis of the results and recommendations.

Orekhov V.V. – literature review, development of the research design.

Pyatikrestovsky K.P. – literature review, analysis of the results.

#### **Funding**

Funding for Research and Development was provided under internal agreement No. 15 by JSC Research Center of Construction.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 11.11.2024*

*Revised 02.12.2024*

*Accepted 05.12.2024*

## Введение

Идет активное освоение новых территорий под строительство. Остро стоит вопрос строительства на основаниях из специфических грунтов со включениями органических веществ. Эти грунты из-за таких свойств, как разложение частиц, могут привести к критическим деформациям зданий и сооружений, предшествующим полному разрушению объекта. При этом специфические грунты распространены по всему миру и зачастую невозможно выбрать альтернативную площадку для строительства или произвести замену грунта.

В целях улучшения физико-механических свойств таких грунтов следует рассмотреть возможность их закрепления. В том числе крепителями, свойства которых не регламентированы действующей нормативной документацией.

Для закрепления грунтов в практике современного строительства и в действующих нормативных документах по проектированию и производству работ применяют следующие основные способы закрепления:

- инъекционный;
- виброинъекционный;
- буросмесительный (глубинное перемешивание);
- струйный;
- термический;
- электрохимический.

Кроме этого, закрепление грунтов подразделяют на основании исходных растворов:

- закрепление грунтов химическими растворами;
- закрепление грунтов цементными растворами.

В НИИОСП им. Н. М. Герсеванова проведена поисковая работа по исследованию закрепляемости специфических грунтов с органическими включениями крепителями на цементной основе, акрилатной и раствором силоксана. Работа выполнена при финансировании из научного фонда АО «НИЦ «Строительство».

## Цели и задачи

При планировании работ были поставлены следующие задачи:

- определить возможность применения новых материалов для закрепления специфических грунтов;
- оценить влияние исследуемых крепителей на рассматриваемые грунты для определения области применения этих материалов;
- определить возможность и направление последующих исследований изучения рассмотренных материалов;
- актуализировать действующую техническую и нормативную документацию в части закрепления грунтов и исследования закрепленных грунтов.

В целом в ходе работ необходимо было получить систематизированные экспериментальные данные о возможности применения исследуемых растворов для закрепления грунтов различного типа и состава; получить данные о составах, концентрациях и свойствах исследуемых растворов; получить данные о свойствах исследуемых грунтов, закрепленных рассматриваемыми растворами, в том числе значения прочности.

## Опыт закрепления грунтов с содержанием органического вещества

В отечественной практике имеется опыт закрепления заторфованных грунтов способом однорастворной силикатизации лессовых супесей-суглинков и двухрастворной электросиликатизацией заторфованных грунтов.

В зарубежной практике специфические грунты с органикой тоже закрепляются. Одним из примеров является закрепление илистого грунта в Португалии под зданием кинотеатра. Здание представляет собой гибкую конструкцию, основанием которой служит илистый песок толщиной слоя 10 м. В процессе эксплуатации появилась необходимость усилить существующий свайный фундамент из микросвай. В качестве решения в данном варианте использовалась технология создания элементов закрепленного грунта в грунте методом струйной цементации. Одинарные колонны диаметром 500 мм работали как глубокое основание для передачи вертикальных нагрузок на глины. Каждая колонна несет осевую рабочую нагрузку, равную 400 кН.

Технологии цементации грунтов уже хорошо изучены. А в части закрепления грунтов с органикой требуется уточнить значения прочности, которые можно достичь при закреплении цементными растворами.

В настоящее время с развитием технологий и химической отрасли появились и малоизученные полимерные материалы, которые активно применяются в строительной отрасли. В частности, как замена бурового бентонитового раствора при разработке траншей или для гидроизоляции конструкций, в том числе отсечной.

Также на рынке имеется много примеров составов, которые обеспечивают гелеобразование и способны связывать между собой частицы грунта.

Применение таких материалов пока не регламентировано действующей нормативной документацией РФ и требует дополнительных исследований и разработки методик испытания.

## Нормативная документация

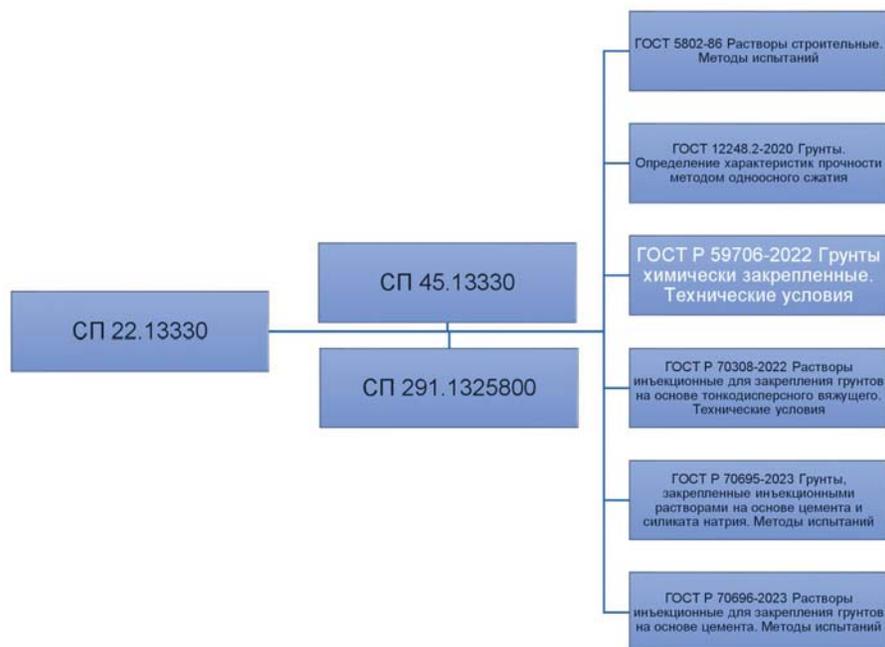
Определение свойств закрепленных грунтов регламентировано ГОСТ Р 59706-2022 [1]. Этот стандарт устанавливает базовые показатели закрепленных грунтов растворами на основе цемента и силиката натрия.

Требования к закреплению грунтов растворами на основе акрилатов и силоксанов в действующей базе стандартов отсутствуют. В СП 22.13330.2016 [2] указывается на обязательные предварительные исследования новых крепителей для оценки возможности их применения в практике строительства.

Действующие стандарты дополняют нормы проектирования и устанавливают общие требования как к исходным компонентам, так и к характеристикам закрепленных грунтов и методам их закрепления. Нормативная документация, регламентирующая требования к закрепленным грунтам, приведена на рис. 1.

Общие требования к лабораторным испытаниям грунтов и растворов, оборудованию и приборам, лабораторным помещениям, способам изготовления образцов для испытаний приведены в ГОСТ 30416-2020 [3], ГОСТ Р 59538-2021 [4], ГОСТ Р 70696-2023 [5], ГОСТ Р 70695-2023 [6], ГОСТ Р 59705-2021 [7], ГОСТ Р 70308-2022 [8], ГОСТ Р 59706-2022 [1].

Исходные компоненты растворов на основе цемента должны соответствовать [4, 8].



**Рис. 1.** Нормативная документация, регламентирующая закрепление грунтов и контроль закрепленных грунтов  
**Fig. 1.** Regulatory documentation for soil stabilization and the monitoring of stabilized soils

В процессе экспериментальных работ было выполнено:

- для моделей исследуемых грунтов: определение плотности ( $\rho$ ) и коэффициента фильтрации (Кф) согласно ГОСТ 25584-2016 [9], ГОСТ 5180-2015 [10];
- для растворов крепителей: плотность, прочность согласно [5];
- для образцов закрепленного грунта цементными растворами: определение плотности и прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии согласно [1, 6].
- для образцов закрепленного грунта химическим (акрилатным) раствором: определение плотности и прочности на одноосное сжатие согласно [1, 6].

## Методика работы

### *Исследуемые грунты. Методика изготовления моделей грунтов*

В качестве специфических грунтов с органическими включениями были исследованы специфические грунты с содержанием органического вещества в количестве 1,5; 4,5 и 8,5%. Грунт, используемый для закрепления, нарушенной структуры. Для проведения экспериментальной части требуемые грунты были изготовлены в лабораторных условиях путем механического смешивания песков с торфом. Вследствие неоднородности получаемой смешиваемой массы были определены интервалы содержания органики в моделях: 1–3%, 4–7%, 7–10%.

В работе рассмотрены модели грунтов, представленные в табл. 1.

Следует отметить, что торфы относятся к наиболее сжимаемым грунтам. Из-за большого содержания в торфах связанной воды осадки оснований, сложенных торфом или содержащих

Таблица 1

**Модели исследуемых грунтов**

Table 1

**Soil models under investigation**

Маркировка модели	Разновидность песка	Содержание органических веществ (торф), %
1.0	мелкий	0
1.1	мелкий	1,5
1.2	мелкий	4,5
1.3	мелкий	8,5
2.0	средней крупности	0
2.1	средней крупности	1,5
2.2	средней крупности	4,5
2.3	средней крупности	8,5
3.0	крупный	0
3.1	крупный	1,5
3.2	крупный	4,5
3.3	крупный	8,5

включения заторфованных грунтов, бывают значительны и затухают очень медленно. Несущая способность торфа и заторфованных грунтов очень мала.

Перед смешиванием производилась предварительная подготовка исходного торфа в виде просеивания через сита с отверстиями диаметром 2,5 мм с целью получить относительно однородный материал для смешивания.

Требуемая масса торфа для получения заданного процентного соотношения определялась расчетным методом с учетом фактической влажности и зольности исходного торфа. Фактическое содержание органического вещества в моделях грунта было проверено и подтверждено в лабораторных условиях.

*Исследуемые растворы. Характеристики и пропорции компонентов*

В качестве крепителей рассматривались следующие растворы: цементные и микроцементные (табл. 2), акрилатный раствор (табл. 3), силоксан (табл. 4).

Таблица 2

**Состав цементных растворов**

Table 2

**Composition of cement mortars**

Вид раствора	Удельная поверхность частиц согласно [4], см <sup>2</sup> /г	В/Ц	Состав раствора на 1 м <sup>3</sup>			Плотность, г/см <sup>3</sup>
			цемент М500, кг	бентонит, кг (1%Ц)	вода, л	
И	3000–5000	0,8	880	8	704	1,6
ИТДВ	5000–8000	1	750	0	750	1,52
ИОТДВ	8000–20000	2	430	0	860	1,29

Таблица 3

**Состав акрилатного раствора**

Table 3

**Composition of acrylic solution**

Вид раствора	Пропорции компонентов				Плотность, г/см <sup>3</sup>
	A1, кг	A2, кг	B (соль), кг	вода, кг	
Акрилат	0,5	0,0125	0,001	0,5	1,15

Таблица 4

**Состав силиконового раствора**

Table 4

**Composition of siloxane solution**

Вид раствора	Пропорции компонентов		Плотность, г/см <sup>3</sup>
	силиоксан, кг	вода, кг	
Раствор силиксана	Применялся неразбавленным		1,15

Маркировка И, ИТДВ, ИОТДВ указывает на градацию цементов по площади удельной поверхности частиц. Растворы типа И изготавливаются на основе цементов общестроительного назначения. ИТДВ и ИОТДВ относятся к растворам «микроцементов» в зависимости от крупности помола. Такое разделение растворов регламентировано [4].

## Проведение работ

При изготовлении образцов закрепленного грунта смешивание производится вручную в механических смесителях с частотой вращения 30–200 об/мин. Далее выполняется заполнение форм размерами 70 × 70 × 70 мм.

После приготовления смеси грунта и раствора образцы укладываются в формы не позднее 5 мин после окончания перемешивания.

Испытания выполнялись в лабораторных условиях. Испытания на затвердевших образцах выполнены в возрасте 14 сут для фиксации нормативных показателей прочности и плотности. На рис. 2 показан образец закрепленного грунта перед испытанием.

Определение плотности закрепленного грунта проводилось на образцах, изготавливаемых для определения прочности.

Все работы по изготовлению образцов и проб растворов выполнялись при температуре в помещении и температуре исходных компонентов 21–25 °С.

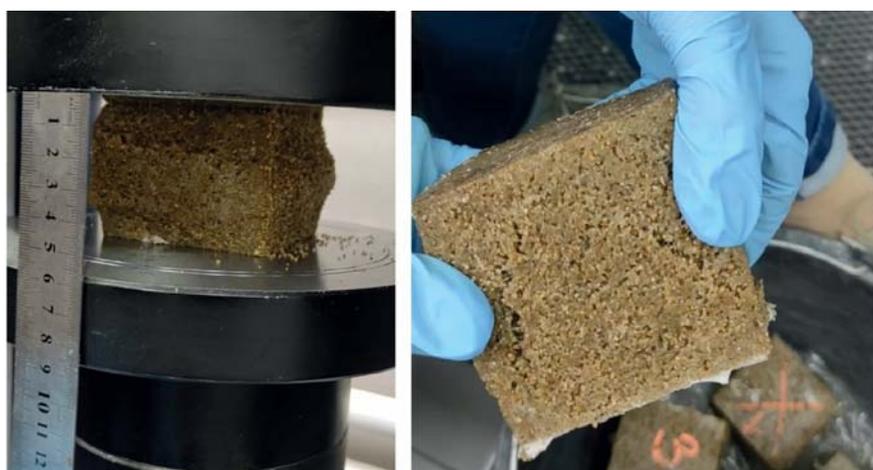
Испытания образцов закрепленного грунта цементными растворами в серии проводили в состоянии полного водонасыщения, при котором образцы насыщают водой и хранят в воде все время перед испытанием.



**Рис. 2.** Образец с составом: раствор типа ИОТДВ + песок средней крупности с добавлением органики 7–10 %  
**Fig. 2.** Sample composition: ИОТДВ-type mortar with medium-grained sand with 7–10% content of organic matter



**Рис. 3.** Испытание образца на сжатие  
**Fig. 3.** Compression testing of the sample



**Рис. 4.** Испытание образца на сжатие: крупный песок, закрепленный акрилатом  
**Fig. 4.** Compression testing of the sample: coarse sand stabilized with acrylate solution

### Испытание образцов на одноосное сжатие

Образец устанавливается на нижнюю плиту пресса центрально относительно его оси так, чтобы основанием служили грани, соприкасавшиеся со стенками формы при его изготовлении. Испытания на сжатие выполнялись на двух видах прессов: ПРГ-1-50 и MATEST S.p.A (модель YIM1500kN, серийный номер YIM1500KN/BA/0057). Процесс испытания на сжатие образцов, закрепленных цементным и акрилатным растворами, показан на рис. 3 и 4 соответственно.

Достигнутое в процессе испытания образца максимальное усилие принималось за величину разрушающей нагрузки.

Рабочая площадь сечения образцов определялась по результатам измерения как среднеарифметическое значение площадей двух противоположных граней.

Предел прочности раствора на сжатие вычисляют как среднее арифметическое значение результатов испытаний всех образцов.

### Результаты работ

Определение свойств закрепленных грунтов регламентировано в [1]. В нем прописаны нормируемые показатели закрепленных грунтов: плотность, прочность, условный радиус закрепления, нормируемые минимальные значения модуля деформации.

В этом же ГОСТ приведены методики определения плотности и прочности образцов, отобранных из закрепленного грунта, деформационных характеристик.

Анализ результатов проводился путем сравнения полученных значений прочности образцов с базовыми нормируемыми показателями по [1].

Таблица 5

#### Базовые нормируемые показатели грунтов, закрепленных растворами на основе цемента

Table 5

#### Basic regulated parameters of soils stabilized with cement-based mortars

Вид крепителя	Коэффициент фильтрации, м/сут	Нормируемые показатели закрепленного грунта		Тип закрепленного грунта согласно [1]
		плотность, г/см <sup>3</sup>	прочность на сжатие, МПа	
Растворы типа ИТДВ, ИОТДВ	0,5-10	1,5-2,3	0,5	Гз-ИП*
	10-20		0,5-1,5	
	20-50		1,5	
	50-80		1,5-2,5	
Раствор типа И	-		≤ 15	Гз-СЦ** (1 компонент)
	-		5-10	Гз-СЦ** (2 компонента)
	-		5-7,5	Гз-СЦ** (3 компонента)
Раствор типа И	-		3-10	Гз-ГП***

\* ГП – закрепление грунта растворами типа И на основе цемента (цементация грунта методом глубинного перемешивания);  
 \*\* ИП – закрепление грунта растворами типа ИТДВ и ИОТДВ на основе цемента (цементация грунта методом инъекции в режиме пропитки);  
 \*\*\* СЦ – закрепление грунта растворами типа И на основе цемента (цементация грунта методом струйной цементации)

Таблица 6

**Базовые нормируемые показатели грунтов, закрепленных растворами на основе акрилата и силоксана**

Table 6

**Basic regulated parameters of soils stabilized with acrylate- and siloxane-based solutions**

Вид крепителя	Коэффициент фильтрации, м/сут	Нормируемые показатели закрепленного грунта		Тип закрепленного грунта согласно [1]
		плотность, г/см <sup>3</sup>	прочность на сжатие, МПа	
Раствор акрилата, раствор силоксана	10–20	1,5–2,1	0,5–1,5	Гз-С/2/1
	20–50		1–2	
	50–80		2–5	
Раствор акрилата, раствор силоксана	1		1–5	Гз-С/1/1
Раствор акрилата, раствор силоксана	0,5–1		0,3–0,5	Гз-С/1/УГ
	1–5		0,5–0,8	
	5–20		0,8–1,0	
Раствор акрилата, раствор силоксана	≥ 0,4	0,5–1	Гз-С/1/2	

С/1/УГ – закрепление грунта раствором силиката натрия (силикатизация однорастворная с применением углекислого газа);  
С/1/1 – закрепление грунта раствором силиката натрия (силикатизация однорастворная однокомпонентная);  
С/1/2 – закрепление грунта раствором силиката натрия (силикатизация однорастворная двухкомпонентная гелеобразующей смесью из раствора силиката натрия и алюмината натрия);  
С/2/1 – закрепление грунта раствором силиката натрия и хлористого кальция (силикатизация двухрастворная однокомпонентная)

Для грунтов, закрепленных цементными растворами, анализ проводился в соответствии с базовыми показателями, нормируемыми [1, табл. 2, 3 и 5], которые приведены в табл. 5.

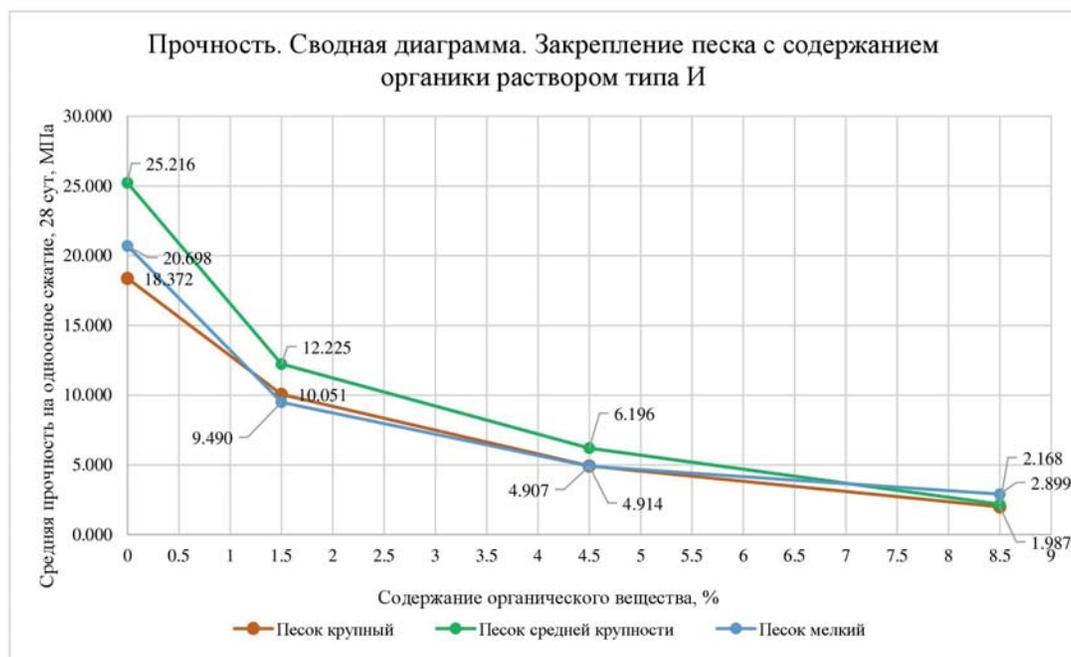
Для грунтов, закрепленных акрилатными и силоксановыми растворами, анализ проводился в соответствии с базовыми показателями, нормируемыми [1, табл. 4], которые приведены в табл. 6.

Далее представлены графики зависимости прочности образцов от количества органических веществ в грунте (рис. 5–8).

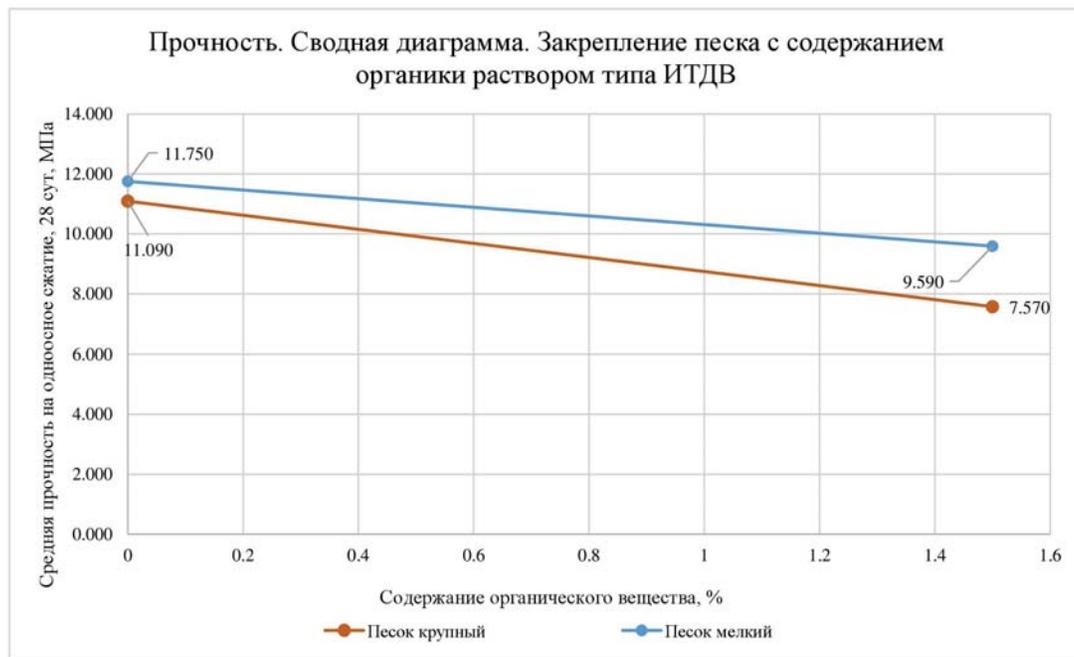
По итогам работ для цементных растворов можем увидеть, как падает прочность образцов с увеличением количества органического вещества в моделях. При включении органических веществ от 4,5 % и более не все образцы достигают нормируемой прочности. Для растворов типа И минимальная прочность – 3 МПа, для растворов микроцементов типов ИТДВ и ИОТДВ минимальная прочность – 0,5 МПа. Плотности всех образцов находятся в пределах допустимых значений.

Для растворов типа ИТДВ был применен микроцемент марки СокСоил. Образцы с добавлением органического вещества свыше 4,5 % и закрепленные этим цементом не перешли в твердое агрегатное состояние, а получили консистенцию глины. Таким образом, следует проверять влияние органосодержащих грунтов на выбранный цемент и возможность закрепления путем физического моделирования закрепления в лабораторных условиях.

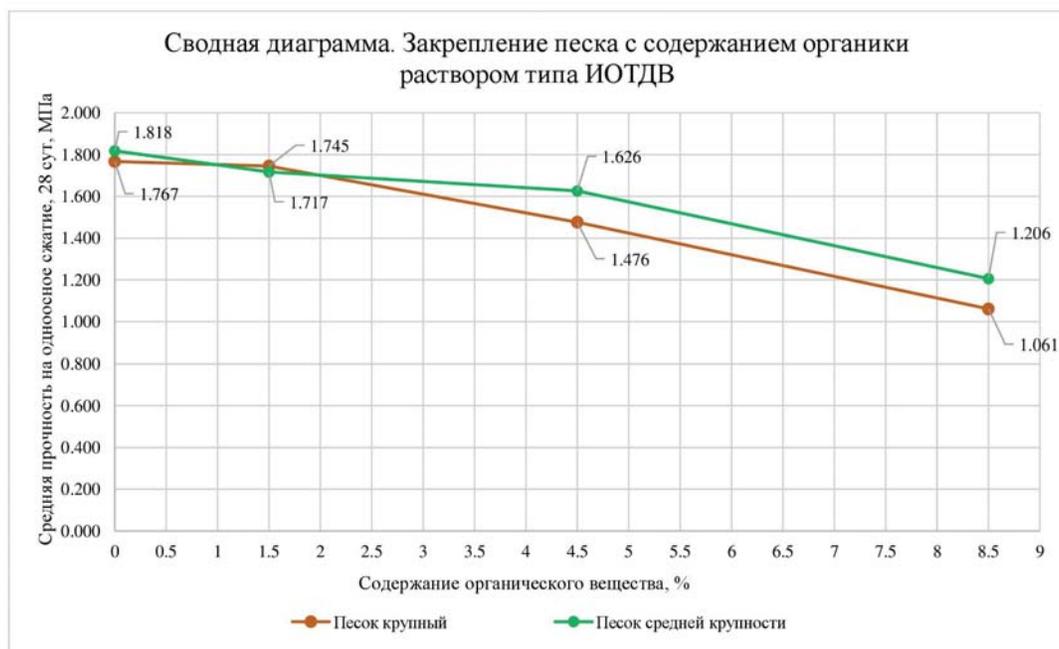
При закреплении грунта без добавления органики акрилатным раствором видно, что образцы не достигают минимальной прочности 0,3 МПа. При этом происходит процесс гелеобразования, образцы сохраняют форму и объем.



**Рис. 5.** Прочность. Закрепление песка с содержанием органики раствором типа И  
**Fig. 5.** Strength. Stabilization of organic sand with Type-I mortar



**Рис. 6.** Прочность. Закрепление песка с содержанием органики раствором типа ИТДВ  
**Fig. 6.** Strength. Stabilization of organic sand with ITDV-type mortar



**Рис. 7.** Прочность. Закрепление песка с содержанием органики раствором типа ИОТДВ  
**Fig. 7.** Strength. Stabilization of organic sand with IOTDV-type mortar



**Рис. 8.** Прочность. Закрепление песков без содержания органических включений раствором на основе акрилата  
**Fig. 8.** Strength. Stabilization of sand without organic constituents with an acrylate-based solution

Таблица 7

**Показатели модулей деформации незакрепленного и закрепленного песка при трехосном сжатии**

Table 7

**Deformation modulus values for unconfined and stabilized sand under triaxial compression**

Максимальный девиатор, кПа	Разрушающая вертикальная нагрузка, кПа	Давление в камере, кПа	Секущий модуль деформации, $E_{50}$ , МПа	Модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении, $E_{ur}$ , МПа
Песок крупный незакрепленный				
296	396	100	24	156
614	814	200	80	258
866	1166	300	107	320
Песок крупный закрепленный				
355	435	100	5	87
456	656	200	5	37
677	977	300	24	194

Таблица 8

**Показатели прочностных характеристик незакрепленного и закрепленного песка при трехосном сжатии**

Table 8

**Strength characteristics of unconfined and stabilized sand under triaxial compression**

Сцепление, $C$ , кПа	Угол внутреннего трения, $\varphi^\circ$	Референсное давление, $p^{ref}$ , кПа	Опорный секущий модуль деформации, $E_{50}^{ref}$ , МПа	Опорный модуль деформации при разгрузке/повторном нагружении, $E_{ur}$ , МПа
Песок крупный незакрепленный				
6	36	100	26	158
Песок крупный закрепленный				
45	27	100	4	63

При добавлении органики более 4,5% образцы не меняют своего агрегатного состояния и не сохраняют форму и объем.

Поскольку образцы не обладают необходимой прочностью, были выполнены испытания в установке трехосного сжатия крупного песка, закрепленного и незакрепленного акрилатом.

По результатам выявлено, что в образцах с закреплением при заданном соотношении «грунт – раствор» уменьшается модуль деформации и угол внутреннего трения, а сцепление увеличивается почти в 8 раз. Результаты испытаний приведены в табл. 7 и 8.

При изучении исходного силоксана выявлено, что процесс гелеобразования не происходит и в качестве крепителя его использовать нельзя.

Были проведены исследования по влиянию этого состава на коэффициент фильтрации (Кф) нескольких моделей грунта. Были испытаны образцы без добавки силоксана и с добавкой.

Таблица 9

**Показатели коэффициентов фильтрации образцов без добавки и с добавкой силоксана**

Table 9

**Permeability coefficient values for samples with and without siloxane**

Модель грунта	Лаб. №	№ опыта	$m_{гр}$	плотность	$K_{\phi}$ , м/сут	образец с добавкой №	плотность	$K_{\phi}$ , м/сут
песок мелкий	3304	1	342,6	1,36	5,35	образец 1	1,46	0,84
						образец 2	1,46	0,58
						образец 3	1,44	0,44
песок средний	3305	1	430,44	1,45	26,56	образец 1	1,44	62,07
						образец 2	1,42	16,48
						образец 3	1,42	5,86
песок крупный	3306	1	390,54	1,43	17,83	образец 1	1,48	4,91
						образец 2	1,50	50,58
						образец 3	1,50	46,97
песок крупный с добавлением органики 4,5%	3307	1	351,6	1,3	2,87	образец 1	1,50	< 0,01
						образец 2	1,50	< 0,01
						образец 3	1,50	< 0,01

В отдельных образцах отмечено частичное снижение коэффициента фильтрации, в образцах с органикой фильтрация не началась. Результаты определения коэффициента фильтрации приведены в табл. 9.

## Заключение

По итогам выполненных работ исследовано влияние крепителей на модели специфических грунтов с различным содержанием органических веществ, их прочность, деформационные свойства.

На основании анализа результатов работ предполагается выполнить актуализацию нормативной базы и действующих национальных стандартов. Следует дополнить действующий СП 22.13330.2016 [2] требованиями к закрепленным грунтам с органическими включениями, закрепляемыми цементными растворами; требованиями к грунтам, закрепляемым акрилатными растворами, определить область их применения. В СП 45.13330.2017 [11] необходимо указать требования к растворам, применяемым для закрепления грунтов с органическими включениями до 10%; требования к растворам на основе акрилатов при закреплении грунтов; необходимо дополнить и определить контролируемые показатели для закрепленных грунтов с органическими включениями до 10% и для грунтов, закрепляемых акрилатными растворами. Следует дополнить имеющиеся ГОСТы методиками испытания грунтов, закрепленных акрилатными растворами, а также базовыми нормируемыми показателями.

Для формирования контролируемых показателей и включения этих показателей в нормативную базу следует выполнить дополнительную верификацию полученных результатов на грунтах со включением органического вещества в естественном сложении в полевых условиях.

## Список литературы

1. ГОСТ Р 59706-2022. Грунты химически закрепленные. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>
3. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. Москва: Российский институт стандартизации; 2021.
4. ГОСТ Р 59538-2021. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2021.
5. ГОСТ Р 70696-2023. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации; 2023.
6. ГОСТ Р 70695-2023. Грунты, закрепленные инъекционными растворами на основе цемента и силиката натрия. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации; 2023.
7. ГОСТ Р 59705-2021. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе силиката натрия. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2021
8. ГОСТ Р 70308-2022. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе тонкодисперсного вяжущего. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
9. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. Москва: Стандартинформ; 2016.
10. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2016.
11. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная версия СНиП 3.02.01-87 [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14715/>
12. EN 12715:2000. Execution of special geotechnical work – Grouting. <https://doi.org/10.3403/02034454>
13. EN 12716:2001. Execution of special geotechnical works – Jet grouting. <https://doi.org/10.3403/02307696>
14. DD ENV 1997-3:2000. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 3: Design assisted by fieldtesting. <https://doi.org/10.3403/02237242u>
15. *Falcao J., Pinto A.L., Pinto F.D.* Case histories of ground improvement solutions using jet-grouting. In: International conference on geotechnical and geological engineering. GeoEng2000. Vol. 2: Extended Abstract. Technomic Publishing Company; 2000.
16. ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. Москва: Стандартинформ; 2020.
17. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ; 2020.
18. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2018.
19. *Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В.* Закрепление грунтов в подземном строительстве. Москва: АСВ; 2022.
20. *Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В.* Опыт закрепления грунтов в основании исторических зданий музыкальной школы им. Гнесиных в Москве. Вестник НИЦ Строительство. 2014;(10):54–59.
21. *Малинин А.Г.* Струйная цементация грунтов. Москва: Стройиздат; 2010.
22. Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидро-разрывов. Москва: НИИОСП; 2020.
23. Методическое пособие по проектированию оснований и фундаментов на органоминеральных и органических грунтах. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова; 2020.
24. СП 291.1325800.2017. Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
25. *Архангельский И.В., Солодухин М.А.* Справочник техника-геолога по инженерно-геологическим и гидрогеологическим работам. Москва: Недра; 1982.
26. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. Москва: ДАР/ВОДГЕО; 2005.

## References

1. State Standard R 59706-2022. Soil's chemical improvement. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. (In Russian).
2. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83\* [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>. (In Russian).
3. State Standard R 30416-2020. Sods. Laboratory testing. General. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russian).
4. State Standard R 59538-2021. Cement based injection mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
5. State Standard R 70696-2023. Cement based injection mortars. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russian).
6. State Standard R 70695-2023. Soils chemically fixed with mortars based on cement and sodium silicate. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russian).
7. State Standard R 59705-2021. Sodium silicate injection mortars for soil consolidation. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russian).
8. State Standard R 70308-2022. Injection mortars based on a finely dispersed binder for soil stabilization. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. (In Russian).
9. State Standard 25584-2016. Soils. Laboratory methods for determination of coefficient of hydraulic conductivity. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
10. State Standard 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
11. SP 45.13330.2017. Earthworks, Grounds and Footings. Updated version of SNiP 3.02.01-87 [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14715/> (In Russian).
12. EN 12715:2000. Execution of special geotechnical work – Grouting. <https://doi.org/10.3403/02034454>
13. EN 12716:2001. Execution of special geotechnical works – Jet grouting. <https://doi.org/10.3403/02307696>
14. DD ENV 1997-3:2000. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 3: Design assisted by fieldtesting. <https://doi.org/10.3403/02237242u>
15. *Falcao J., Pinto A.L., Pinto F.D.* Case histories of ground improvement solutions using jet-grouting. In: International conference on geotechnical and geological engineering. GeoEng2000. Vol. 2: Extended Abstract. Technomic Publishing Company; 2000.
16. State Standard 12248.2-2020. Soils. Determination of strength parameters by unconfined compression testing. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
17. State Standard 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
18. State Standard 5802-86. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
19. *Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V.* Soil consolidation in underground construction: monograph. Moscow: ASV Publ.; 2022. (In Russian).
20. *Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V.* The experience of fixing soils at the base of historical buildings of the Gnessin music School in Moscow. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2014;(10):54–59. (In Russian).
21. *Malinin A.G.* Jet cementation of soils. Moscow: Stroyizdat Publ.; 2010. (In Russian).
22. Methodological guide for strengthening soils by jet cementation methods, deep mixing, injection with solutions based on micro-cements, cuff injection in the mode of hydraulic fracturing. Moscow: NIIOSP; 2020. (In Russian).
23. Methodological guide for the design of foundations and foundations on organomineral and organic soils. Moscow: NIIOSP named after N.M. Gersevanov; 2020. (In Russian).
24. SP 291.1325800.2017. Armed grouted structures. Rules of architectural design. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).
25. *Solodukhin M.A., Arkhangel'sky I.V.* Handbook of a geologist technician on engineering-geological and hydrogeological works. Moscow: Nedra Publ.; 1982.
26. Reference manual for processing materials of engineering and geological surveys. Moscow: DAR/VODGEO Publ.; 2005. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Анастасия Игоревна Мисюк**<sup>✉</sup>, заместитель заведующего сектором усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: lab22@niiosp.ru

**Anastasia I. Misyuk**<sup>✉</sup>, Deputy Head of the Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: lab22@niiosp.ru

**Андрей Васильевич Шапошников**, канд. техн. наук, заведующий сектором усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Andrey V. Shaposhnikov**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Дмитрий Владимирович Антоненко**, аспирант, АО «НИЦ «Строительство»; инженер сектора усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Dmitry V. Antonenko**, Postgraduate Student, JSC Research Center of Construction; Engineer, Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Олег Александрович Шулятьев**, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Oleg A. Shulyatyev**, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director for Scientific Work, Head of the Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Вячеслав Валентинович Орехов**, д-р техн. наук, главный специалист экспертно-аналитического отдела, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Vyacheslav V. Orekhov**, Dr. Sci. (Engineering), Chief Specialist of the Expert and Analytical Department, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Константин Пантелеевич Пятикрестовский**, д-р техн. наук, АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Konstantin P. Pyatikrestovsky**, Dr. Sci. (Engineering), JSC Research Center of Construction, Moscow

<sup>✉</sup> Автор, ответственный за переписку / Corresponding author