

УДК 624.137.5

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

## Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Сравнение работы двух конструкций инженерной защиты в сейсмически активном районе на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако»

Афанасьев Никита Александрович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова.  
Москва, Российская Федерация

**Аннотация:** В статье на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако» рассмотрена работа различных вариантов удерживающих конструкций инженерной защиты. Участок строительства включает Нижнюю станцию канатной дороги «F» и удерживающее сооружение СТ-3, входящие в состав Горно-туристический центр ОАО «Газпром». ГТЦ «ОАО «Газпром» находится в Адлерском районе г. Сочи. Объект находится в сейсмически опасном районе, что повышает риск образования опасных геологических процессов, следовательно, повышаются требования к устройству мероприятий инженерной защиты, появляется необходимость расчета сооружения на сейсмическое воздействие.

В работе рассмотрено два типа сооружений противооползневой защиты, соответствующие двум этапам работ. Первый этап – исходное состояние объекта - строительство станции канатной дороги, строительство подпорной стенки СТ-3, устройство анкерных полей ниже по склону и крепление СТ-3 анкерами. Второй этап – реконструкция системы инженерной защиты – устройство новых подпорных стен ниже по склону.

Математическое моделирование производилось в расчетном комплексе Plaxis 2D. Расчет устойчивости производился для различных комбинаций вариантов инженерной защиты. Полученные расчетные коэффициенты устойчивости сравнивались с нормированным значением коэффициента устойчивости склона (откоса) для математического моделирования ( $k_{st} \geq [k_{st}]$ ,  $[k_{st}] = \gamma_n \psi / \gamma_d$ ), сделаны выводы, даны рекомендации.

**Ключевые слова:** инженерная защита, сейсмический район, опасные геологические процессы, математическое моделирование, расчет устойчивости

**Для цитирования:** Афанасьев Н.А. Сравнение работы двух конструкций инженерной защиты в сейсмически активном районе на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 5. С. 73-86. DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

## Seismic safety and seismic isolation of buildings

Comparison of the work of various variants of engineering protection structures and their combinations in a seismic area on the example of the object "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge"

Afnas'ev Nikita A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Research Center of Construction NIIOSP named after N.M. Gersevanov. Moscow, Russian Federation

**Abstract:** The paper contains the work of various variants of retaining structures of engineering protection. The paper contains the project "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge". The construction site is located in the Adler district of Sochi. The construction area includes the Lower station of the cableway "F" and the retaining Wall-3, which are part of the Gazprom Mountain Resort. The object is located in a seismically dangerous area, which increases the risk of the formation of dangerous geological processes. The requirements for the device of engineering protection measures increase, there is a need for calculations of the structure for seismic impact. The paper considers two types of anti-landslide protection structures – two stages. The first stage is the "Initial state of the object" – the construction of a cableway station, the construction of a retaining Wall-3, the fixing of the slope by anchor fields and the fixing of Wall-3 by anchors through the construction. The second stage is the "Reconstruction of the engineering protection system" – the installation of new retaining walls lower down the slope. Numerical modeling was performed by PLAXIS 2D. The stability calculation was performed for a different combination of engineering protection options, the calculated safety factors were compared with the normalized value of the slope stability coefficient for numerical modeling. In results of the work made conclusions and recommendation.

**Keywords:** engineering protection, seismic area, dangerous geological processes, mathematical modeling, stability calculation

**For citation:** Afnas'ev N. A. Comparison of the work of various variants of engineering protection structures and their combinations in a seismic area on the example of the object "Engineering landslide protection of the northern slope of the Psekhako ridge". *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 73-86. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-73-86](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-73-86)

## Введение

Современное строительство сегодня – это, в основном, строительство сложных, уникальных зданий и сооружений. Такие объекты требуют особого подхода с конструктивной точки зрения. Для их проектирования существует ряд повышенных требований, в том числе требования по безопасности. При строительстве нетиповых объектов необходимо производить ряд сопутствующих мероприятий. В ряде случаев одним из видов таких мероприятий является устройство инженерной защиты. Поэтому устройство систем инженерной защиты в период активного строительства уникальных и зрелищных объектов является актуальной задачей строительной науки и практики.

Отметим, что существуют случаи, когда устройство инженерной защиты порождает новые опасные геологические процессы, прогнозирование которых на этапе проектирования невозможно. В данной статье на примере объекта «Инженерная противооползневая защита северного склона хребта Псехако», который был использован при проведении Олимпийских игр в Сочи, рассмотрен именно такой случай.

## Исходные данные

Рассматриваемый участок располагается в Адлерском районе г. Сочи, в 3 км к северу от п. Эсто-Садок на водораздельной части хребта Псехако (рис. 1-2). Участок строительства входит в

состав Сочинского государственного природного национального парка. Поверхность свободна от плотной застройки, на участке растет смешанный лес.

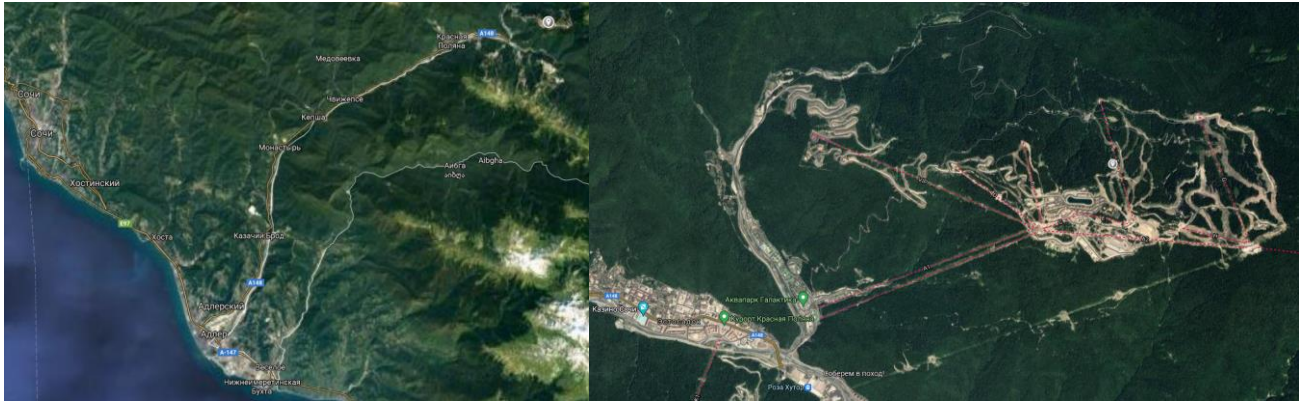


Рисунок 1 – Расположение участка строительства

Figure 1 – Construction site location

ГТЦ ОАО «Газпром» – комплекс сооружений для проведения отдыха и спортивных мероприятий по лыжным видам спорта. Комплекс включает горнолыжные спуски (трассы), 8 канатных дорог, лыжный стадион, гостиницы и коттеджи, сооружения для летних видов спорта (волейбольные площадки, теннисные корты), аквапарк, а также сооружения оснежения, энергоснабжения, безопасности, связи и другие обслуживающие и вспомогательные сооружения. Комплекс использовался при проведении Зимних Олимпийских Игр 2014 года. Класс ответственности всех сооружений, за исключением канатной дороги – II (нормальный), канатная дорога имеет I уровень ответственности

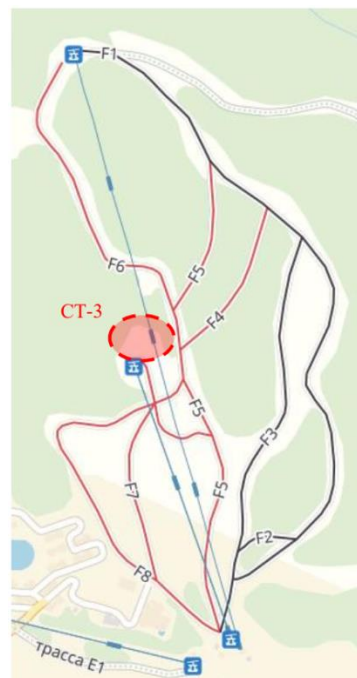


Рисунок 2 – Участок строительства

Figure 2 – Construction site

## Сооружение инженерной защиты

В рамках данной статьи рассматривается сооружение инженерной защиты СТ3, предотвращающее развитие опасных инженерно-геологических процессов в районе нижней станции канатной дороги «F».

Удерживающая стена СТ-3 протяженностью 111 м выполняется из двух и трех рядов буронабивных свай диаметром 820 мм длиной 25.0 м, устроенных с шагом 1,5 м в плане (рис.3-4). Монолитная железобетонная стена уголкового типа имеет высоту надземной части от 6 до 9 метров и толщину плитной части 1,2 м. Для обеспечения дополнительной устойчивости конструкции через тело СТ-3 предусмотрены удерживающие анкеры.

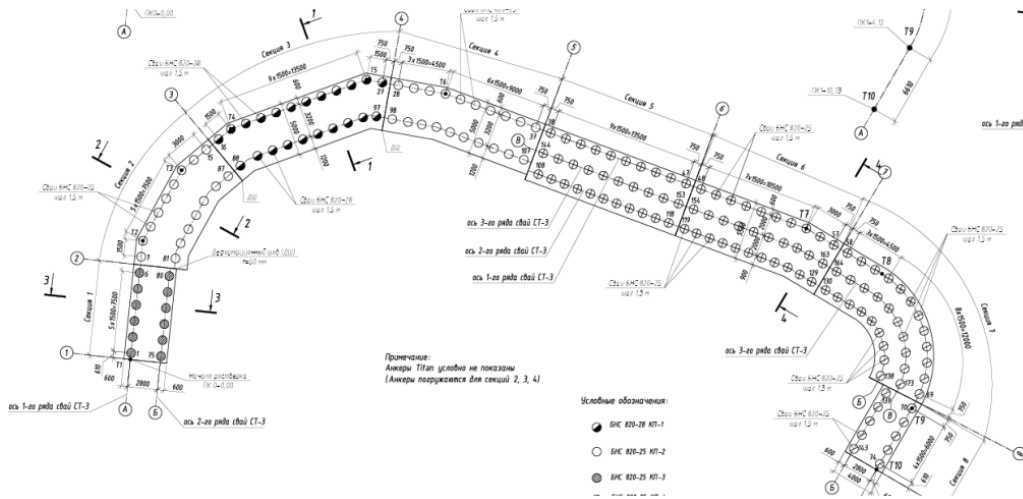


Рисунок 3 – План подпорной стены СТ-3

Figure 3 – The retaining wall ST-3 plan

Откосы ниже по склону СТ-3 закрепляются грунтовыми анкерами 6-27 метров с шагом в плане 2x2 метра. Также предусмотрено закрепление склона анкерными железобетонными плитами на анкерах длиной 21 м.

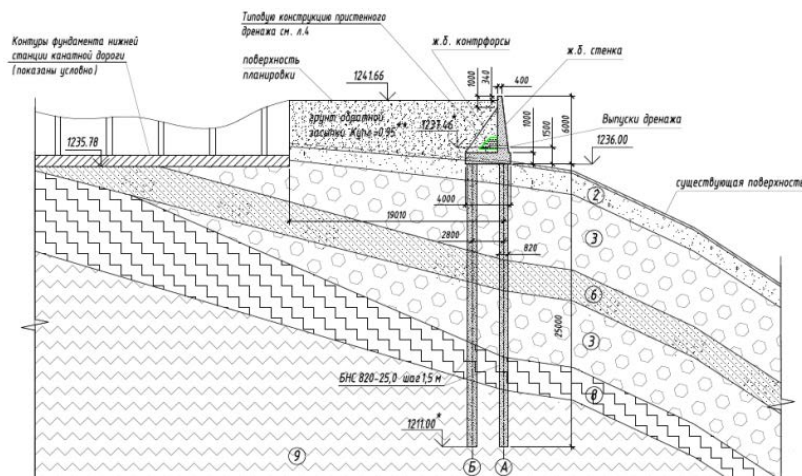


Рисунок 4 – Типовой разрез по стене СТ-3

Figure 4 – Section of retaining wall ST-3

В результате неполного завершения строительных работ при возведении объекта, в процессе эксплуатации на участке ниже СТ-3 по склону стоки воды привели к тому, что из-за оползневых явлений сваи в основании уголковой подпорной стены сократили свою заделку в грунт на 10 метров. Перемещения секций подпорной стены в плане превысили 20 см. Верхняя часть свай обнажилась (рис.5), а рельеф склона серьезно изменился. Запас устойчивости удерживающего сооружения СТ-3 понизился по отношению к нормативному значению и потребовалось перепроектирование.



Рисунок 5 – Обнажение буронабивных свай фундамента СТ-3

Figure 5 – Opening of retaining wall's ST-3 bored piles

### **Реконструкция системы инженерной защиты**

Для аварийного участка в районе СТ-3 рассматривается изменение конструктивного решения инженерной защиты с системы нагельных полей на террасирование, выполаживание и систему ступенчатых подпорных стен для предотвращения развития оползневых процессов.

Предусмотрены следующие мероприятия:

- усиление основания станции канатной дороги - цементация массива грунта по манжетной технологии. Данные мероприятия позволяют снизить боковое давление на СТ-3 за счет передачи нагрузки на нижележащие слои грунта, повышают жесткость основания и снижают дополнительные осадки и плановые смещения фундамента станции. За счет включения в работу нижележащих коренных слоев грунта повышается устойчивость склона при сейсмическом воздействии;

- выполаживание и террасирование склона ниже СТ-3 и устройством трех ярусов подпорных стен - обеспечение общей устойчивости склона и существующей подпорной стены СТ-3, а также основания фундамента станции канатной дороги, предотвращения обводнения грунтов за счет отсыпки террас из крупнообломочного и хорошо дренирующего материала. Проектный угол выполаживания откоса обеспечивается за счет устройства трех ярусов уголковых подпорных стен из монолитного железобетона.

Высота уголковых подпорных стен - 5,8 м, толщина – 500 - 800 мм, толщина фундаментной плиты - 800 мм.

Угловые стены на склоне устраиваются на свайном основании. Диаметр свай составляет 200 мм. Бетон класса В30. Свайное основание представляет собой пять рядов свай с шагом 1,0 м, расстояние между сваями в ряду - 1,0 м.

Восприятие подпорными стенами бокового давления от массива грунта обеспечивается за счет устройства 3-х ярусов грунтовых анкеров на каждую из стен. Анкеры в ряду располагаются с шагом 2,0 м.

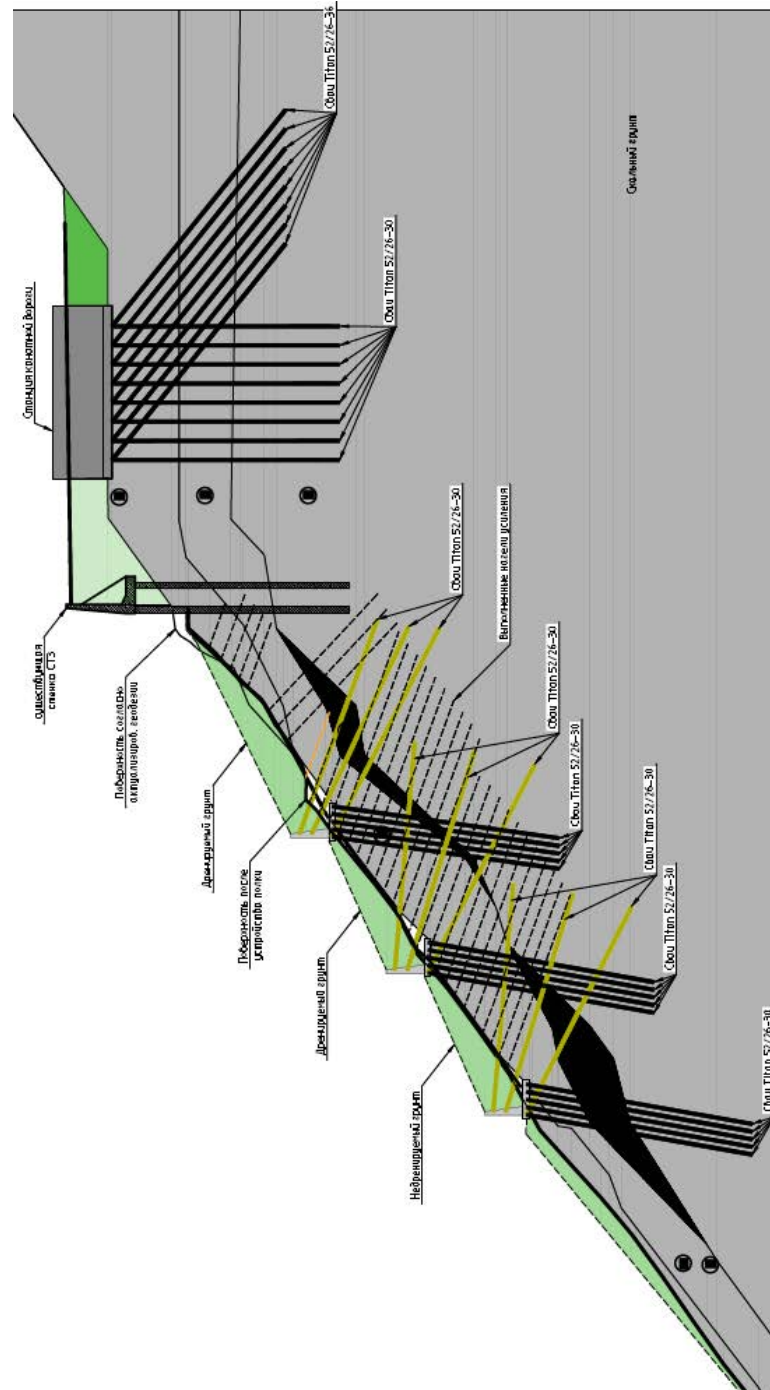


Рисунок 6 – Общая схема новой системы инженерной защиты

Figure 6 – Designed engineering protection general form

## Математическое моделирование

Математическое моделирование производилось в расчетном комплексе Plaxis в плоской постановке, что позволяет получить результаты расчетов удерживающих конструкций с некоторым запасом, принимаемым в запас надежности по сравнению с расчетами, выполняемыми в трехмерной постановке. Расчет устойчивости производился для различных комбинаций вариантов инженерной защиты.

Математическое моделирование производилось для следующих этапов (фаз):

- 1) Initial phase – определение природного напряженно-деформированного состояния грунтового массива (склона);
- 2) Устройство станции;
- 3) Устройство исходных нагельных полей;
  - 4.1.1.1) Укрепление фундамента станции;
  - 4.1.1.2) Расчет устойчивости;
  - 4.1.2.1) Устройство системы инженерной защиты;
  - 4.1.2.2) Расчет устойчивости;
  - 4.1.3.1) Приложение сейсмической нагрузки;
  - 4.1.3.2) Расчет устойчивости;
- 4.2.1.1) Устройство системы инженерной защиты;
- 4.2.1.2) Расчет устойчивости;
- 4.2.2.1) Приложение сейсмической нагрузки;
- 4.2.2.2) Расчет устойчивости

В соответствии с СП 116.13330.2012 расчет устойчивости проектируемых противооползневых сооружений и подпорных стен, выполняется в соответствии с зависимостью:

$$k_{st} \geq [k_{st}], [k_{st}] = \gamma_n \Psi / \gamma_d$$

$\gamma_n = 1,15$  - коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый по ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Класс рассматриваемого сооружения – КС-2, в соответствии с ГОСТ 27751-2014 принимается не менее  $\gamma_n = 1,0$ .

$\gamma_d = 1$  – коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы; устанавливается в диапазоне  $0,75 \leq \gamma_d \leq 1,00$  нормами проектирования отдельных видов сооружений.

$\Psi = 1$  (для эксплуатационного периода),  $\Psi = 0,95$  (для особого сочетания нагрузок (сейсмики)) - коэффициент сочетания нагрузок.

Значение нормированного коэффициента запаса устойчивости для периода эксплуатации:

$$k_{st} = 1 \cdot 1,15 / 1 = 1,15$$

Значение нормированного коэффициента запаса устойчивости с учетом сейсмического воздействия:

$$k_{st} = 0,95 \cdot 1,15 / 1 = 1,093$$

Полученные расчетные коэффициенты устойчивости сравнивались с нормированным значением коэффициента устойчивости склона (откоса) для математического моделирования, сделаны выводы, даны рекомендации.

## Результаты расчета

Результаты расчета математического моделирования рассматриваемой задачи представлены на рис. 7 - 16 и сведены в таблицу 1.

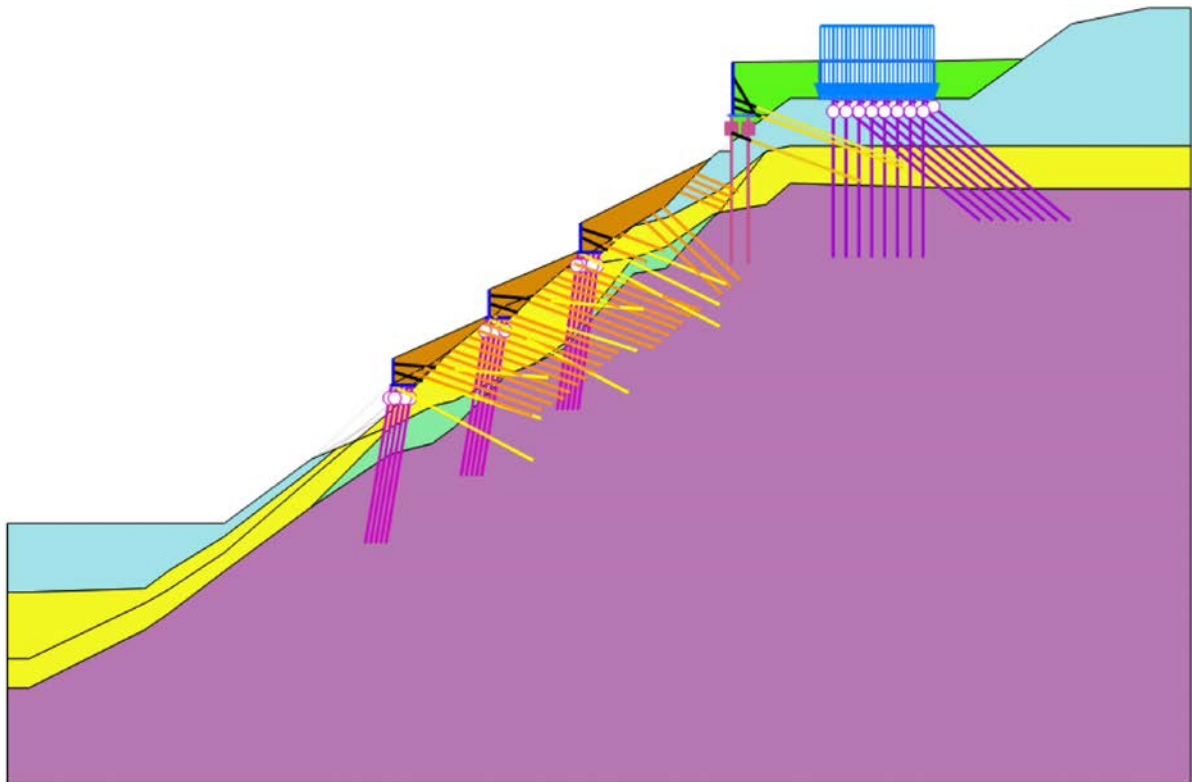


Рисунок 7 – Общий вид расчетной схемы

Figure 7 – Calculation model

Material set								
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	
Identification	2	4	1	3	N	2a	Fill	
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Drainage type	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	
Colour	RGB 243, 247, 34	RGB 182, 119, 178	RGB 161, 226, 232	RGB 134, 234, 162	RGB 91, 245, 25	RGB 248, 209, 53	RGB 214, 137, 5	
Comments								
General properties								
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	20.60	23.60	20.00	20.90	18.00	21.00	18.00
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	21.60	24.00	21.00	21.90	19.00	22.00	19.00
Material set								
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	
Identification	2	4	1	3	N	2a	Fill	
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Drainage type	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	
Colour	RGB 243, 247, 34	RGB 182, 119, 178	RGB 161, 226, 232	RGB 134, 234, 162	RGB 91, 245, 25	RGB 248, 209, 53	RGB 214, 137, 5	
Stiffness								
E	kN/m <sup>2</sup>	27.30E3	120.0E3	19.80E3	51.00E3	18.00E3	32.90E3	15.00E3
$\nu$ ( $\nu_u$ )		0.3500	0.3000	0.3500	0.3500	0.3200	0.3500	0.3000
Alternatives								
G	kN/m <sup>2</sup>	10.11E3	46.15E3	7333	18.89E3	6818	12.19E3	5769
$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	43.81E3	161.5E3	31.78E3	81.85E3	25.76E3	52.80E3	20.19E3
Strength								
$c_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	12.60	60.00	20.80	43.00	1.000	12.40	1.000
$\phi$ ( $\phi_i$ )	°	25.40	32.00	23.00	34.00	28.00	29.20	40.00
$\psi$ ( $\psi_i$ )	°	0.000	2.000	0.000	4.000	0.000	0.000	10.00
Velocities								
$V_s$	m/s	69.39	138.5	59.97	94.16	60.96	75.45	56.07
$V_p$	m/s	144.4	259.1	124.8	196.0	118.5	157.1	104.9

Рисунок 8 – Физико-механические характеристики грунтов

Figure 8 – Physico-mechanical characteristics of the soils



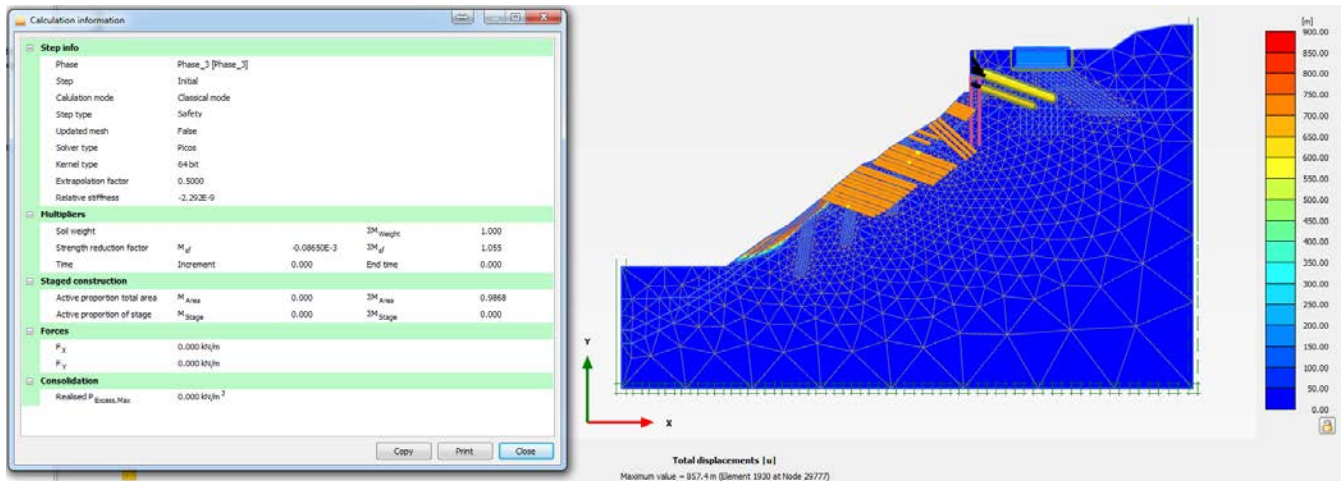


Рисунок 9 – Расчет устойчивости без дополнительных мероприятий (статика),  $K_{sf}=1,055$

Figure 9 – Calculation type – safety, static analysis: initial state of slope

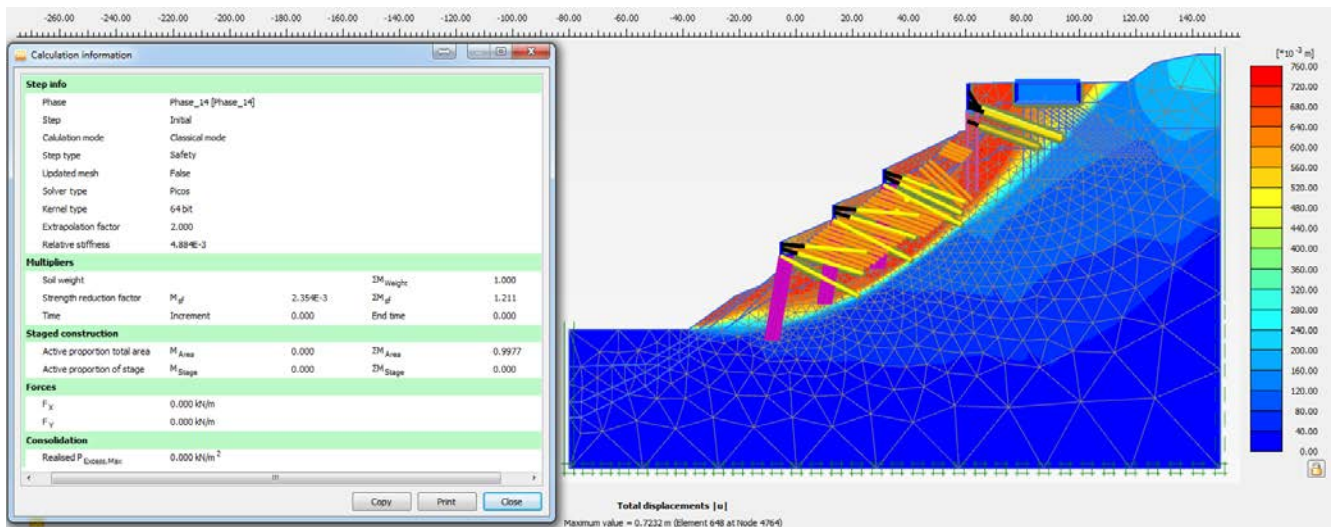


Рисунок 10 – Расчет устойчивости с мероприятиями без усиления фундамента станции (статика),  $K_{sf}=1,211$

Figure 10 – Calculation type – safety, static analysis: retaining walls

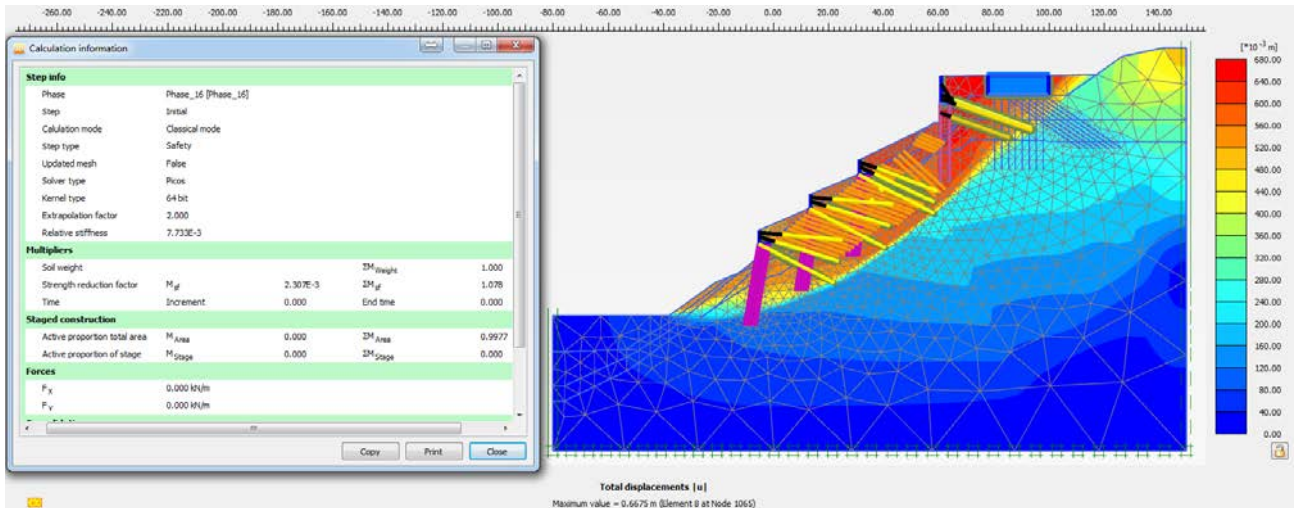


Рисунок 11 – Расчет устойчивости с мероприятиями без усиления фундамента станции (сеймика),  $K_{sf}=1,078$

Figure 11 – Calculation type – dynamics, static analysis: retaining walls

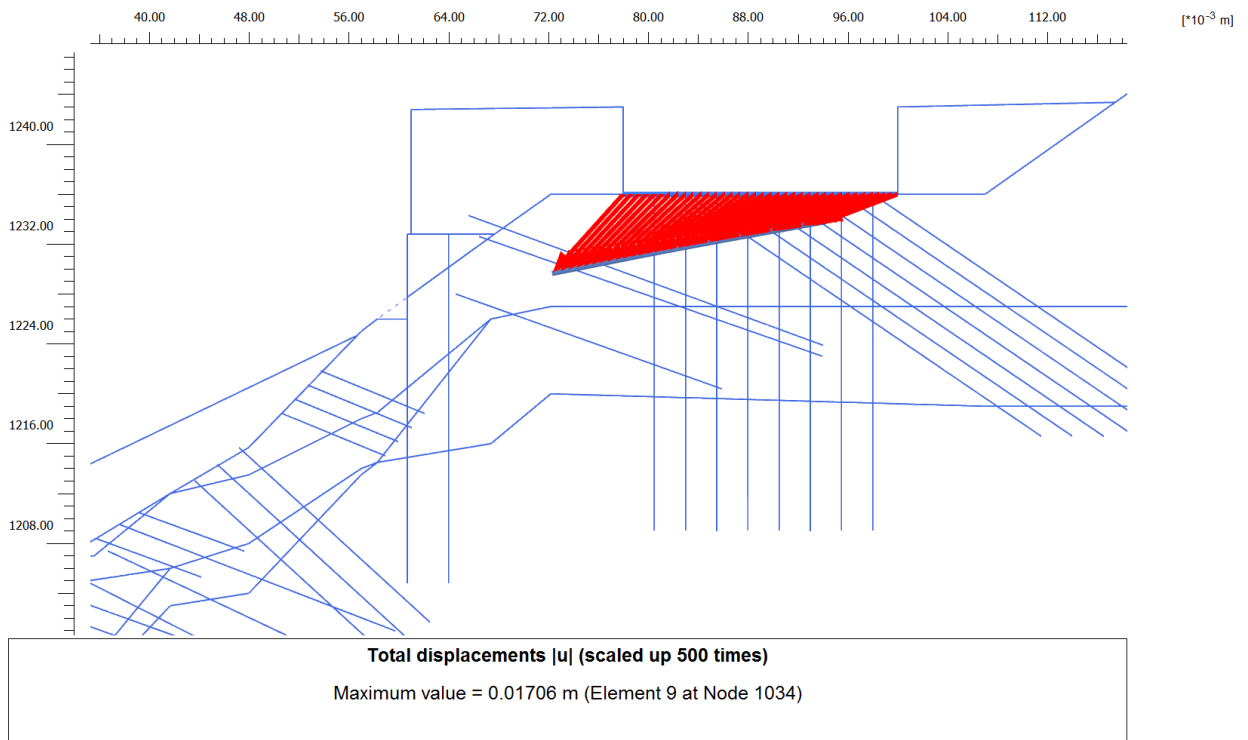


Рисунок 12 – Перемещения фундамента станции без усиления (статика)

Figure 12 – Total displacement: retaining walls

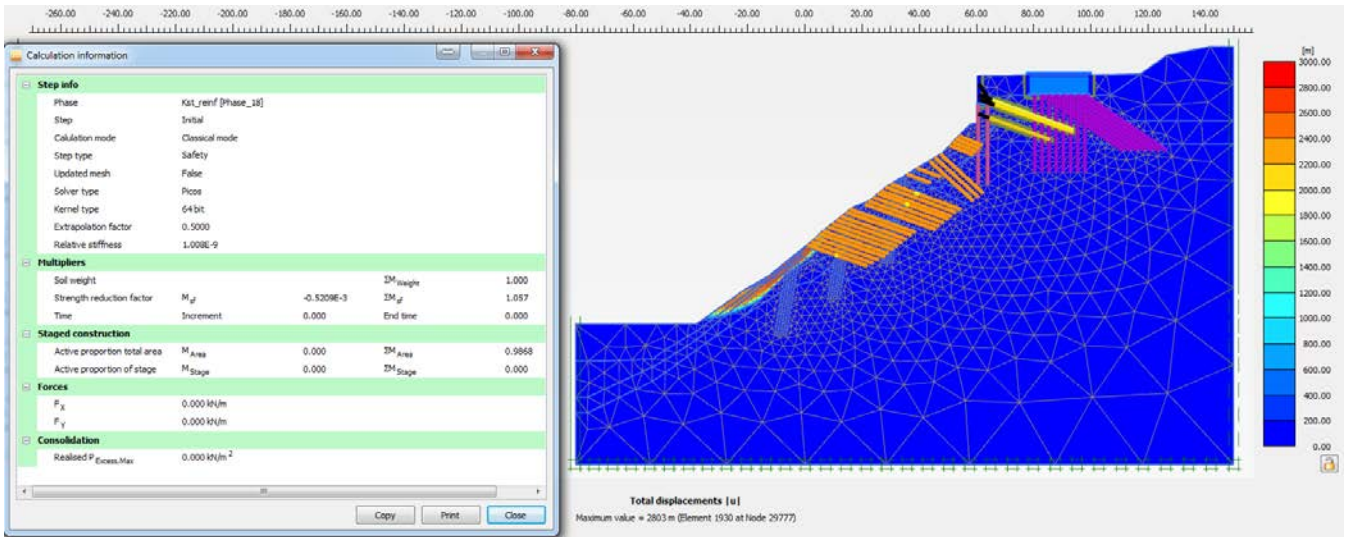


Рисунок 13 – Расчет устойчивости с усилением фундамента станции (статика),  $K_{sf}=1,057$

Figure 13 – Calculation type – safety, static analysis: initial state of slope + cement slurry injection

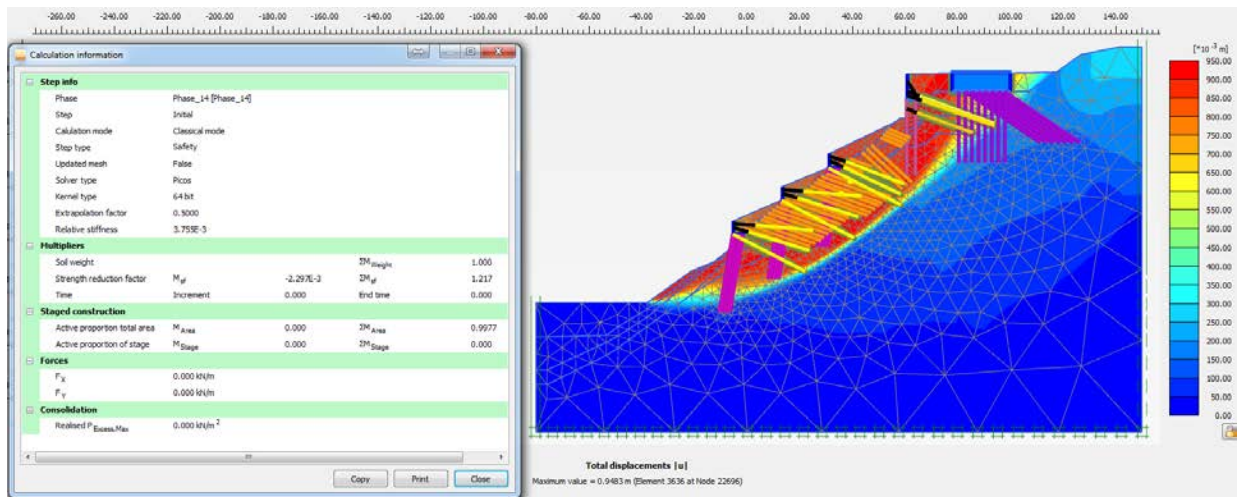


Рисунок 14 – Расчет устойчивости с мероприятиями и с усилением станции (статика),  $K_{sf}=1,217$

Figure 14 – Calculation type – safety, static analysis: retaining walls + cement slurry injection

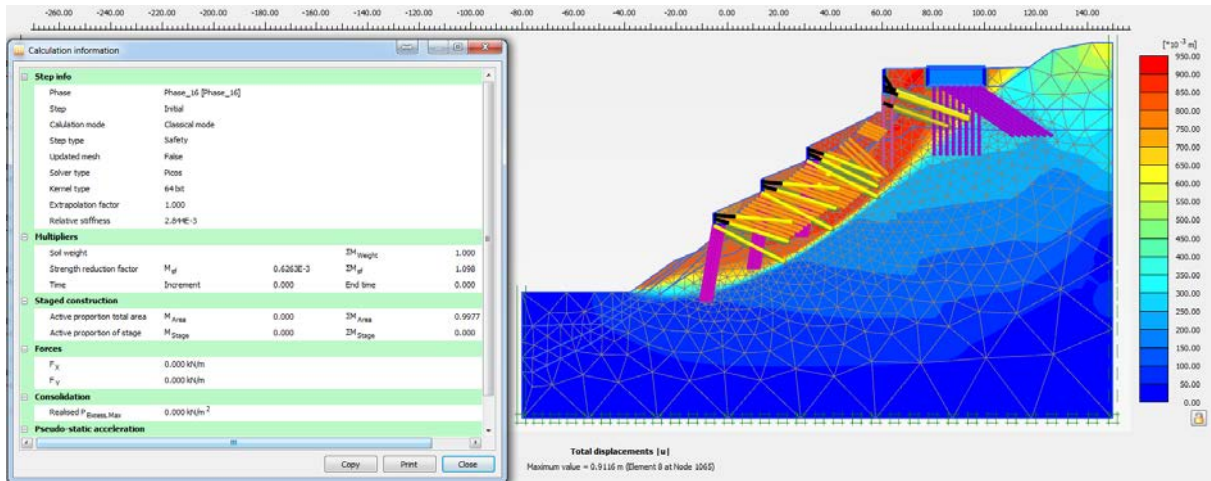


Рисунок 15 – Расчет устойчивости с мероприятиями и с усилением станции (сейсмика),  $K_{sf}=1,098$

Figure 15 – Calculation type – dynamics, static analysis: retaining walls + cement slurry injection

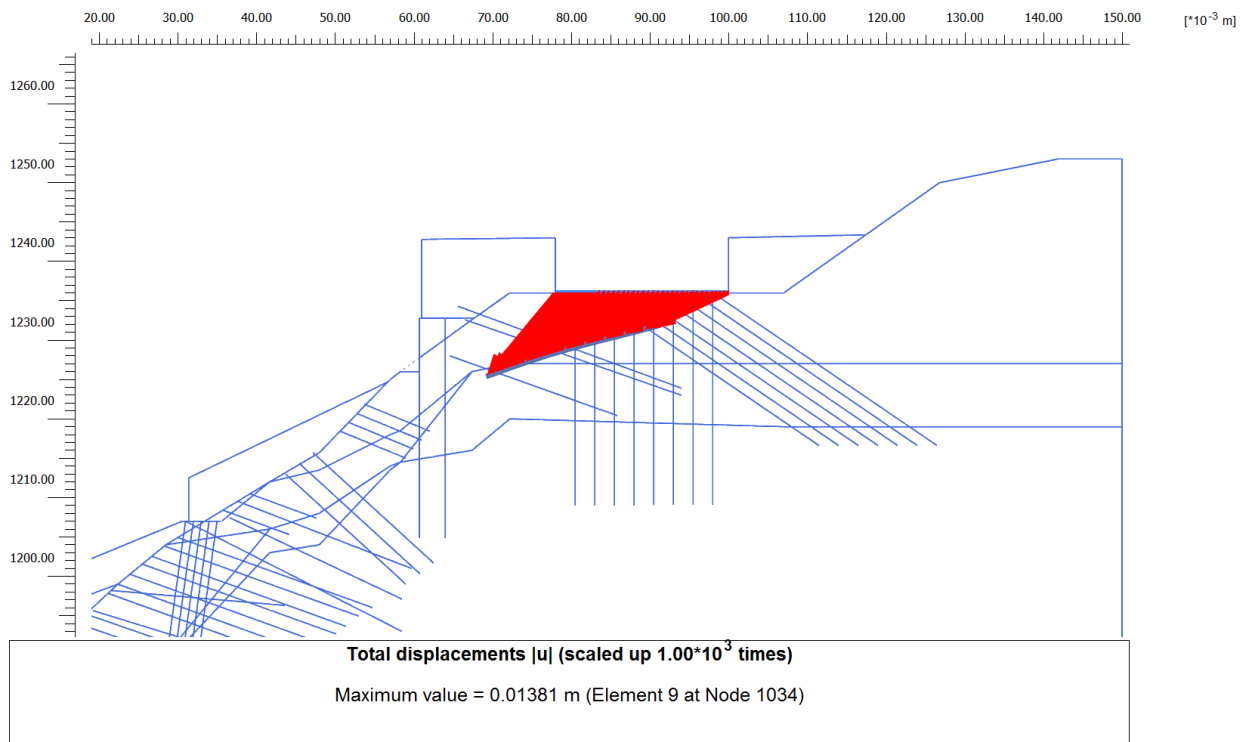


Рисунок 16 – Перемещения фундамента станции с учетом усиления.

Figure 16 – Total displacement: retaining walls + cement slurry injection

Таблица 1 – Результаты математического моделирования

Table 1 – Numeral calculation results

Коэффициент устойчивости склона			
Название этапа	Нормированный коэффициент устойчивости склона для математического моделирования, $[k_{st}]$	Без усиления фундамента станции, $K_{sf}$	С усилением фундамента станции, $K_{sf}$
Расчет устойчивости без мероприятий инженерной защиты (статика)	1,15	1,055	1,057
Расчет устойчивости с мероприятиями инженерной защиты (статика)	1,15	1,211	1,217
Расчет устойчивости с мероприятиями инженерной защиты (сейсмика 9 баллов)	1,093	1,078	1,098
Перемещения фундамента*, см			
Окончание строительства инженерной защиты	5,0	1,7	1,4

\* - согласно СП 22.13330.2016 Приложение К для гражданских и производственных одноэтажных и многоэтажных зданий с полным железобетонным или стальным каркасом I-й категории технического состояния

### Выводы и рекомендации

- 1) В данной статье рассмотрена аварийная работа системы инженерной защиты в виде нагельных полей, расчетом определен коэффициент устойчивости.
- 2) Рассмотрена реконструкция инженерной защиты с системы нагельных полей на террасирование, выполаживание и систему ступенчатых подпорных стен.
- 3) Рассмотрена работа новой инженерной защиты в различных комбинациях – с устройством укрепления основания станции и без укрепления.
- 4) Согласно результатам математического моделирования, принятые конструктивные решения позволяют обеспечить требуемый запас устойчивости данного участка склона при основном и особом сочетании нагрузок в соответствии с нормативной документацией.
- 5) Определены перемещения здания станции канатной дороги.

### Список литературы

- 1) СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов»;
- 2) СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»;
- 3) СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»;

- 4) СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты»;
- 5) СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»;
- 6) ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»;
- 7) ВСН 506-88 Проектирование и устройство грунтовых анкеров

#### **References**

- 1) SP 116.13330.2012 «Inzhenernaya zashchita territorij, zdaniy i sooruzhenij ot opasnyh geologicheskikh processov»;
- 2) SP 14.13330.2018 «Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah»;
- 3) SP 22.13330.2016 «Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij»;
- 4) SP 24.13330.2011 «Svajnye fundamenty»;
- 5) SP 63.13330.2012 «Betonye i zhelezobetonnye konstrukcii»;
- 6) GOST 27751-2014 «Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij»;
- 7) VSN 506-88 Proektirovanie i ustrojstvo gruntovyh ankerov

#### **Информация об авторе/Information about author**

**Афанасьев Никита Александрович**, АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, лаборатория механики грунтов № 17. Москва, Российская Федерация

**Nikita A. Afanas'ev**, Laboratory № 17 of Soil Mechanics NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian federation