ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):32-47
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.19 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_32

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИПОРТАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТОННЕЛЕЙ ПРИ ОПОЛЗНЕВЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Н.А. Беляков[1], Д.А. Потемкин[1], П.В. Пягай[1]

[1] Санкт Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ppyagai@gmail.com

Аннотация: Целью работы является разработка метода прогноза напряженно-деформированного состояния припортального подпорного сооружения с учетом длительного реологического деформирования грунтового массива и последующего сейсмического воздействия. Предложен и обоснован последовательный расчетный подход, предназначенный для проверки подпорных конструкций на контрольное землетрясение и учитывающий предысторию формирования напряженно-деформированного состояния оползневого склона. Реологические параметры модели грунта, описывающей процессы ползучести, определены методом ретроспективного анализа на основании сопоставления расчетных перемещений с данными геотехнического мониторинга. Выполнено сравнение результатов моделирования с учетом реологии грунтов и без нее, позволившее установить влияние длительных деформаций на контактные напряжения, внутренние усилия и характер их распределения в элементах конструкции. Предложенный метод предусматривает прямой динамический расчет в постановке плоской деформации с последующим переходом к пространственной модели посредством импорта полученных во времени перемещений точек конструкции. В пространственной постановке оцениваются напряжения в арматуре и развитие зон повреждения бетона. Такой подход обеспечивает совместный учет оползневых, реологических и сейсмических факторов и повышает достоверность оценки работы сооружения. Метод может применяться при проектировании и проверке припортальных подпорных конструкций, расположенных в оползневых склонах сейсмически активных районов, при условии калибровки параметров грунта по данным конкретного объекта.

Ключевые слова: геомеханика, прогнозирование напряженно-деформированного состояния, припортальные сооружения, транспортные тоннели, численное моделирование, сейсмические воздействия, оползневые воздействия, подпорные конструкции.

Для цитирования: *Беляков Н. А., Потемкин Д. А., Пягай П. В.* Разработка метода прогноза напряженно-деформированного состояния подпорных конструкций припортальных сооружений тоннелей при оползневых и сейсмических нагрузках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 32–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_32.

© Н.А. Беляков, Д.А. Потемкин, П.В. Пягай. 2026.

Development of method for stress–strain prediction in retaining structures at tunnel portals under landslide forces and seismic loads

N.A. Belyakov[1], D.A. Potemkin[1], P.V. Piagai[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ppyagai@gmail.com

Abstract: The aim of the study is to develop a method for the stress–strain prediction in retaining structures of tunnel portals with regard to long-term rheological deformation and subsequent seismic loading of rock mass. A sequential calculation approach is proposed and substantiated, meant for testing retaining structures under the influence of a control earthquake and taking into account pre-history of the stress–strain behavior of a landslide slope. The rheological parameters of a soil creep model are determined from the retrospective analysis and comparison of the estimated displacements with the data of geotechnical monitoring. The comparison of the modeling results obtained with and without regard to soil rheology made it possible to determine the influence of the long-term deformation on the contact stress, internal forces and their distribution in constructional units. The proposed method provides the direct dynamic calculation in the plane deformation formulation with the later transition to a spatial model with the import of the obtained time-dependent displacements of points of a structure. The stresses in reinforcement and the development of damage zones in concrete are estimated in the spatial formulation. Such approach ensures an integrated analysis of landslide forces, rheological factors and seismic loads, and improves confidence in estimate of behavior of a structure. The method is applicable in design and verification of retaining structures at tunnel portals in landslide slopes in seismically active regions subject to calibration of soil parameters by the data of a certain object.

Key words: geomechanics, stress–strain prediction, portal structures, transportation tunnels, numerical modeling, seismic loads, landslide forces, retaining structures.

For citation: Belyakov N. A., Potemkin D. A., Piagai P. V. Development of method for stress–strain prediction in retaining structures at tunnel portals under landslide forces and seismic loads. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):32-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_32.

Введение

Припортальные подпорные конструкции располагаются во врезке, где взаимодействуют с откосами, гидрогеологическими и геодинамическими условиями местности [1]. Таким образом, это зона повышенного геотехнического риска, возникающего ввиду неопределенности взаимодействия контакта «открытая поверхность — горный массив» [2].

Несмотря на то, что действующие отечественные строительные правила (СП 381.1325800, СП 122.13330, СП 14.13330) охватывают проектирование подпорных стен, обделок тоннелей и учет сейсмических нагрузок, единого документа, регламентирующего проектирование именно портальных сооружений, не существует [3]. В результате проектировщики вынуждены использовать подход, заключающийся в объединении положений из нескольких нормативных документов, что часто приводит к необоснованным расчетным параметрам [4], недоучету специфики взаимодействия конструкций с массивом в сложных геологических условиях, неоптимальному подбору материалов и сечений.

Тема обоснования сбора данных о сейсмических нагрузках на подземные сооружения отражена в научных статьях отечественных исследователей. Авторы [5] привели сопоставление аналитического [6] и численного решений [7, 8]. Исследователи делают акцент на важности и преимуществах применения численного моделирования при анализе напряженно-деформированного состояния подземных конструкций при сейсмических воздействиях.

В публикациях также сделан акцент на численном моделировании по части обоснования сейсмических нагрузок на подземные сооружения [9]. В исследованиях [10, 11] указывается важность корректного учета статической составляющей при расчете на сейсмические воздействия.

Влияние наличия оползневых процессов на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) подпорных конструкций при сейсмических воздействиях нигде не отражено [12, 13]. Припортальные зоны зачастую располагаются в зонах сильнотрещиноватых пород или несвязных грунтов [14, 15], характеризующихся наличием напорных вод и активным рельефом [16, 17]. Такие условия приводят к образованию оползневых процессов, наличием которых нельзя пренебречь при учете НДС до реализации сейсмического воздействия.

Таким образом, актуальность темы определяется не только высокой степенью риска при строительстве и эксплуатации порталов в сложных условиях, но и отсутствием унифицированных методик по расчету данных сооружений.

Цель работы: повышение геомеханической безопасности портальных сооружений за счет повышения достоверности прогноза нагрузок и воздействия, а также расчета их напряженно-деформированного состояния.

Методика и методы

В основе разработки метода прогноза НДС подпорных припортальных конструкций лежит подход к расчету, включающий в себя несколько этапов моделирования:

- подбор параметров модели деформирования грунта, учитывающей реологические свойства, методом ретроспективного [18, 19] анализа накопленных перемещений в оползневой зоне;
- расчет на землетрясение в прямой динамической постановке с учетом накопившихся деформаций ползучести в задаче плоской деформации;
- импорт накопившихся перемещений во времени в пространственную задачу с использованием упругопластических моделей поведения конструкционных материалов.

Валидация модели

Для достоверного моделирования оползневых процессов необходимо воспользоваться моделью поведения грунта, учитывающей реологическое поведение массива. Таковой является модель поведения Нортона N2PC-MCT [20], реализованная в программном комплексе Plaxis [21].

Модель N2PC-MCT объединяет исходную модель N2PC с критерием Кулона–Мора и критерием разрушения при растяжении [22, 23]. В частности, разложение деформации в уравнении расширено следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{T} + \varepsilon^{cr} + \varepsilon^{p} \qquad (1)$$

где ε^{e} — составляющая упругих деформаций; ε^{T} — составляющая термических деформаций; ε^{cr} — составляющая вязкоупругих деформаций ползучести; ε^{p} — составляющая пластических деформаций.

В рамках решаемой задачи составляющей термических деформаций было пренебрежено [24]. Таким образом, формула (1) принимает вид

$$\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{cr} + \varepsilon^{p} . \qquad (2)$$

Упругие деформации реализуются по закону Гука. Пластическая составляющая формируется по критерию Кулона–Мора.

Закон ползучести Нортона формулируется следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = Aq^{N} \frac{3s}{2q}, \qquad (3)$$

где s — девиатор напряжений; q — интенсивность напряжений по Мизесу; A и N — энергетические параметры модели, калибруемые путем построения графика зависимости девиаторного напряжения от скорости деформаций ползучести в логарифмическом масштабе [25].

Таким образом, калибровочная модель собрана в программном комплексе Plaxis 2D [26]. Модель отражает реальное проектируемое сооружение, находящееся в городе Сочи (9 баллов по шкале сейсмической интенсивности MSK-64).

Откос, склонный к оползневым процессам, слагают четвертичные отложения [27, 28] (суглинки тугопластичные и полутвердые с включением обломков коренных пород (песчаника), в том числе крупнообломочных, до 20%).

Ретроспективный анализ в данной задаче состоит в следующем: энергетические параметры A_1 и A_2 подбираются таким образом, чтобы обеспечить годовые (по данным спутникового мониторинга) горизонтальные смещения, равные 25 мм [29]. Подобранные параметры материала вводятся в основную расчетную модель. В результате расчета можно вывести напряжения на контакте грунта и сооружения в интерфейсном элементе, что и будет являться оползневым давлением [30]. Также программный комплекс Plaxis позволяет вывести усилия (изгибные моменты и перерезывающие силы) непосредственно в элементе подпорного сооружения [31, 32].

Таблица 1

Характеристики материалов (составлено авторами)
Material Properties (compiled by the authors)

	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3
γ_{unsat}, кН/м^3	19,8	23	24,5
γ_{sat}, кН/м^3	20,1	23	24,5
μ	0,2	0,35	0,19
E, МПа	16	520	971
G, МПа	6,68	192,6	408
c, кПа	17	250	300
φ, град	9	29	36
N_1	–		3,1
A_1, 1/сут			$0{,}22 \cdot 10^{-9}$
N_2			1
A_2, 1/сут			$0{,}014 \cdot 10^{-3}$

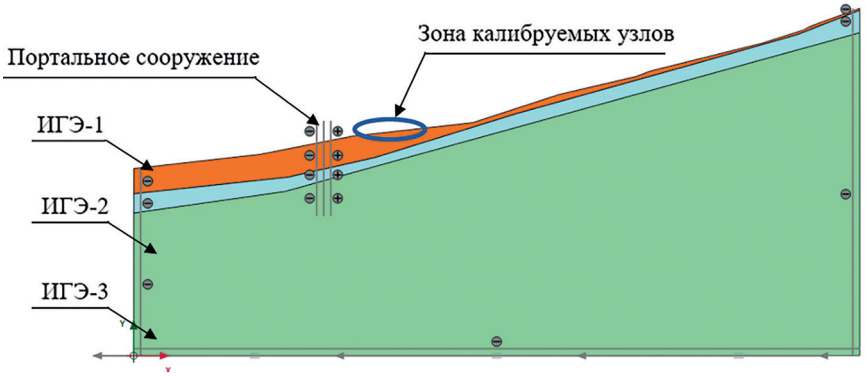


Рис. 1. Расчетная схема оползневого склона (составлено авторами)
Fig. 1. Calculation model of the landslide slope (prepared by the authors)

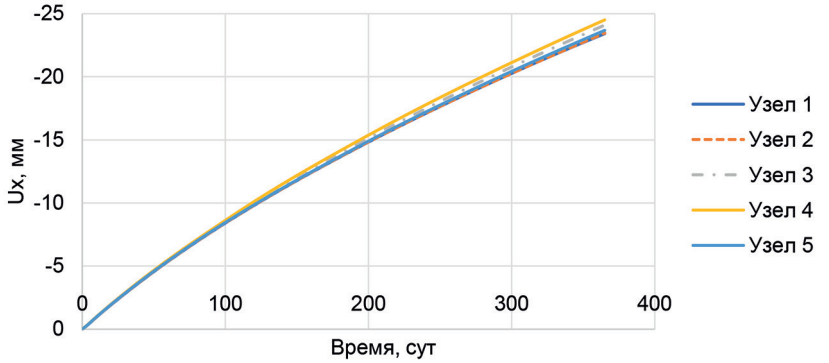


Рис. 2. График зависимости горизонтальных перемещений от времени (составлено авторами)
Fig. 2. Graph showing the relationship between horizontal displacements and time (compiled by the authors)

Подбор параметров модели N2PC

Конечно-элементная модель для калибровки вместе с отображением зоны интереса представлена на рис. 1. Характеристики грунта (взятые из инженерно-геологического отчета) см. в табл. 1. На рис. 2 показаны зависимости горизонтальных перемещений от параметра времени в пяти узлах из зоны интереса.

Максимальное значение горизонтальных перемещений — 24,16 мм (рис. 3). Следовательно, подобранные значения параметров модели Нортона позволяют получить необходимые смещения [33].

Сбор нагрузок от оползневого давления и сейсмического воздействия

Подпорные конструкции портального сооружения состоят из бурокасательных свай. В задаче плоской деформации целесообразно подпорную конструкцию

Таблица 2

Характеристики сваи (составлено авторами)
Pile Characteristics (compiled by the authors)

***E*, ГПа**	***I*, м^4**	***A*, м^2**	ν	***w*, кН/м/м**
32,5	0,049087	1,813664	0,2	25

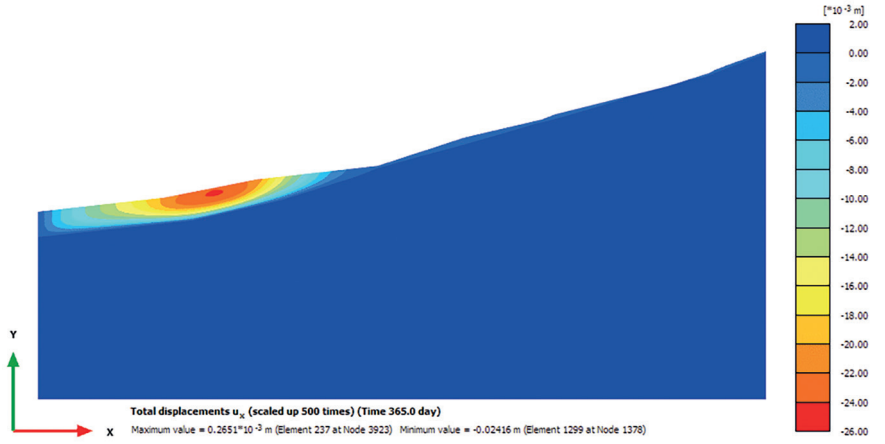


Рис. 3. Изополя горизонтальных перемещений на 365-й день (составлено авторами)
Fig. 3. Isopoles of horizontal displacements on day 365 (compiled by the authors)

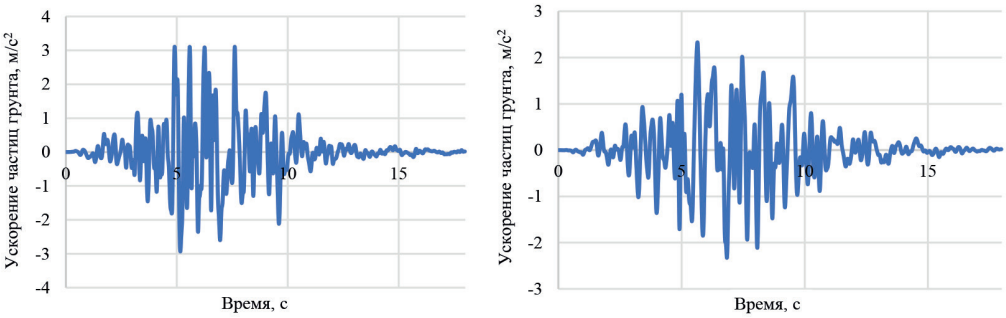


Рис. 4. Акселерограммы (составлено авторами)
Fig. 4. Accelerograms (compiled by the authors)

смоделировать посредством элемента Plate.

Характеристики сваи представлены в табл. 2.

Для наиболее достоверного моделирования оползневого давления следует решить задачу в прямой динамической постановке [34]. Модельные (синтетические) акселерограммы представлены на рис. 4.

В модели для апробации были введены следующие этапы строительства:

1. Фаза для расчета исходного напряженно-деформированного состояния, рассчитываемая по процедуре Gravity Load.

2. Обнуление достигнутых перемещений. Включение ползучести. Продолжительность расчетного периода — 365 сут.

3. Обнуление деформаций. Установка «стены в грунте» (далее — СВГ).

4. Этап экскавации грунта.

5. Обнуление достигнутых перемещений. Включение ползучести. Время расчета — 365 сут.

6. Реализация сейсмического воздействия в прямой динамической постановке от акселерограммы расчетного сейсмического события.

На стадиях 1—5 использовались горизонтальные закрепления по боковым границам модели, а внизу модели ограничения перемещений накладывались по вертикальным и горизонтальным перемещениям. На стадии приложения сейсмического воздействия боковым границам присвоены граничные условия свободного поля Free Field, а нижней границе — граничное условие податливого основания Compliant Base.

Поверочный расчет в прямой динамической постановке с применением нелинейных моделей материалов конструкций

Порталы тоннелей — это сооружения, в основной своей массе принадлежащие классу сооружений КС-3 [35, 36] (повышенного уровня ответственности). Чтобы удостовериться в надежности спроектированной конструкции и в верном подходе к проектированию порталов в принципе, необходимо выполнить численный расчет в прямой динамической постановке с учетом моделей материалов, учитывающих их нелинейное поведение.

Описание расчетной модели

Железобетонная свая длиной 28 м заглублена в аргиллитоподобные глины на глубину 14 м. Диаметр сваи — 1500 мм. Армирование конструкции состоит из 12 стержней диаметром 32 мм. Во избежание проблем с формированием контактов взаимодействия, а также проблем с формированием сетки конечных элементов сетки было принято решение спиралевидное поперечное армирование аппроксимировать хому-

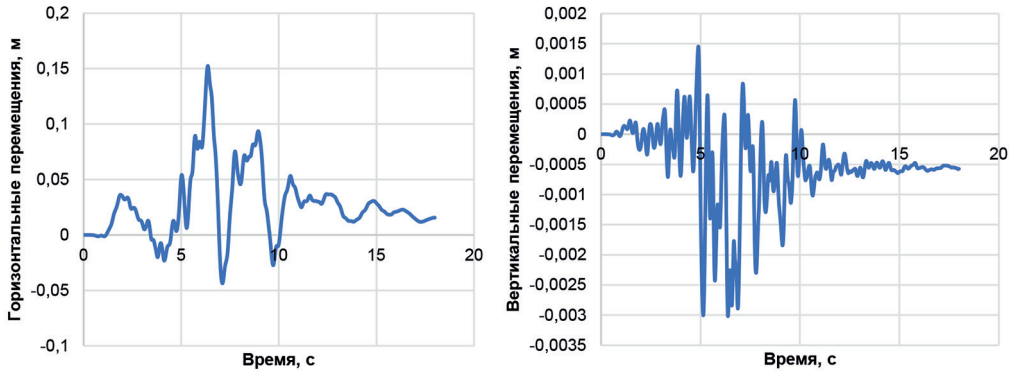


Рис. 5. График зависимости перемещений точки подпорной стены от времени (составлено авторами)
Fig. 5. Graph showing the relationship between the displacements of a point on the retaining wall and time (compiled by the authors)

тами шагом 150 мм. Класс всей арматуры — А500С.

Воздействие задано путем импорта горизонтальных и вертикальных перемещений, полученных в программном комплексе Plaxis 2D (из результатов расчета в прямой динамической постановке). Из Plaxis 2D были выведены графики зависимости перемещений (горизонтальных и вертикальных) от времени. Сейсмограммы (графики зависимости перемещений от времени) в одной характерной точке на свае представлены на рис. 5.

По матрице, где строка есть координата высоты сваи, а столбец — время в секундах, была составлена поверхность функции смещения (рис. 6). Из этой поверхности на каждой 0,5 с с помощью скрипта на языке программирования Python были выведены уравнения перемещения сваи, аппроксимированные полиномом 6-й степени.

Для обнаружения зон пластических деформаций в бетоне сваи марки В40 была выбрана модель разрушающегося бетона Concrete Damaged Plasticity (далее — CDP). В СП 63.13330.2018 опи-

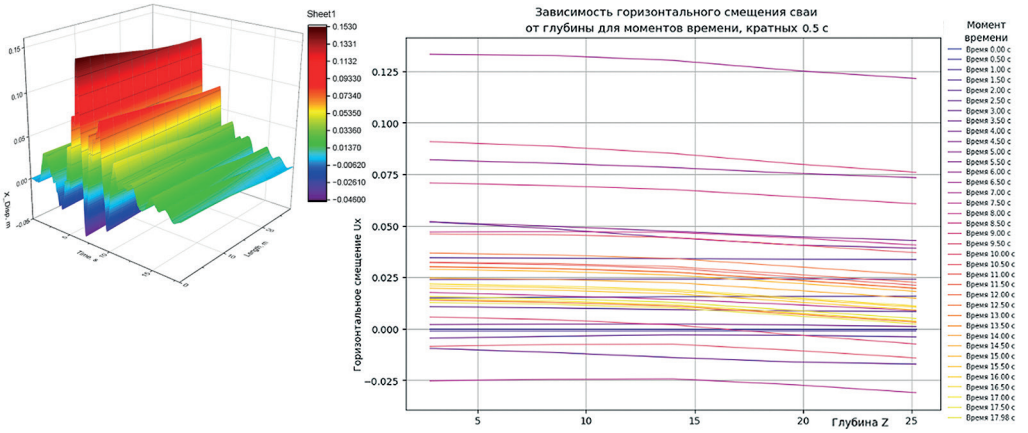


Рис. 6. Поверхность горизонтального перемещения конструкции в координатах времени и вертикальной координаты (слева) и полиномиальный закон перемещения сваи, выведенные каждые 0,5 с (справа) (составлено авторами)
Fig. 6. The surface of the structure's horizontal displacement in time and vertical coordinates (left) and the polynomial displacement law of the pile, plotted every 0.5 seconds (right) (compiled by the authors)

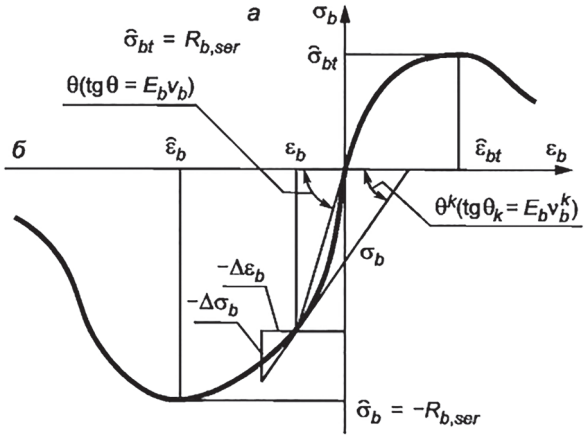


Рис. 7. Диаграмма деформирования бетона (СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»)
Fig. 7. Concrete strain-stress diagram

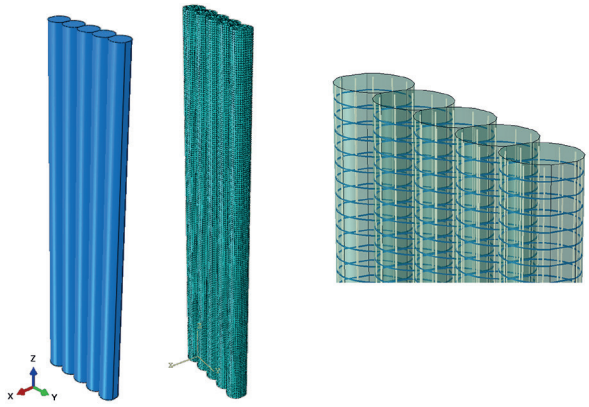


Рис. 8. Общий вид расчетной модели и сетка конечных элементов (составлено авторами)
Fig. 8. General view of the computational model and the finite element mesh (compiled by the authors)

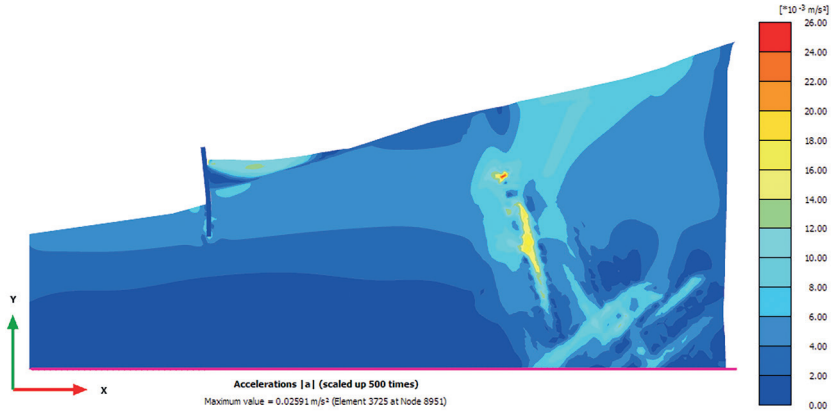


Рис. 9. Изополя ускорений в массиве в момент времени t = 4,15 с (составлено авторами)
Fig. 9. Acceleration isopoles in the array at time t = 4.15 s (compiled by the authors)

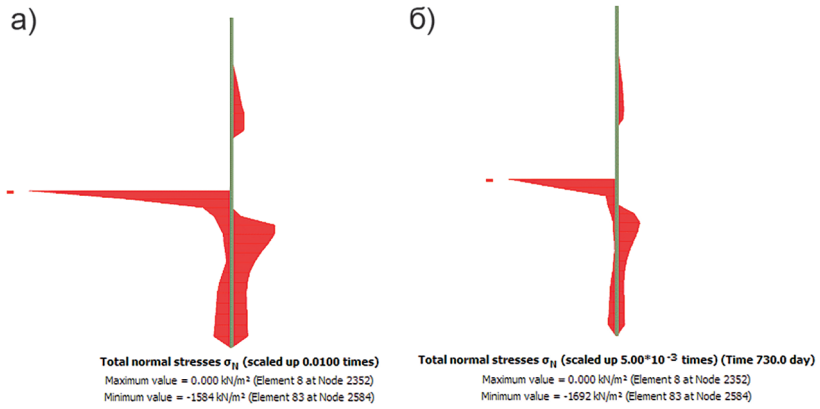


Рис. 10. Напряжения на контакте между СВГ и грунтом без учета (а) и с учетом (б) ползучести. Напряжение увеличилось с 1584 кПа до 1692 кПа (составлено авторами)

Fig. 10. Stresses at the interface between the diaphragm wall geosynthetic and the soil, without (a) and with (b) consideration of creep. The stress increased from 1,584 kPa to 1,692 kPa (compiled by the authors)

сана модель диаграммы деформирования бетона (рис. 7), из анализа которой были определены расчетные параметры модели CDP. Таким образом, модель учитывает кривые упрочнения и разупрочнения как при сжатии, так и при растяжении. Также в модели задаются коэффициенты образования трещин в зависимости от пластических деформаций.

Арматура задана двухлинейной моделью деформирования с пределом текучести, соответствующему пределу текучести стали арматуры марки А500.

Общий вид расчетной схемы и сетка конечных элементов представлены на рис. 8 и 9. В Abaqus перемещения были приложены посредством задания граничных условий перемещений с по-

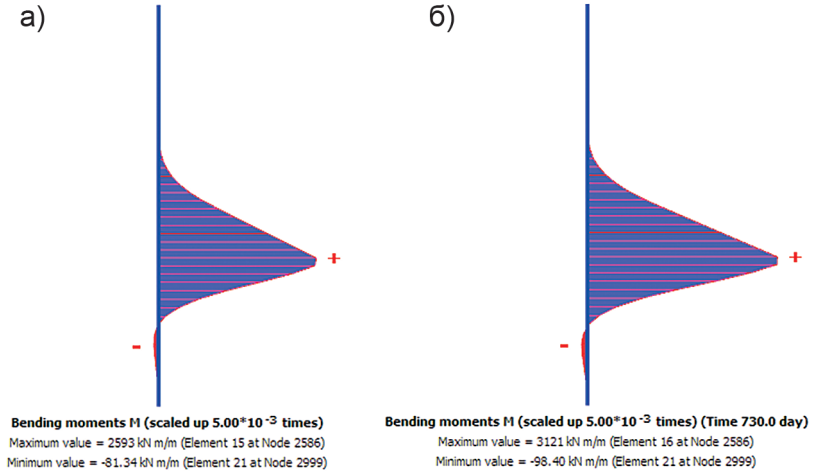


Рис. 11. Изгибные моменты СВГ без учета (а) и с учетом (б) ползучести. Максимальное значение изгибного момента при учете ползучести — порядка 3121 кН/м/м, в то время как при не учете ползучести повышается до 2593 кН/м/м (составлено авторами)

Fig. 11. Bending moments of the diaphragm wall without (a) and with (b) accounting for creep. The maximum bending moment when creep is taken into account is approximately 3,121 kN/m/m, whereas when creep is not taken into account, it increases to 2,593 kN/m/m (compiled by the authors)

мощью Subroutine DISP (каждые 0,5 с перемещения системы описывались соответствующим полиномом).

Обсуждение результатов

Результатом являются выведенные изополя распространения волн ускорения в массиве; контактные напряжения между стеной в грунте (далее — СВГ) и грунтом; а также усилия в конструкции.

На рис. 9 представлены изополя ускорений в массиве. Концентрация ускорений располагается в оползневом теле. На этапе до приложения сейсмического воздействия были выведены эпюры оползневого давления с учетом ползучести массива и без (нормальная составляющая напряжений на контакте грунт — подпорная конструкция). Результаты (см. рис. 10 и 11) свидетельствуют о том, что при учете реологии массива значения напряжений возрастают на 6,82%. Изгибные моменты возрастают на 20,97%.

Таким образом, неучет реологии массива может привести к занижению значений фактических напряжений на контакте грунт — подпорная конструкция.

Результаты динамического расчета с применением упругопластических моделей материалов конструкций

Модель Concrete Damaged Plasticity позволяет вывести изополя образования трещин в бетоне сваи (рис. 12) с помощью параметра DAMAGET.

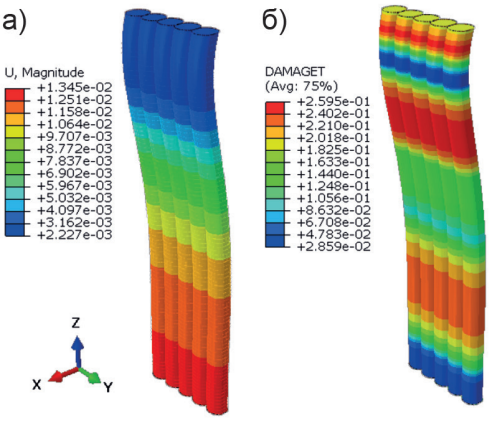


Рис. 12. Деформированная схема конструкции (а) и картина трещинообразования (б) (составлено авторами)

Fig. 12. Deformed structural diagram (a) and crack formation pattern (b) (compiled by the authors

Параметр DAMAGET (d_t) в модели CDP характеризует степень деградации жесткости бетона при растяжении вследствие образования и развития трещин:

$$0 \le d_t \le 1. \qquad (4)$$

На рис. 13 представлены графики зависимости главных напряжений в бетоне (минимальных и максимальных) от времени. На рис. 14 показан график зависимости показателя поврежденности DAMAGET от времени. Также такая постановка позволяет вывести пластические зоны в арматуре сваи (см. рис. 14).

Критерием отказа конструкции будет являться появление интенсивного трещинообразования в бетоне и нали-

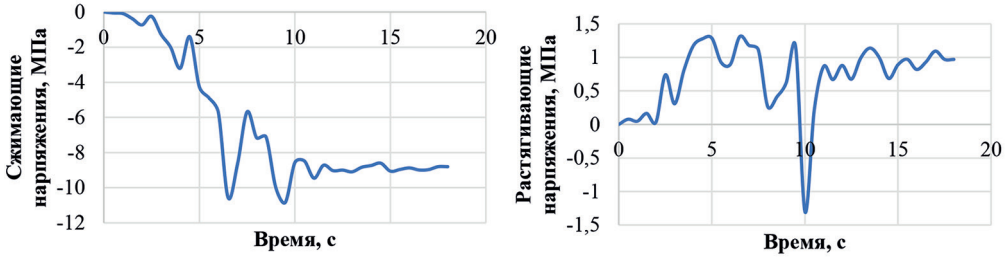


Рис. 13. График развития напряжений в бетоне (составлено авторами)

Fig. 13. Graph showing stress development in concrete (compiled by the authors)

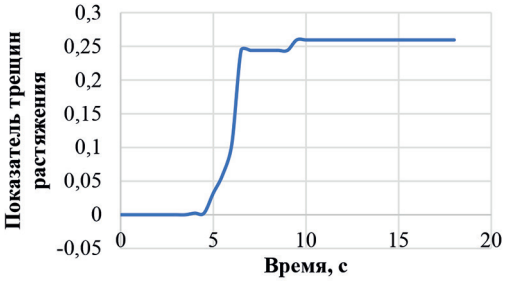


Рис. 14. График развития параметра DAMAGET (составлено авторами)
Fig. 14. Graph showing the evolution of the DAMAGET parameter (compiled by the authors)

чие пластических деформаций в арматуре.

Исходя из результатов расчета в прямой динамической постановке с учетом упругопластических свойств деформирования материалов (см. рис. 12 — 14), можно сделать вывод о том, что сейсмическое воздействие вызывает образование трещин в бетоне сваи, однако значение напряжений в арматуре не превышает предела текучести стали А500С (рис. 15).

Заключение

Проведенные исследования в рамках этой работы показали, что данные сооружения подвержены значительным воздействиям со стороны землетрясений и оползневых процессов, что может приводить к развитию пластических деформаций и повреждениям несущих элементов.

Применение современных численных методов моделирования в сочетании с полевыми наблюдениями позволило выявить критические зоны, закономерности развития деформаций и предельные состояния конструкций.

Таким образом, метод, объединяющий моделирование и натурные исследования, обеспечивает повышение надежности портальных сооружений и снижение рисков их повреждения под воздействием неблагоприятных геодинамических факторов.

В работе предложен метод прогноза напряженно-деформированного состояния припортальной подпорной конструк-

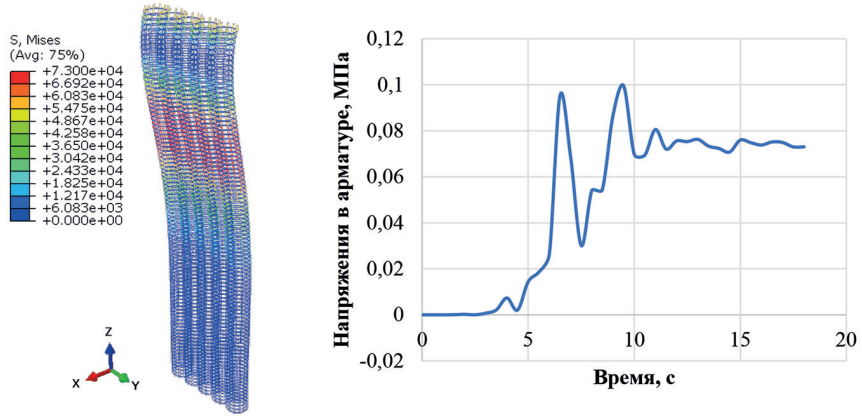


Рис. 15. Изополя напряжений в арматуре и график зависимости значения напряжений от времени (составлено авторами)
Fig. 15. Stress isopoles in the reinforcement and a graph showing the relationship between stress and time (compiled by the authors)

ции, учитывающий последовательное накопление деформаций ползучести в оползневом массиве, последующее сейсмическое воздействие с учетом нелинейного деформирования железобетонных элементов.

Реологические параметры грунта определялись методом ретроспективного анализа по данным мониторинга. Подобранные параметры модели Нортона обеспечили расчетное горизонтальное перемещение оползневого массива 24,16 мм за 365 сут при наблюдаемом значении 25 мм, что подтверждает возможность воспроизведения реологических процессов в откосе в численной модели.

Установлено, что ползучесть грунтового массива увеличивает максимальные контактные напряжения между грунтом и подпорной конструкцией с 1584 до 1692 кПа, или на 6,82 %, а также приводит к изменению и перераспределению изгибающих моментов примерно на 20%. Следовательно, исключение реологических процессов из расчета может привести к недостоверной оценке давления грунта и внутренних усилий в конструкции.

Для оценки поврежденности сооружения выполнен переход от задачи плоской деформации к пространственной модели посредством переноса полученных во времени перемещений конструкции. Расчет с применением модели повреждаемого бетона показал образование зон трещинообразования в свае, при этом напряжения в арматуре не достигли предела текучести стали А500С.

Научная новизна работы заключается в объединении калибровки реологической модели оползневого массива методом ретроспективного анализа, прямого динамического расчета и пространственного анализа повреждаемости железобетонной конструкции. Практическая значимость метода состоит в повышении достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния подпорных конструкций припортальных сооружений при сейсмических воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Protosenya A., Ivanov A.* Data-driven prediction of stress — strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models // Mining. 2026, vol. 6, no. 1, article 4. DOI: 10.3390/mining6010004.

2. *Протосеня А. Г., Вербило П. Э., Иванов А. А.* Оперативный прогноз устойчивости горных выработок с применением нейросетевого подхода // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 28—38. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-28-38.

3. *Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y.* Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks // Geotechnics. 2025, vol. 5, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.

4. *Trushko V. L., Baeva E. K., Blinov A. A.* Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal peninsula, Russian Arctic // Eng. 2025, vol. 6, article 76. DOI: 10.3390/eng6040076.

5. *Selikhov A. A., Karasev M. A., Petrushin V. V., Romanova E. L. Andreeva A. V., Biberin V. S., Kudashov E. S.* Features of modeling the mechanical response of crushed salt-based backfill material in potash mines // Eng. 2026, vol. 7, article 330. DOI: 10.3390/eng7070330.

6. *Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A.* Concrete damage plasticity model application to predict stress-strain behavior of waterproof strata in deep rock salt deposits // Preprints. 2026, 2026030207. DOI: 10.20944/preprints202603.0207.v1.

7. *Бельгелиль Ф., Фредж М., Саадун А., Букарм Р.* Анализ обрушения бортов на железорудном карьере Уэнса в Северо-Восточном Алжире методом конечных элементов: причины и выводы для контроля устойчивости // Записки Горного института. — 2024. — Т. 268. — С. 576—587.

8. *Коршунов В. А., Павлович А. А., Бажуков А. А.* Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 606—618. DOI: 10.31897/PMI.2023.16

9. *Song D.-B., Lou K., Yin J.-H., Fox P. J., Chen W.-B.* A finite strain elastic-viscoplastic consolidation model for layered soft soils considering self-weight and nonlinear creep // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2023, vol. 149, no. 12, article 04023121. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-11576.

10. *Song D.-B., Lou K., Chen W.-B., Wu P.-C., Yin J.-H.* Finite strain elastic visco-plastic consolidation model for layered soils with vertical drain considering self-weight loading and nonlinear creep // Computers and Geotechnics. 2024, vol. 169, article 106180. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106180.

11. *Thiyyakkandi S., Shankar P.* Active earth pressure on retaining walls with sloping backfill considering arching effect under rotation about base // Innovative Infrastructure Solutions. 2022, vol. 7, article 126. DOI: 10.1007/s41062-021-00724-5.

12. *Akbar M., Pan H., Huang J., Arshid M. U., Khan Q. U. Z., Ou G., Ahmed B.* Seismic response comparison of various geogrid reinforced earth-retaining walls: based on shaking table and 3D FE analysis // Scientific Reports. 2024, vol. 14, article 24168. DOI: 10.1038/s41598-024-64203-4.

13. *Tiwari R., Lam N.* Modelling of seismic actions in earth retaining walls and comparison with shaker table experiment // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021, vol. 150, article 106939. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106939.

14. *Carbonell J. M., Monforte L., Ciantia M. O., Arroyo M., Gens A.* Geotechnical particle finite element method for modeling of soil-structure interaction under large deformation conditions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 967 – 983. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.12.006.

15. *Khan S. A., Karray M., Paultre P.* Seismic behavior of retaining walls: A critical review of analytical and field performance studies // Geotechnics. 2024, vol. 4, no. 1, pp. 54 – 77. DOI: 10.3390/geotechnics4010004.

16. *Que Y., Long C.-C., Chen F.-Q.* Slip line solution for active earth pressure of retaining walls with relief shelves subjected to base rotation // International Journal of Geomechanics. 2023, vol. 23, no. 10, article 04023176. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-8540.

17. *Brown M., Burland J., Chapman T., Higgins K., Skinner H., Toll D.* (eds.). ICE Manual of Geotechnical Engineering. Vol. I: Geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation. 2nd ed. London: ICE Publishing, 2023. DOI: 10.1680/icemge.66816.

18. *Brown M., Burland J., Chapman T., Higgins K., Skinner H., Toll D.* (eds.). ICE Manual of Geotechnical Engineering. Vol. II: Geotechnical design, construction and verification. 2nd ed. London: ICE Publishing, 2023. DOI: 10.1680/icemge.66830.

19. *Dinkler D., Kowalsky U.* Introduction to finite element methods. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. DOI: 10.1007/978-3-658-42742-9.

20. *Qasem M., Hasan M., Muhamad R., Chin C.-L., Alanazi N.* Generalised calibration and optimization of concrete damage plasticity model for finite element simulation of cracked reinforced concrete structures // Results in Engineering. 2025, vol. 25, article 103905. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103905.

21. *Trad R., Mroueh H., Bian H., Cormery F.* Synthesis of numerical methods for the design of segmental tunnel lining // MATEC Web of Conferences. 2019, vol. 295, article 03008. DOI: 10.1051/matecconf/201929503008.

22. *Chen G., Yu H.* Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel portal section subjected to SH waves considering wedge topography effect // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2025, vol. 195, article 109448. DOI: 10.1016/j.soildyn.2025.109448.

23. *Cui G., Ma J.* Shaking table test on the seismic response of the portal section in soft and hard rock junction // Science Progress. 2021. DOI: 10.1177/00368504211031393.

24. *Xu H., Sun R., Li T., Yan Q., Cui Y.* Seismic behavior of mountain tunnel portal by shaking table tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2026. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.07.035.

25. *Wang Q., Geng P., Chen C., Chen J., He C.* Determination of seismic response of reinforced tunnel portal slope using shaking table tests // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023, vol. 136, article 105072. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105072.

26. *Sun W., Yan S., Ma Q., Liang Q., Ou E., Cao X., Wang J., Luo X.* Dynamic response characteristics and failure mode of a bias loess tunnel using a shaking table model test // Transportation Geotechnics. 2021, vol. 31, article 100659. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100659.

27. *Wen H., Yang C., Hou B., Chen G., Wang Z., Lian J., Su K., Li X.* Seismic damage evolution and dynamic characteristics of the surrounding rock in tunnel portal anti-dip slopes reinforced with frame beams // Scientific Reports. 2026, vol. 16, article 6480. DOI: 10.1038/s41598-026-37208-4.

28. *Zhang X., Jiang Y., Sugimoto S.* Seismic damage assessment of mountain tunnel: A case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 71, pp. 138—148. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.019.

29. *Andreotti G., Lai C. G.* Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 91, article 103008. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103008.

30. *Рысин А. И., Откупщикова И. А., Лебедева А. М., Нуртдинов А. С.* Оценка влияния закладочного материала на выбор параметров ведения очистных работ на соляных месторождениях // Горный журнал. — 2025. — № 11. DOI: 10.17580/gzh.2025.11.01.

31. *Вербило П. Э., Карасев М. А., Шишкина В. С.* Прогноз геомеханического состояния структурно нарушенных породных целиков с учетом запредельного их деформирования // Горный журнал. — 2025. — № 3. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.

32. *Котиков Д. А., Веселова А. В., Романова Е. Л., Деменков П. А.* Анализ факторов потери устойчивости крепи вертикального ствола при длительной эксплуатации в условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11-1. — С. 57—80. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_57.

33. *Рысин А. И., Лебедева А. М., Откупщикова И. А., Нуртдинов А. С.* Закономерности изменения прочностных параметров соляных пород вследствие повышения содержания галопелитов // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 19—27. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.03.

34. *Синегубов В. Ю.* Ретрополяционное прогнозирование уровня горнотехнических условий на глубоких горизонтах месторождения Олений Ручей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 9. — С. 15—35. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_15.

35. *Синегубов В. Ю.* Разработка комплексного подхода к прогнозу напряженного состояния породного массива и апробация на месторождении Олений Ручей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 2 (168). — С. 68—79. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79.

36. *Волохов Е. М., Кожухарова В. К., Зеленцов С. Н., Мукминова Д. З., Исаев А. А.* Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. — 2025. — Т. 276. — № 1. — С. 16—29. ГИАБ

REFERENCES

1. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress—strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models. *Mining*. 2026, vol. 6, no. 1, article 4. DOI: 10.3390/mining6010004.

2. Protosenya A. G., Verbilo P. E., Ivanov A. A. Rapid prediction of mine working stability using a neural network approach. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 28—38. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-28-38.

3. Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y. Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks. *Geotechnics*. 2025, vol. 5, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.

4. Trushko V. L., Baeva E. K., Blinov A. A. Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal peninsula, Russian Arctic. *Eng*. 2025, vol. 6, article 76. DOI: 10.3390/eng6040076.

5. Selikhov A. A., Karasev M. A., Petrushin V. V., Romanova E. L. Andreeva A. V., Biberin V. S., Kudashov E. S. Features of modeling the mechanical response of crushed salt-based backfill material in potash mines. *Eng*. 2026, vol. 7, article 330. DOI: 10.3390/eng7070330.

6. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. *Concrete damage plasticity model application to predict stress-strain behavior of waterproof strata in deep rock salt deposits*. Preprints. 2026, 2026030207. DOI: 10.20944/preprints202603.0207.v1.

7. Belgueliel F., Fredj M., Saadoun A., Boukarm R. Finite element analysis of slope failure in Ouenza open-pit iron mine, NE Algeria: Causes and lessons for stability control. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 268, pp. 576—587. [In Russ].

8. Korshunov V. A., Pavlovich A. A., Bazhukov A. A. Evaluation of the shear strength of rocks by cracks based on the results of testing samples with spherical indentors. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 606—618. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.16

9. Song D.-B., Lou K., Yin J.-H., Fox P. J., Chen W.-B. A finite strain elastic-viscoplastic consolidation model for layered soft soils considering self-weight and nonlinear creep. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2023, vol. 149, no. 12, article 04023121. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-11576.

10. Song D.-B., Lou K., Chen W.-B., Wu P.-C., Yin J.-H. Finite strain elastic visco-plastic consolidation model for layered soils with vertical drain considering self-weight loading and nonlinear creep. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 169, article 106180. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106180.

11. Thiyyakkandi S., Shankar P. Active earth pressure on retaining walls with sloping backfill considering arching effect under rotation about base. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022, vol. 7, article 126. DOI: 10.1007/s41062-021-00724-5.

12. Akbar M., Pan H., Huang J., Arshid M. U., Khan Q. U. Z., Ou G., Ahmed B. Seismic response comparison of various geogrid reinforced earth-retaining walls: based on shaking table and 3D FE analysis. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 24168. DOI: 10.1038/s41598-024-64203-4.

13. Tiwari R., Lam N. Modelling of seismic actions in earth retaining walls and comparison with shaker table experiment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021, vol. 150, article 106939. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106939.

14. Carbonell J. M., Monforte L., Ciantia M. O., Arroyo M., Gens A. Geotechnical particle finite element method for modeling of soil-structure interaction under large deformation conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 967 — 983. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.12.006.

15. Khan S. A., Karray M., Paultre P. Seismic behavior of retaining walls: A critical review of analytical and field performance studies. *Geotechnics*. 2024, vol. 4, no. 1, pp. 54 — 77. DOI: 10.3390/geotechnics4010004.

16. Que Y., Long C.-C., Chen F.-Q. Slip line solution for active earth pressure of retaining walls with relief shelves subjected to base rotation. *International Journal of Geomechanics*. 2023, vol. 23, no. 10, article 04023176. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-8540.

17. Brown M., Burland J., Chapman T., Higgins K., Skinner H., Toll D. (eds.). *ICE Manual of Geotechnical Engineering. Vol. I: Geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation*. 2nd ed. London: ICE Publishing, 2023. DOI: 10.1680/icemge.66816.

18. Brown M., Burland J., Chapman T., Higgins K., Skinner H., Toll D. (eds.). *ICE Manual of Geotechnical Engineering. Vol. II: Geotechnical design, construction and verification*. 2nd ed. London: ICE Publishing, 2023. DOI: 10.1680/icemge.66830.

19. Dinkler D., Kowalsky U. *Introduction to finite element methods*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. DOI: 10.1007/978-3-658-42742-9.

20. Qasem M., Hasan M., Muhamad R., Chin C.-L., Alanazi N. Generalised calibration and optimization of concrete damage plasticity model for finite element simulation of cracked reinforced concrete structures. *Results in Engineering*. 2025, vol. 25, article 103905. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103905.

21. Trad R., Mroueh H., Bian H., Cormery F. Synthesis of numerical methods for the design of segmental tunnel lining. *MATEC Web of Conferences*. 2019, vol. 295, article 03008. DOI: 10.1051/matecconf/201929503008.

22. Chen G., Yu H. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel portal section subjected to SH waves considering wedge topography effect. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025, vol. 195, article 109448. DOI: 10.1016/j.soildyn.2025.109448.

23. Cui G., Ma J. Shaking table test on the seismic response of the portal section in soft and hard rock junction. *Science Progress*. 2021. DOI: 10.1177/00368504211031393.

24. Xu H., Sun R., Li T., Yan Q., Cui Y. Seismic behavior of mountain tunnel portal by shaking table tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2026. DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.07.035.

25. Wang Q., Geng P., Chen C., Chen J., He C. Determination of seismic response of reinforced tunnel portal slope using shaking table tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 136, article 105072. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105072.

26. Sun W., Yan S., Ma Q., Liang Q., Ou E., Cao X., Wang J., Luo X. Dynamic response characteristics and failure mode of a bias loess tunnel using a shaking table model test. *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 31, article 100659. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100659.

27. Wen H., Yang C., Hou B., Chen G., Wang Z., Lian J., Su K., Li X. Seismic damage evolution and dynamic characteristics of the surrounding rock in tunnel portal anti-dip slopes reinforced with frame beams. *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, article 6480. DOI: 10.1038/s41598-026-37208-4.

28. Zhang X., Jiang Y., Sugimoto S. Seismic damage assessment of mountain tunnel: A case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 71, pp. 138–148. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.019.

29. Andreotti G., Lai C. G. Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 91, article 103008. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103008.

30. Rysin A. I., Otkupshchikova I. A., Lebedeva A. M., Nurtdinov A. S. Effect of backfill material on selection of stoping system parameters at salt deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 11. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.11.01.

31. Verbilo P. E., Karasev M. A., Shishkina V. S. Geomechanical state of jointed rock pillar with the account of softening behavior. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.

32. Kotikov D. A., Veselova A. V., Romanova E. L., Demenkov P. A. Analysis of factors of stability loss of vertical shaft lining during long-term operation in the Far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 11-1, pp. 57–80. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_57.

33. Rysin A. I., Lebedeva A. M., Otkupshchikova I. A., Nurtdinov A. S. Strength variation patterns in salt rocks owing to increased halopelite content. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 19–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.03.

34. Sinegubov V. Yu. Backcasting of geotechnical conditions at deep levels of the Oleniy Ruchey deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 9, pp. 15–35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_15.

35. Sinegubov V. Yu. Development of a comprehensive approach to predicting the stress state of the rock mass and testing it at the Oleniy Ruchey deposit. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025, no. 2 (168), pp. 68–79. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79.

36. Volohov E. M., Kozhukharova V. K., Zelentsov S. N., Mukminova D. Z., Isaev A. A. Assessment of interaction effects between the foundation and the base using numerical simulation methods for conditions of undermining the Mariinskii Theatre building in Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 276, no. 1, pp. 16–29. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляков Никита Андреевич[1] – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: BelyakovNA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9754-501X,
Потемкин Дмитрий Александрович[1] – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: PotemkinDA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3129-3865,
Пягай Павел Валерьевич[1] – аспирант, e-mail: ppyagai@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0003-7657-5513,
[1] Санкт Петербургский горный университет Императрицы Екатерины II.
Для контактов: Пягай П.В., e-mail: ppyagai@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Belyakov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: BelyakovNA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-9754-501X,
D.A. Potemkin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: PotemkinDA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-3129-3865,
P.V. Piagai [1], Graduate Student, e-mail: ppyagai@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0003-7657-5513,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: P.V. Piagai, e-mail: ppyagai@gmail.com.

Получена редакцией 15.05.2026; получена после рецензии 01.08.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 15.05.2026; received after the review 01.08.2026; accepted for printing 10.11.2026.