

УДК 624.138.24:550.348.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-167-178

*М.В. СОКОЛОВ, С.М. ПРОСТОВ, О.В. ГЕРАСИМОВ,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева*

ПРОГНОЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Объектом исследования является прогноз сейсмостойкости при укреплении грунтовых оснований сооружений.

Цель работы заключается в численной оценке суммарного приращения сейсмической интенсивности при искусственном преобразовании и укреплении грунтов основания на основе результатов геомеханического моделирования.

Исследование базируется на классических математических методах моделирования грунтовых оснований в плоской нелинейной постановке.

Представлен новый подход к определению суммарного приращения сейсмической интенсивности, основанный на определении отношения величин оседаний фундаментов зданий и сооружений до и после работ по укреплению грунтов. В работе представлены результаты прогноза изменения сейсмостойкости для реальных объектов, полученные по данным инженерно-геологических изысканий и численным компьютерным моделям.

Установлено, что за счет преобразования грунтовых оснований сейсмостойкость может снижаться более чем на 0,5 балла. Данная методика может быть применена для корректировки балльности как для отдельных объектов, так и уточнения границ сейсмических зон на картах ОСР.

Ключевые слова: грунтовые основания; сейсмостойкость; приращение сейсмической интенсивности; укрепление грунтов; численное моделирование.

Для цитирования: Соколов М.В., Простов С.М., Герасимов О.В. Прогноз сейсмостойкости сооружений по результатам численного моделирования деформационных свойств грунтовых оснований // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 167–178.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-167-178

*M.V. SOKOLOV, S.M. PROSTOV, O.V. GERASIMOV,
Gorbachev Kuzbass State Technical University*

NUMERICAL SIMULATION OF SUBGRADE SOIL DEFORMATION PROPERTIES FOR PREDICTION OF EARTHQUAKE RESISTANCE OF STRUCTURES

Purpose: The aim of this paper is to predict the earthquake resistance in strengthening the subgrade soils of structures. Numerical simulation of the total increment of seismic intensity during the artificial transformation and strengthening of subgrade soils based on geomechanical modeling. **Research methods:** Classical mathematical methods for modeling subgrade soils in a plane nonlinear problem. **Originality:** A new approach is developed to determine the total increment of seismic intensity using the ratio between the subsidence values of building foundations and structures before and after soil strengthening. The paper presents the prediction results of changes in seismic resistance of real objects, based on engineering and geologi-

cal surveys and numerical computer models. It is shown that due to the transformation of subgrade soils, the earthquake resistance can be reduced by more than 0.5 points. **Practical implication:** This technique can be used to adjust the score for individual objects and map the boundaries of seismic zones.

Keywords: subgrade soil; earthquake resistance; seismic intensity increment; soil strengthening; numerical simulation.

For citation: Sokolov M.V., Prostov S.M., Gerasimov O.V. Prognostic seismicity of structures on the basis of numerical simulation of subgrade soil deformation properties for prediction of earthquake resistance of structures. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 3. Pp. 167–178.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-167-178

Сейсмичность Кузбасса имеет смешанный природно-техногенный характер, при этом количество слабых сейсмических событий продолжает увеличиваться. Основной причиной роста техногенной сейсмичности является активная разработка полезных ископаемых. В Кемеровской области работают 120 предприятий угольной промышленности, в т. ч. эксплуатируются 58 шахт и 36 предприятий открытой добычи [1–5]. До 2000 г. Кузбасс по сейсмическому районированию относился в основном к территории с сейсмичностью не более 6 баллов, что не предусматривало проведения специальных антисейсмических мероприятий при строительстве. По принятым нормам здания проектируются и строятся сейсмостойкими на территориях, имеющих сейсмоопасность 7 баллов и выше, согласно СП 14.13330.2014. Переоценка сейсмической опасности территории области привела к росту балльности региона. Применение антисейсмических мер увеличивает стоимость строительства зданий и сооружений в среднем на 30–40 %. Ситуацию осложняет распространённость слабых обводнённых грунтов, при наличии которых сейсмичность повышается на дополнительный балл. Сейсмическое воздействие на здание на площадке с сейсмичностью в 7 баллов в 2 раза превышает 6-балльное, в свою очередь, на 8-балльных площадках это воздействие в 2 раза превышает 7-балльное и т. д.

Уменьшение коэффициента сейсмической опасности в настоящее время является важной и актуальной социально-экономической задачей. Одним из способов добиться этого является уплотнение грунтов. Для управления состоянием грунтовых массивов существует целый ряд физических и физико-химических методов, направленных на преобразование грунтов с целью увеличения плотности, снижения пористости, упрочнения скелета. На территории Кузбасса наиболее перспективными стали методы напорной инъекции цементно-песчаных растворов и электрохимического закрепления [6–8].

Проектирование укрепляемых грунтовых оснований ставит новые задачи, недоступные для классических аналитических методов, связанные с необходимостью рассмотрения анизотропного неоднородного основания. Решением этой проблемы является численное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов, основанное, в частности, на

методах численных расчетов. При этом достаточно точно учитывается реальное неоднородное строение грунтового массива, что дает более точное представление об его деформациях [9, 10].

Цель работы заключается в численной оценке суммарного приращения сейсмической интенсивности при искусственном преобразовании и укреплении грунтов основания на основе результатов геомеханического моделирования.

В соответствии с СП 14.13330.2014 сейсмичность района строительства определяется двумя величинами: исходной балльностью, устанавливаемой по картам ОСР-1 или ОСР-2, и дополнительным приращением сейсмической интенсивности ΔI , зависящим от различий физико-механических свойств грунтов по отношению к условиям, принятым за эталонные.

Величину ΔI определяют методом сейсмических интенсивностей, согласно РСН 65–87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ» и [11, 12]:

$$\Delta I = \Delta I_{\Gamma} + \Delta I_{\text{в}}, \quad (1)$$

где ΔI – суммарное приращение сейсмической интенсивности (в баллах) относительно исходной балльности; ΔI_{Γ} – приращение сейсмической интенсивности за счет различия грунтовых условий; $\Delta I_{\text{в}}$ – приращение сейсмической интенсивности за счет изменения уровня грунтовых вод.

Оценку различия грунтовых условий проводят по отношениям акустических и плотностных свойств грунтов:

$$\Delta I_{\Gamma} = 1,67 \lg \left(\frac{V_{\text{сз}} \cdot \rho_{\text{э}}}{V_{\text{си}} \cdot \rho_{\text{и}}} \right), \quad (2)$$

где $V_{\text{сз}}$, $V_{\text{си}}$ – средневзвешенные значения скоростей распространения поперечных волн на эталонном и изучаемом участках; $\rho_{\text{э}}$, $\rho_{\text{и}}$ – средневзвешенные значения плотностей грунтов на эталонном и изучаемом участках.

Величина $\Delta I_{\text{в}}$ определяется по формуле

$$\Delta I_{\text{в}} = k \cdot e^{-0,04h^2}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от грунтовых условий; h – положение уровня грунтовых вод, м.

Рассмотрим возможность изменения параметров сейсмичности путем управления физико-механическими свойствами грунтовых оснований сооружений с применением комплекса геотехнических методов.

Снижение величины $\Delta I_{\text{в}}$ достигается понижением уровня грунтовых вод методами технической мелиорации.

Для оценки возможности управления величиной ΔI_{Γ} воспользуемся уравнением скорости поперечных упругих колебаний

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho(1 + \nu)}}, \quad (4)$$

где E – модуль деформации, МПа; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность, кг/м³.

Подставив величину скоростей V_s в уравнение (2), получим

$$\Delta I_r = 1,67 \lg \left(\sqrt{\frac{E_e \cdot 2\rho_n (1 + \nu_n)}{2\rho_e (1 + \nu_e) E_n}} \frac{\rho_e}{\rho_n} \right) = 0,835 \lg \left(\frac{E_e}{E_n} \frac{1 + \nu_n}{1 + \nu_e} \frac{\rho_e}{\rho_n} \right). \quad (5)$$

Опыт геолого-геофизического мониторинга процессов улучшения строительных свойств грунтов методами напорной инъекции и электрохимического закрепления позволил установить следующее [13]:

– повышение деформационных свойств грунтов обеспечивается в значительной мере не за счет их уплотнения, а в результате увеличения жесткости скелета грунта, таким образом, существует взаимосвязь $\rho_n = \rho_e \cdot k_1$, где k_1 – коэффициент уплотнения грунтов при заполнении пор укрепляющим раствором, $k_1 = 1,1–1,25 = \text{const}$;

– по экспериментальным данным в упрочненных грунтах не происходит заметного увеличения коэффициента поперечных деформаций, а значит, $\nu_n = \nu_e \cdot k_2$, где k_2 – коэффициент, учитывающий увеличение поперечных деформаций, $k_2 = 1,1–1,15$;

– поскольку после воздействия на грунтовое основание нагрузка на него (давление) не изменилась, а за глубину распространения деформации принимают размер сжимаемой толщи основания, соотношение модулей деформаций обратно пропорционально отношению абсолютных значений смещений (оседаний).

На основании изложенного уравнение (5) будет иметь вид

$$\Delta I = \Delta I_r = 0,835 \lg \left(\frac{S_n}{S_e} \frac{1}{K} \right), \quad (6)$$

где S_n , S_e – соответственно оседания основания исследуемого и эталонного объектов; K – постоянная, комплексно учитывающая величины коэффициентов k_1 и k_2 .

Параметры физико-механических свойств грунтового основания можно определить с помощью геолого-геофизических изысканий, которые требуют значительных затрат. Однако с достаточной точностью изыскания можно выполнить с помощью математических моделей напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований сооружений. Следует отметить, что данный подход позволяет сделать геомеханический прогноз не только по усредненным параметрам, входящим в уравнение (6), но и по наиболее слабому участку основания.

Описанная выше методика реализована на двух строительных объектах. В полном объеме технология укрепительных работ, результаты инженерно-геологических изысканий и моделирования геомеханического состояния укрепляемых грунтовых массивов изложены в работах [14, 15].

Территория первого объекта (рис. 1, а) характеризуется спланированным рельефом, имеющим абсолютные отметки поверхности от 128,3 до 128,6 м. Сооружение высотой в 5 этажей имеет в плане Г-образную форму, с максимальными размерами 53,0×40,4 м, наличием эксплуатируемого подвала и холодного чердака. Фундаменты здания бетонные и бутовые с переменной глубиной заложения до 4,9 м.

По данным инженерно-геологических изысканий (рис. 1, б), отмечено сложное геологическое строение грунтового основания, включающее 4 основные инженерно-геологические разновидности грунтов, представленные в табл. 1.

Особенностью строения грунтового основания сооружения является наличие водонасыщенных грунта и включений с низкими деформационными свойствами.

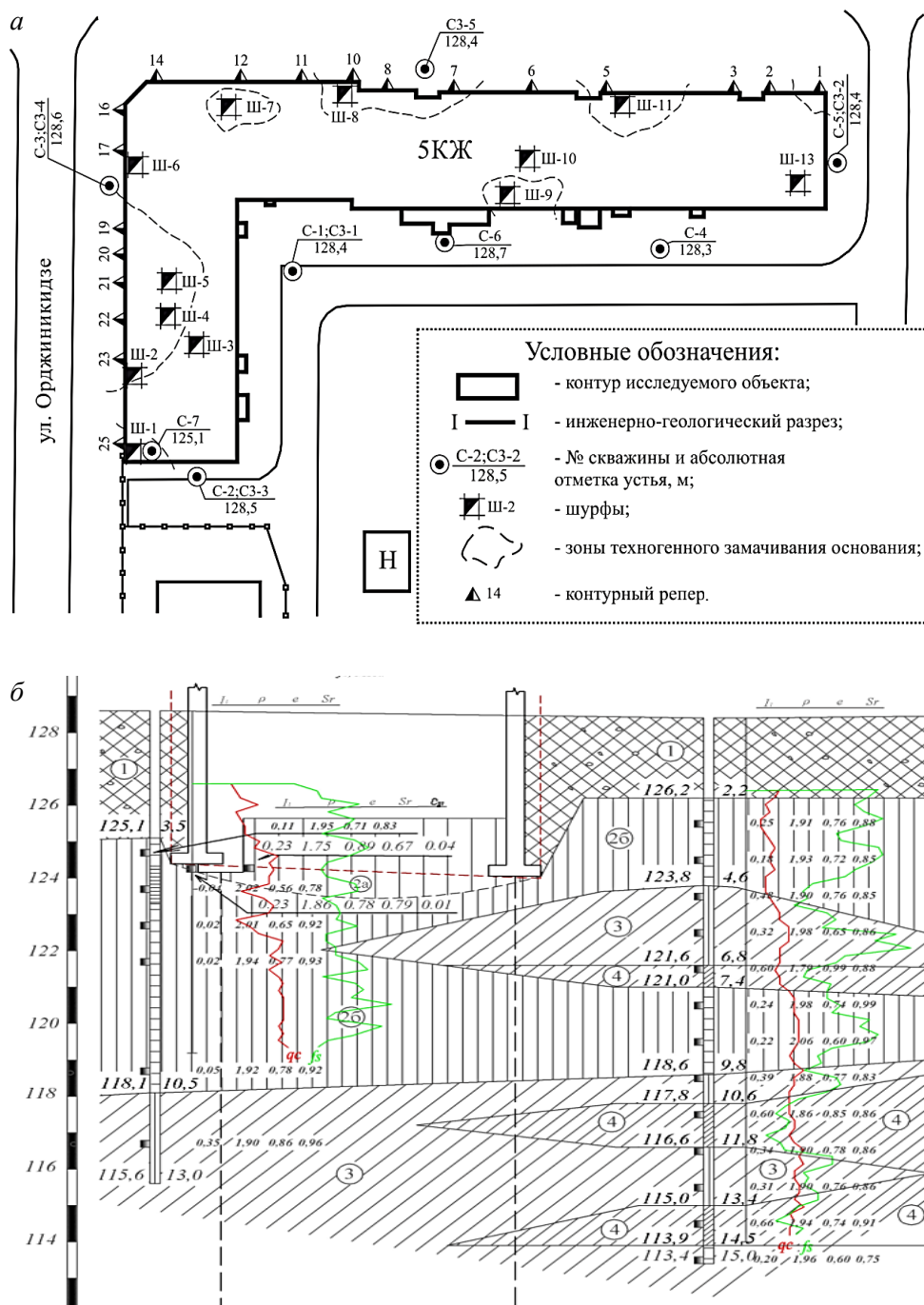


Рис. 1. План-схема здания (а) и инженерно-геологический разрез (б):
1-4 – инженерно-геологические элементы

Таблица 1

Сводная таблица механических свойств инженерно-геологических элементов

| Наименование физико-механических свойств | Номер инженерно-геологического элемента (ИГЭ) | | | | |
|---|---|--------------|--------------|--------------|-----------|
| | ИГЭ-1 | ИГЭ-2а | ИГЭ-2б | ИГЭ-3 | ИГЭ-4 |
| 1. Природная плотность ρ , г/см ³ : в естественном состоянии в замоченном состоянии | 1,90 – | 1,77 1,87 | 1,94 1,79 | 1,91 1,88 | 1,89 – |
| 2. Угол внутреннего трения φ , град: в естественном состоянии в замоченном состоянии | 18 – | 14 10 | 17 12 | 13 12 | 13 – |
| 3. Удельное сцепление C , кПа: в естественном состоянии в замоченном состоянии | 10 – | 23 10 | 30 12 | 17 12 | 15 – |
| 4. Модуль деформации E , МПа: в естественном состоянии в замоченном состоянии | 15,0 – | 11,2 5,6 | 23,0 16,7 | 9,0 8,1 | 7,4 – |

В результате прогноза геомеханического состояния грунтового основания данного здания получены графики оседаний S грунтового основания вдоль продольных осей северного и западного фасадов здания (рис. 2) для базовых (рис. 3, а, б) и локальных (рис. 3, в) геомеханических моделей до и после работ по закреплению грунтов. При моделировании искусственного массива учитывалась разработанная компанией ООО «НООЦЕНТР» схема закрепления (рис. 3, з) [14].

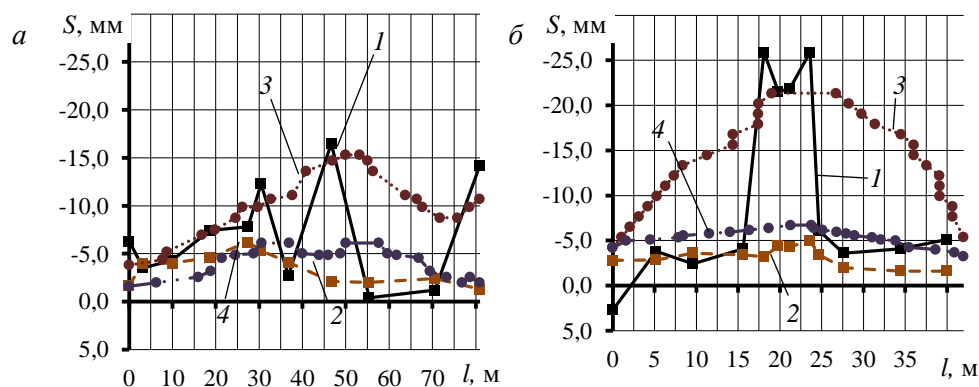
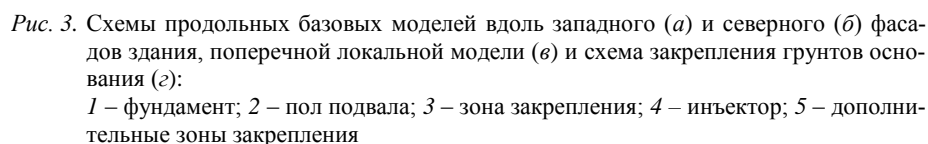


Рис. 2. Распределение вертикальных оседаний S вдоль продольных осей северного (а) и западного (б) фасадов здания:

1 – фактические значения до закрепления; 2 – фактические значения после закрепления; 3 – прогнозируемые значения до закрепления; 4 – прогнозируемые значения после закрепления



This technical drawing shows a detailed plan of a road layout. The drawing includes several rectangular areas, likely representing buildings or specific road sections, and various lines indicating roads, paths, and boundaries. Key labels include 'III-1', 'III-2', 'III-3', and 'III-4' which appear to be stationing or section markers. Dimensions are provided in meters (e.g., 140.04, 139.8, 140.2, 140.3, 140.1, 140.5, 139.7, 139.87, 140.0, 140.1, 140.2, 140.3, 140.4, 140.5, 140.6, 140.7, 140.8, 140.9, 141.0, 141.1, 141.2, 141.3, 141.4, 141.5, 141.6, 141.7, 141.8, 141.9, 142.0, 142.1, 142.2, 142.3, 142.4, 142.5, 142.6, 142.7, 142.8, 142.9, 143.0, 143.1, 143.2, 143.3, 143.4, 143.5, 143.6, 143.7, 143.8, 143.9, 144.0, 144.1, 144.2, 144.3, 144.4, 144.5, 144.6, 144.7, 144.8, 144.9, 145.0, 145.1, 145.2, 145.3, 145.4, 145.5, 145.6, 145.7, 145.8, 145.9, 146.0, 146.1, 146.2, 146.3, 146.4, 146.5, 146.6, 146.7, 146.8, 146.9, 147.0, 147.1, 147.2, 147.3, 147.4, 147.5, 147.6, 147.7, 147.8, 147.9, 148.0, 148.1, 148.2, 148.3, 148.4, 148.5, 148.6, 148.7, 148.8, 148.9, 149.0, 149.1, 149.2, 149.3, 149.4, 149.5, 149.6, 149.7, 149.8, 149.9, 150.0, 150.1, 150.2, 150.3, 150.4, 150.5, 150.6, 150.7, 150.8, 150.9, 151.0, 151.1, 151.2, 151.3, 151.4, 151.5, 151.6, 151.7, 151.8, 151.9, 152.0, 152.1, 152.2, 152.3, 152.4, 152.5, 152.6, 152.7, 152.8, 152.9, 153.0, 153.1, 153.2, 153.3, 153.4, 153.5, 153.6, 153.7, 153.8, 153.9, 154.0, 154.1, 154.2, 154.3, 154.4, 154.5, 154.6, 154.7, 154.8, 154.9, 155.0, 155.1, 155.2, 155.3, 155.4, 155.5, 155.6, 155.7, 155.8, 155.9, 156.0, 156.1, 156.2, 156.3, 156.4, 156.5, 156.6, 156.7, 156.8, 156.9, 157.0, 157.1, 157.2, 157.3, 157.4, 157.5, 157.6, 157.7, 157.8, 157.9, 158.0, 158.1, 158.2, 158.3, 158.4, 158.5, 158.6, 158.7, 158.8, 158.9, 159.0, 159.1, 159.2, 159.3, 159.4, 159.5, 159.6, 159.7, 159.8, 159.9, 160.0, 160.1, 160.2, 160.3, 160.4, 160.5, 160.6, 160.7, 160.8, 160.9, 161.0, 161.1, 161.2, 161.3, 161.4, 161.5, 161.6, 161.7, 161.8, 161.9, 162.0, 162.1, 162.2, 162.3, 162.4, 162.5, 162.6, 162.7, 162.8, 162.9, 163.0, 163.1, 163.2, 163.3, 163.4, 163.5, 163.6, 163.7, 163.8, 163.9, 164.0, 164.1, 164.2, 164.3, 164.4, 164.5, 164.6, 164.7, 164.8, 164.9, 165.0, 165.1, 165.2, 165.3, 165.4, 165.5, 165.6, 165.7, 165.8, 165.9, 166.0, 166.1, 166.2, 166.3, 166.4, 166.5, 166.6, 166.7, 166.8, 166.9, 167.0, 167.1, 167.2, 167.3, 167.4, 167.5, 167.6, 167.7, 167.8, 167.9, 168.0, 168.1, 168.2, 168.3, 168.4, 168.5, 168.6, 168.7, 168.8, 168.9, 169.0, 169.1, 169.2, 169.3, 169.4, 169.5, 169.6, 169.7, 169.8, 169.9, 170.0, 170.1, 170.2, 170.3, 170.4, 170.5, 170.6, 170.7, 170.8, 170.9, 171.0, 171.1, 171.2, 171.3, 171.4, 171.5, 171.6, 171.7, 171.8, 171.9, 172.0, 172.1, 172.2, 172.3, 172.4, 172.5, 172.6, 172.7, 172.8, 172.9, 173.0, 173.1, 173.2, 173.3, 173.4, 173.5, 173.6, 173.7, 173.8, 173.9, 174.0, 174.1, 174.2, 174.3, 174.4, 174.5, 174.6, 174.7, 174.8, 174.9, 175.0, 175.1, 175.2, 175.3, 175.4, 175.5, 175.6, 175.7, 175.8, 175.9, 176.0, 176.1, 176.2, 176.3, 176.4, 176.5, 176.6, 176.7, 176.8, 176.9, 177.0, 177.1, 177.2, 177.3, 177.4, 177.5, 177.6, 177.7, 177.8, 177.9, 178.0, 178.1, 178.2, 178.3, 178.4, 178.5, 178.6, 178.7, 178.8, 178.9, 179.0, 179.1, 179.2, 179.3, 179.4, 179.5, 179.6, 179.7, 179.8, 179.9, 180.0, 180.1, 180.2, 180.3, 180.4, 180.5, 180.6, 180.7, 180.8, 180.9, 181.0, 181.1, 181.2, 181.3, 181.4, 181.5, 181.6, 181.7, 181.8, 181.9, 182.0, 182.1, 182.2, 182.3, 182.4, 182.5, 182.6, 182.7, 182.8, 182.9, 183.0, 183.1, 183.2, 183.3, 183.4, 183.5, 183.6, 183.7, 183.8, 183.9, 184.0, 184.1, 184.2, 184.3, 184.4, 184.5, 184.6, 184.7, 184.8, 184.9, 185.0, 185.1, 185.2, 185.3, 185.4, 185.5, 185.6, 185.7, 185.8, 185.9, 186.0, 186.1, 186.2, 186.3, 186.4, 186.5, 186.6, 186.7, 186.8, 186.9, 187.0, 187.1, 187.2, 187.3, 187.4, 187.5, 187.6, 187.7, 187.8, 187.9, 188.0, 188.1, 188.2, 188.3, 188.4, 188.5, 188.6, 188.7, 188.8, 188.9, 189.0, 189.1, 189.2, 189.3, 189.4, 189.5, 189.6, 189.7, 189.8, 189.9, 190.0, 190.1, 190.2, 190.3, 190.4, 190.5, 190.6, 190.7, 190.8, 190.9, 191.0, 191.1, 191.2, 191.3, 191.4, 191.5, 191.6, 191.7, 191.8, 191.9, 192.0, 192.1, 192.2, 192.3, 192.4, 192.5, 192.6, 192.7, 192.8, 192.9, 193.0, 193.1, 193.2, 193.3, 193.4, 193.5, 193.6, 193.7, 193.8, 193.9, 194.0, 194.1, 194.2, 194.3, 194.4, 194.5, 194.6, 194.7, 194.8, 194.9, 195.0, 195.1, 195.2, 195.3, 195.4, 195.5, 195.6, 195.7, 195.8, 195.9, 196.0, 196.1, 196.

Рис. 4. Топографический план местности

Инженерно-геологические изыскания, результаты которых приведены на рис. 5, выявили наличие просадочных суглинков и современных техноген-

ных отложений, распространенных на всей площадке, имеющих низкие физико-механические свойства (табл. 2).

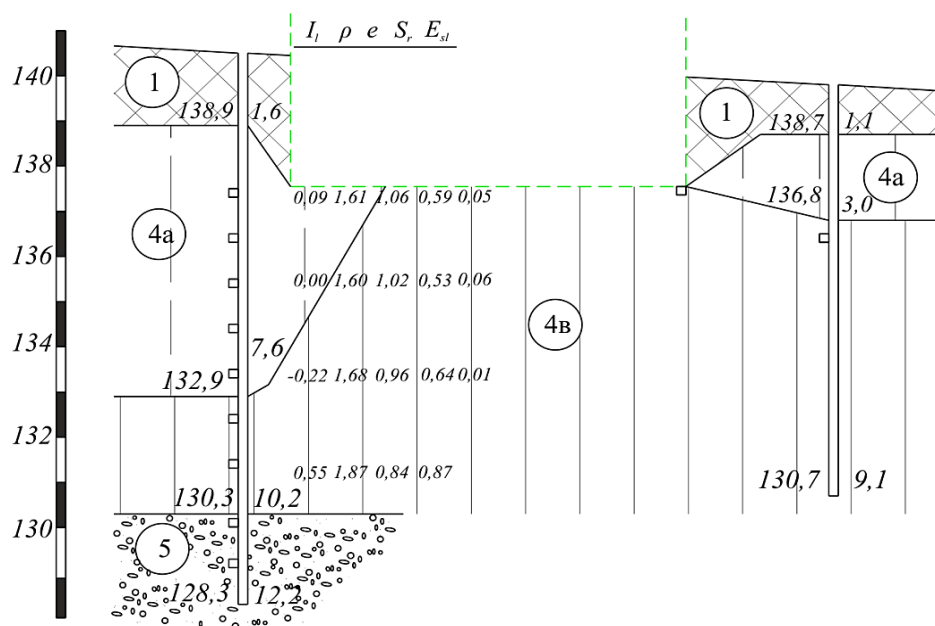


Рис. 5. Инженерно-геологический разрез:
1, 4a, 4b, 5 – основные инженерно-геологические элементы

Таблица 2

Физико-механические свойства ИГЭ

| № ИГЭ | Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³ | Плотность грунта ρ , г/см ³ | Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³ | Коэффициент пористости e , д.е. | Коэффициент водонасыщения S_r , д.е. | Модуль деформации E , МПа | Угол внутреннего трения φ , град | Сцепление C , кПа |
|-------|--|---|--|-----------------------------------|--|-----------------------------|--|---------------------|
| 4a | 2,7 | 1,61 | 1,35 | 1,00 | 0,75 | 9,5 | 17 | 25 |
| 4b | 2,7 | 1,88 | 1,49 | 0,81 | 0,87 | 11,9 | 12 | 27,3 |
| 5 | 2,7 | 1,81 | 1,50 | 0,79 | 0,7 | 24,1 | 22 | 23 |

Проведенный геомеханический прогноз показал, что оседания неоднородного грунтового основания в наибольшей мере проявляются в зонах техногенных отложений ($x = 4,5-7,5$ м) (рис. 6).

Представленные результаты получены на компьютерных моделях естественного грунтового основания (рис. 7), а также в результате его укрепления по специально разработанной схеме закрепления (рис. 8).

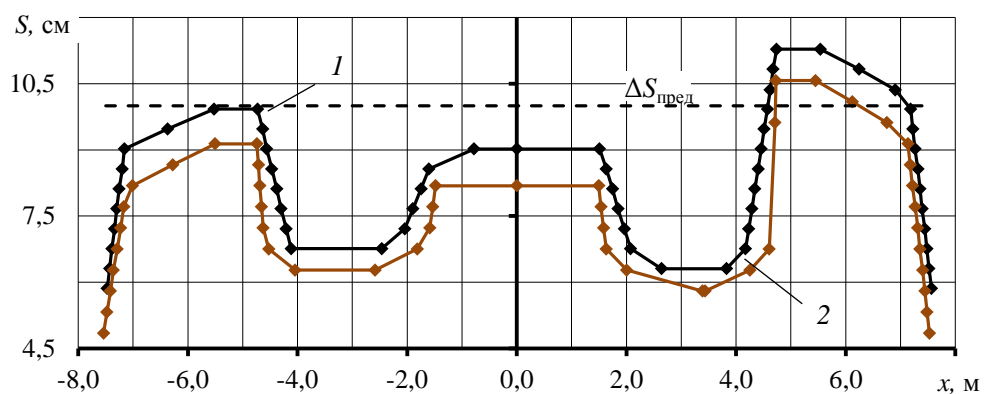


Рис. 6. Зависимости распределения вертикальных оседаний S вдоль поперечной оси x :
 1 – в естественном массиве; 2 – в искусственном массиве; $\Delta S_{пред}$ – предельное допустимое оседание

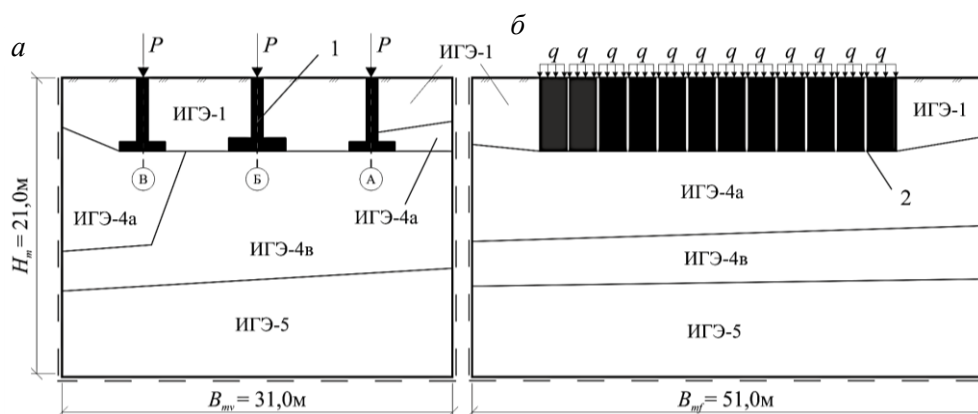


Рис. 7. Схема базовых моделей в поперечном (а) и продольном (б) профилях здания:
 1 – фундамент; 2 – шов деформации

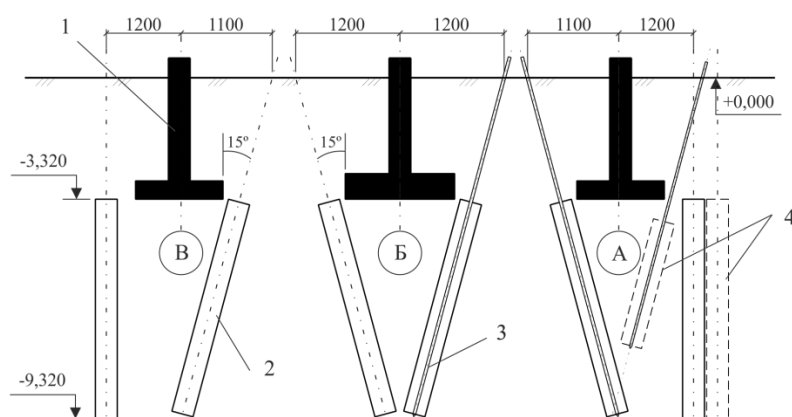


Рис. 8. Схема закрепления грунтов основания в поперечном сечении:
 1 – фундамент; 2 – зона закрепления; 3 – иньектор; 4 – дополнительные иньекторы

Для представленных объектов проведен анализ влияния техногенного преобразования грунтового основания на сейсмичность, основанный на описанной выше методике. Результаты геомеханического прогноза при $K = 1,2$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты анализа

| Наименование объекта | Величина осадок грунтового основания до закрепления, см | Величина осадок грунтового основания после закрепления, см | Величина приращения сейсмической интенсивности за счет различия грунтовых условий |
|------------------------------------|---|--|---|
| По максимальным значениям оседаний | | | |
| Объект 1, вдоль западного фасада | 21,34 | 5,946 | –0,529516 |
| Объект 1, вдоль северного фасада | 15,30 | 6,470 | –0,378228 |
| Объект 2 | 11,30 | 10,57 | –0,090334 |
| По осредненным значениям оседаний | | | |
| Объект 1, вдоль западного фасада | 13,24 | 5,39 | –0,392016 |
| Объект 1, вдоль северного фасада | 10,25 | 4,20 | –0,389658 |
| Объект 2 | 8,11 | 7,27 | –0,108175 |

Таким образом, проведенные авторами исследования методом математического моделирования и выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Инъекционное укрепление грунтовых оснований сооружений при наличии разуплотненных и влагонасыщенных зон обеспечивает снижение сейсмичности более чем на 0,5 балла при пиковых значениях оседаний, а при осредненных значениях – более чем на 0,3 балла.

2. Предложенную методику оценки сейсмичности территории по данным инженерно-геологических изысканий и численного моделирования геомеханического состояния массива при стандартных нагрузках целесообразно использовать для уточнения границ сейсмических зон на картах ОСР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I., Tsirel S.V. Natural and induced seismic activity in Kuzbass // Journal of Mining Science. 2013. V. 49. P. 862–872.
2. Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 399–405.
3. Shabarov A.N., Tsirel S.V., Morozov K.V., Rasskazov I.Yu. Concept of integrated geodynamic monitoring in underground mining // Gornyi Zhurnal. 2017. V. 9. P. 120–134.

4. Масаев Ю.А. и др. Массовые взрывы при добыче угля открытым способом и их влияние на сейсмические проявления в Кузбассе // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 4. С. 48–54.
5. Еманов А.Ф. и др. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. 2009. № 12. С. 37–43.
6. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенная сейсмическая активизация на юге Кузбасса (п. Малиновка) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. № 3. Т. 2. С. 66–71.
7. Ибрагимов М.И., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве. Москва : Изд-во АСВ, 2017. 266 с.
8. Простов С.М., Покатилов А.В., Рудковский Д.И. Электрохимическое закрепление грунтов / РАН. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. 294 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва : Недра, 1987. 221 с.
10. Зуевская Н.В., Дворник С.А. и др. Изменение напряжено-деформированного состояния грунтов при устройстве глубоких выемок // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2011. № 38.
11. Бондарев В.И. и др. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. Москва, 1974. 142 с.
12. Сердюков А.С., Яблоков А.В., Чернышов Г.С. и др. Методы сейсмических исследований водонасыщенности грунтов и горных пород с использованием поверхностных волн // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 1. № 3. С. 185–190.
13. Простов С.М., Хямяляйнен В.А., Герасимов О.В. Комплексный мониторинг процессов высоконапорной инъекции грунтов / РАН. Кемерово ; Москва : Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат. – АСТИ, 2006. 94 с.
14. Sokolov M., Prostov S., Kharitonov I. Geomechanical Substantiation of the Parameters of Injection Fixing of the Soil Bases During the Liquidation of the Emergency Condition of the Structure // E3S Web Conference. IIIrd International Innovative Mining Symposium. 2018. V. 41. Article 01009. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101009>
15. Соколов М.В., Простов С.М. Геомеханическое обоснование параметров инъекционного закрепления неоднородного неустойчивого грунтового основания здания // Вестник КузГТУ. 2017. № 3. С. 37–44.

REFERENCES

1. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I., Tsirel S.V. Natural and induced seismic activity in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2013. V. 49. Pp. 862–872.
2. Bryksin A.A., Seleznev V.S. Vliyanie tekhnogennykh faktorov na seismichnost' raionov Kuzbassa o zera Baikal [Influence of technogenic factors on seismicity of the Kuzbass regions of Lake Baikal]. *Geologiya i geofizika*. 2012. V. 3. No. 3. Pp. 399–405. (rus)
3. Shabarov A.N., Tsirel S.V., Morozov K.V., Rasskazov I.Yu. Concept of integrated geodynamic monitoring in underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017. V. 9. Pp. 120–134.
4. Masaev Yu.A., et al. Massovye vzryvy pri dobyche uglya otkrytym sposobom i ikh vliyanie na seismicheskie proyavleniya v Kuzbasse [Mass explosions during open pit coal mining and their impact on seismic manifestations in Kuzbass]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti*. 2016. No. 4. Pp. 48–54. (rus)
5. Emanov A.F., et al. Seismicheskie aktivizatsii pri razrabotke uglya v Kuzbasse [Seismic activation during coal mining in Kuzbass]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2009. No. 12. Pp. 37–43. (rus)
6. Emanov A.A., Emanov A.F., Fateev A.V., Leskova E.V. Tekhnogennaya seismicheskaya aktivizatsiya na yuge Kuzbassa (p. Malinovka) [Technogenic seismic activation in the south of Kuzbass (Malinovka settlement)]. *Interexpo Geo-Sibir'*. 2017. No. 3. V. 2. Pp. 66–71. (rus)
7. Ibragimov M.I., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Tsementatsiya gruntov in "ekstsei rastvorov v stroitel'stve [Cementation of soils by solution injection]. Moscow: ASV, 2017. 266 p. (rus)
8. Prostov S.M., Pokatilov A.V., Rudkovsky D.I. Elektrokhimicheskoe zakreplenie gruntov [Electrochemical soil fixation]. Tomsk: TSU, 2011. 294 p. (rus)
9. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike [Finite element method in geomechanics]. Moscow: Nedra, 1987. 221 p. (rus)

10. Zuevskaya N.V., Yardnick S.A., et al. Izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov pri ustroistve glubokikh vyemok [Stress-strain state of soils during deep excavations]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta*. 2011. No. 38. (rus)
11. Bondarev V.I., et al. Rekomendatsii po primeneniyu seismicheskoi razvedki dlya izucheniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv rykhlykh gruntov v estestvennom zaleganii dlya stroitel'nykh tselei [Recommendations on the use of seismic exploration for studying physical and mechanical properties of loose soils in natural occurrence for construction purposes]. Moscow: 1974. 142 p. (rus)
12. Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Chernyshov G.S., et al. Metody seismicheskikh issledovaniy vodonasyshchennosti gruntov i gornykh porod s ispol'zovaniem poverkhnostnykh voln [Seismic studies of water saturation of soils and rocks using surface waves]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016. V. 1. No. 3. Pp. 185–190. (rus)
13. Prostov S.M., Härmäläinen V.A., Gerasimov O.V. Kompleksnyi monitoring protsessov vysokonapornoi in'eksii gruntov [Monitoring of high-pressure injection process of soils]. Kemerovo; Moscow: Russian University; Kuzbassvuzizdat, 2006. 94 p. (rus)
14. Sokolov M., Prostov S., Kharitonov I. Geomechanical substantiation of the parameters of injection fixing of the soil bases during the liquidation of the emergency condition of the structure. *Proc. 3rd Int. Innovative Mining Symposium*. 2018. V. 41. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101009
15. Sokolov M.V., Prostov S.M. Geomekhanicheskoe obosnovanie parametrov in'eksionnogo zakrepleniya neodnorodnogo neustoichivogo gruntovogo osnovaniya zdaniya [Geomechanical substantiation of injection fixation parameters of unstable subgrade soil]. *Vestnik KuzGTU*. 2017. No. 3. Pp. 37–44. (rus)

Сведения об авторах

Соколов Михаил Валерьевич, доцент, канд. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, smv.ad@kuzstu.ru

Простов Сергей Михайлович, профессор, докт. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, psm.kem@mail.ru

Герасимов Олег Васильевич, доцент, канд. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, gerasimov@noocentr.com

Authors Details

Mikhail V. Sokolov, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, 650000, smv.ad@kuzstu.ru

Sergei M. Prostov, DSc, Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, 650000, psm.kem@mail.ru

Oleg V. Gerasimov, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, 650000, gerasimov@noocentr.com