

## ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА ОБЪЕКТЫ НАЗЕМНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Е.М. Волохов<sup>1</sup>, В.К. Кожухарова<sup>1</sup>, И.А. Бритвин<sup>1</sup>, Б.М. Савков<sup>2</sup>, Е.С. Жерлыгина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: s225049@stud.spmi.ru

<sup>2</sup> ООО «ГИРО», Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Исследуется актуальная проблема оценки вредного влияния горных работ на здания и сооружения на земной поверхности. Степень вредного влияния на объекты наземной инфраструктуры определяется прогнозируемыми значениями деформаций. Исходя из этого, принимается решение о необходимости применения мер охраны для подрабатываемых объектов. Однако, несмотря на интенсивные темпы освоения подземного пространства крупных городов, обеспечение охраны и защиты зданий на поверхности не всегда может быть эффективно реализовано вследствие отсутствия фиксированной методологии. Цель исследования заключается в анализе существующих отечественных и зарубежных методов оценки деформированного состояния зданий в зоне их подработки, определении достоинств и недостатков существующих подходов, обозначении перспективных путей решения заявленной проблемы. Анализ показал, что наибольшей состоятельностью обладает показатель суммарных деформаций  $\Delta l$ , поскольку одновременно учитывает горизонтальные деформации и деформации кривизны, а также конструктивные особенности здания. В качестве примера рассмотрен реальный случай подработки исторического здания при строительстве наклонного хода станции метро «Адмиралтейская» в городе Санкт-Петербург. При анализе натуральных данных маркшейдерско-геодезических измерений выявлено, что рассмотренные критерии не дают единую оценку степени подработки здания. Тем не менее, наибольшей достоверностью характеризуется показатель суммарных деформаций. В завершение приведены рекомендации по разработке комплексного критерия, учитывающего взаимодействие системы «подземное сооружение – грунт – здание».

**Ключевые слова:** охрана зданий и сооружений, подземное строительство, мульда сдвига, осадки зданий, существующая застройка, сдвигание земной поверхности, повреждение зданий и сооружений, критерии повреждения зданий.

**Для цитирования:** Волохов Е. М., Кожухарова В. К., Бритвин И. А., Савков Б. М., Жерлыгина Е. С. Проблема оценки влияния горных работ на объекты наземной инфраструктуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 8. – С. 72–93. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_8\_0\_72.

### Assessment of impact of mining operations on surface infrastructure

E.M. Volohov<sup>1</sup>, V.K. Kozhukharova<sup>1</sup>, I.A. Britvin<sup>1</sup>, B.M. Savkov<sup>2</sup>, E.S. Zherlygina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sankt-Petersburg Mining University, Sankt-Petersburg, Russia, e-mail: s225049@stud.spmi.ru

<sup>2</sup> GIRO LLC, Sankt-Petersburg, Russia

---

**Abstract:** Spotlight is on the problem connected with the assessment of harmful impact exerted by mining on buildings and structures on ground surface. The adverse effect on the surface infrastructure is evaluated in terms of predicted values of the surface deformations. On this basis, a decision is made on necessity of protection of the undermined ground objects. However, despite the extensive development of underground space in large cities, it is not always possible to protect effectively buildings on ground surface because of the lack of a certified methodology. This research aims to review the domestic and foreign procedures for deformation assessment of buildings in undermined zones, to identify advantages and disadvantages of the existing methods, and to seek promising solutions to the mentioned problem. According to the analytical outcome, the highest weight belongs to the total deformation index  $\Delta l$  as it embraces simultaneously horizontal deformations, curvature deformations and structural peculiarities of buildings. The article describes a case-study of undermining of a historical building in the course of construction of a sloped tunnel at the Admiralteyskaya metro station at Saint-Petersburg. The analysis of the in-situ surveying data shows that the criteria analyzed are incapable to provide a uniform evaluation of the undermining rate of a building. Nonetheless, the total deformation index is characterized by the highest reliability. Finally, the article offers recommendations on development of an integrated criterion to encompass all interactions in the underground structure-ground-building system.

**Key words:** protection of buildings and structures, underground construction, movement trough, building subsidence, existing housing system, ground surface movement, damage of buildings and structures, building damage criterion.

**For citation:** Volohov E. M., Kozhukharova V. K., Britvin I. A., Savkov B. M., Zherlygina E. S. Assessment of impact of mining operations on surface infrastructure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(8):72-93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_8\_0\_72.

---

## Введение

В результате ведения горных работ, будь то строительство метрополитена, различных подземных сооружений и коммуникаций в крупных городах или отработка полезных ископаемых в районах добычи, активизируются процессы сдвижения породного массива. Это в совокупности с воздействием различных природных факторов приводит к деформированию земной поверхности и, как следствие, повреждению и нарушению работоспособности объектов наземной инфраструктуры.

На сегодняшний день имеется обширная база исследований на тему того, как определить и спрогнозировать эти самые процессы деформирования земной

поверхности [1 – 3] и породного массива вблизи подземного сооружения [4 – 8]. Существует множество нормативных документов, которые регламентируют определение границ зоны влияния горных работ на земную поверхность. В частности, к этим документам относятся ПБ 07-269-98 «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях», СП 21.13330.2012 «Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах». В качестве критериев используются значения таких деформаций, как кривизна, наклон, а также относительная горизонтальная деформация земной поверхности. Но определить зону

вредного влияния подземных разработок на земную поверхность и наземную инфраструктуру недостаточно, нужно оценить возможность подработки зданий и сооружений, а также степень их повреждения вследствие ведения горных работ для принятия необходимых мер охраны. Требуется ответить на вопрос: как можно оценить деформации породного массива и зданий, попавших в зону подработки?

Проблема оценки деформаций зданий и их развития при неравномерных деформациях оснований сопряжена с решением целого комплекса проблем, связанных с учетом работы многочисленных неоднородных и сложно пространственно ориентированных несущих конструкций — стен, перекрытий, фундаментов [9], а также свай в основании, при их наличии [10]; оценки реальных прочностных и деформационных характеристик несущих элементов (особенно для старых кирпичных зданий) [11] и параметров их взаимодействия; расчета взаимодействия деформирующихся породного основания и фундамента [12, 13]; выявления механизмов развития и учета трещин в расчетах [14] и других аспектов. Аналитическое описание этих процессов невозможно в силу очевидных математических трудностей, описание же их на базе популярного сегодня численного моделирования в основном не позволяет обеспечить количественную достоверность оцениваемых параметров [15], а физические модели трудоемки в реализации и так же, в основном, не позволяют выйти на удовлетворительную количественную достоверность [16, 17]. Поэтому основным подходом в подобных оценках по-прежнему является обобщение эмпирических данных и использование феноменологической методологии.

В рамках поставленного вопроса обратимся к имеющимся научным дости-

жениям, проанализируем существующие методы и попытаемся понять, в чем состоит проблема таких подходов, в каком направлении необходимо двигаться в современных представлениях о процессах деформирования зданий на подрабатываемых территориях и способах их оценки.

### **Допустимые условия подработки зданий и сооружений**

В СССР вопрос адекватной оценки деформаций земной поверхности и обеспечения охраны зданий и сооружений на подрабатываемых территориях получил свое решение в середине прошлого века. С целью обеспечения рациональных и оптимальных вариантов подработки зданий и сооружений было необходимо сформировать методiku прогноза, которая бы связывала деформации строительного объекта с деформациями земной поверхности. Изначально в качестве условного критерия, в соответствии с которым выбирался тип применяемых мер охраны для подрабатываемых сооружений, выступала безопасная глубина ведения горных работ [18]. Использование критерия безопасной глубины предотвращало возникновение опасных деформаций на земной поверхности и, как следствие, разрушительных воздействий на подрабатываемые объекты. Использование условного критерия безопасной глубины стало невозможным после увеличения глубины горных работ и усложнения горно-геологических условий. Решение проблемы обеспечения охраны подрабатываемых объектов требовало создания новых подходов, и в последующие годы был разработан и в дальнейшем усовершенствован метод, предложенный ВНИМИ «Научно-исследовательским институтом горной геомеханики и маркшейдерского дела» [19], который был отображен в нормативном документе ПБ 07-269-98.

Метод прогнозирования основан на опыте ведения горных работ под зданиями и сооружениями в районах разработки угольных месторождений и заключается в определении показателя суммарных деформаций, который учитывает деформации в основании сооружения и влияние геометрии конструкции на степень ее деформируемости через параметр  $L/H$ , где  $L$  — длина здания, а  $H$  — его высота.

Исследованиями В.М. Варлашкина и В.В. Маркова [20] установлено, что существует явная корреляция между степенью повреждения подрабатываемого здания и величиной горизонтальных деформаций  $\varepsilon$ , а также радиусом кривизны  $R$  ( $R = 1/K$ , где  $K$  — кривизна земной поверхности). Критерий горизонтальной деформации влияет на степень растяжения или сжатия конструкции, что способствует развитию трещин в сооружении. Критерий вертикальной деформации, выраженный через радиус кривизны, вносит свой вклад в степень изгиба основания здания, что приводит к возникновению дополнительных растягивающих/сжимающих деформаций. В работе [20] установлено, что показатель суммарных деформаций необходимо определять как

$$\Delta l = L \sqrt{m_\varepsilon^2 \varepsilon_1^2 + m_k^2 \frac{H^2}{R^2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $R_1$  — максимальные значения расчетных показателей горизонтальной деформации и деформации кривизны земной поверхности в месте расположения здания;  $m_k$ ,  $m_\varepsilon$  — коэффициенты условий работы здания в зависимости от его геометрических параметров.

Важный этап методики прогнозной оценки заключается в определении допустимых и предельных деформаций. Здесь выделено два пороговых уровня: допустимые деформации — устанавливающие значение, до которого можно обойтись текущими ремонтными рабо-

тами без вмешательств в конструктив здания, и предельные деформации — связанные с угрозой возникновения аварийной ситуации и разрушения.

Допустимые и предельные показатели деформаций земной поверхности для гражданских (жилых и общественных) зданий определяются по следующим формулам:

$$[\Delta l_d] = [\Delta l_d]_н n_1 n_2 n_3 n_4 n_5, \quad (2)$$

$$[\Delta l_n] = [\Delta l_n]_н n_1 n_2 n_3 n_4 n_5, \quad (3)$$

где  $[\Delta l_d]_н$  и  $[\Delta l_n]_н$  — нормативные допустимый и предельный показатели деформаций, определяются в зависимости от назначения гражданских зданий и их этажности;  $n_1$  — коэффициент, зависящий от грунтовых условий;  $n_2$  — коэффициент, учитывающий материал и толщину наружных стен зданий;  $n_3$  — коэффициент, учитывающий износ наружных стен зданий;  $n_4$  — коэффициент, учитывающий наличие «жестких» перекрытий;  $n_5$  — коэффициент, учитывающий форму здания в плане.

Данная методика основана на обширной многолетней базе натуральных наблюдений, в ней учитываются геометрические и конструктивные свойства подрабатываемых зданий, а также типы грунтов в его основании. В частности, в параметры и заложены эксплуатационные особенности различных классов сооружений в зависимости от назначения подрабатываемого объекта, а коэффициент  $n_3$ , отвечающий за износ наружных стен зданий, учитывает год постройки объекта и общие свойства, характерные для одного периода постройки. Коэффициенты  $n_2$  и  $n_4$  учитывают жесткость здания и факторы, определяющие сопротивляемость зданий деформированию вслед за земной поверхностью. Влияние конфигурации здания на его деформируемость предусматривается коэффициентом  $n_5$ . Грунтовые условия и степень просадочности грунта учитываются с по-

мощью коэффициента  $n_1$ . Особое внимание грунтовым условиям и территориям, потенциально подвергающимся деформациям, уделяется в документе СП 22.13330.2012 «Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах». Здесь необходимость проектирования защитных мер и их особенности определяются в зависимости от типа грунтов подрабатываемых территорий, которые разделены на 4 группы по уровню деформаций.

Для выявления степени влияния каждого из коэффициентов на конечную величину допустимого показателя суммарных деформаций был проведен факторный анализ, в результате которого определено, что коэффициент износа является одним из самых значимых параметров, определяющих допустимость подработки сооружения и необходимость принятия различных мер охраны (рис. 1). Рассмотрим подробнее, как коэффициент износа был получен и от каких характеристик он зависит.

В нормативном документе «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» 1981 г. износ несущих стен зданий определяется в зависимости от показателя максимального раскрытия трещин —  $\delta_{\max}$ . Величина раскрытия

трещин в стенах связана со степенью ослабления конструкции здания. Вследствие этого износ зданий или сооружений может дополнительно служить параметром, определяющим их ослабление [21]. Данный показатель прост в определении и достаточно нагляден. Он используется при определении вероятных повреждений основных конструкций в исследованиях С.Е. Шагалова, Р.А. Муллера, В.В. Маркова [22]. С помощью максимального раскрытия трещин в «Правилах охраны...» 1981 г. также определяется износ зданий. В обновленных ПБ 07-269-98 отошли от показателя максимального раскрытия трещин и заменили его удельным —  $\delta_{\text{уд}}$ . Помимо удельного раскрытия трещин используется показатель удельной площади трещин —  $F_{\text{уд}}$ . Каждый из указанных показателей имеет свои достоинства и недостатки. Если говорить о максимальном раскрытии трещин, то данный показатель не в полной степени характеризует состояние конструкций здания; при больших повреждениях одной стороны фасада другая может находиться в полной сохранности. В свою очередь удельное раскрытие трещин и удельная площадь являются интегральными показателями и более устойчивы в оценках с неравномерными деформациями основания. Однако на практике эти па-

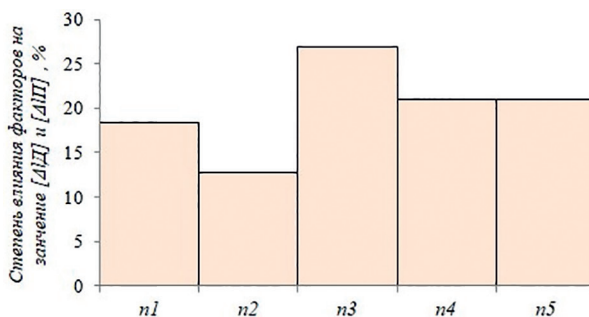


Рис. 1. Влияние коэффициентов, характеризующих свойства участка подработки, на допустимый/предельный показатель суммарных деформаций

Fig. 1. The influence of coefficients characterizing the properties of the undermining site on the permissible/limiting index of total deformations

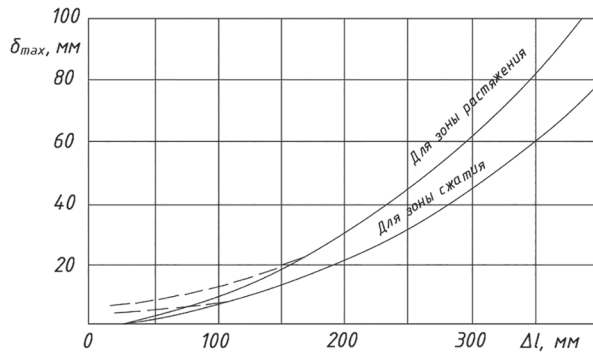


Рис. 2. Статистическая зависимость раскрытия трещин в стенах подрабатываемых зданий от величины деформаций земной поверхности [22]

Fig. 2. Statistical dependence of crack opening in the walls of the undermining buildings on the magnitude of deformations of the Earth's surface [22]

раметры практически не используются вследствие больших трудозатрат на их определение [18].

На сегодняшний день, за счет своей наглядности и простоты определения, в большинстве случаев используется вышеупомянутый критерий максимального раскрытия трещин —  $\delta_{\max}$ . Следует отметить, что в соответствии с «Правилами охраны...» 1981 г. при максимальном раскрытии трещины более 12 мм износ здания считается максимальным, учитывается постоянным параметром и описывается категорией «Более 30%». Такой подход не позволяет конкретно оценивать износ зданий с раскрытием трещин более 12 мм, что особенно важно для повторно подрабатываемых сооружений.

В работе [18] был произведен анализ зависимости износа стен зданий от величины раскрытия трещин, в результате чего была получена логарифмическая зависимость износа здания от максимальной величины раскрытия трещин:

$$Q = a_Q \ln(\delta_{\max} + 1), \quad (4)$$

где  $Q$  — износ стен здания в %,  $a_Q$  — коэффициенты пропорциональности,  $a_Q = 12,38$ ;  $\delta_{\max}$  — максимальное раскрытие трещин в стенах здания до подработки.

Результаты исследований [22] показали, что между раскрытием трещин и деформацией земной поверхности существует нелинейная зависимость, которая может быть представлена в виде графика (рис. 2).

На основании указанной зависимости можно определить максимальное раскрытие трещин в подрабатываемом здании в зависимости от рассчитанного показателя суммарных деформаций, при этом необходимо учитывать ориентацию здания относительно направления ведения горных работ и вводить соответствующие коэффициенты.

Резюмируя все вышеизложенное, можно установить, что показатель суммарных деформаций  $\Delta l$  имеет ряд преимуществ: он одновременно учитывает два основных параметра деформаций ( $\epsilon$  и  $R$ ), опирается на простую форму расчета и учитывает основные геометрические, конструктивные и геотехнические параметры здания. Преимуществом методики является то, что она основана на эмпирических зависимостях, определенных по результатам наблюдений за подрабатываемыми зданиями и сооружениями, а критерий  $\Delta l$  позволяет проанализировать степень воздействия деформаций на подрабатываемое здание без данных изысканий (например: фи-

зико-механических свойств грунта, деформационных и прочностных свойств материалов конструкции).

Методика имеет и недостатки. Существенным минусом при использовании показателя суммарных деформаций является то, что здание представляется работающим за пределами упругой стадии и полностью повторяющим деформации земной поверхности, вопрос перехода от деформаций здания к деформациям поверхности не рассматривается, а при определении пороговых параметров  $[\Delta l_{дн}]$  и  $[\Delta l_{пн}]$  учитываются лишь гражданские здания малой и средней этажности. В настоящее время именно многоэтажные здания и сооружения занимают значительную часть урбанизированных территорий, а градостроительство ориентировано на высотную застройку.

В связи с этим при выборе допустимых и предельных показателей деформации для многоэтажных зданий возникают определенные сложности [23], при увеличении высоты здания в конструкции преобладают деформации сдвига, в результате эффективность показателя суммарных деформаций, отражающего деформации изгиба, снижается, и он не дает адекватную оценку возможности подрботки многоэтажных сооружений. Существует разница в механизме дефор-

мирования зданий в зависимости от параметра  $L/H$ . Как было отмечено в работе [24], при уменьшении данного отношения в конструкции преобладают деформации сдвига, при увеличении — деформации изгиба. Этот эффект требует дальнейшего изучения. Помимо этого, методика не позволяет детализировать анализ воздействия на несущие конструкции подрабатываемых объектов.

### Зарубежный опыт оценки влияния деформаций земной поверхности на здания и сооружения в условиях подрботки

В зарубежной практике оценки влияния деформаций земной поверхности на здания получил распространение параметр  $\delta S/L$ , параметр дифференциальной осадки, где  $\delta S$  — разница осадок между двумя точками на здании,  $L$  — расстояние между этими точками [25]. В этом подходе влияние геометрии и конструктива здания не учитывается, а горизонтальные деформации не рассматриваются. Данный критерий используется и по настоящее время, в том числе в отечественной нормативной документации.

В 1970-е годы были разработаны методики, основанные на теории изгиба

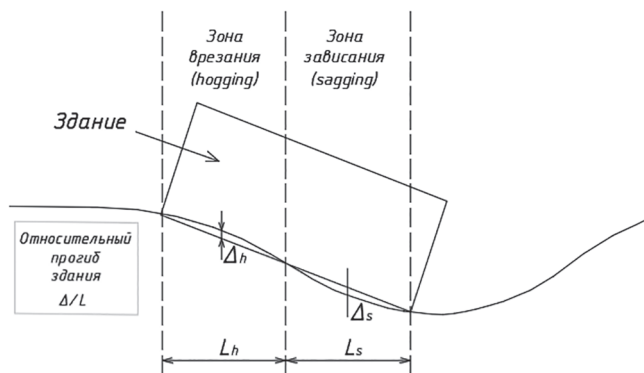


Рис. 3. Коэффициент отклонения для участков врезания и зависания [28].

Fig. 3. Deflection coefficient for hogging and sagging zones [28]

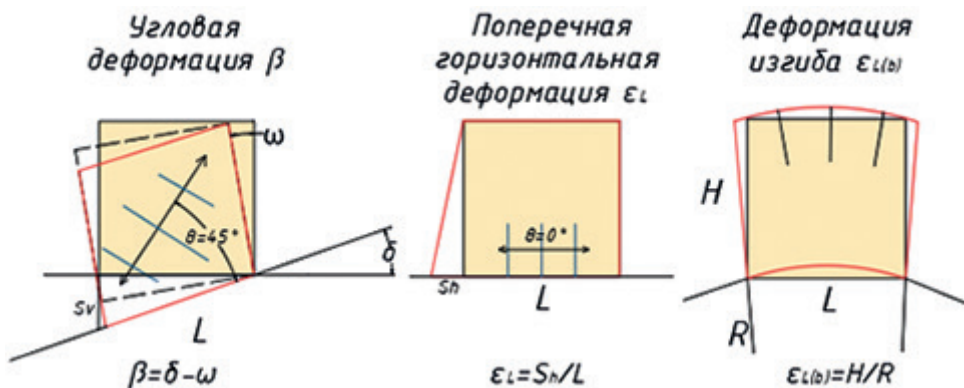


Рис. 4. Деформационные параметры сдвига [29]

Fig. 4. Shear deformation parameters [29]

балок С.П. Тимошенко [26], что позволяло учитывать деформации изгиба и сдвига в здании, которое условно представлено изотропной упругой балкой. Такой подход допускал определение повреждения подработанного здания без учета детализации конструкции и свойств материала основных несущих элементов сооружения [27]. В качестве критериев оценки здесь используется коэффициент относительного прогиба здания —  $\Delta/L$  (рис. 3), впервые предложенный в исследовании [25] и впоследствии усовершенствованный в работе [24], в которой коэффициент относительного прогиба аналитически был связан с деформациями здания при изгибе и сдвиге.

Аналогичный подход был реализован в работе [29], где основное внимание было сосредоточено на деформации сдвига в подрабатываемых сооружениях (рис. 4).

В качестве определяющего параметра в данном методе используется угловая деформация конструкции —  $\beta$ , которая вычисляется как разность наклона ( $\delta$ ) и крена ( $\omega$ ) подрабатываемого сооружения, для определения наклона измеряют оседание конструкции ( $S_v$ ), для вычисления деформаций  $\epsilon_L$  и  $\epsilon_{L(b)}$  используют горизонтальное перемещение ( $S_h$ ) и радиус кривизны ( $R$ ) соответст-

венно. Максимальная горизонтальная деформация рассчитывается в соответствии с выражением (5), а затем сравнивается с критической деформацией при растяжении, при которой происходит развитие новых трещин.

$$\epsilon_p = \epsilon_L \cos(\theta_{\max}^2) + \beta \sin(\theta_{\max}) \cos(\theta_{\max});$$

$$\operatorname{tg}(2\theta_{\max}) = \frac{\beta}{\epsilon_L} \quad (5)$$

где  $\epsilon_L$  — горизонтальная деформация растяжения, измеренная в основании здания;  $\theta_{\max}$  — направление образования трещины.

Однако все эти критерии также не рассматривали взаимодействие в системе «грунт — здание» и не учитывали взаимосвязь между деформацией здания и земной поверхностью. Исследования последних лет [30 — 32] направлены на изучение влияния жесткости здания и учет параметров жесткости при анализе повреждений подрабатываемых сооружений. При таком подходе используются методы численного [33] и физического моделирования [34] для анализа различных соотношений параметров жесткости зданий и грунтов. Здесь на первом этапе осуществляется определение коэффициентов относительной осевой жесткости и жесткости при изгибе,



которые необходимы для определения вклада жесткости подрабатываемого здания в уменьшение его повреждений. На следующем этапе осуществляется определение коэффициентов модификации. Коэффициент модификации ( $M$ ) для максимальных растягивающих и сжимающих деформаций задается отношением между горизонтальной деформацией здания в поперечном и продольном направлении относительно мульды сдвига ( $\varepsilon_{\text{Bldg}}$ ) и максимальными горизонтальными деформациями земной поверхности в месте расположения здания ( $\varepsilon_{\text{GF}}$ ) [28]. Анализ горизонтальных деформаций на уровне фундамента является первым шагом в предварительной оценке повреждения здания, затем с учетом величины относительного коэффициента жесткости и коэффициента модификации, определенного для типовых видов конструкции, вычисляются искомые горизонтальные деформации здания и сравниваются с допустимыми.

Для комплексного изучения деформирования системы «подземное сооружение — грунт — здание» также необходимо учитывать вес конструкции. Этой теме было посвящено множество исследований, в работах [35, 36] пришли к выводу, что влияние собственного веса здания на земную поверхность, хотя это и имеет важное значение, обычно является второстепенным фактором по сравнению с ролью жесткости для типовых конструкций.

На сегодняшний день методики, учитывающие соотношение свойств конструкций здания и грунтов основания, следует рассматривать как наиболее перспективные. Однако они пока не получили повсеместного распространения, так как часто опираются на обобщающие параметры и ряд допущений. Например, коэффициенты относительной жесткости применяются для всего здания в целом, хотя известно, что строительные

конструкции имеют существенно неоднородную жесткость. Помимо этого, здесь часто не учитываются данные о типе конструкции сооружения, материалах, технологиях строительства и текущих условиях его эксплуатации. Поэтому особую значимость приобретают методы численного моделирования, способные учесть обозначенные особенности совместной работы основания и сооружения на разных уровнях детализации.

### **Предельные дополнительные деформации.**

#### **Нормы и требования**

В настоящее время в России при строительстве подземных сооружений отсутствует единый согласованный и признанный подход к оценке степени подработки зданий и обеспечения их охраны [37]. Так, до недавнего времени использовались региональные нормы — РД 07-166-97 «Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений», ТСН 50-302-2004 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге» с разными подходами и критериями. Существуют и федеральные документы — своды правил, такие как СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», часть требований которых обязательны для всех отраслей промышленности.

Сегодня при оценке влияния подземного строительства на объекты поверхности большинства проектировщиков вынуждены ссылаться на критерии СП 22.13330.2016. Этот документ оперирует значениями предельных дополнительных деформаций существующих сооружений, к которым отнесены максимальная осадка и относительная разность осадок (или деформация наклона). С 2016 г. данные правила отнесены к

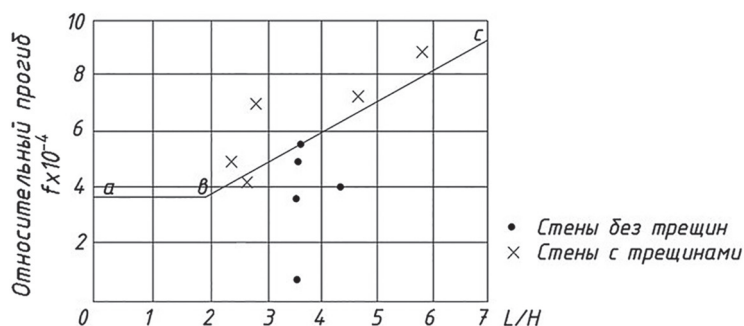


Рис. 5. Результаты измерения деформации основания фундамента для десяти кирпичных зданий [42]  
 Fig. 5. The results of measuring the deformation of the foundation base for ten brick buildings [42]

проектированию оснований зданий и сооружений, в том числе подземных, возводимых в различных природных условиях, для различных видов строительства.

Чтобы определить справедливость и корректность применения данных критериев к подрабатываемым объектам наземной инфраструктуры, обратимся к истории возникновения данного подхода и критериев допустимости развития деформаций.

В 1955 г. был введен стандарт НИТУ 127-55 «Нормы и технические условия проектирования естественных оснований зданий и промышленных сооружений», основанный на работах Р.А. Токаря [38], Д.Е. Польшина [39], Б.Д. Васильева [40], Н.А. Цытовича [41]. В нормах 1955 г. вместо расчета по несущей способности на первое место выдвигается методика, основанная на определении предельного состояния основания по деформациям. Расчет оснований зданий и сооружений по деформациям сводится к следующему условию:

$$\Delta < f, \quad (6)$$

где  $\Delta$  — определяемая расчетом деформация основания;  $f$  — деформация основания, предельно допустимая по условиям прочности и эксплуатации проектируемого сооружения.

По результатам наблюдений за осадками различных конструкций в различ-

ных геологических условиях в течение 25 лет были установлены нормы допускаемых осадок и их неравномерности.

Предельные значения деформаций также могут учитывать взаимосвязь между предельным прогибом конструкции и ее геометрическими параметрами. Так, в работе [42] представлены результаты измерения деформаций основания фундамента для десяти кирпичных зданий (рис. 5).

На основании исследований [42] сделаны выводы, что относительный прогиб для зданий с кирпичной кладкой, при которой еще не образуются трещины, можно принять следующей:

$$\text{при } L/H \leq 2 \quad f = 0,0003,$$

$$\text{при } L/H = 8 \quad f = 0,0010.$$

Со временем указанные нормы прошли несколько актуализаций. В 1983 г. утверждается СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений». В этих нормах впервые упоминается проектирование оснований зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. В 2011 г. принят СП 22.13330.11 «Основания зданий и сооружений» (на сегодня СП 22.13330.16), с 2016 г. указанные своды правил распространяются не только на проектирование оснований зданий и сооружений, но и регламентируют оценку влияния подземных сооружений, возводимых горным способом, на окру-

жающую застройку. Однако принципы и критерии оценки были выбраны те же, что и для оценки деформаций оснований под строящимися зданиями. Указанный подход не получил освещения в научных публикациях, а его обоснование до сих пор не представлено научной общественности. В связи с этим встает вопрос о том, насколько справедливы эти подходы и корректны представленные критерии предельных деформаций для существующих зданий, попавших в зону влияния подземного строительства.

Во-первых, необходимо отметить, что значения максимальной осадки и разности осадок — это лишь первичные параметры, характеризующие развитие деформаций, они не позволяют полноценно оценить деформированное состояние подрабатываемого объекта. Отсутствие ссылок на обоснование и многолетние базы наблюдений за подрабатываемыми объектами также вызывают сомнения в правомерности выбора критериев, представленных в данных нормах. В соответствии с СП 22.13330.2016 максимальная осадка основания фундаментов сооружений, которые находятся в зоне влияния подземного строительства, ограничиваются значениями  $5 \div 50$  мм, в зависимости от категории технического состояния здания, а также типа постройки и ее назначения.

Рассматривая предельные осадки для исторической застройки и памятников архитектуры, можно видеть, что они зафиксированы на уровнях 10 мм и 5 мм для II и III категории технического состояния соответственно. По данным исследований В.А. Васенина [43], статистическая обработка нивелировочной сети Санкт-Петербурга показала, что скорости осадок зданий исторически сложившейся территории застройки составили порядка 1 мм/год, эти осадки развиваются, как правило, под действием собственного веса здания и различ-

ных природных факторов. Согласно СП 22.13330.2016 допустимые предельные осадки исторических зданий III категории (это большая часть таких зданий) — 5 мм. Из чего можно заключить, что они будут достигаться регулярно примерно каждые 5 лет практически для всех зданий исторической застройки Санкт-Петербурга, а сами здания III категории будут систематически переходить в аварийное состояние.

Возвращаясь к основной проблеме исследования, необходимо отметить очевидность того, что подработки таких зданий обычным станционным комплексом метрополитена или любым другим объектом подземной инфраструктуры исключены, так как снизить оседание поверхности до уровней ниже 5 мм технически невозможно. Таким образом, указанный в СП 22.13330.2016 подход с критериями и порогами на уровне чувствительности методов наблюдений ставит под вопрос возможность любого строительства в районах исторической застройки.

В последней актуализации норм СП 22.13330.2016 расчет оснований по деформациям для сооружений окружающей застройки, расположенных в зоне влияния нового строительства или реконструкции, проводят из условия

$$s_{ad} \leq s_{ad,u}, \quad (7)$$

где  $s_{ad}$  — дополнительная осадка основания фундамента (совместная дополнительная деформация основания и сооружения), определяемая в соответствии с учетом совокупности воздействий, связанных с новым строительством или реконструкцией;  $s_{ad,u}$  — предельное значение дополнительной осадки основания фундаментов (предельное значение совместной дополнительной деформации основания и сооружения).

Согласно СП 22.13330.16 «Основания зданий и сооружений», при проверке соблюдения вышеприведенного усло-

вия необходимо рассматривать единую систему «основание — фундамент — здание». Но при оценке влияния строительства подземного сооружения на земную поверхность, здания и сооружения такая система не может полностью оценить работу и механизм взаимодействия подрабатываемого объекта и земной поверхности. Нам необходимо рассматривать объекты комплексно и при определении выполнимости данного условия изучить систему «подземное сооружение — грунт — здание». Необходимо учитывать ориентацию подрабатываемого объекта относительно направления ведения горных работ, принимать во внимание очередность строительства подземного сооружения, а также задержку реализации сдвижений на земной поверхности.

Заметим, что предельные значения дополнительных деформаций есть сумма деформаций от всех техногенных факторов, которые связаны со строительно-технологическим воздействием. То есть выделить предельно допустимые деформации от каждого воздействия невозможно. В условии (7) не учитываются завершившиеся деформации от предыдущих техногенных воздействий. Этот фактор может быть частично скомпенсирован категорией технического состояния. Но в рассматриваемых нормах при определении предельно допустимых деформаций этих категорий всего три, и такая грубая классификация не может в полной мере оценить технологическое состояние подрабатываемого объекта.

Подводя итог, можно заключить, что критерии предельных деформаций зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства, диктуемые федеральным СП 22.13330.2016 или региональным ТСН 50-302-2004, не способны обеспечить адекватную оценку уровня повреждений конструкций при подработке или при новом строительстве. Что под-

тверждается рядом примеров из строительной практики [44, 45].

### **Анализ конкретного случая подработки**

На примере строительства эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская» рассмотрим эффективность и достоверность методик и подходов, проанализированных в данной статье.

Станционный комплекс метро «Адмиралтейская» был построен еще в 1997 г., но в эксплуатацию он запущен не был, по причине отсутствия выхода на поверхность. Только в 2010 г. начались работы по строительству эскалаторного тоннеля, которые при этом были осложнены весьма мощной толщей неустойчивых осадочных пород четвертичных ледниковых отложений [46] и очень плотной исторической застройкой в этом районе.

На рис. 6, а представлена схема расположения реперов. По данным маркшейдерско-геодезических измерений был отстроен план распределения оседаний над станционным комплексом метро «Адмиралтейская» (рис. 6, б). Можно видеть, что максимальные оседания локализуются вблизи домов по адресу Кирпичный пер., д. 2, Кирпичный пер., д. 4, Кирпичный пер., д. 6/11, улица Большая Морская, д. 11/6 и Большая Морская, д. 9. В декабре 2013 г. по Кирпичному переулку было зафиксировано максимальное суммарное оседание в 78 мм на реперах № 6 и № 7, на Большой Морской улице максимальные оседания зарегистрированы в реперах № 50 и № 10, они достигли 85 — 94 мм.

Для анализа допустимых и предельных деформаций для здания были выбраны дома № 11/6 и № 9 по Большой Морской улице, так как в основании этих домов на 2013 г. были зафиксированы максимальные оседания, а реставрация этих зданий, по имеющимся данным,

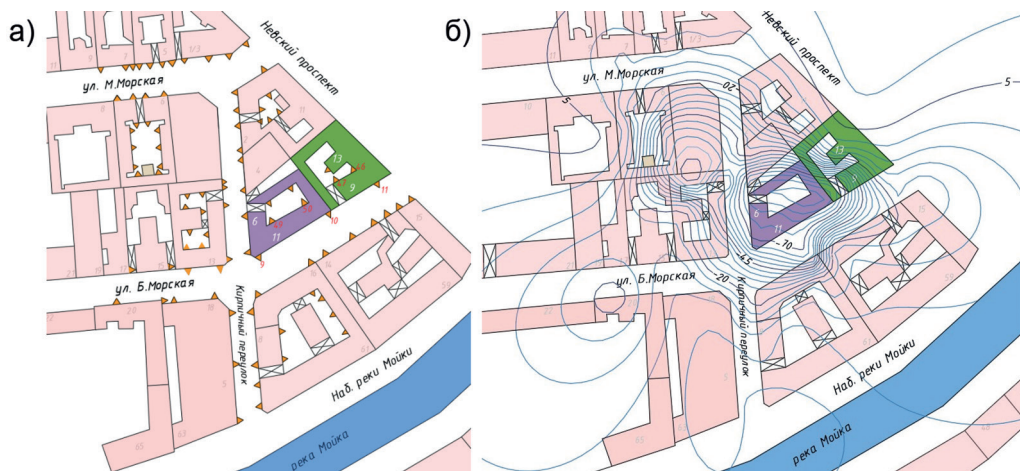


Рис. 6. Схема подрабатываемой городской территории: расположение наблюдательной станции (а); распределение оседаний в зоне влияния горных работ на наземную инфраструктуру (б)

Fig. 6. Scheme of the undermined urban area: location of the observation station (a); distribution of settlements in the zone of influence of mining operations on surface infrastructure (b)

с момента завершения строительства подземного комплекса метро «Адмиралтейская» не проводилась.

Непосредственно под домами № 11/6 и № 9 по Большой Морской улице имеем неравномерное распределение оседаний (рис. 7). Действительно, можем видеть, что реперы № 50 и № 10 оседают больше остальных, при этом вертикальные перемещения реперов по всей

рассматриваемой области очень неоднородны, наблюдаются скачки в значениях перемещений между смежными реперами, что приводит к возникновению повышенных значений деформаций. Для определения влияния деформаций земной поверхности на здание был выбран дом № 9 (памятник архитектуры, известный как дом Чаплиных), так как в его основании развиваются повышенные де-

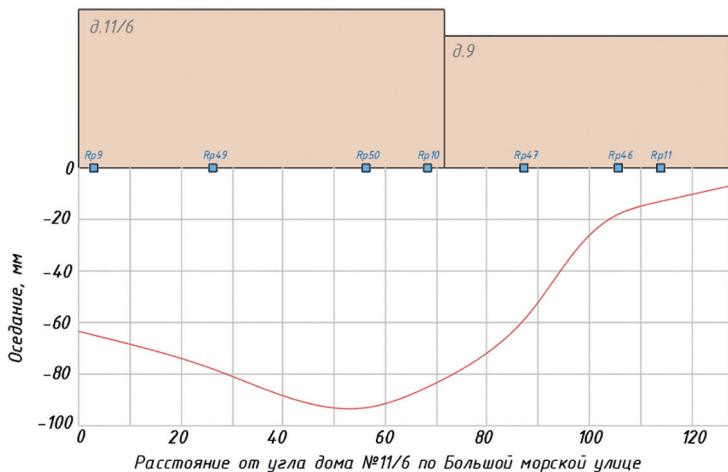


Рис. 7. Профиль распределения оседаний под домами по Кирпичному переулку

Fig. 7. Profile of subsidence distribution under houses along Kirpichny Lane

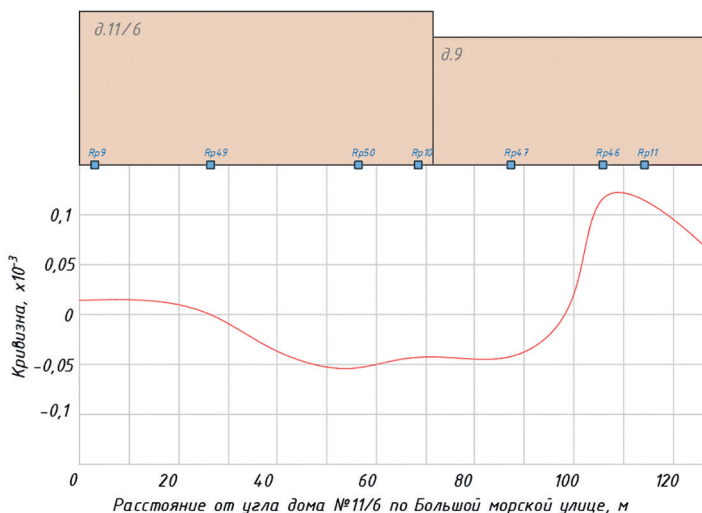


Рис. 8. Кривизна земной поверхности в основании домов по Большой Морской улице  
 Fig. 8. The curvature of the earth's surface at the base of houses along Bolshaya Morskaya Street

формации кривизны земной поверхности положительного и отрицательного знака.

По сути, сооружение находится в переходной зоне — зоне перегиба, вследствие чего в нем могут развиваться существенные деформации, по сравнению с тем же зданием № 11/6, которое практически целиком находится в зоне отрицательной кривизны.

Для определения расчетного показателя суммарных деформаций (1) в соответствии с методикой ПБ 07-269-98 необходимо установить значения кривизны

земной поверхности (рис. 8) и относительные горизонтальные деформации, развивающиеся в основании здания, но так как горизонтальные деформации при строительстве станционных комплексов глубокого заложения весьма малы, ими можем пренебречь, тогда формула (1) примет следующий вид:

$$\Delta l = L \cdot m_k \frac{H}{R_1} \quad (8)$$

Здание № 9 по Большой Морской улице обладает следующими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

**Основные характеристики здания № 9 по Большой Морской улице**  
**The main characteristics of the building No. 9 on Bolshaya Morskaya Street**

Длина здания (L, м)	Высота здания (H, м)	Материал стен	Толщина стен, мм	Износ стен, %	Конфигурация в плане	Грунты в основании
52	14	кирпичная кладка	510 и более	более 30	П-образная	супеси, суглинки

Таблица 2

**Показатели суммарных деформаций для здания № 9 по Большой Морской улице**  
**Indicators of total deformations for building No. 9 on Bolshaya Morskaya Street**

$\Delta l$ , мм	$[\Delta l]_H$ , мм	$[\Delta l]_H$ , мм
43	48	67

Таблица 3

**Предельные и фактические деформации в основании здания № 9 по Большой Морской улице**

**Ultimate and actual deformations at the base of building No. 9 on Bolshaya Morskaya Street**

$(\Delta s / L)_u$	$s_{ad,u}^{max}$ , мм	$\Delta s / L$	$s_{max}$
$0,6 \cdot 10^{-3}$	-10	$2,2 \cdot 10^{-3}$	-93

В свою очередь расчетные, допустимые и предельные показатели деформаций при таких геометрических и конструктивных свойствах в данных условиях подработки будут принимать следующие значения (табл. 2).

Расчетное значение показателя суммарных деформаций не превысило допустимого и предельного порога, это значит, что зданию не грозит потеря работоспособности, а при возникновении незначительных дефектов (мелких трещин) в конструкции можно обойтись легкими ремонтными работами. Отметим, что расчетное значение показателя довольно близко к допустимому, за счет повышенных значений кривизны земной поверхности и большого износа конструкции. Это также обуславливает необходимость проведения более тщательного мониторинга за рассматриваемым зданием и прилегающими к нему сооружениями.

Если рассматривать методику, регламентируемую СП 22.13330.2016, то в качестве оцениваемых критериев, как уже указывалось ранее, выступают предельные осадки и относительная разность осадок. В табл. 3 представлены значения предельных дополнительных деформаций в соответствии с СП 22.13330.2016 для многоэтажного здания исторической застройки II категории технического состояния и фактические деформации в основании рассматриваемого сооружения. Поскольку официальные данные об уровне повреждения рассматриваемого объекта отсутствовали, была выбрана II категория технического состояния здания — «с запасом» в оценке степени подработки (I категория для исторических сооружений отсутствует).

Подрабатываемое здание по адресу Большая Морская улица, д. 9, согласно критериям СП 22.13330.2016, должно

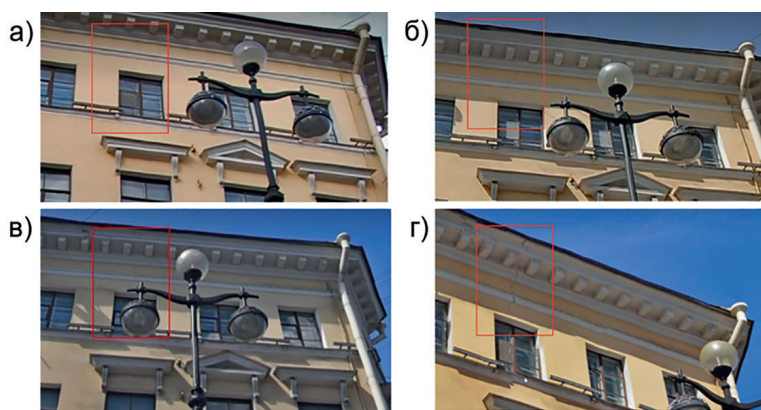


Рис. 9. Развитие повреждений в подрабатываемом здании по адресу г. Санкт-Петербург, Большая Морская улица, д. 9: 2009 г. (а); 2013 г. (б); 2016 г. (в); 2019 г. (г) [Yandex.Panoramas]

Fig. 9. Development of damage in a undermined building at the address St. Petersburg, Bolshaya Morskaya street, 9: 2009 (a); 2013 (b); 2016 (v); 2019 (g) [Yandex.Panoramas]

было получить серьезные повреждения. Но при рассмотрении фото фасадов из повреждений можем видеть только одну нормально ориентированную трещину у карниза здания (рис. 9) в месте локализации максимального значения положительной кривизны (см. рис. 8), а не максимального оседания.

На сегодня функционирование подрабатываемого объекта не нарушено, при этом работы по его реконструкции и ремонту после завершения подземных горных работ так и не проводились. Всего в зоне влияния горных работ по станции «Адмиралтейская» оказалось несколько десятков зданий исторической застройки, критерии деформаций СП 22.13330.2016 для которых также были превышены кратно, однако значимых повреждений эти здания не получили.

### **Заключение**

Анализ приведенной отечественной литературы, норм и правил показал, что проблема оценки влияния деформаций земной поверхности на подрабатываемые сооружения остается весьма актуальной. Имеющиеся подходы к оценке деформационного состояния зданий плохо согласуются между собой. Критерии, регламентируемые федеральными нормами, не учитывают взаимодействие в системе «подземное сооружение — грунт — здание» и дают завышенную оценку, что было подтверждено на примере подработки зданий исторической застройки при строительстве выработок станции метро «Адмиралтейская». В свою очередь, более достоверная методика оценки деформаций, положенная в основу Правил — ПБ 07-269-98, имеет некоторые неопределенности в основных допущениях по геометрическим параметрам.

Основываясь на проведенном анализе, были сделаны следующие выводы:

1. Методы, основанные на ограничении деформаций, в которых сдвиге-

ния и деформации в мульде сдвига накладываются непосредственно на здания и сооружения, могут быть применены только для первичной оценки степени повреждения здания, так как недоучитывают многомерность исследуемого объекта и часто переоценивают потенциальные повреждения.

2. Для одних и тех же фактических деформаций рассмотренные критерии не дают единую оценку и могут завышать степень повреждения подрабатываемого объекта.

3. Деформации в основании здания, вызванные подземными работами и развивающиеся во времени, должны быть отделены от эффектов влияния собственного веса здания и различных природных факторов.

4. Данные наземной наблюдательной станции, которая функционирует в зоне влияния строительства подземных сооружений на земную поверхность и объекты, попадающие в мульду сдвига, должны быть точными и достоверными для правильного понимания того, как распределены деформации земной поверхности [47, 48], каким образом деформируется здание относительно грунта, что происходит с основанием здания и какой тип деформаций оно испытывает. С помощью данных деформационного мониторинга, при условии рационального и оптимального расположения стальных и грунтовых реперов, можно с достаточной точностью оценить развитие деформационных процессов как самого подрабатываемого объекта, так и земной поверхности.

Для решения выявленных проблем при анализе существующих методов оценки влияния горных работ на объекты инфраструктуры необходимо:

- рассмотреть и изучить механизмы деформирования зданий и сооружений с различными конструктивными схемами, в различных условиях подработки



с помощью численного и физического моделирования;

- исследовать и выявить зависимость деформирования зданий разной этажности. Многоэтажные здания при использовании анализируемых методов практически не рассматриваются, их число в перечне обработанных данных незначительно. Это не позволяет применять к ним рассмотренные подходы;
- изучить роль и влияние жесткости здания на уменьшение собственных

деформаций. Определить влияние собственного веса сооружения на перераспределение сдвижений и деформаций в основании конструкции;

- на основании численного и физического моделирования, с учетом данных о реальных случаях подработки зданий, разработать комплексные критерии оценки влияния горных работ на здания и сооружения, которые учитывают взаимодействие системы «подземное сооружение — грунт — здание».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novozhenin S. U., Vystrchil M. G., Bogdanova K. A.* Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.

2. *Карасев М. А., Сотников Р. О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 251. — С. 626 — 638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

3. *Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A.* Geomechanics of lowsubsidence construction during the development space in large cities and megalopolises // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005 — 1014.

4. *Ignatiev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Zh.* Determination of the stress-strain state of rock mass and zone of inelastic deformation around underground mine excavation using modern methods of numerical modeling // *Journal of Sustainable Mining*. 2021, vol. 20, no. 3, pp. 220 — 227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.

5. *Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D.* Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior // *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355 — 371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

6. *Протосеня А. Г., Иовлев Г. А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 5. — С. 128 — 139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139.

7. *Юнгмейстер Д. А., Ячейкин А. И.* Обоснование рациональной конструкции исполнительного органа тоннелепроходческого щита для условий шахт Метростроя Санкт-Петербурга // *Записки Горного института*. — 2021. — Т. 249. — С. 441 — 448. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.13.

8. *Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербилло П. Э.* Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 254. — С. 252 — 260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

Литературу с п. 9 по п. 17 смотри в REFERENCES.

18. *Бочаров С. И.* Разработка методики прогнозирования повреждений зданий, расположенных над горными выработками, на основе многомерного математического моделирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новочеркасск: НПИ, 1984. — 24 с.

19. Варлашкин В. М., Муллер Р. А., Марков В. В. О выборе оптимального показателя суммарных деформаций для определения степени повреждений эксплуатируемых многоэтажных зданий при подработке в Донецком бассейне // Труды ВНИМИ. — 1965. — № 35. — С. 112–145.

20. Варлашкин В. М., Марков В. В. Обобщение случаев подработки гражданских зданий в Донбассе. — М.: Центрогипрошахт, 1961. — 112 с.

21. Решетов Г. А. Износ и предельные условия эксплуатации гражданских зданий на подрабатываемых территориях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л.: ЛИИЖТ, 1975. — 23 с.

22. Шагалов С. Е., Муллер Р. А., Марков В. В. Защита и подработка зданий и сооружений. — М.: Недра, 1974. — 256 с.

23. Балезин Р. Л., Шулятьев О. А., Шулятьев С. О., Буслев А. С. Выявление критериев, определяющих ограничение деформаций оснований фундаментов высотных зданий // Вестник НИЦ «Строительство». — 2021. — Т. 29. — С. 13–27. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-13-27.

Литературу с п. 24 по п. 36 смотри в REFERENCES.

37. Волохов Е. М., Зеленцов С. Н., Хуцкий В. П. Проблемы нормативного и методического обеспечения оценки вредного влияния подземного строительства и мониторинга деформаций для условий Санкт-Петербурга // Записки Горного института. — 2012. — № 199. — С. 260–262.

38. Токарь Р. А. О расчете оснований по деформациям // Труды института НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. — 1956. — Т. 30. — С. 5–38.

39. Польшин Д. Е. О расчетах оснований сооружений по предельным состояниям // Основания. Фундаменты и механика грунтов. — 1959. — № 1. — С. 9–11.

40. Васильев Б. Д. Возведение капитальных зданий на сильно сжимаемых основаниях. — М., 1952. — 128 с.

41. Цытович Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. — М.: Академия наук СССР, 1958. — 168 с.

42. Polshin D. E., Tokar R. A. Maximum allowable non-uniform settlement of structures // International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 1957, vol. 1, pp. 402–405.

43. Васенин В. А. Оценка осадок исторической застройки Санкт-Петербурга по результатам длительных мониторинговых наблюдений / Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: Сборник международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию образования кафедры геотехники СПбГАСУ (механики грунтов, оснований и фундаментов ЛИСИ) и 290-летию российской науки. — 2014. — С. 20–26.

44. Конюхов Д. С. Безопасность существующей застройки при производстве подземных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 158–167. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_158.

45. Куликова Е. Ю., Конюхов Д. С. Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 97–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_97.

46. Дашко Р. Э., Лохматиков Г. А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 180–190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.

47. Хатум Х. М., Мустафин М. Г. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. — 2020. — Т. 81. — С. 2–13. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.

48. Вальков В. А., Виноградов К. П., Валькова Е. О., Мустафин М. Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. — 2022. — Т. 83. — С. 40–49. DOI: 10.22389/0016-7126-989-11-40-49. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Novozhenin S. U., Vystrchil M. G., Bogdanova K. A. Analysis of the mathematical modelling results of displacements and deformations induced by the construction of the escalator tunnel of «Mining Institute» station in Saint Petersburg. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012105. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012105.

2. Karasev M. A., Sotnikov R. O. Prediction of the stress state of the shotcreting support under repeated seismic load. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 626–638. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

3. Protosenya A. G., Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A. Geomechanics of lowsubsidence construction during the development space in large cities and megalopolises. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005–1014.

4. Ignatiev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Zh. Determination of the stress-strain state of rock mass and zone of inelastic deformation around underground mine excavation using modern methods of numerical modeling. *Journal of Sustainable Mining*. 2021, vol. 20, no. 3, pp. 220–227. DOI: 10.46873/2300-3960.1324.

5. Nguyen Tai Tien, Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355–371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

6. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Prediction of spatial stress–strain behavior of physically nonlinear soil mass in tunnel face area. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 128–139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139.

7. Yungmeister D. A., Yacheykin A. I. Rational design justification of the tunnel boring shield executive body for the conditions of the mines of Saint Petersburg Metrostroy. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 441–448. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.13.

8. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252–260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

9. Kujawa M., Lubowiecka I., Szymczak C. Finite element modelling of a historic church structure in the context of a masonry damage analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2020, vol. 107, article 104233. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104233.

10. Golik V. I., Kongar-Syuryun Ch. B., Michałek A., Pires P., Rybak A. Ground transmitted vibrations in course of innovative vinyl sheet piles driving. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1921, no. 1, article 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1921/1/012083.

11. Gregori A., Mercuri M., Angiolilli M., Pathirage M. Simulating defects in brick masonry panels subjected to compressive loads. *Engineering Structures*. 2022, vol. 263, article 114333. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114333.

12. Liu B., Xue J., Lehane B. M. Centrifuge investigation of soil – foundation – superstructure interaction under static loading. *Engineering Structures*. 2023, vol. 281, article 115779. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115779.

13. Cao Z., Ba X., Yuan Z., Wang J., Zheng K., Xu Y. An analytical solution for the dynamic tunnel – soil – shallow foundation interaction under a harmonic point load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023, vol. 164, article 107647. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107647.

14. Dalgic K. D., Hendriks M. A., Ilki A., Broere W. A two-stage numerical analysis approach for the assessment of the settlement response of the pre-damaged historic Hoca Pasha

Mosque. *International Journal of Architectural Heritage*. 2019, vol. 13, no. 5, pp. 704–724. DOI: 10.1080/15583058.2018.1469174.

15. Pascariello M. N., Luciano A., Bilotta E., Acikgoz S., Mair R. Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 131, article 104845. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104845.

16. Ritter S., Giardina G., Franza A., DeJong M. J. Building deformation caused by tunneling: centrifuge modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020, vol. 146, no. 5, pp. 1–17. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.00022.23.

17. Xu J., Franza A., Marshall A. M. Response of Framed Buildings on Raft Foundations to Tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020, vol. 146, no. 11, article 04020120. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002376.

18. Bocharov S. I. *Razrabotka metodiki prognozirovaniya povrezhdeniy zdaniy, raspolozhenykh nad gornymi vyrabotkami, na osnove mnogomernogo matematicheskogo modelirovaniya* [Development of a methodology for predicting damage to buildings located above mine workings based on multidimensional mathematical modeling], Candidate's thesis, Novocherkassk, NPI, 1984, 24 p.

19. Varlashkin V. M., Muller R. A., Markov V. V. On the choice of the optimal indicator of total deformations to determine the degree of damage to multi-storey buildings in operation during mining in the Donetsk basin. *Trudy VNIMI*. 1965, no. 35, pp. 112–145. [In Russ].

20. Varlashkin V. M., Markov V. V. *Obobshchenie sluchayev podrabotki grazhdanskikh zdaniy v Donbasse* [Generalization of cases of undermining of civil buildings in Donbass], Moscow, Tsentrogiproshakht, 1961, 112 p.

21. Reshetov G. A. *Iznos i predel'nye usloviya ekspluatatsii grazhdanskikh zdaniy na podrabatyvaemykh territoriyakh* [Depreciation and limiting conditions for the operation of civil buildings in undermined territories], Candidate's thesis, Leningrad, LIIZhT, 1975, 23 p.

22. Shagalov S. E., Muller R. A., Markov V. V. *Zashchita i podrabotka zdaniy i sooruzheniy* [Protection and underworking of buildings and structures], Moscow, Nedra, 1974, 256 p.

23. Balezin R., Shulyatyev O., Shulyatyev S., Buslov A. Criteria definition for high-rise buildings foundations deformation limitation. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021, vol. 29, pp. 13–27. [In Russ]. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-13-27.

24. Boscardin M. D., Cording E. J. Building response to excavation-included settlement. *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*. 1989, vol. 115, pp. 1–21.

25. Burland J. B., Wroth C. P. Settlement of buildings and associated damage. *Building Research Establishment*. 1975, vol. 65, article 00127405.

26. Timoshenko S. *Strength of materials*. Van Nostrand, New York, 1957, 571 p.

27. Jian Y., Leung C. F., Maosong H., Tan J. Q. W. Assessment of settlement-based strain in masonry building facade due to tunneling. *Computers and Geotechnics*. 2022, vol. 144, article 104658. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.104658.

28. Son M., Cording E. J. Estimation of building damage in a 3D distorting structure to tunnel and underground excavation-induced ground movements. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 97, pp. 511–521. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103222.

29. Franza A., Deck O., DeJong M. J. Charts for the mining-induced deflection of buildings. *Canadian Geotechnical Journal*. 2020, vol. 57, no. 12, pp. 2020–2026. DOI: 10.1139/cgj-2019-0041.

30. Liu N. W., Liang Y. Y., Yu F. K., Gong X. N., Chen Y. T. Estimation of building damage caused by adjacent deep excavation in clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 430–445. DOI: 10.1680/jgeen.19.00097.

31. Zhao C., Schmödderich C., Barciaga N., Röchter R. Response of building to shallow tunnel excavation in different types of soil. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 115, article 103165. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103165.

32. Burd H. J., Yiu W. N., Acikgoz S., Martin C. M. Soil-foundation interaction model for the assessment of tunnelling-induced damage to masonry buildings. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022, vol. 119, article 104208. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104208.

33. Dalgic K. D., Gulen B., Liu Y., Acikgoz S., Burd H., Marasli M., Ilk A. Masonry buildings subjected to settlements: Half-scale testing, detailed measurements, and insights into behavior. *Engineering Structures*. 2023, vol. 278, article 115233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115233.

34. Giardina G., DeJong M. J., Chalmers B., Ormond B., Mair R. J. A comparison of current analytical methods for predicting soil-structure interaction due to tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 79, pp. 319–335. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.013.

35. Amorosi A., Sangirardi M. Coupled three-dimensional analysis of the progressive tunnelling-induced damage to masonry buildings: is it always worth it? *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 118, article 104173. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104173.

36. Bilotta E., Paolillo A., Russo G., Aversa S. Displacements induced by tunnelling under a historical building. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 61, pp. 221–232. DOI: 10.1016/j.tust.2016.10.007.

37. Volokhov E. M., Zelentsov S. N., Khutsky V. P. Problems of regulatory and methodological support for assessing the harmful effects of underground construction and deformation monitoring for the conditions of St. Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2012, no. 199, pp. 260–262. [In Russ].

38. Tokar R. A. On the calculation of foundations by deformation. *Trudy instituta NIIOSP im. N.M. Gersevanova Gosstroya SSSR*. 1956, vol. 30, pp. 5–38. [In Russ].

39. Polshin D. E. On the calculations of the foundations of structures for limiting states. *Fundamenty i mekhanika gruntov*. 1959, no. 1, pp. 9–11. [In Russ].

40. Vasil'ev B. D. *Vozvedenie kapital'nykh zdaniy na sil'no szhimaemykh osnovaniyakh* [Erection of capital buildings on highly compressible foundations], Moscow, 1952, 128 p.

41. TSytovich N. A. *Osnovaniya i fundamenty na merzlykh gruntakh* [Bases and foundations on frozen soils], Moscow, Akademiya nauk SSSR, 1958, 168 p.

42. Polshin D. E., Tokar R. A. Maximum allowable non-uniform settlement of structures. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 1957, vol. 1, pp. 402–405.

43. Vasenin V. A. Modern geotechnologies in construction and their R&D support. *Sovremennye geotekhnologii v stroitel'stve i ikh nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie: Sbornik mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu obrazovaniya kafedry geotekhniki SPbGASU (mekhaniki gruntov, osnovaniy i fundamentov LISI) i 290-letiyu rossiyskoy nauki* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Geotechnics (Department of Foundation and Soil Engineering of the Leningrad Civil Engineering Institute) and the 290th anniversary of the Russian science], 2014, pp. 20–26. [In Russ].

44. Konyukhov D. S. Safety of existing buildings during underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 158–167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_158.

45. Kulikova E. Yu., Konyukhov D. S. Accident risk monitoring in underground space development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 97–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_97.

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

47. Khatum Kh. M., Mustafin M. G. Optimization of the location of robotic stations for observing deformations of buildings and structures. *Geodesy and Cartography*. 2020, vol. 81, pp. 2–13. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.

48. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodesy and Cartography*. 2022, vol. 83, pp. 40–49. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-989-11-40-49.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Волохов Евгений Михайлович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*Кожухарова Василина Константиновна*<sup>1</sup> — аспирант,

e-mail: s225049@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0009-0008-0705-3646,

*Бритвин Илья Александрович*<sup>1</sup> — аспирант,

e-mail: s205048@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*Жерлыгина Екатерина Сергеевна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: bazilyak.e.s@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3404-0863,

*Савков Борис Михайлович* — генеральный директор,

ООО «ГИРО», e-mail: giro08@mail.ru,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,

**Для контактов:** Кожухарова В.К., e-mail: s225049@stud.spmi.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.M. Volokhov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*V.K. Kozhukharova*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: s225049@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0009-0008-0705-3646,

*I.A. Britvin*<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: s205048@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*E.S. Zherlygina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: bazilyak.e.s@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3404-0863,

*B.M. Savkov*, General Director, GIRO LLC,

e-mail: geogiro@mail.ru

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** Kozhukharova V.K., e-mail: s225049@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 24.03.2023; получена после рецензии 24.04.2023; принята к печати 10.07.2023.

Received by the editors 24.03.2023; received after the review 24.04.2023; accepted for printing 10.07.2023.

