

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА СДВИЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАНЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Е.М. Волохов¹, И.А. Бритвин¹, В.К. Кожухарова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: britvini25@yandex.ru

Аннотация: Проведена оценка достоверности методов расчета сдвижений земной поверхности при строительстве крупных выработок метрополитена глубокого заложения. В контексте защиты зданий, сооружений и другой наземной инфраструктуры городов и мегаполисов от вредного влияния горных работ при строительстве метрополитенов вопрос достоверности прогнозных методов расчета деформаций является ключевым. С приходом в практику проектирования численных методов для прогнозной оценки и наметившегося в последнее десятилетие перехода на их исключительное использование проблема обеспечения точности и достоверности прогноза деформаций этими методами в сравнении с традиционными эмпирическими и аналитическими методами выходит на первый план, а исследований, посвященных данному вопросу, недостаточно. Произведена сравнительная оценка основных традиционных эмпирических, аналитико-эмпирических расчетных методов прогноза и численного моделирования. На основе анализа расчетного аппарата и результатов прогнозов выявлены достоинства и недостатки методов оценки сдвижений и деформаций. Показана сильная зависимость уровней деформаций от текущих технологических параметров. Обозначена зависимость достоверности традиционных методов от так называемых эмпирических коэффициентов, корректирующих результаты расчета для конкретных условий проходки, и непроработанность аппарата их получения и оценки. Для численных методов, при всех их высоких потенциальных расчетных возможностях, показаны их ограничения и зависимость результатов от применяемых моделей сред и их входных характеристик, корректно оценить которые в лабораторных условиях невозможно. Сформулированы рекомендации по выбору и корректировке прогнозных методов и подходов.

Ключевые слова: муьда оседания, прогноз сдвижений и деформаций, аналитико-эмпирические методики, численное моделирование, охрана зданий, строительство метрополитена, станционные комплексы, глубокое заложение.

Для цитирования: Волохов Е. М., Бритвин И. А., Кожухарова В. К. Проблемы обеспечения достоверности прогноза сдвижений поверхности при строительстве станционных комплексов метрополитена глубокого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 36–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_36.

Reliability of ground surface movement prediction in construction of stationary facilities in deep subways

E.M. Volokhov¹, I.A. Britvin¹, V.K. Kozhukharova¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: britvini25@yandex.ru

Abstract: Reliability of calculation methods of ground surface movement in construction of large-size tunnels in deep subways is assessed. In the context of protection and guard of buildings, structures and the other surface infrastructure in towns and cities from the adverse effect of mining operations in subway construction, reliability of deformation prediction is a critical issue. With the expanding practice of using exclusively numerical methods in predictions in the latest decade, accuracy and reliability of deformation predictions using these methods as compared with the conventional empirical and analytical approaches become the top-priority challenge, while it lacks comprehensive research. The main conventional empirical and analytical-empirical prediction techniques are compared with the numerical modeling method. The analysis of calculation tools and prediction results reveals the benefits and disbenefits of these estimation methods of displacements and deformations. It shown that levels of deformations strongly depend on the actual process variables. Reliability of the conventional methods depends on the so-called empirical coefficients, which adjust calculations for specific tunneling conditions, and on the insufficient elaboration of apparatus of calculations and estimation of their results. For the numerical methods having high potential computational capacities, it is demonstrated that they also have limitations and their results depend on the involved models of environment and their input characteristics which are impossible to evaluate correctly on a laboratory scale. The recommendations on the selection and correction of the prediction methods and approaches are formulated.

Key words: subsidence trough, displacement and deformation prediction, analytical-empirical procedures, numerical modeling, building protection, subway construction, stationary facilities, great depth.

For citation: Volokhov E. M., Britvin I. A., Kozhukharova V. K. Reliability of ground surface movement prediction in construction of stationary facilities in deep subways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):36-61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_36.

Введение

Активное освоение подземного пространства в мировых мегаполисах неминуемо приводит к развитию сдвижений и деформаций на земной поверхности. Исследование данной проблемы в мировом научном сообществе активно началось еще в середине XX в. в эпоху интенсивного подземного строительства в исторических районах крупных городов. В то время прогноз осуществлялся

главным образом на базе аналитических решений, подкрепленных данными натурных наблюдений. Так, например, в отечественной методологии широко известна аналитико-эмпирическая методика проф. Ю.А. Лиманова [1], получившая последующее развитие в работах В.Ф. Подакова [2], В.П. Хуцкого [3], Е.М. Волохова [4]; в зарубежной практике самая популярная методика — методика Реск [5], которая развивалась в работах мно-

гих европейских и американских ученых [6–8]. С развитием возможностей и мощностей ЭВМ прогноз деформаций и их вредного влияния постепенно переориентировался на использование численных методов (преимущественно метода конечных элементов), реализованных в прикладных программных комплексах. Данный подход к прогнозу деформаций при строительстве подземных сооружений обладает большей вариативностью и используется как в России [9–11], так и за ее пределами [12–14]. Необходимо отметить, что в зарубежной практике не утратили актуальности исследования на физических моделях (методами эквивалентных материалов, центробежного моделирования и др.) [15]. Эти методы широко применялись и в отечественной практике для объектов метрополитена с 50-х годов [1, 16]. Есть и современные работы, где на физических моделях — центрифугах изучается взаимодействие системы «тоннель — массив — здание» и оценивается вредное влияние строительства [17–19].

Несмотря на существенные мировые и отечественные достижения в изучении вопроса прогноза и оценки вредного воздействия горных работ, проблема обеспечения достоверности прогноза деформаций при строительстве станционных комплексов метрополитена по-прежнему остается актуальной. Сложная компоновка выработок, значительное количество одновременно сооружаемых выработок таких комплексов, большое поперечное сечение выработок, а также наложение деформационных процессов от разных выработок в условиях взаимовлияния создают условия для проявления существенных для зданий и сооружений деформаций. Задача прогноза и оценки деформаций здесь существенно усложняется, а достоверность расчетов снижается, особенно при рассмотрении развития деформационных процес-

сов на разных стадиях строительства станций метрополитена.

Использование закрытого (горного) способа в подземном строительстве часто связано с вопросами сохранения исторической застройки центров крупных мегаполисов. Рассматривая проблему проектирования в подобном ракурсе, иногда приходится использовать для таких объектов и значительные глубины заложения (от 40–60 м до 100–150 м). Использование глубокого заложения для объектов метрополитена характерно для Санкт-Петербурга (более 85% станций), Москвы (станции Кольцевой линии), Киева (самая глубокая станция в мире «Арсенальная»), Алма-Аты (5 станций глубокого заложения), Пхеньяна (практически все станции), Лондона (более 50% станций), Праги (ряд станций линии А). Например, для петербургского метростроения кроме обширных территорий с исторической застройкой и выдержанного рельефа характерны сложные инженерно-геологические условия, особенно в верхней четвертичной толще породного массива, мощность этой толщи слабых, неустойчивых и обводненных пород, не приспособленных для крупного подземного строительства, обычно находится в пределах 35–40 м [20]. Вследствие этого большинство станций здесь имеют глубокое заложение и сооружаются в толще переуплотненных протерозойских глин.

Для станций глубокого заложения вредное влияние горных работ характеризуется большой площадью зоны влияния, неоднородностью значений деформаций по глубине и площади распространения, интенсивным развитием их во времени (вслед за движущимися забоями), плохо предсказуемыми наложениями деформаций от разных выработок комплекса, проявлением реологических процессов в породном массиве (существенно изменяющем первичные дефор-

мации даже после окончания горных работ). В результате такого наложения деформаций их уровень для некоторых областей зоны влияния может местами временнократно превышать их уровень на момент окончания горных работ по станции.

Одним из таких станционных комплексов является сооружаемая в настоящее время станция петербургского метрополитена «Театральная», на примере которой проиллюстрирована проблема обеспечения достоверности прогноза сдвижений и деформаций на земной поверхности. Указанный объект выбран как пример для анализа в связи с типичными условиями оценки вредного влияния подземного строительства в отечественных мегаполисах с историческими микрорайонами: высокие уровни деформаций, наличие плотной застройки со зданиями, имеющими культурную и историческую ценность, отсутствие региональной нормативной базы для наблюдений и обоснования мер охраны зданий, большое количество организаций субподрядчиков, ведущих горные работы и натурные наблюдения, плохая координация и согласованность взаимных

действий этих организаций и, как следствие, высокие риски появления аварийных ситуаций и нанесения значительного ущерба объектам инфраструктуры на поверхности.

Методы оценки сдвижений и деформаций подземного строительства

Уровень влияния строительства тоннелей предварительно определяется прогнозным расчетом. Наибольшее распространение и известность в зарубежной практике получила эмпирико-аналитическая методика Пекк [5], который, проанализировав данные натурных наблюдений при проходке тоннелей, предложил описывать форму поперечной мульды сдвижений функцией нормального распределения – кривой Гаусса (рис. 1):

$$S(y) = S_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right), \quad (1)$$

где $S(y)$ – оседание поверхности в заданной точке; S_{\max} – максимальное оседание поверхности; y – расстояние от оси тоннеля до рассматриваемой точки; i – расстояние от оси тоннеля до точки перегиба мульды.

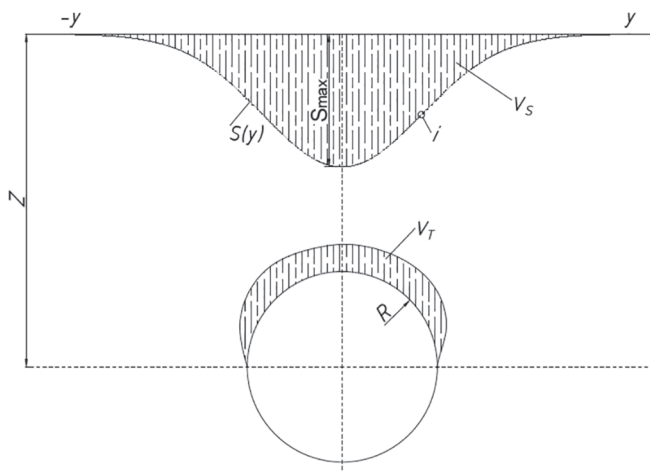


Рис. 1. Расчетная схема к прогнозу оседаний над одиночным тоннелем по методике Пекк [5]

Fig. 1. Estimation scheme for settlement prediction above a single tunnel by Peck method [5]

Опираясь на гипотезу о равенстве объемов «потерянного» грунта в массиве при проходке тоннеля V_T (уменьшения сечения выработки до полного вступления в работу основной крепи) и мульды на земной поверхности V_S , предлагалось проинтегрировать выражение (1) и определить объем мульды оседания V_S на единицу длины:

$$V_S = \int_{-\infty}^{+\infty} S(y)dy = \sqrt{2\pi}iS_{\max} = 2,5iS_{\max}. \quad (2)$$

Параметр потерь грунта V_L (англ. «volume loss») рассматривается как отношение объема потерянного грунта из-за уменьшения сечения выработки V_T (на единицу длины) к объему тоннеля (на единицу длины), выражается в процентах:

$$V_L = \frac{V_T}{\pi R^2} \cdot 100\% = \frac{V_S}{\pi R^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где R — радиус тоннеля.

По сути, здесь речь идет о сокращении площади сечения выработки при деформационных процессах, которая фиксируется в относительных величинах. Данное сокращение площади сечения рассматривается как следствие деформирования массива в призабойной зоне, наличия зазора между массивом и оболочкой щита (щиты имеют конусную форму — их сечение сокращается к хвосту), неполного заполнения тампонажным раствором пустот между породным контуром (за оболочкой щита) и обделкой, а также деформации обделки при вступлении ее в работу [21].

Величину максимального оседания соответственно предлагается определять как

$$S_{\max} = \frac{V_S}{\sqrt{2\pi}i} = 0,0125 \frac{R^2 V_L}{i}, \quad (4)$$

Методика оценки сдвижений, как видно, опирается на два основных па-

раметра: параметр потерь грунта V_L (для которого не приводятся способы, опирающиеся на какие-либо технологические параметры) и ординату точки перегиба i .

Точка перегиба профиля полумульды в поперечном направлении i определяет ее длину, а также является ключевым параметром при оценке деформационного воздействия на здание, поскольку находится на границе зон прогиба и выгиба мульды оседаний.

Существует множество аналитических подходов для идентификации положения точки перегиба на кривой нормального распределения [22]. В оригинальной формуле, предложенной Пекк [5], положение точки перегиба зависит от диаметра тоннеля, глубины его заложения и свойств вмещающего массива:

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z}{2R} \right)^n, \quad (5)$$

где R — радиус тоннеля; Z — глубина его залегания; n — параметр, зависящий от грунтовых условий.

O'Reilly & New [7] на базе натуральных наблюдений методом регрессионного анализа получили упрощенную линейную зависимость между положением точки перегиба мульды и глубиной заложения тоннеля:

$$i = k(Z - Z_0), \quad (6)$$

где k — коэффициент, характеризующий длину полумульды и зависящий от типа грунта; Z_0 — глубина залегания рассматриваемой точки в массиве (на земной поверхности $Z_0 = 0$).

Для глин k может изменяться в диапазоне от 0,4 до 0,6 [23], в упрощенном варианте предлагается брать $k = 0,5$ [8].

Принято считать, что расстояния от тоннеля до точки перегиба мульды в поперечном и продольном направлениях одинаковы: $i_y = i_x = i$ [8]. Таким образом, зона влияния на земной поверхности от

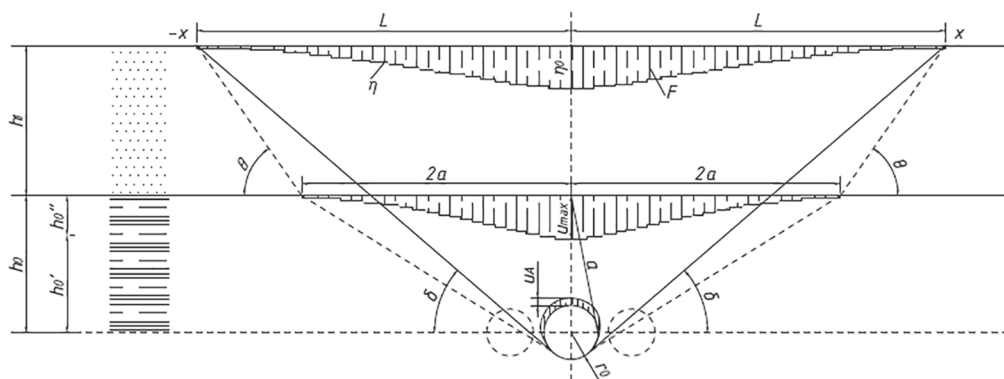


Рис. 2. Расчетная схема к прогнозу оседаний над одиночным тоннелем по методике Лиманова [1] с дополнениями Подакова [2]

Fig. 2. Estimation scheme for settlement prediction above a single tunnel by Limanov method [1] with additions by Podakov [2]

проходки тоннельной выработки определяется здесь только величиной i .

Так как кривая Гаусса приближается к нулю асимптотически и нет ясности с границей зоны сдвижения, в качестве границ поперечной мульды предлагается брать точки на расстоянии $3i$ от ее центра [8].

В дальнейшем Attewell & Woodman доработали метод Реск и предложили схему расчета оседаний в любой точке мульды на поверхности [6].

Гипотеза о распределении оседаний в мульде сдвижения по экспоненциальной функции нормального закона находит свой отклик не только в зарубежной практике расчетов, но и в отечественной [24], причем была предложена советскими исследователями на несколько лет раньше.

В отечественной практике оценки сдвижений (оседаний) поверхности при проходке тоннелей глубокого заложения получила распространение аналитико-эмпирическая методика проф. Ю.А. Лиманова [1], разработанная для горно-геологических условий Ленинграда. Исходными данными для этого прогнозного расчета ожидаемых оседаний служат геометрические параметры выработки и физико-механические свойства по-

род вмещающей толщи (коэффициент Пуассона, модуль упругости) и мощности слоев (рис. 2).

Опираясь на аналитическое решение плоской задачи механики сплошной среды проф. С.Г. Гутмана об одиночной выработке круглого сечения, помещенной в упругую изотропную невесомую полуплоскость, Ю.А. Лиманов установил зависимость между оседаниями шельги свода выработки UA и максимальным оседанием мульды на контакте коренных и четвертичных отложений U_{\max} и предложил выражение для определения U_{\max} :

$$U_{\max} = (1 - \mu^2) \frac{P}{E} \frac{4r_0^2 h_0}{h_0^2 - r_0^2}, \quad (7)$$

где r_0 — радиус тоннельной выработки; h_0 — глубина заложения центра тоннеля в толще кембрийских глин; μ — коэффициент Пуассона коренных пород (аргиллитоподобных глин); E — модуль деформации коренных пород; P — условная равномерно распределенная нагрузка, действующая на контуре тоннеля.

P предлагается определять через усреднение неравномерного давления по формуле

$$P = \left(\frac{1 + \lambda}{2} \right) P_B, \quad (8)$$

здесь λ — коэффициент бокового давления (бокового распора) в протерозойских глинах, $\lambda = \mu/(1 - \mu)$; P_B — нагрузка, действующая на глубине заложения центра выработки, $P_{\square} = \gamma_1 h_1 + \gamma_0 h_0$, где γ_1 — объемный вес четвертичных отложений; h_1 — мощность четвертичных отложений; γ_0 — объемный вес коренных пород (глин); h_0 — мощность нижнекембрийских глин и глин переходного слоя.

Учитывая схему развития сдвижений в наносах и угол сдвижения в сыпучих грунтах $\theta = \pi/4 + \varphi/2$ (предложенные акад. С.Г. Авершиным), проф. Ю.А. Лиманов определил границы мульды оседаний на земной поверхности от границы мульды на контакте двух толщ (см. рис. 2). Для описания формы кривой оседания земной поверхности было предложено использовать выражение акад. С.Г. Авершина [25], считавшееся тогда универсальным:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^4 \exp\left(\frac{4x}{L}\right), \quad (9)$$

где η — оседание в точке с абсциссой x ; η_0 — максимальное оседание в центре мульды; L — длина полумульды на поверхности.

С учетом не опровергнутой до сих пор гипотезы равенства площадей мульды на контакте коренных пород с четвертичными отложениями и поверхности, а также принятых форм кривых оседаний Ю.А. Лиманов определил интегрированием площадь мульды и предложил выражение для вычисления максимального оседания η_0 :

$$\eta_0 = \frac{F}{L}, \quad (10)$$

где F — площадь мульды оседания на контакте протерозоя (коренных пород) с четвертичными отложениями; L — длина полумульды на земной поверхности.

Интегрирование по функции оседаний из решения проф. С.Г. Гутмана на

интервале $(-\infty, +\infty)$ дает следующее выражение:

$$F = a\pi U_{\max} = \sqrt{h_0^2 - r_0^2} \pi U_{\max}. \quad (11)$$

Анализ влияния технологических параметров, свойств пород и взаимовлияния выработок позволил Ю.А. Лиманову предложить расчет оседаний в своде тоннеля U_A для i -й тоннельной выработки в зависимости от времени ее нахождения без крепления:

$$U_{A,i} = U_0 + n(\arctg\Delta_1 t + \Delta_2 t), \quad (12)$$

где U_0 — величина упругой деформации в шельге свода незакрепленного контура выработки в мм,

$$U_0 = U_A \frac{E}{E_c}, n = \frac{2(U_A - U_0)}{\pi};$$

E_y — модуль упругости породы; Δ_1 и Δ_2 — коэффициенты, характеризующие интенсивность развития деформаций и зависящие от свойств горных пород; t — время нахождения выработки без крепления в сутках.

Длина полумульды на поверхности из расчетной схемы (см. рис. 2) получается

$$\begin{aligned} L &= 2a + h_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = \\ &= 2\sqrt{h_0^2 - r_0^2} + h_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

где φ — усредненный угол внутреннего трения для четвертичных отложений.

Из расчетной схемы Ю.А. Лиманова видно, что размер мульды на контакте определяется величиной

$$2a = 2\sqrt{h_0^2 - r_0^2},$$

которую автор условно фиксирует по уровню погрешности определения оседаний (оседаний на контакте толщ). Необходимо отметить, что уровень оседаний в этой точке для разных глубин и радиусов тоннелей сильно варьируется,

соответственно, и граница мульды будет определяться недостаточно четко. Есть проблема и с не совсем корректным эффектом уменьшения размеров мульды с ростом диаметра тоннеля.

Методика Ю.А. Лиманова имеет еще один недостаток, связанный с тем, что прогнозная оценка вредного влияния ориентирована только на оценку оседаний (деформации по методике Ю.А. Лиманова не рассчитываются). В связи с этим В.Ф. Подаков и др. [2] доработали эту методику. Для расчета ожидаемых оседаний, наклонов и кривизны земной поверхности они предложили использовать метод типовых кривых с нормированными (единичными) функциями типовых кривых оседаний и деформаций в мульде сдвижения для горно-геологических условий Санкт-Петербурга.

Данный подход стал соответствовать классической для маркшейдерской практики схеме прогнозной оценки, изложенной в Правилах охраны (например, в ПБ 07-269-98 «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разра-

боток на угольных месторождениях»). Методика Лиманова-Подакова позволяет определить зону влияния, определить ожидаемые оседания и деформации, а также уровень их воздействия на здания.

Другим перспективным направлением прогнозирования вредного влияния строительства тоннелей является применение численных методов моделирования, таких как метод конечных элементов (МКЭ). На сегодняшний день в мировой практике большинство прогнозных оценок сопровождается численным моделированием, поскольку с его помощью возможно спрогнозировать поведение неоднородного (многослойного) массива анизотропных, физически нелинейных пород при сооружении в нем выработок крупных станционных комплексов. Конечно-элементные модели позволяют точно воссоздать геометрию подземного сооружения и способны учесть стадийность сооружаемого объекта. Численные модели позволяют учесть различные параметры породных массивов (анизотропность деформационных и прочно-

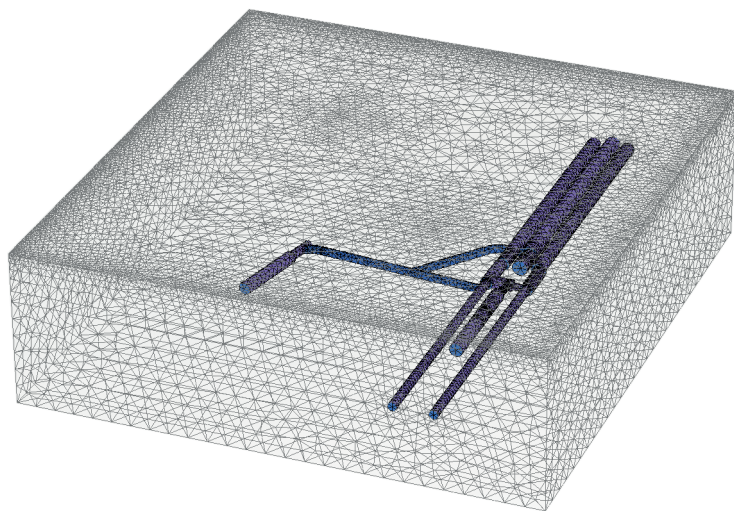


Рис. 3. Конечно-элементная модель станционного комплекса глубокого заложения (станция «Театральная»)

Fig. 3. Finite element model of the deep-laid station complex (Teatralnaya station)

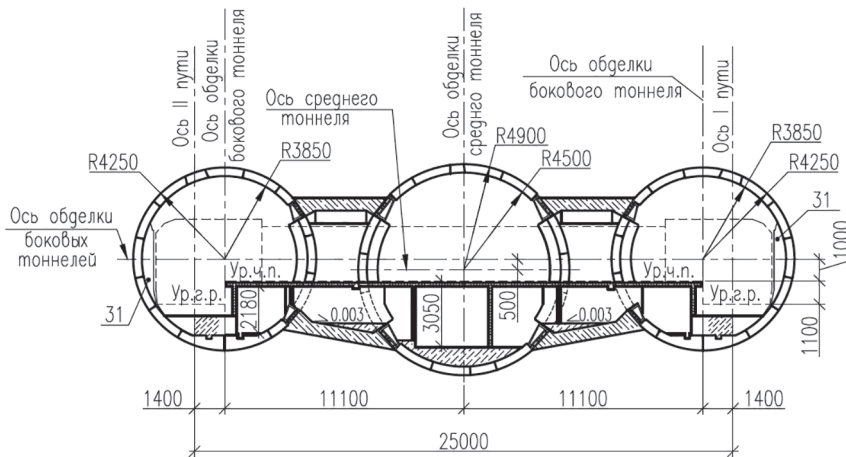


Рис. 4. Сечение станции «Театральная» на участке проемов [Из материалов проектно-сметной документации строительства]

Fig. 4. Section of the Teatralnaya station in the passage zone [Design and estimate documentation of construction data]

стных свойств [26, 27], реологические свойства [28, 29] и т.д.), достоверно описать напряженно-деформированное состояние породного массива и подземных конструкций. Вследствие упомянутых достоинств в своих прогнозных оценках мы также часто используем МКЭ для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива при строительстве станций метрополитена (рис. 3). Однако такие модели могут характеризоваться низкой количественной достоверностью, особенно если они не прошли верификацию и не откалиброваны по данным натуральных наблюдений [30].

Анализ данных натуральных наблюдений, приведенный в работе, основан на использовании результатов измерений оседаний деформационных стенных и профильных реперов наблюдательной станции на поверхности над строящейся станцией метрополитена. Сеть реперов нерегулярна, их расположение несимметрично относительно оси станции, на стенные реперы могла оказывать влияние жесткость подрабатываемых зданий и работы по компенсационному нагне-

танию. Для удобства анализа точечные данные интерполировались нелинейными методами, полученные муьды оседаний поверхности представлялись в изолиниях оседаний.

В рамках исследования приводится прогнозный расчет сдвижений и зоны вредного влияния строительства станции метрополитена глубокого заложения по изложенным выше методикам (эмпирические, аналитическо-эмпирические методы и численное моделирование) и сравнивается с фактической муьдой сдвижения на поверхности по результатам натуральных наблюдений. В качестве объекта исследования выступает станционный комплекс глубокого заложения «Театральная», являющийся продолжением Лахтинско-Правобережной линии Санкт-Петербурга. Пилонная станция «Театральная» (рис. 4) запроектирована в зоне плотной исторической застройки и оказывает воздействие на здания, представляющие культурную ценность, такие как здания исторической сцены Мариинского театра и Вторая сцена Мариинского театра (на рис. 5, 6 выделены черным цветом). Глубина заложения стан-

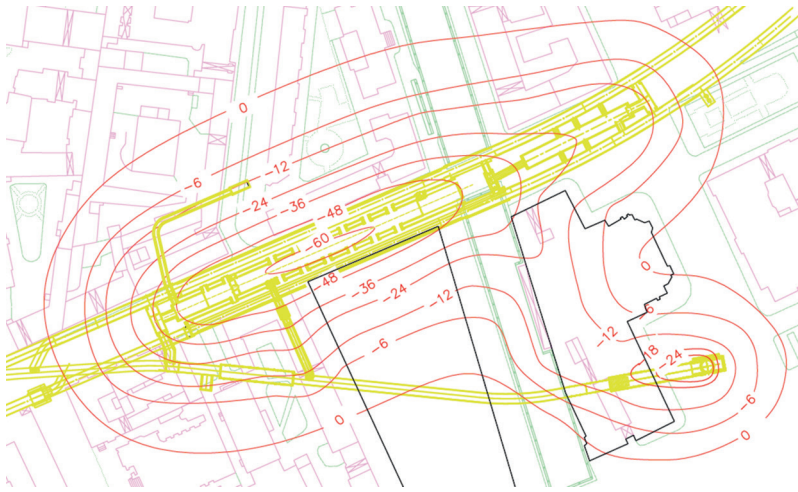


Рис. 5. Прогнозная муфта оседаний поверхности над станционным комплексом «Театральная», полученная методом конечных элементов

Fig. 5. Forecast settlement trough above the Teatralnaya station complex based on finite element method

ции по оси основных тоннелей 51,8 м. Станционный комплекс включает средний станционный тоннель (ССТ) $\varnothing 9,8$ м, боковые станционные тоннели (БСТ) $\varnothing 8,5$ м — правый (ПСТ) и левый (ЛСТ), натяжную камеру, тягово-понижительную

подстанцию (ТПП) и ряд вспомогательных выработок (рис. 6).

В настоящий момент все горнопроходческие работы на станции завершены, ведется строительство внутренних конструкций.



Рис. 6. Фактическая муфта оседаний поверхности над станционным комплексом «Театральная» по данным натурных наблюдений

Fig. 6. Settlement trough above the Teatralnaya station complex based on field measurement data

Таблица 1

Параметры поперечной мульды сдвижения при сооружении среднего и боковых тоннелей станции «Театральная»
Parameters of the transverse trough due to construction of the middle and side tunnels of the Teatralnaya station

Метод расчета	Максимальное оседание η_0 , мм	Длина полумульды L , м
По Лиманову-Подакову	102 при $E = 100$ МПа 62 при $E = 200$ МПа	78
По Реск при средних потерях объема V_{Lcp}	97 80 68	74 при $k = 0,4$ 89 при $k = 0,5$ 104 при $k = 0,6$
По Реск при минимальных потерях объема V_{Lmin}	33 28 23	74 при $k = 0,4$ 89 при $k = 0,5$ 104 при $k = 0,6$
По Реск при максимальных потерях объема V_{Lmax}	163 135 114	74 при $k = 0,4$ 89 при $k = 0,5$ 104 при $k = 0,6$
Метод конечных элементов	63	93
Факт	70	117

Результаты прогнозной оценки сдвижений

Расчет произведен по методикам Реск и Лиманова-Подакова, также принимается во внимание прогнозная мульда (см. рис. 5) для всего станционного комплекса из технического отчета проектировщика НИПИИ «Ленметрогипротранс», полученная МКЭ до начала ведения горных работ. В данном расчете не учитывались подходные выработки под зданием Мариинского театра (как на рис. 6). В завершение приводится фактическая мульда на конец 2022 г. (см. рис. 6), полученная по данным натурных наблюдений на поверхности, организованной подрядной организацией ООО «ГИРО».

В табл. 1 сведены данные о максимальных оседаниях и размерах зоны влияния от сооружения трех станционных тоннелей для каждого из методов расчета.

Приведенные фактические оседания при строительстве станционных тоннелей (ССТ и БСТ), где исключено влияние вспомогательных выработок (см. полу-

мульду в северном направлении), показывают существенную неоднородность. Оседания непосредственно над тоннелями варьируются от 40 до 90 мм с учетом вскрытых проемов между тоннелями, максимальные оседания над всем станционным комплексом локализованы с западной стороны и достигают 87 мм, длина полумульды также неоднородна и достигает 117 м.

Решение задачи прогноза сдвижений от строительства станционных тоннелей станции «Театральная» по методике Реск требует определения параметра потерянного объема грунта V_L при проходке ССТ, ПСТ и ЛСТ. Ввиду отсутствия входных эмпирических данных для этих целей было принято решение использовать реальные технологические параметры проходки: значения фактических переборов по породе, особенности схемы первичного нагнетания (когда нагнетание ниже горизонтального диаметра (ГД) осуществляется без задержки, а сводовую часть нагнетают с отставанием в несколько колец), параметров гео-

Таблица 2

Расчет объема потерянного грунта и максимальных оседаний при средних, минимальных и максимальных переборах породы по методике Peck
Estimation of volume loss and maximum settlement for average, minimum and maximum overexcavation by Peck method

Тоннель	Радиус кольца R_k , м	Радиус переборов R_n , м	Площадь кольца S_k , м ²	Площадь породы S_n , м ²	Переборы выше ГД $\Delta S/2$, м ²	V_L , %	k	Положение точки перегиба i , м	Максимальное оседание S_{max} , м
БСТ	4,255	4,380	56,88	60,27	1,70	2,98	0,5	26	0,026
		4,300		58,09	0,60	1,06	0,5	26	0,009
		4,470		62,77	2,95	5,18	0,5	26	0,045
ССТ	4,905	5,040	75,58	79,80	2,11	2,79	0,5	26	0,032
		4,950		76,98	0,70	0,92	0,5	26	0,011
		5,120		82,35	3,39	4,48	0,5	26	0,052

метрии колец по данным маркшейдерских съемок. Таким образом, для оценки потерянного объема учитываются пустоты, образовавшиеся выше ГД. Анализ фактических параметров проходки показывает, что соблюдение технологических требований по эллиптичности в монтаже колец приводит к увеличению радиуса кольца в среднем на 5 мм от проектного, принимая во внимание следующие оседания сводов обделки (по данным наблюдений своды колец БСТ претерпели усадку в среднем на 10 мм, своды колец ССТ — на 20 мм). Фактический радиус тоннеля по породе выше ГД с учетом усредненных переборов по всей длине тоннеля получается больше радиуса кольца обделки в среднем на 130–140 мм, при минимальных переборах будет на 40–60 мм, а при максимальных переборах — на 210–230 мм. Так, для обделки БСТ $\varnothing 8,5$ м проектный внешний радиус обделки $R_{np} = 4250$ мм, фактический радиус с учетом оседаний сводов обделки порядка $R_{\phi} = 4255$ мм, радиус по породе с учетом усредненных переборов выше ГД $R'_{cp} = 4380$ мм, радиус на минимальных переборах $R'_{min} = 4300$ мм, радиус на максимальных переборах $R'_{max} = 4470$ мм. Непостоянство переборов ведет к раз-

бросу по объемам потерянного грунта и, как следствие, расчетных максимальных оседаний (табл. 2).

В свою очередь величины максимальных оседаний S_{max} и длины полумульды L могут здесь существенно изменяться в зависимости от положения точки перегиба i , которое определяется параметром $k = 0,4 \div 0,6$ (см. табл. 1). С учетом вариации k для глин разброс по оседаниям от БСТ будет в интервале 8–57 мм, от ССТ — в интервале 9–65 мм.

Здесь важно отметить, что прогнозируемые по методике Peck длины полумульды практически не зависят от радиуса выработки.

При расчете прогнозных оседаний по методике Лиманова-Подкова также имеет место разброс по оседаниям 62–102 мм в зависимости от принятого модуля деформаций коренных отложений E (см. табл. 1). К вопросу определения физико-механических характеристик массива проектировщик местами может подходить посредственно. Так, для различных объектов строительства петербургского метростроения на стадии инженерно-геологических изысканий принимались значения модуля деформаций протерозойских глин в интервале $100 \div 200$ МПа.

Стоит отметить, что модуль деформации также является входным параметром для конечно-элементных моделей, значение которого будет напрямую определять величины сдвижений и деформаций массива.

Обсуждение результатов

Каждый из прогнозных расчетов показывает недостаточное соответствие данным по фактическим деформациям. Рассмотрим ограничения, которые имеет каждая из методик прогнозирования, и попытаемся объяснить, в чем может быть причина такого существенного несоответствия прогнозных и фактических данных.

Начнем с анализа методики Реск. В-первых, уязвимым местом данной методики прогнозирования является не подтверждающаяся многими исследованиями гипотеза о равенстве потерянного объема грунта и объема мульды сдвижения на земной поверхности. Ряд зарубежных исследователей отмечает, что объем потерянного грунта на единицу длины не соответствует объему поперечной мульды на единицу длины [31]; по данным физического моделирования развития сдвижений Ю.А. Лиманова [1], эта гипотеза также не подтверждается (площадь изменения контура трех станционных тоннелей при деформировании меньше площади мульды оседания на поверхности на 10–30%). М.В. Долгих [32] для условий сооружений станционных тоннелей в Санкт-Петербурге указывает на значительное расхождение объемов потерянного грунта на контурах выработок и объемов мульды оседаний на поверхности.

Согласно представленным расчетам по методике Реск, потерянный объем грунта на 1 м длины от трех станционных тоннелей (при усредненных значениях, принятых с учетом данных о фактических переборах) составит $V_T = 5,5 \text{ м}^3$,

тогда как вертикальная площадь фактической мульды (для стадии раскрытых проемов) на рис. 6 $V_S = 7,3 \text{ м}^3$.

Указанное соотношение можно рассматривать как удовлетворительное для первого приближения (с учетом возможности заниженной оценки технологических переборов), однако в проведенной оценке не учитываются объемы тампонажного раствора, которым заполняется пространство между породным массивом и обделкой. Технологические данные (согласно журналам первичного нагнетания на участке) показывают, что объемы переборов в целом соизмеримы с объемами нагнетаемого раствора. В таком случае получается, что объем так называемого потерянного грунта пренебрежимо мал. Тем не менее, на поверхности образуется мульда внушительных размеров. Наиболее вероятной причиной данного несоответствия может являться интенсивное изменение НДС массива до момента вступления обделки в работу (которое трудно оценить при проходке). Соответственно, чем дольше развиваются деформационные процессы до вступления обделок в работу, тем большие оседания будут наблюдаться в мульде сдвижения.

Во-вторых, распределение оседаний на поверхности не всегда отвечает распределению Гаусса. В связи с этим предлагаются модифицированные кривые распределения [33, 34].

Методика Реск критикуется в работе Verruijt & Booker [35], которые для прогноза сдвижений массива применили аналитическое решение задачи о бесконечной полуплоскости в упругой среде, предложенное Sagasetta [36]. А для определения потерь грунта используется радиальная потеря грунта с постоянным радиальным перемещением вокруг обделки тоннеля.

Предложенная методика [35] развивается в работах Loganathan & Poulos

[37], Park [38], где вместо равномерной радиальной потери грунта учитываются его неравномерные потери за контуром обделки, наибольшие из которых наблюдаются в своде тоннеля.

В-третьих, массив рассматривается как однородная среда на всю глубину от тоннеля до поверхности, не учитывается существенное отличие по свойствам верхнего слоя рыхлых обводненных четвертичных пород (наносов).

В-четвертых, в методиках Реск и последователей, как правило, опускается процедура оценки объема потерянного грунта и четкой фиксации длины полумульды. Переборы в заобделочном пространстве доподлинно неизвестны и могут сильно варьироваться в зависимости от горно-геологических условий. При изменении значений принятых переборов в большую сторону резко возрастает величина потерянного объема V_L , что ведет к пропорциональному увеличению оседаний. Также отметим, что для одних и тех же штатных переборов с уменьшением диаметра тоннеля возрастает V_L , а следовательно, неоправданно возрастают и оседания от тоннелей. Так, проведенная интервальная оценка (см. табл. 2) показывает, что в зависимости от входных условий для расчета по методике Реск максимальные оседания могут изменяться от 58 до 275 мм, также имеются проблемы с достоверностью оценки длин полумульды (размеров зон влияния). Длина полумульды может существенно отличаться в зависимости от принятого подхода к определению положения точки перегиба i . Длина полумульды по расчетам варьируется от 74 до 104 м.

Параметры V_L и i , как правило, определяются эмпирически либо принимаются по аналогии с существующими опытами проходки в идентичных горно-геологических условиях [6]. Подбор же данных параметров по объектам-аналогам может приводить к кратным раз-

бросам, которые недопустимы при решении задач прогнозирования вредного влияния.

В-пятых, в методике Реск не учитывается дополнительная активация сдвижений, возникающих при строительстве тоннеля вблизи уже сооруженного, как и, в принципе, нет аппарата для учета взаимовлияния выработок.

Вся совокупность обозначенных недостатков указанного подхода Реск и его аналогов не позволяет считать эти решения актуальными и достоверными в рассматриваемых здесь задачах прогноза сдвижений.

В основе подхода Лиманова-Подкова лежит гипотеза о равенстве объемов мульд на контакте и поверхности. На сегодняшний день эта гипотеза не опровергнута исследователями и широко используется на практике, основным обоснованием такой постановки являются низкие показатели сжимаемости нижних слоев четвертичной толщи и низкие градиенты поля напряжений и деформаций в этих уровнях над тоннелем при его проходке.

Тем не менее, уже обозначенные вопросы к данной методике показывают неоднозначность определения длины полумульды на земной поверхности, заключающуюся в недостаточной обоснованности фиксации границы мульды на контакте толщ величиной $2a$ (см. рис. 2). Указанный недостаток предлагается скорректировать определением границы мульды сдвижения на контакте коренных и четвертичных отложений по значению условной граничной кривизны [4], зависящему экспоненциально от соотношения мощностей указанных пород над выработкой, однако этот подход не получил распространения в расчетной практике и требует дополнительного эмпирического обоснования.

Подход Ю.А. Лиманова обладает важным преимуществом, которое заключа-

ется в том, что в массиве, помимо слоя коренных протерозойских глин, учитываются четвертичные отложения, а в корректировке В.Ф. Подакова — и слой (т.н. переходный слой) дислоцированных коренных протерозойских глин (на рис. 2 мощностью h''_0), деформационные и прочностные параметры которых существенно отличаются от основной толщи.

Методика Лиманова-Подакова более универсальна для решения поставленной задачи, поскольку позволяет осуществлять прогноз вредного влияния от строительства станционных тоннелей глубокого заложения, в том числе и сближенных (когда учитываются эффекты активизации деформаций от взаимовлияния тоннелей), сооружающихся горным способом. Для учета технологических факторов и влияния сближенных выработок Ю.А. Лиманов предложил эмпирическую зависимость (12), которая помимо прочего еще учитывала и развитие деформаций во времени на своде тоннеля и в мульде на контакте толщ.

Однако указанная эмпирическая зависимость не корректировалась с 50-х годов XX в., когда сооружали первые станционные выработки ленинградского метрополитена. С тех пор технологии проходки и крепления станционных и перегонных выработок сильно изменились, и подобные зависимости нужно корректировать.

Тут можно отметить, что методика Реск ориентирована на образование мульды при щитовой проходке только одиночных тоннелей, пройденных в однородном массиве — расчетная система однослойная.

Из представленных результатов расчета видно, что расчетные оседания по рассматриваемым аналитико-эмпирическим методикам для большинства случаев будут давать завышенные значения прогноза. Методика Реск и ее аналоги

не подходят для проведения прогнозных оценок для выработок глубокого заложения в неоднородных массивах ввиду вышеупомянутых ограничений. Методика Лиманова-Подакова хорошо зарекомендовала себя для проведения подобных оценок, она разработана и скорректирована для соответствующих горно-геологических условий, однако оседания и деформации здесь часто получаются завышенными (в сравнении с фактическими показателями деформаций), а главное — она не позволяет учесть влияние на деформации специальных горнотехнических мероприятий (горных мер защиты). Так, учет в таких прогнозных расчетах специально разработанных проектировщиком технологических мероприятий на станции «Театральная», снижающих уровень деформаций и вредного влияния на Мариинский театр (использование опережающего крепления лба забоя [39], компенсационного нагнетания в массив над сводом тоннеля), не представляется возможным. Определение границ зон влияния по данным методикам трудно признать математически строгим и достоверным.

Таким образом, практически очевидно, что наиболее перспективными можно считать конечно-элементные модели, обладающие широкой вариативностью, техническими возможностями и гибким математическим аппаратом, являющиеся наиболее востребованным и исчерпывающим инструментом, обеспечивающим учет практически всех факторов и потенциально позволяющим поставить надежный прогноз вредного влияния строительства крупных станционных комплексов. Тем не менее, следует признать, что расчетная мульда, полученная методами численного моделирования, также характеризуется недостаточной достоверностью при сравнении ее с результатами фактических деформаций по натурным наблюдениям: мак-

симальные оседания могут отличаться в 1,5–2 раза, длины полумульд (размеры зон влияния) отличаются на десятки метров, форма кривой существенно не совпадает с фактической.

Столь неудовлетворительные результаты мы и наши коллеги получали для многих объектов метрополитена. Единственным выходом из ситуации на пути к повышению достоверности прогнозных оценок по станции «Театральная» был выход на «уточняющую» постановку прогнозного расчета по текущим результатам натурных данных и параметров горнотехнической ситуации, когда прогноз на стадию завершения строительства корректировался по мере набора натурных данных в периоды остановки основных горных работ. Причем и традиционные аналитико-эмпирические расчеты, и численное моделирование давали схожий результат в прогнозе, а их погрешность становилась удовлетворительной, отклонения прогноза от фактических оседаний находились на уровне 5–10%.

Последнее, что необходимо обсудить — это неоднородность мульды оседаний. Максимальные вертикальные сдвиги земной поверхности локализованы в начале станции в западном торце (см. рис. 6). Здесь помимо станционных тоннелей в самом начале сооружалась крупная монолитная камера, соединяющая оба перегонных тоннеля и обеспечивающая начало проходки ССТ и ПСТ. Также здесь сооружался ходок с прикамерком к технической скважине, расположенный севернее ЛСТ и входящий под уклоном на 15 м вверх от уровня чистого пола на станции. Эти выработки и их неоптимальные с точки зрения развития деформаций режимы проходки вполне закономерно обеспечили повышенные оседания более 85 мм. На расчетных моделях локализация наибольших оседаний зафиксирована бли-

же к середине станции (см. рис. 5), без учета технологических особенностей проходки выработок в монолите, длительных периодов нахождения выработок в рамном креплении и технологических простоев, которые приводят к дополнительной активации процессов сдвига и деформаций, как следствие, дополнительных оседаний в мульде сдвига. Кроме того, по результатам фактических наблюдений (см. рис. 6) видно, что здание Второй сцены Мариинского театра получило оседания порядка 40 мм, а здания, расположенные напротив, в другой полумульде, имеют оседания около 70 мм, и это несмотря на то, что здания расположены равноудаленно относительно оси станции. Здесь отчетливо проявляется влияние самих зданий и их конструктивных особенностей на оседания поверхности [40].

Здесь же можно отметить и то, что для аналогичной пилонной станции «Горный институт» максимальные оседания от основных станционных выработок значительно превосходят спрогнозированные проектировщиком 63 мм (на сегодня максимальные оседания над осью станции достигли уже 110–120 мм). Кстати, такие результаты больше соотносятся с прогнозом по методике Лиманова-Подакова, дающей, как было показано, завышенные результаты. Обе станции очень схожи по геологическим условиям, по проектным решениям, в том числе и по мерам по снижению деформаций, однако режимы проходки и качество строительных работ и, соответственно, оседания поверхности на станциях, как видно из представленных данных, различаются весьма значительно. Указанные обстоятельства отчетливо свидетельствуют об определяющем влиянии на величины оседаний и деформаций поверхности технологических режимов проходки, крепления, первичного и контрольного нагнетания, кото-

рые в прогнозных расчетах напрямую не учитывались.

Предложения

Прогнозный расчет сдвижений и деформаций выполняется до начала строительства и, как правило, рассматривается на момент окончания всех горнопроходческих работ. На практике выработки станционного комплекса часто сооружаются в удобной подрядчику последовательности, забои на участке могут оставаться и снова запускать в работу через некоторое время, забои взаимовлияющих близкорасположенных выработок могут сооружаться одновременно. Обилие горных выработок станционного комплекса, каждая из которых формирует свою зону влияния, вызывает непрерывные, динамически развивающиеся во времени, деформационные процессы. Безусловно, ход и технология ведения горных работ откладывает свой отпечаток на сооружения на поверхности, которые в свою очередь также имеют различную степень сопротивления деформациям.

За годы строительства метрополитена здания, попадающие в мульду сдвижения, могут испытывать сложные знакопеременные деформации (кривизны, кручения, сдвига и т.д.), которые в совокупности могут привести к серьезным повреждениям. Сами здания зачастую сложны и уникальны, вследствие чего каждое требует индивидуального подхода. Протяженные строения, такие как Вторая сцена Мариинского театра, расположенные одновременно и в центре мульды, и на ее периферии, могут подвергаться опасным деформациям кривизны выпуклости и вогнутости одновременно.

Таким образом, прогноз и оценку вредного влияния необходимо производить, дополнять и корректировать с учетом развития деформационных процессов в

массиве и на поверхности на различных стадиях сооружения станционного комплекса. Такой подход способен обеспечить правильную оценку и своевременное реагирование на последствия изменения горнотехнической ситуации [41].

Приведенная фактическая мульда сдвижений над станционным комплексом «Театральная» по завершении строительно-монтажных работ является примером того, что прогнозируемые и фактические сдвижения могут заметно различаться. Несоответствие расчетов в первую очередь связано с рядом технологических причин. Поэтому прогнозные методики должны учитывать влияние технологических факторов и режимов проходки, а обоснование мер охраны в проекте должно осуществляться по многовариантному сценарию.

По нашему мнению, при определенных обстоятельствах и методики на базе решения Реск могли бы иметь применение, однако гипотеза равенства потерянного объема грунта и объема мульды должна корректироваться специальными расчетами, а оценка самого потерянного объема должна обрести реальный технологический смысл и осуществляться через конкретные технологические параметры, которые можно измерить и контролировать при проходке (например, параметры перебора грунта, объемов нагнетания, динамики конвергенции породного массива и т.д.).

Из аналитико-эмпирических или полупырических методов наиболее предпочтительно для целей прогнозирования сдвижений и деформаций выглядит методика Лиманова-Подакова, однако она требует доработки в части актуализации учета технологических параметров проходки, совершенствования аппарата для перехода от оседаний на контакте толщ к оседаниям на поверхности, оценки и описания форм кривых оседаний и фиксации границ мульды.

Проблема оценки границ в контексте охраны наземной инфраструктуры от вредного влияния горных работ не решена ни в одном подходе к прогнозу деформаций. В связи с этим можно рекомендовать применение в подобных оценках граничных деформационных критериев: граничного значения наклона и граничного значения горизонтальных деформаций, которые давно зарекомендовали себя как более действенный и надежный механизм фиксации границ зон влияния, и отказ от использования критерия оседания, особенно на нулевых его значениях [42].

Как видно из представленных расчетных подходов, количественная сторона деформационных процессов в аналитико-эмпирических методиках и численных моделях определяется главным образом значениями физико-механических характеристик вмещающей толщину пород (модуля упругости, модуля деформации и т.п.) и выбранными механическими моделями сред. Указанные характеристики и параметры моделей, как правило, получают из лабораторных испытаний образцов, а потому они не могут учесть должным образом влияние масштабного фактора или сложных эффектов, проявляющихся в реальном неоднородном, гетерогенном, многофазном и трещиноватом массиве (деформаций ползучести и релаксации напряжений, дискретного проявления деформаций и т.п.) [43, 44]. Прямое использование характеристик из лабораторных испытаний зачастую кратно искажает оценку сдвижений, а усложнение моделей сред здесь пользы принести не сможет. Для ликвидации подобных недостатков традиционно применялись натурные физико-механические испытания в массиве и на крупных образцах, но эти методы весьма дороги и нерепрезентативны. Поэтому наиболее эффективным способом борьбы за достоверность входных

физико-механических параметров породного массива мы считаем использование данных деформационного мониторинга за породным массивом и земной поверхностью в комбинации с методами обратных расчетов и итерационной корректировки параметров по данным мониторинга деформаций.

Практика наших оценок деформаций от подработки показывает, что ценность достоверной оценки входных физико-механических характеристик существенно падает на фоне учета влияния технологических факторов. Имея в расчетах средства учета влияния технологических факторов, при их преобладающем влиянии на конечный результат расчета деформаций, мы можем приближать достоверность до приемлемых уровней, а иногда и учитывать (корректировать) этими средствами (косвенно) неточность оценки входных физико-механических характеристик горных пород.

Рассуждая в подобном ключе о сложности предлагаемых современными исследователями математических моделей сред в численном моделировании, приходится констатировать невысокую актуальность разработки новых сложных моделей сред, деформирование которых описывается широким набором параметров модели ввиду ограниченных возможностей получения таких параметров для реальных сред — породных массивов, что также ведет к повышению трудоемкости и затрат машинного времени, а главное — снижению контролируемости результата и низкой значимости усовершенствования механизмов описания геомеханических процессов на фоне подавляющего влияния технологических факторов. Поэтому в численном моделировании надо ориентироваться на использование не самых сложных и контролируемых моделей сред.

Учет в прогнозных расчетах фактора влияния самих зданий на деформации

поверхности, показанного здесь на примере застройки над станцией «Театральная», наиболее просто и эффективно для исследователя осуществляется посредством включения в численную модель этих зданий и использования в модельной оценке системы «тоннель — массив — здание» [45]. Трудоемкость и затраты машиной памяти здесь будут не слишком велики.

Заключение

Постановка достоверного прогноза сдвижений и деформаций при строительстве станционных комплексов глубокого заложения в целях обоснования мер защиты для зданий и сооружений — весьма непростая задача. Все имеющиеся на сегодня методы прогноза деформаций не могут обеспечить соблюдение современных высоких требований к достоверности этих оценок, что определяет либо необоснованно большие затраты на обследования и контроль объектов подработки при завышенных прогнозах, либо высокие риски больших незапланированных расходов на восстановление подработанных объектов или даже аварийные ситуации при заниженных показателях прогнозных деформаций. Привычная на сегодня для заказчика и проектировщика метрополитена ситуация, когда прогнозные показатели отличаются в несколько раз от фактических, а выполненные при изысканиях и проектировании прогнозы не уточняются, даже при существенных изменениях в проекте, должна уйти в прошлое. Приходится констатировать, что прямое использование для прогнозных расчетов традиционных аналитико-эмпирических методик, без применения специальных исследований и корректировок расчетного алгоритма под текущие горно-геологические условия, не позволяет обеспечить прогнозирование на требуемом для разработки охранных

мероприятий уровне в 20—40% от величины сдвижений и деформаций. Аналогичная ситуация с применением физического моделирования и с более перспективными и универсальными методами численного моделирования. Причин для таких неудовлетворительных показателей достоверности много.

До последнего времени в прогнозных оценках использовались аналитико-эмпирические методики, многие из которых актуальны и в наши дни. Наиболее популярная в зарубежной практике методика Реск и ее поздние модернизации в основе своей содержат использование гипотезы о равенстве условной потери объемов на контуре тоннеля и мульды оседаний на земной поверхности. По результатам нашего анализа и исследований других исследовательских групп, эта гипотеза не может считаться достоверной — оценки, полученные на физических моделях, на теоретических решениях и на результатах натурных данных, не подтверждают эту гипотезу для тоннелей глубокого заложения. Неравенство потерянного на тоннеле объема и объема мульды можно объяснить развитием сложного деформационного состояния с областями сжатия и растяжения в массиве, наличием зон предельных деформаций, где породы способны терять изначальную сплошность и разуплотняться, а также высокой вероятностью проявления гидрогеологических процессов в сильно увлажненных породах вокруг тоннелей из-за изменения НДС массива. Все подобные методики используют в расчете специальные корректировочные эмпирические коэффициенты, существенно изменяющие результат расчета, оценка и разброс значений этих коэффициентов также являются часто недостаточно обоснованными и сильно меняются в разных условиях проходки. Использование в этих методиках экспоненциальных функций, ана-

логичных по виду нормальному закону, для описания распределения сдвижений в мульде особых нареканий не вызывает, однако вопрос установки длин полумулд здесь решен также весьма нестрого.

Известная в нашей стране методика прогноза Лиманова-Подакова и ее более поздние версии для дискретно неоднородной толщи пород (двух- и трехслойной среды), основанная на теоретическом решении проф. С.Г. Гутмана, в своих изначальных предпосылках более строга, однако и она может давать большие погрешности в расчетах из-за опоры на физико-механические характеристики элементов породной толщи, которые часто берут из испытаний образцов. Использование здесь гипотезы равенства объемов мульды на контакте коренных пород и четвертичных отложений и мульды на поверхности теоретически более обоснованна, особенно для слабых обводненных пород при развитии в них плавных сдвижений. Более корректно с точки зрения достоверности выглядит здесь и использование типовых кривых для описания кривой оседаний. Однако существенная разница в форме кривых мульд по типовой кривой и по теоретическому решению С.Г. Гутмана может приводить к некорректной оценке максимальной оседания. Методика Ю.А. Лиманова имеет потенциал для косвенного учета технологических факторов и даже позволяет учитывать реологические параметры, но введенные эмпирические зависимости не корректировались с 50-х годов прошлого века, а технологии проходки с тех пор существенно изменились.

Более современные методы математического моделирования на базе численных методов позволяют учесть в расчетах неоднородную толщу подрабатываемого массива и особенности деформирования пород, геометрически слож-

ный и многокомпонентный стационарный комплекс, стадийность проходки, горно-технические мероприятия по снижению деформаций, влияние самих зданий и их механическую работу при последовательной подработке. Эти методы наиболее актуальны для сложных случаев прогноза деформаций, когда эмпирические и аналитико-эмпирические методы не способны учесть ряд значимых факторов. Однако и у этих методов имеется ряд недостатков, начиная с проблемы определения входных данных, уровень достоверности которых также ограничивается точностью оценок физико-механических показателей для массива горных пород, и заканчивая сложностью создания и тестирования модели, выбора физических уравнений и моделей среды. Так как конкретный расчет модели численными методами — это, по сути, единичный математический эксперимент, то для выявления закономерностей деформирования приходится организовывать серии таких экспериментов и обобщать данные таких серий и т.д. Решать такими методами текущие производственные задачи и получать простые рабочие зависимости крайне затруднительно, это удел сложных задач и исследовательской деятельности.

Ввиду обозначенных проблем применения прогнозных методов и учитывая их достоинства и недостатки, предлагается не концентрироваться на конкретной методологии и отбрасывать какой-то класс методов, а осуществлять дифференцированный подход к прогнозным задачам, выделяя при этом предварительное прогнозирование на предпроектных проработках и выборе объемно-планировочных решений по подземным объектам, детальное прогнозирование для обоснования защитных мероприятий и текущее прогнозирование для целей уточнения уровней деформационного воздействия и выбора параметров

мер охраны подрабатываемых зданий и сооружений. Для первой и третьей группы вполне подойдут аналитико-эмпирические методы, конечно, при условии их доработки в контексте обозначенных недостатков и повышения достоверности. Для второй группы нужно рассматривать методы численного моделирования при условии верификации расчетов по натурным данным и калибровки моделей. И те и другие должны обеспечивать учет в оценке деформаций технологических параметров проходки.

Вследствие целого спектра нюансов и проблем моделирования подработки несущих конструкций реальных гражданских и промышленных зданий в системе «тоннель – массив – здание», особенно для старых кирпичных зданий, эти мо-

дели в данной работе не рассматриваются. По этим же причинам здесь не рассматриваются и наши исследования в части учета сложных систем компенсации деформаций, таких, например, как компенсационное нагнетание в породный массив под охраняемые здания. Эти результаты планируется опубликовать отдельно.

Авторы выражают благодарность маркшейдерской службе ООО «Гиро» и АО «Метрострой Северной Столицы» за предоставление данных натуральных наблюдений за зданиями, находящимися в зоне подработки, плана горных выработок станционного комплекса «Театральная», а также журналов укладки колец и учета переборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лиманов Ю. А.* Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах. – Л.: Изд. ЛИИЖТа, 1957. – 239 с.
2. *Подаков В. Ф., Соловьев Ю. Ф., Капустин В. М., Муллер Р. А., Овсянко Е. А., Шагалов С. Е.* Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена. – Л.: Стройиздат, 1973. – 72 с.
3. *Хуцкий В. П.* Методика прогноза оседаний и деформаций земной поверхности при сооружении тоннелей метрополитена / Сборник научных трудов ОАО «ВНИИГалургии». Т. 1. – 2001. – С. 65 – 79.
4. *Волохов Е. М.* Прогноз сдвижений и деформаций массива горных пород и земной поверхности при сооружении городских тоннелей глубокого заложения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 23 с.
5. *Peck R. B.* Deep excavations and tunnelling in soft ground / Proceedings of the 7th International Conference on Soft Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico, 1969, pp. 225 – 290.
6. *Attewell P. B., Woodman J. P.* Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil // Ground Engineering. 1982, vol. 15, no. 8, pp. 13 – 20. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90142-0.
7. *O'Reilly M. P., New B. M.* Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction / Tunnelling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, UK. 1982, pp. 173 – 181. DOI: 10.1016/0148-9062(83)91768-0.
8. *Rankin W. J.* Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects // Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications. 1988, vol. 5, no. 1, pp. 79 – 92. DOI: 10.1144/gsl.eng.1988.005.01.06.
9. *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.
10. *Nguyen T. T., Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D.* Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355 – 371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.

11. *Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A.* Construction of underground and multi-story car parks in high-density urban areas // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 02, pp. 224–236. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.02.
12. *Franco V. H., Gitirana G. D. F. N., de Assis A. P.* Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage // *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 113, article 103097. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103097.
13. *Yang H., Liu F., Lin S.* Investigation on the 3D ground settlements induced by shallow tunneling considering the effects of buildings // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020, vol. 24, pp. 365–376. DOI: 10.1007/s12205-020-2201-9.
14. *Salahudeen A. B., Yisa G. L.* Settlement, slope stability and seepage analyses by numerical modelling method and their applications in practice // *Nigerian Journal of Technology*. 2023, vol. 42, no. 3, pp. 306–314. DOI: 10.4314/njt.v42i3.2.
15. *Son M., Cording E. J.* Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005, vol. 131, no. 2, pp. 162–177. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(162).
16. *Кузнецов Г. Н.* Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления / Труды совещания по управлению горным давлением. — М.: Углетехиздат, 1948. — С. 9–149.
17. *Fang Q., Liu X., Zeng K., Zhang X., Zhou M., Du J.* Centrifuge modelling of tunnelling below existing twin tunnels with different types of support // *Underground Space*. 2022, vol. 7, no. 6, pp. 1125–1138. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.02.007.
18. *Song G., Marshall A. M.* Tunnel–piled structure interaction: numerical simulation of hybrid centrifuge tests // *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 140, article 104477. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104477.
19. *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, article 04020017. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002223.
20. *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.
21. *Shirlaw J. N., Boone S. J.* Discussion: A study on large volume losses induced by EBPM tunneling in sandy soils // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 142, article 105424. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105424.
22. *Kolivand F., Rahmnejad R.* Determination of settlement trough width and optimization of soil behavior parameters based on the design of experiment method (DOE) // *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2018, vol. 52, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.22059/ijmge.2017.240572.594693.
23. *Mair R. J., Taylor R. N.* Theme lecture: Bored tunneling in the urban environment / *Proceedings of the 14th International Conference on Soft Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany*. 1997, pp. 2353–2385.
24. *Демешко Е. А., Ходош В. А.* Прогнозирование осадок поверхности при щитовой проходке тоннеля в песчаных грунтах // *Метрострой*. — 1963. — № 3-4. — С. 50–53.
25. *Авершин С. Г.* Сдвигание горных пород при подземных разработках. — М.: Углетехиздат, 1947. — 245 с.
26. *Chang Y., Chang L., Ren F.* Strength anisotropy of jointed rock slope considering mining damage: a numerical analysis method // *Geomats, Natural Hazards and Risk*. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 2587–2614. DOI: 10.1080/19475705.2020.1856200.
27. *Do N. A., Dias D., Dinh V. D., Tran T. T., Dao V. C., Dao V. D., Nguyen P. N.* Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses – Case of underground coal mines // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 99–110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.05.005.
28. *Zhang Z., Chen Y., Han K., Wei G., Pan Y., Sun M.* Mathematical modelling for interaction between soft ground and small curvature shield tunneling considering viscoelastic characteristics influences // *Applied Mathematical Modelling*. 2024, vol. 127, pp. 607–639. DOI: 10.1016/j.apm.2023.12.020.
29. *Wang Z., Guo W., Ding W., Liu K., Qin W., Wang C., Wang Z.* Numerical study on the hydrodynamic properties of bentonite slurries with Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model // *Powder Technology*. 2023, vol. 419, article 118375. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118375.

30. Volokhov E. M., Kireeva V. I. Analysis of the results of field studies of geomechanical processes in construction of large transport tunnels with the use of a mechanized tunnelboring complex with work face earth pressure balance in the special conditions // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 5811 – 5821. DOI: rp_2017/jeas_1017_6425.

31. Marshall A. M., Farrell R. P., Klar A., Mair R. J. Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements // *Géotechnique*. 2012, vol. 62, no. 5, pp. 385 – 399. DOI: 10.1680/geot.10.P047.

32. Долгих М. В. Сдвигание земной поверхности при строительстве объектов метрополитена Санкт-Петербурга: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУ, 1999, , 20 p.

33. Jacobsz S. W., Standing J. R., Mair R. J., Hagiwara T., Sugiyama T. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles // *Soils and Foundations*. 2004, vol. 44, no. 1, pp. 49 – 56. DOI: 10.3208/sandf.44.49.

34. Song Z. P., Tian X. X., Zhang Y. W. A new modified Peck formula for predicting the surface settlement based on stochastic medium theory // *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, article 7328190. DOI: 10.1155/2019/7328190.

35. Verruijt A., Booker J. R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane // *Géotechnique*. 1996, vol. 46, no. 4, pp. 753 – 756. DOI: 10.1680/geot.1996.46.4.753.

36. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss // *Géotechnique*. 1987, vol. 37, no. 3, pp. 301 – 320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301.

37. Loganathan N., Poulos H. G. Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998, vol. 124, no. 9, pp. 846 – 856. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846).

38. Park K. H. Analytical solution for tunneling-induced ground movement in clays // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2005, vol. 20, no. 3, pp. 249 – 261. DOI: 10.1016/j.tust.2004.08.009.

39. Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A., Basova L. A. Face stability in heavy clay: Theory and practice // *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, pp. 234 – 245. DOI: 10.1134/S1062739122020077.

40. Li D., Yan C. Building deformation prediction based on ground surface settlements of metro-station deep excavation // *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, article 6050353. DOI: 10.1155/2018/6050353.

41. Falbe-Hansen K., Paulatto E., Arce Juliao I. Monitoring cityringen metro project in Copenhagen, Denmark // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 2018, vol. 171, no. 5, pp. 39 – 47. DOI: 10.1680/jcieng.17.00024.

42. Новоженин С. Ю. Оценка границ зоны влияния проходки эскалаторных тоннелей механизированными комплексами в Санкт-Петербурге // *Маркшейдерский вестник*. – 2015. – № 3. – С. 54 – 57.

43. Вербилло П. Э., Вильнер М. А. Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6-2. – С. 47 – 59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.

44. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 247. – С. 33 – 38. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.

45. Miliziano S., Caponi S., Carlaccini D., Lillis A. Prediction of tunnelling-induced effects on a historic building in Rome // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022, vol. 119, article 104212. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104212. **ТАБ**

REFERENCES

1. Limanov Yu. A. *Osadki zemnoy poverkhnosti pri sooruzhenii tonneley v kembriyskikh glinakh* [Surface settlements induced by tunneling in Cambrian clays], Leningrad, 1957, 239 p.

2. Podakov V. F., Solov'ev Yu. F., Kapustin V. M., Muller R. A., Ovsyanko E. A., Shagalov S. E. *Posobie po proektirovaniyu meropriyatiy dlya zashchity ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzheniy ot vliyaniya gornoprophodcheskikh rabot pri stroitel'stve metropolitena* [Manual for designing measures to protect exploited buildings and structures from excavation influence during subway construction], Leningrad, Stroyizdat, 1973, 72 p.

3. Khutskiy V. P. Methodology for predicting surface settlements and deformations due to subway tunnels construction. *Sbornik nauchnykh trudov OAO «VNII Galurgii»*. T. 1. [Collection of scientific papers of JSC «VNII Galurgii», vol. 1], 2001, pp. 65 – 79.
4. Volokhov E. M. *Prognoz sdvizheniy i deformatsiy massiva gornyx porod i zemnoy poverkhnosti pri sooruzhenii gorodskikh tonneley glubokogo zalozheniya* [Prediction of rock mass movements and deformations due to deep-laid tunnels construction], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2004, 23 p.
5. Peck R. B. Deep excavations and tunnelling in soft ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soft Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Mexico, 1969, pp. 225 – 290.
6. Attewell P. B., Woodman J. P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil. *Ground Engineering*. 1982, vol. 15, no. 8, pp. 13 – 20. DOI: 10.1016/0148-9062(83)90142-0.
7. O'Reilly M. P., New B. M. Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. *Tunnelling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium*, Brighton, UK. 1982, pp. 173 – 181. DOI: 10.1016/0148-9062(83)91768-0.
8. Rankin W. J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*. 1988, vol. 5, no. 1, pp. 79 – 92. DOI: 10.1144/gsl.eng.1988.005.01.06.
9. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability 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.
10. Nguyen T. T., Do N. A., Karasev M. A., Kien D. V., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 174, no. 4, pp. 355 – 371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057.
11. Trushko O. V., Trushko V. L., Demenkov P. A. Construction of underground and multi-story car parks in high-density urban areas. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 02, pp. 224 – 236. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.02.
12. Franco V. H., Gitirana G. D. F. N., de Assis A. P. Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 113, article 103097. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103097.
13. Yang H., Liu F., Lin S. Investigation on the 3D ground settlements induced by shallow tunneling considering the effects of buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020, vol. 24, pp. 365 – 376. DOI: 10.1007/s12205-020-2201-9.
14. Salahudeen A. B., Yisa G. L. Settlement, slope stability and seepage analyses by numerical modelling method and their applications in practice. *Nigerian Journal of Technology*. 2023, vol. 42, no. 3, pp. 306 – 314. DOI: 10.4314/njt.v42i3.2.
15. Son M., Cording E. J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005, vol. 131, no. 2, pp. 162 – 177. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(162).
16. Kuznetsov G. N. Experimental methods for studying rock pressure. *Trudy soveshchaniya po upravleniyu gornym davleniem* [Proceedings of the meeting on rock pressure control], Moscow, Ugletekhizdat, 1948, pp. 9 – 149.
17. Fang Q., Liu X., Zeng K., Zhang X., Zhou M., Du J. Centrifuge modelling of tunnelling below existing twin tunnels with different types of support. *Underground Space*. 2022, vol. 7, no. 6, pp. 1125 – 1138. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.02.007.
18. Song G., Marshall A. M. Tunnel – piled structure interaction: numerical simulation of hybrid centrifuge tests. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 140, article 104477. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104477.
19. 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, article 04020017. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002223.
20. 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.
21. Shirlaw J. N., Boone S. J. Discussion: A study on large volume losses induced by EBPM tunnelling in sandy soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, vol. 142, article 105424. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105424.

22. Kolivand F., Rahmannejad R. Determination of settlement trough width and optimization of soil behavior parameters based on the design of experiment method (DOE). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2018, vol. 52, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.22059/ijmge.2017.240572.594693.

23. Mair R. J., Taylor R. N. Theme lecture: Bored tunneling in the urban environment. *Proceedings of the 14th International Conference on Soft Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Germany. 1997, pp. 2353–2385.

24. Demeshko E. A., Khodosh V. A. Prediction of surface settlements induced by shield tunneling in sand. *Metrostroy*. 1963, no. 3-4, pp. 50–53. [In Russ].

25. Avershin S. G. *Sdvizhenie gornyykh porod pri podzemnykh razrabotkakh* [Rock mass movement response to underground excavation], Moscow, Ugletekhizdat, 1947, 245 p.

26. Chang Y., Chang L., Ren F. Strength anisotropy of jointed rock slope considering mining damage: a numerical analysis method. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 2587–2614. DOI: 10.1080/19475705.2020.1856200.

27. Do N. A., Dias D., Dinh V. D., Tran T. T., Dao V. C., Dao V. D., Nguyen P. N. Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses – Case of underground coal mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 99–110. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.05.005.

28. Zhang Z., Chen Y., Han K., Wei G., Pan Y., Sun M. Mathematical modelling for interaction between soft ground and small curvature shield tunneling considering viscoelastic characteristics influences. *Applied Mathematical Modelling*. 2024, vol. 127, pp. 607–639. DOI: 10.1016/j.apm.2023.12.020.

29. Wang Z., Guo W., Ding W., Liu K., Qin W., Wang C., Wang Z. Numerical study on the hydrodynamic properties of bentonite slurries with Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model. *Powder Technology*. 2023, vol. 419, article 118375. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118375.

30. Volokhov E. M., Kireeva V. I. Analysis of the results of field studies of geomechanical processes in construction of large transport tunnels with the use of a mechanized tunnelboring complex with work face earth pressure balance in the special conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 5811–5821. DOI: rp_2017/jeas_1017_6425.

31. Marshall A. M., Farrell R. P., Klar A., Mair R. J. Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements. *Géotechnique*. 2012, vol. 62, no. 5, pp. 385–399. DOI: 10.1680/geot.10.P.047.

32. Dolgikh M. V. *Sdvizhenie zemnoy poverkhnosti pri stroitel'stve ob'ektov metropolitena Sankt-Peterburga* [Surface movement response to subway construction], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 1999, 20 p.

33. Jacobsz S. W., Standing J. R., Mair R. J., Hagiwara T., Sugiyama T. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles. *Soils and Foundations*. 2004, vol. 44, no. 1, pp. 49–56. DOI: 10.3208/sandf.44.49.

34. Song Z. P., Tian X. X., Zhang Y. W. A new modified Peck formula for predicting the surface settlement based on stochastic medium theory. *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, article 7328190. DOI: 10.1155/2019/7328190.

35. Verruijt A., Booker J. R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Géotechnique*. 1996, vol. 46, no. 4, pp. 753–756. DOI: 10.1680/geot.1996.46.4.753.

36. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Géotechnique*. 1987, vol. 37, no. 3, pp. 301–320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301.

37. Loganathan N., Poulos H. G. Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998, vol. 124, no. 9, pp. 846–856. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846).

38. Park K. H. Analytical solution for tunneling-induced ground movement in clays. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2005, vol. 20, no. 3, pp. 249–261. DOI: 10.1016/j.tust.2004.08.009.

39. Lebedev M. O., Karasev M. A., Belyakov N. A., Basova L. A. Face stability in heavy clay: Theory and practice. *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, pp. 234–245. DOI: 10.1134/S1062739122020077.

40. Li D., Yan C. Building deformation prediction based on ground surface settlements of metro-station deep excavation. *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, article 6050353. DOI: 10.1155/2018/6050353.

41. Falbe-Hansen K., Paulatto E., Arce Juliao I. Monitoring cityringen metro project in Copenhagen, Denmark. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 2018, vol. 171, no. 5, pp. 39–47. DOI: 10.1680/jcien.17.00024.

42. Novozhenin S. U. Evaluation of the trough boundaries of escalator tunnel construction using TBM in Saint-Petersburg. *Mine Surveying Bulletin*. 2015, no. 3, pp. 54–57. [In Russ].

43. Verbilo P. E., Vilner M. A. Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 47–59. [In Russ]. DOI: 10.25 018/0236_1493_2022_62_0_47.

44. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 33–38. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.

45. Miliziano S., Caponi S., Carlacchini D., Lillis A. Prediction of tunnelling-induced effects on a historic building in Rome. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022, vol. 119, article 104212. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104212.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Волохов Евгений Михайлович*¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*Бритвин Илья Александрович*¹ — аспирант,

e-mail: britvini25@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*Кожухарова Василина Константиновна*¹ — аспирант,

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

ORCID ID: 0009-0008-0705-3646,

¹ Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II

Для контактов: Бритвин И.А., e-mail: britvini25@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.M. Volokhov*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor,

e-mail: volohov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4430-4172,

*I.A. Britvin*¹, PhD Student,

e-mail: britvini25@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1561-0835,

*V.K. Kozhukharova*¹, PhD Student,

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

ORCID ID: 0009-0008-0705-3646,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: I.A. Britvin, e-mail: britvini25@yandex.ru.

Получена редакцией 09.01.2024; получена после рецензии 05.02.2024; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 09.01.2024; received after the review 05.02.2024; accepted for printing 10.04.2024.

