

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Степуков Е. В., младший научный сотрудник

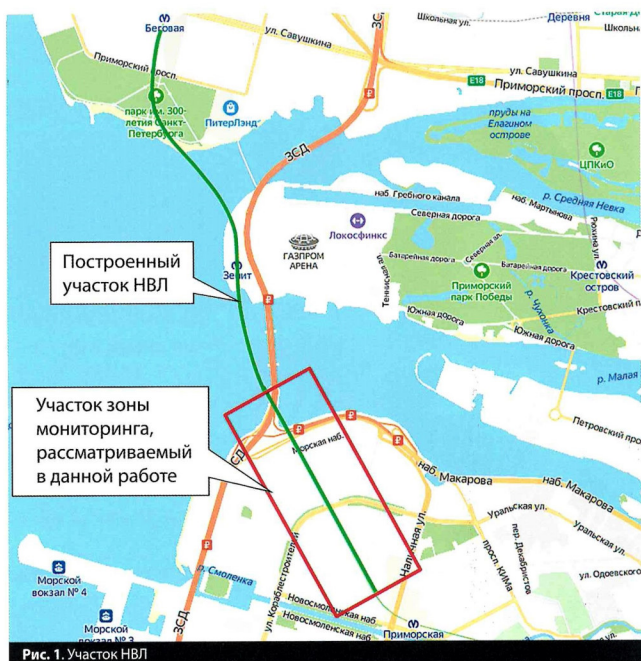
Ларионов Р. И., заведующий лабораторией геомеханических исследований

Укрупнение и расширение городов требует освоения новых территорий, а также расширения существующей сети городского транспорта. В связи с интенсивным развитием северо-западной части Санкт-Петербурга правительством города было принято решение о продлении Невско-Василеостровской линии метрополитена (НВЛ) от станции «Приморская» до станции «Беговая» с последующим продлением до станции «Зоопарк» (рис. 1). При строительстве метрополитена осуществлялся геотехнический мониторинг в соответствии с проектом горно-экологического мониторинга по договору между ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» и комитетом по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга.

Геотехнический мониторинг включал в себя систему наблюдений с заданной частотой, анализ и прогноз геодинамического состояния системы «обделка — массив», а также оценку негативного влияния горных работ на окружающую застройку.

Объектами исследования являлись грунтовой массив и здания на дневной поверхности, попавшие в зону влияния строительства двухпутного перегонного тоннеля. Проведенные исследования позволили определить параметры деформаций грунтового массива, а также произвести прогноз возможных деформаций основания зданий на следующих участках строительства.

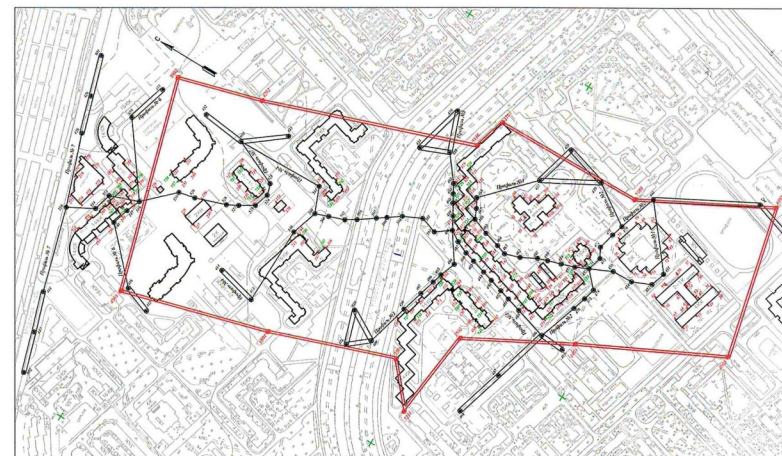
Проходка тоннеля началась в конце 2015 года. Летом 2016 года тоннель прошёл ст. «Беговая», и в конце января 2017 года был осуществлен вход тоннелепроходческого машинного комплекса (ТПМК) на ст. «Новокрестовская», после чего на щите было произведено плановое обслуживание. С 22 февраля 2017 года возобновилась проходка в сторону демонтажной камеры, и 25 августа 2017 года щит за-



вершил проходку. К концу мая 2018 года в тоннеле закончились все работы по внутреннему обустройству и монтажу инженерных коммуникаций, 26 мая 2018 года он был введен в эксплуатацию. Далее по этим данным был построен график мульды оседания земной поверхности, где по горизонтальной оси отложено на ширине мульды, а по вертикальной — величина оседания земной поверхности. Точки на графике — реперы, находящиеся на участке глубокого заложения

циклы измерений с составлением технических отчетов. Величина оседаний на реперных точках анализировалась относительно расстояния до центра оси тоннеля.

Далее по этим данным был построен график мульды оседания земной поверхности, где по горизонтальной оси отложено на ширине мульды, а по вертикальной — величина оседания земной поверхности. Точки на графике — реперы, находящиеся на участке глубокого заложения



двухпутного тоннеля (от демонтажной камеры на Васильевском острове до береговой линии), сведенные в одно сечение. В результате анализа была получена фактическая средняя мульда оседания земной поверхности (рис. 3).

Для определения деформаций внутри грунтового массива использовались экстензометры, расположенные над осью тоннеля и имеющие несколько глубинных реперов на разных горизонтах. Когда деформации массива достигали якоря экстензометра, они передавались на контроллер, находящийся на поверхности скважины, и с него удаленно передавались на компьютер, что позволяло контролировать величину деформаций в режиме реального времени. Разрез по линии расположения экстензометров представлен на рис. 4.

По результатам анализа данных с экстензометров были построены графики оседания грунтового массива над осью тоннеля на разных горизонтах (рис. 5). С помощью данных с экстензометров были проанализированы коэффициенты перебора и деформации слоев грунта при проходке. Совместный анализ данных геодезического и экстензометрического мониторинга позволил получить геометрические параметры мульды на всем протяжении исследуемого участка.

Также в рамках данной работы были проанализированы протоколы установки колец обделки, получаемые с ТПМК, которые включали в себя следующие параметры: давление пригруза на лоб забоя, скорость проходки, объем изъятых грунта, давление раствора, нагнетаемого в заобделочное пространство, давление проходческих домкратов на кольца обделки. Для более удобного анализа по данным протоколов были построены графики, представленные на рис. 6.

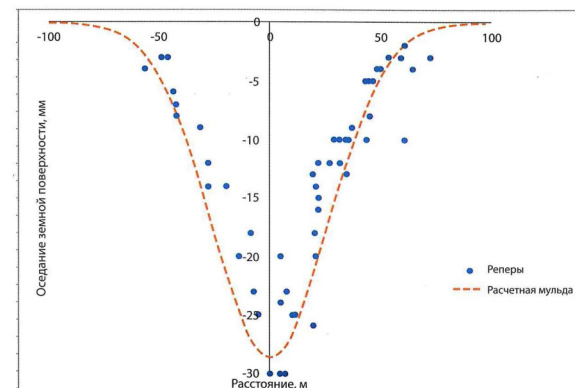


Рис. 3. Фактическая средняя мульда оседания земной поверхности на участке глубокого заложения двухпутного тоннеля НВЛ

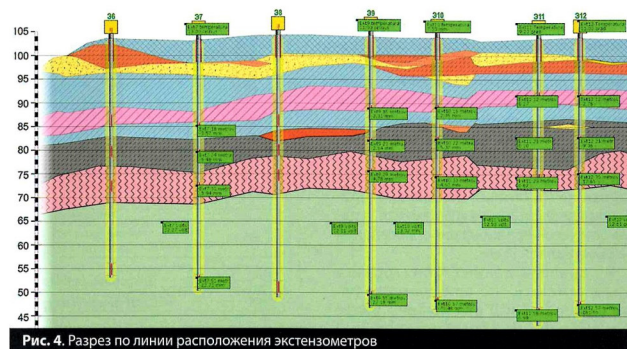


Рис. 4. Разрез по линии расположения экстензометров

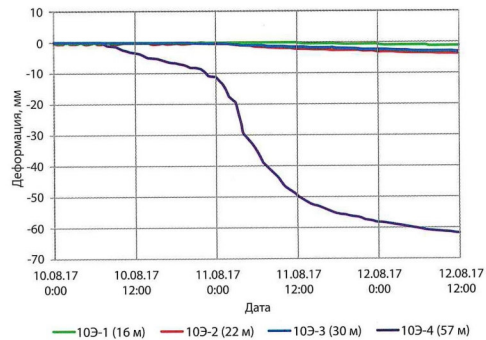


Рис. 5. Величина оседания грунтового массива на участке глубокого заложения двухпутного тоннеля НВЛ. Деформации указаны относительно уровня дневной поверхности

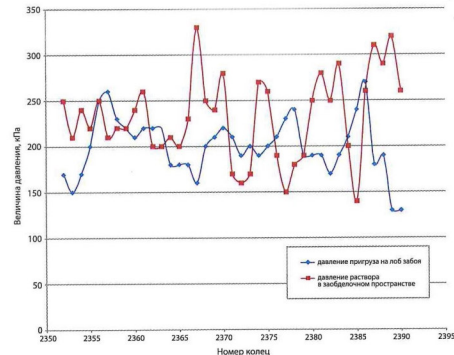


Рис. 6. Фактическая величина давления пригрузки лба забоя и давления нагнетания в заобделочное пространство при проходке двухпутного тоннеля НВЛ рядом с опорой V-9

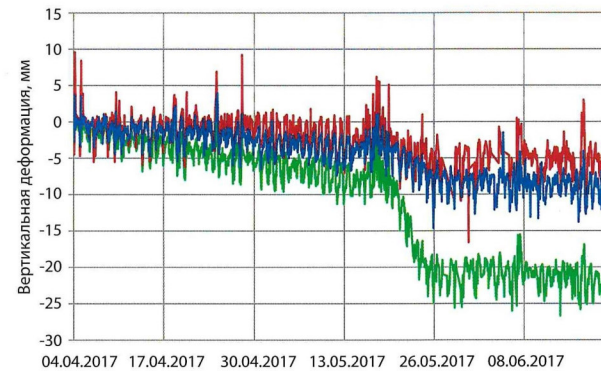


Рис. 8. График развития деформаций по призмам № 12, № 14 и № 15, установленным на опорах ЗСД. Призма № 12 на опоре V-9

После серии расчетов с учетом данных с ТПМК на каждом из участков, оснащенных экстензометрами (Э6-Э11), были подобраны дополнительные параметры, при которых расчетные деформации совпадали с фактическими. После калибровки моделей выполнена серия расчетов проходки двухпутного тоннеля рядом с существующими опорами Западного скоростного диаметра (ЗСД), за которыми велся непрерывный геодезический мониторинг роботизированным тахеометром в период цитовой проходки на перегоне между станциями метро «Новокрестовская» и «Приморская». В результате расчетов были получены вертикальные деформации опор грунтового массива и опор ЗСД (рис. 7), которые совпадали с величинами деформации опор по результатам геодезического мониторинга (рис. 8).

Наиболее опасный участок проходки под ЗСД находился рядом с опорами, расстояние до которых составляло 7,5 м от контура тоннеля в плане. Как видно из рис. 7, расчетные деформации приконтурной зоны совпадают с деформациями, полученными с экстензометров. В расчете вынужденные деформации задавались исходя из того, что породный массив «садится» на оболочку хвостовика, и перебор составляет разницу между диаметром резания и диаметром хвостовика. Дальнейшие деформации в приконтурной зоне компенсируются нагнетанием цементного раствора в заобделочное пространство. Деформации продолжают развиваться только в вышележащих слоях за счет разуплотнения и проседания пород. Толщина ростверка недостаточно для перераспределения деформаций в фундаменте, в результате чего неравномерность оседания свай составляет 11 мм.

Из анализа данных мониторинга можно заметить, что при проходке рядом с опорами ЗСД для глубины более 46 м выбраны не самые оптимальные параметры давления пригрузки лба забоя,

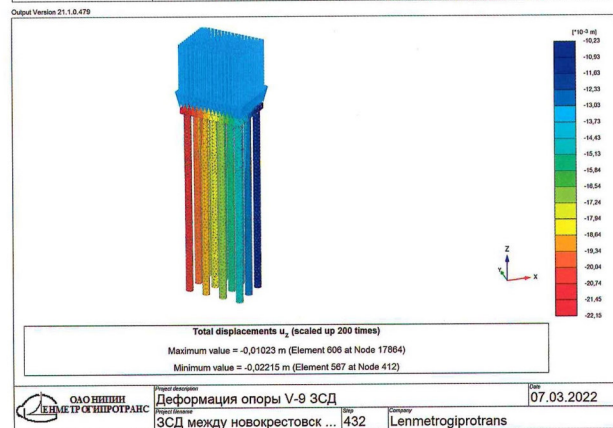
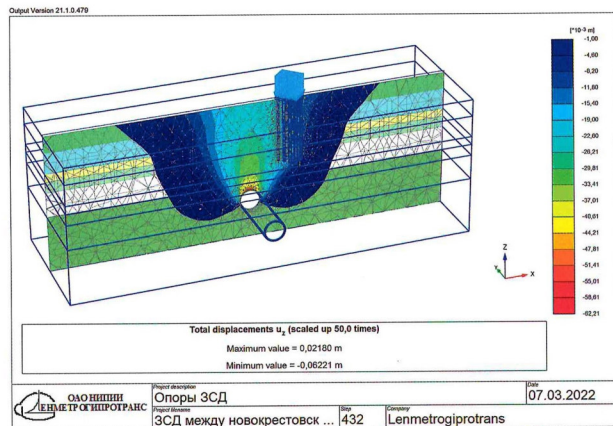


Рис. 7. Вертикальные деформации при проходке двухпутного тоннеля НВЛ рядом с опорой V-9

а также давления нагнетания раствора в заобделочное пространство. При анализе проходческих параметров в совокупности с результатами расчетов авторами данной работы были определены оптимальные параметры проходки, позволяющие значительно сократить величины деформаций опорных конструкций.

На основании высокой сходимости расчетов существующих участков были рассчитаны деформации грунтового массива при разных скоростях, давлениях и составах нагнетания. Параметры проверялись на наличие технической возможности ТПМК, а также дополнительного оборудования, размещенного на нем.

В результате данного исследования было установлено, что величины деформаций опорных строений можно было снизить до 16 мм (рис. 9).

Литература

1. Park K.-H. Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays // *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 249–261, 2005.
2. Mair R. J., Taylor R. N., and Burland J. B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling / in *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp. 713–718, Balkema, London, UK, April 1996.
3. Sirivachiraporn A. and Phienweij N. Ground movements in EPB shield tunneling of Bangkok subway project and impacts on adjacent buildings // *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 30, pp. 10–24, 2012.
4. Ларионов Р. И., Лебедев М. О., Безродный К. П. Способы сохранения зданий, являющихся памятниками архитектуры, при строительстве метрополитена в Санкт-Петербурге // *Инженер и промышленник*. 2018. № 1 (31), март. С. 16–21.
5. Лебедев М. О., Ларионов Р. И. Выбор технологической схемы строительства подземных сооружений метрополитена для обеспечения безопасности существующих зданий и сооружений / *Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке: тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции*, 2018, с. 128–129.

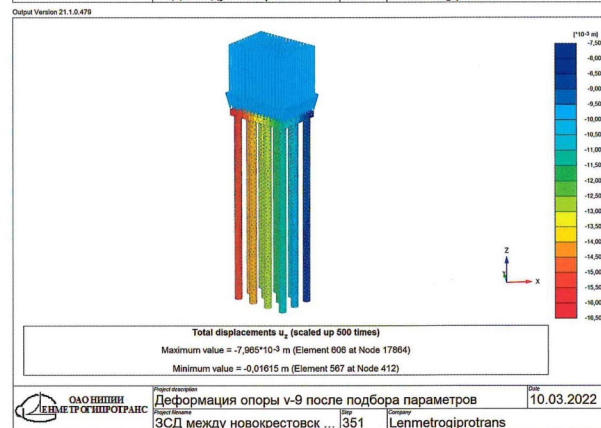
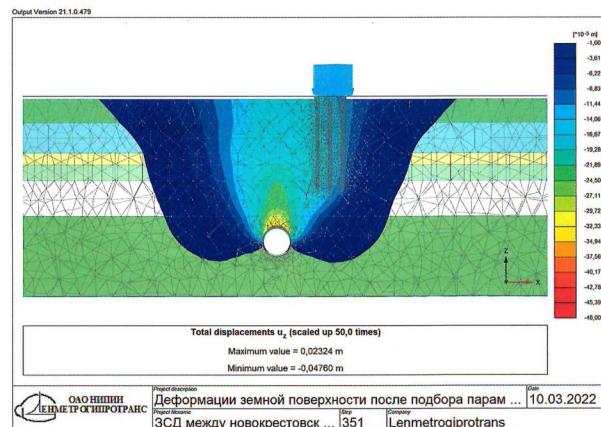


Рис. 9. Прогнозные вертикальные деформации опор при проходке двухпутного тоннеля