

# АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ СТАНЦИЙ МЕТРО «ОБВОДНЫЙ КАНАЛ» И «АДМИРАЛТЕЙСКАЯ» В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ПРИ ПОМОЩИ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Б.В. Костенко<sup>1,2</sup>, Р.И. Ларионов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт  
«Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: polo\_olor@mail.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** В 2009—2011 гг. в Санкт-Петербурге была осуществлена проходка двух эскалаторных тоннелей метрополитена с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса (далее ТПМК) на станциях: «Обводный канал» (октябрь-декабрь 2009 г.), «Адмиралтейская» (январь-апрель 2011 г.). Это были соответственно вторая и третья проходки по сооружению эскалаторного тоннеля с помощью ТПМК с грунтовым пригрузом забоя в мировом опыте (первый опыт — проходка наклонного хода станции метро «Марьяна Роща» в г. Москве). Рассмотрены результаты проходки эскалаторных тоннелей. Натурные данные были получены ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» в рамках геотехнического мониторинга. Интерес представляет влияние новой технологии проходки на оседания земной поверхности. Были построены графики формирования оседаний земной поверхности во времени, мульды оседания на момент окончания проведения геотехнического мониторинга. Построены графики сдвижения внутри массива во времени по показаниям экстензометрических датчиков. Проанализированы отдельные этапы проходки, наиболее сильно влияющие на величину оседаний: грунтопригруз и нагнетание тампонажного раствора в заобделочное пространство. Оценена длительность наблюдения за оседанием массива. Предложена схема формирования оседаний при соблюдении технологии проходки.

**Ключевые слова:** эскалаторный тоннель, мульда оседания, тампонаж, грунтопригруз, натурные данные, геотехнический мониторинг.

**Для цитирования:** Костенко Б. В., Ларионов Р. И. Анализ натуральных данных при строительстве эскалаторных тоннелей станций метро «Обводный Канал» и «Адмиралтейская» в г. Санкт-Петербурге при помощи тоннелепроходческого механизированного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 48–64. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_48.

---

## Field data analysis in construction of escalator tunnels at Obvodny Kanal and Admiralteyskaya Stations of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine

B.V. Kostenko<sup>1,2</sup>, R.I. Larionov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotrans» OSC, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: polo\_olop@mail.ru

<sup>2</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

---

**Abstract:** In 2009–2011 in the Saint-Petersburg Metro, two escalator tunnels were constructed using tunnel boring machine (TBM) at the stations Obvodny Kanal (October–December 2009) and Admiralteyskaya (January–April 2011). Those were respectively the second and third escalator tunnels constructed using TBM under loading of soil in the world (the first experience was gained in inclined heading in construction of the Marina Roshcha Station in the Moscow Metro). This article discusses heading of escalator tunnels. The field data were obtained by Lenmetrogiprotrans Research, Survey and Design Institute during geotechnical monitoring. The emphasis was laid on the influence of the tunneling technology on ground surface subsidence. The time curves of ground surface subsidence were plotted, and the subsidence trough draft by the end of geotechnical monitoring was drawn. The time–displacement curves were plotted by the readings of underground extensometers. The heading phases of the highest effect on ground surface subsidence are analyzed separately: loading generated by soil mass on the heading face and injection of grouting mortar in-between soil and casing. The subsidence monitoring duration is assessed. The subsidence flow chart subject to the adopted heading technology is proposed.

**Key words:** escalator tunnel, subsidence trough, grouting, soil-generated load, field data, geotechnical monitoring.

**For citation:** Kostenko B. V., Larionov R. I. Field data analysis in construction of escalator tunnels at Obvodny Kanal and Admiralteyskaya Stations of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(9):48-64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_48.

---

### Введение

В настоящее время проходка эскалаторного тоннеля в условиях плотной городской застройки является одним из самых опасных этапов при строительстве станционного комплекса: большая часть эскалаторного тоннеля расположена в слабых грунтах, и любое воздействие на них приводит к сдвигениям внутри массива, оседанию земной поверхности и деформациям существующей застройки, что особенно актуально для условий г. Санкт-Петербурга [1].

В 2008 г. в Москве впервые в мире был пройден эскалаторный тоннель при

помощи ТПМК [2]. В 2009–2011 гг. были пройдены эскалаторные тоннели станций метро «Обводный канал» и «Адмиралтейская» с применением тоннелепроходческого механизированного комплекса (далее ТПМК) фирмы Herrenknecht. Геотехнический мониторинг процесса строительства производился ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс». В рамках мониторинга исследовались деформации массива, оседания земной поверхности, напряжения в кольцах обделки, гидростатические давления в массиве, качество заполнения заобделочного пространства [3] и [4]. Технология

геотехнического мониторинга, проводимая за рубежом, представлена для условий проходки для г. Сеула (Корея) в [5], для г. Шицзячжуан (Китай) — в [6].

Анализ оседаний при разных технологиях проходки наклонного хода показал, что при проходке наклонного хода при помощи ТПМК оседания земной поверхности имеют минимальные значения [7].

В данной статье анализируются технологические этапы, особенности проходки с помощью ТПМК, наиболее сильно влияющие на оседания земной поверхности [8]: давление грунтопригрузки на лоб забоя, кольцевые зазоры по длине щита ТПМК и между обделкой и щитом ТПМК, тампонаж заобделочного пространства.

## Анализ натуральных данных

### Эскалаторный тоннель станции «Обводный канал»

Проходка осуществлялась в период с 22 октября 2009 г. (монтаж первого сборного ж/б кольца обделки) по 18 декабря 2009 г. (монтаж последнего 95 кольца обделки). Средняя скорость проходки составила 1,4 кольца/сутки. В отношении геологии участок строительства сложный: под техногенными отложениями и озерно-морскими песками расположены слабые текущие суглинки и супеси до глубины в 20–21 м. Ниже расположены тугопластичные и полутвердые суглинки лужской морены, ниже — твердые глины. Общая мощность четвертичных отложений составляет ≈38 м.

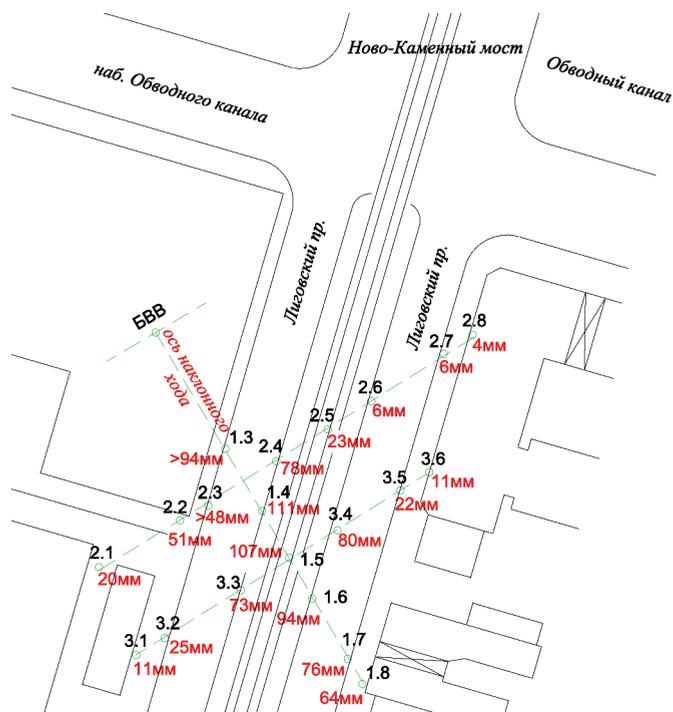


Рис. 1. Схема деформационной сети при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Обводный канал»: 1.3–3.6 — номера деформационных пунктов (красным отмечены оседания к окончанию мониторинга)

Fig. 1. Deformation monitoring network in escalator tunnel boring at Obvodny Kanal Station: 1.3–3.6 — deformation points (red color marks subsidence by completion of monitoring)

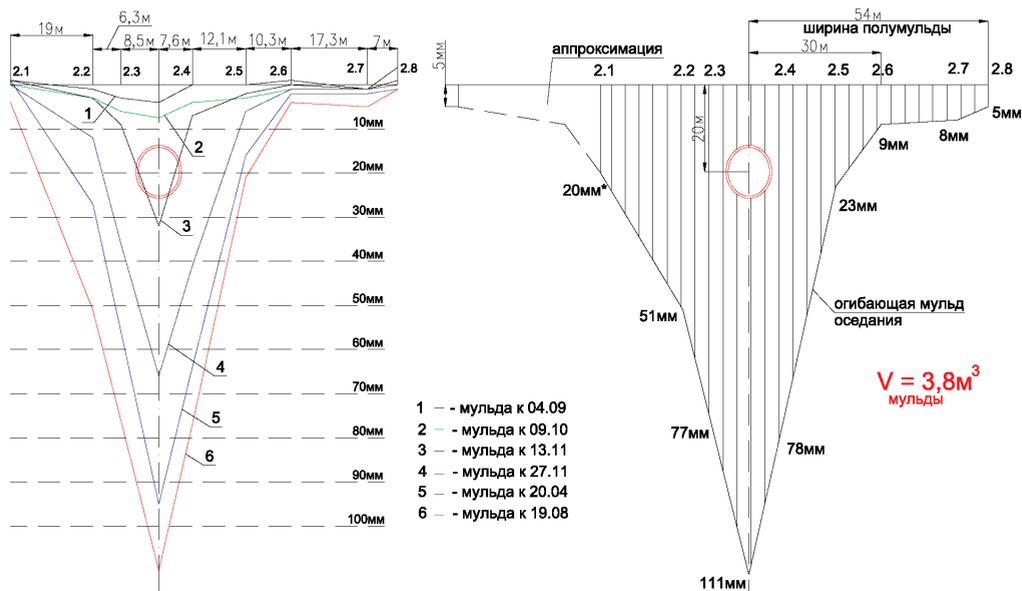


Рис. 2. Характер формирования мульды оседания во времени и окончательный вид мульды по сечению 2.1 – 2.8. Ротор расположен под поперечным профилем с 03.10 по 13.11

Fig. 2. Time history and final appearance of subsidence trough in cross-section 2.1–2.8. Rotor is situated under transverse section between 03.10 and 13.11

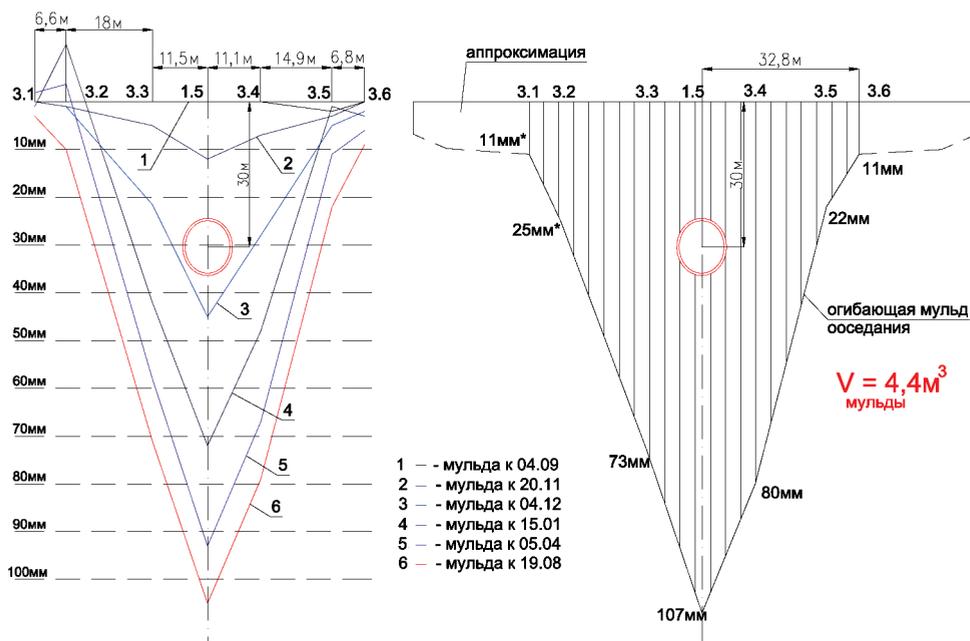


Рис. 3. Характер формирования мульды оседания во времени и окончательный вид мульды по сечению 3.1 – 3.6. Ротор расположен под поперечным профилем 20.11

Fig. 3. Time history and final appearance of subsidence trough in cross-section 3.1 – 3.6. Rotor is situated under transverse section 20.11

На рис. 2 и рис. 3 представлены графики формирования мульды оседания во времени и итоговые мульды оседания на момент окончания проведения мониторинга по сечениям 2,1 – 2,8 и 3,1 – 3,6. Приведены объемы мульды оседания, подсчитанные геометрически.

Как видно из рис. 2 и рис. 3, мульда имеет симметричный вид с некоторыми отклонениями на периферии у реперов 2.1, 3.1 и 3.2, вызванными, по всей видимости, строительными работами в этой зоне (оседания под этими реперами высчитаны как суммы соответствующих оседаний до и после подъемов и обозначены \*). Ширина полумульды оседания по сечению 2.1 – 2.8 (ось тоннеля на глубине 20 м) составила 54 м, ширину полумульды по сечению 3.1 – 3.6 (ось тоннеля на глубине 30 м) по маркшейдерской съемке установить не удалось. Однако ее можно сравнить с мульдой по сечению 2.1 – 2.8: оседание репера 2.6 составило 9 мм, репера 3.6 – 11 мм. Значения оседаний очень близки (в пределах погрешности измерений), а расстояния от оси тоннеля до реперов составляют 30 м и 32,8 м соответственно. Мульда до точки с оседанием в 9 – 11 мм по сечению 3.1 – 3.6 в 1,15 раза шире мульды по сечению 2.1 – 2.8. По [9] ширина мульды в четвертичных отложениях определяется глубиной заложения тоннеля и углом сдвижения, равным  $45^\circ + \varphi/2$ . То есть расчетная ширина полумульды в сечении 3.1 – 3.6 должна быть шире полумульды в сечении 2.1 – 2.8 примерно в  $30/20 = 1,5$  раза. С учетом погрешности измерений можно считать, что у фактической мульды по данным сечениям примерно одинаковая ширина.

Объем мульды имеет важнейшее значение для расчета, так как в традиционных методиках расчета оседаний [10 – 11] предполагается, что этот объем равен «потерянному объему» грунта в процес-

се проходки с неким коэффициентом. Объем мульды по окончании геотехнического мониторинга составлял:

- сечение 2.1 – 2.8:  $V_s = 3,8 \text{ м}^3$  (4,2% от площади ротора ТПМК на 1 п.м. тоннеля);
- сечение 3.1 – 3.6:  $V_s = 4,4 \text{ м}^3$  (4,9% от площади ротора ТПМК на 1 п.м. тоннеля).

«Потерянный объем» при соблюдении технологии проходки должен примерно быть равным строительному зазору между ротором ТПМК и щитом ( $V_L = 0,98 \text{ м}^3$ ) по [12, с. 138]. Учитывая особенности конструкции ТПМК («конусность» щита) и отступления от технологии проходки, «потерянный объем» можно оценить при разном качестве заполнения зазора между обделкой и грунтом тампонажным раствором:

- зазор заполнен на 100%:  $V_{sl} = 0,98 \text{ м}^3$ ;
- зазор заполнен на 50%:  $V_{sl} = 2,65 \text{ м}^3$ ;
- зазор заполнен на 0%:  $V_{sl} = 5,3 \text{ м}^3$  (отсутствие тампонажного раствора).

Сравнивая значения  $V_L$  и  $V_s$ , можно выявить, что, вероятнее всего, при проходке имело место отступление от технологии заполнения заобделочного пространства тампонажным раствором. Действительно, в процессе проходки возникали сложности в связи с засорением нагнетательных сопел ТПМК.

На рис. 4 представлен продольный разрез по эскалаторному тоннелю с кривыми формирования оседаний земной поверхности во времени и разрез с окончательными оседаниями на момент окончания мониторинга. Крестиками указаны даты, в которые ротор ТПМК находился под соответствующим грунтовым репером.

Максимальные оседания проявились в первой трети длины эскалаторного тоннеля, сразу после зоны закрепления грунта. По мере углубления тоннеля в более прочные грунты максимальные оседания уменьшились с более чем

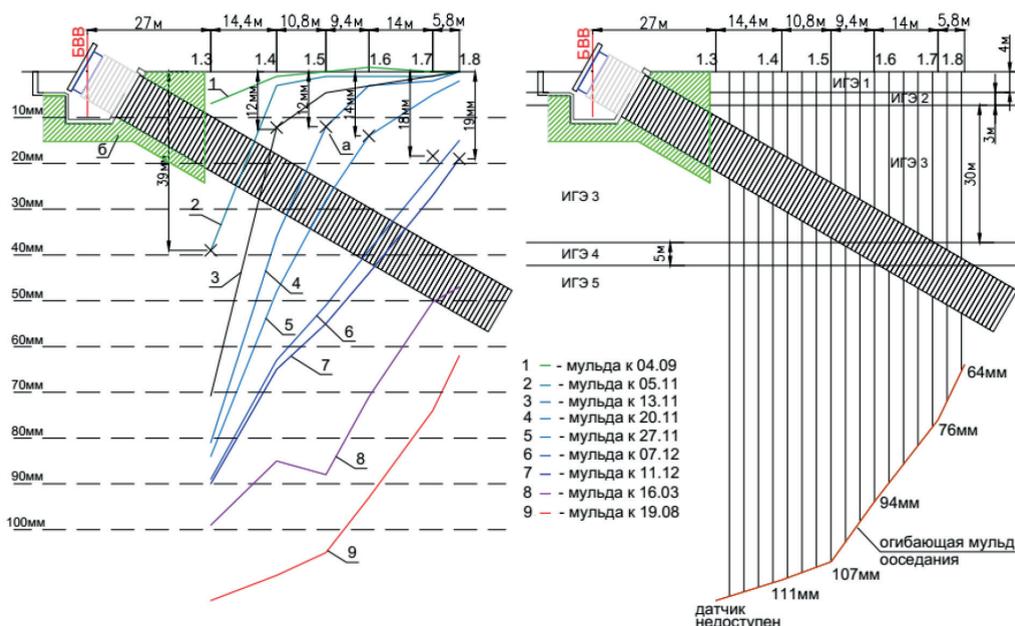


Рис. 4. Характер формирования оседания во времени и окончательные значения оседаний в продольном направлении: даты, в которые ротор ТПМК располагался строго под репером (а); зона закрепления грунта (б); ИГЭ 1 – техногенные отложения, ИГЭ 2 – пески, ИГЭ 3 – суглинки текучепластичные, ИГЭ 4 – суглинки тугопластичные, ИГЭ 5 – твердые глины

Fig. 4. Time history and final values of subsidence longitudinally: days when TBM rotor is situated strictly under check point (a); soil densification zone (b); IGE 1 – waste, IGE 2 – sand, IGE 3 – yielding plastic loam, IGE 4 – tough loam, IGE 5 – firm clay

111 мм до 64 мм. Конечные оседания уменьшаются по длине эскалаторного тоннеля с увеличением глубины заложения тоннеля.

Из графика следует, что оседание впереди лба забоя (оседание к моменту подхода ротора к точке под репером) на много меньше оседания по окончании мониторинга.

Процентное отношение этих двух величин составило:

- репер 1.4: 11%;
- репер 1.5: 11%;
- репер 1.6: 15%;
- репер 1.7: 24%;
- репер 1.8: 30%.

Репер 1.3 не анализировался, так как в этом месте было отступление от технологии проходки. Стоит отметить, что в абсолютных значениях оседание каж-

дого репера на земной поверхности к моменту продвижения ротора под ним имеет почти постоянную величину. Процентное отношение возрастает, так как максимальная величина оседаний под реперами уменьшается при увеличении глубины заложения тоннеля.

На рис. 5 представлен график формирования оседаний реперов во времени в процессе проходки и в течение 8 месяцев после окончания проходки. Максимальные приращения оседаний происходят в процессе проходки. После ее окончания скорость нарастания оседаний уменьшается.

Из рис. 5 и табл. 1 следует, что мониторинг велся на протяжении 8 месяцев после окончания проходки, но процесс оседания на момент окончания мониторинга еще не завершился.

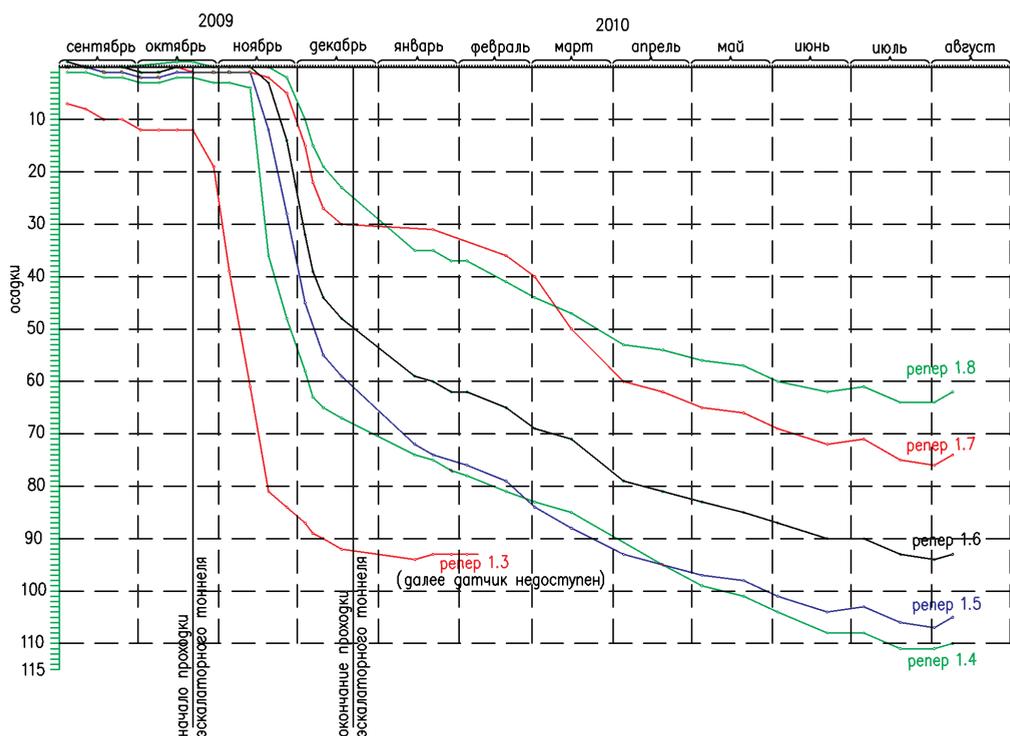


Рис. 5. Графики оседаний реперов 1.3–1.8 во времени  
 Fig. 5. Subsidence of check points 1.3–1.8 versus time

Таблица 1

**Оседания реперов к окончанию проходки тоннеля и окончанию мониторинга**  
**Subsidence of check points by completion of tunneling and monitoring**

	Оседания к окончанию проходки, мм	Оседания к окончанию мониторинга (8 мес.), мм
Репер 1.4	68	111
Репер 1.5	61	107
Репер 1.6	50	94
Репер 1.7	30	76
Репер 1.8	25	64

**Эскалаторный тоннель станции «Адмиралтейская»**

Проходка велась с 7 января 2011 г. (монтаж первого постоянного сборного ж/б кольца обделки) по 15 апреля 2011 г. (монтаж последнего 116 кольца обделки). Средняя скорость проходки (не включая первые 4 кольца, которые монтировались с длительными простоями) со-

ставляла 1,5 кольца/сутки. В отношении геологии участок строительства сложный: под техногенными отложениями и озерно-морскими песками расположены слабые текучие суглинки и супеси до глубины в 26–29 м. Ниже расположены суглинки лужской морены от мягкопластичной до тугопластичной и полутвердой (в самом низу слоя) кон-

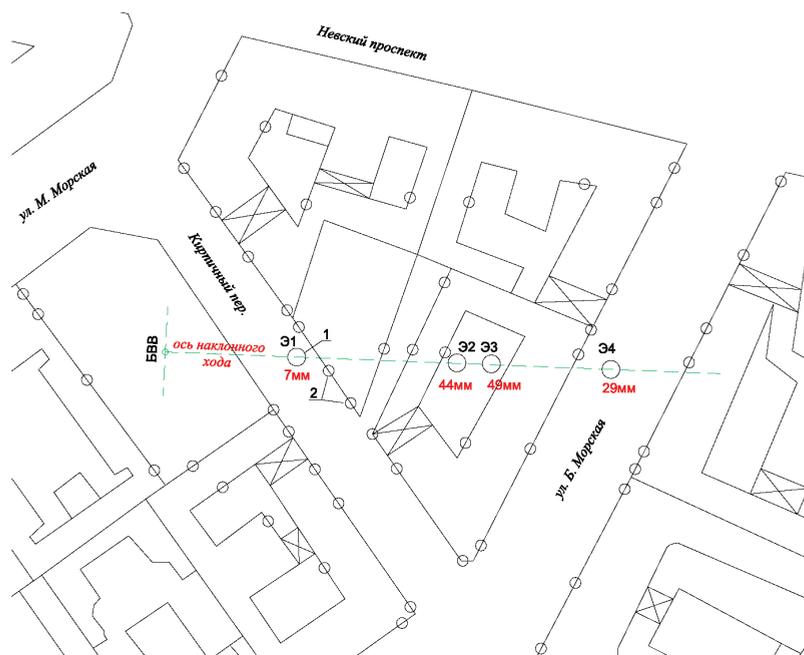


Рис. 6. Схема деформационной сети при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская»: 1 — деформационные грунтовые реперы; 2 — настенные деформационные реперы (красным отмечены оседания к окончанию мониторинга)

Fig. 6. Deformation monitoring network in escalator tunnel boring at Admiralteyskaya Station: 1 — deep-seated deformation check points; 2 — wall deformation check points (red color marks subsidence by completion of monitoring)

систенции, ниже — твердые глины. Общая мощность четвертичных отложений составляет  $\approx 56$  м. Данный участок характеризуется исключительно плотной застройкой жилыми зданиями, большая часть которых имеет историческое значение.

На данной станции были заложены 4 экстензометрические скважины. В скважинах на разных глубинах устанавливались экстензометры (подробнее см. рис. 12), фиксирующие вертикальные смещения массива. Оседания земной поверхности фиксировались по смещениям устьев скважин.

На рис. 7 представлен продольный разрез по эскалаторному тоннелю с кривыми формирования оседаний во времени и разрез с окончательными оседаниями на момент завершения мониторинга. Крестиками указаны даты,

в которые ротор ТПК находился под соответствующим грунтовым репером.

В зоне стартового котлована производилось закрепление грунта по технологии Jet Grouting. Устье скважины Э1 расположено в зоне закрепленного грунта, поэтому оседания по данному реперу малы (7 мм). Максимальные оседания оголовков скважин на момент окончания геотехнического мониторинга составили: для Э2 — 44 мм, Э3 — 49 мм, Э4 — 29 мм. По сравнению с проходкой на станции «Обводный канал» оседания уменьшились в 2,2 раза (отношение максимальных величин оседаний).

Из продольного разреза по рис. 7 следует, что, как и на станции «Обводный канал», оседания земной поверхности впереди лба забоя (оседание при подходе ротора к точке под репером) намного меньше, чем оседание по окончании

мониторинга, кроме данных по Э1 и Э4 (см. пояснения ниже). Кроме того, оседание впереди лба забоя для Э2 и Э3, как и на станции «Обводный канал», имеет почти одинаковое значение (3 и 4 мм). Отношение величины оседания

впереди лба забоя к полному оседанию составило:

- устье скважины Э1: не учитывалось (зона цементации);
- устье скважины Э2: 7%;
- устье скважины Э3: 8%;

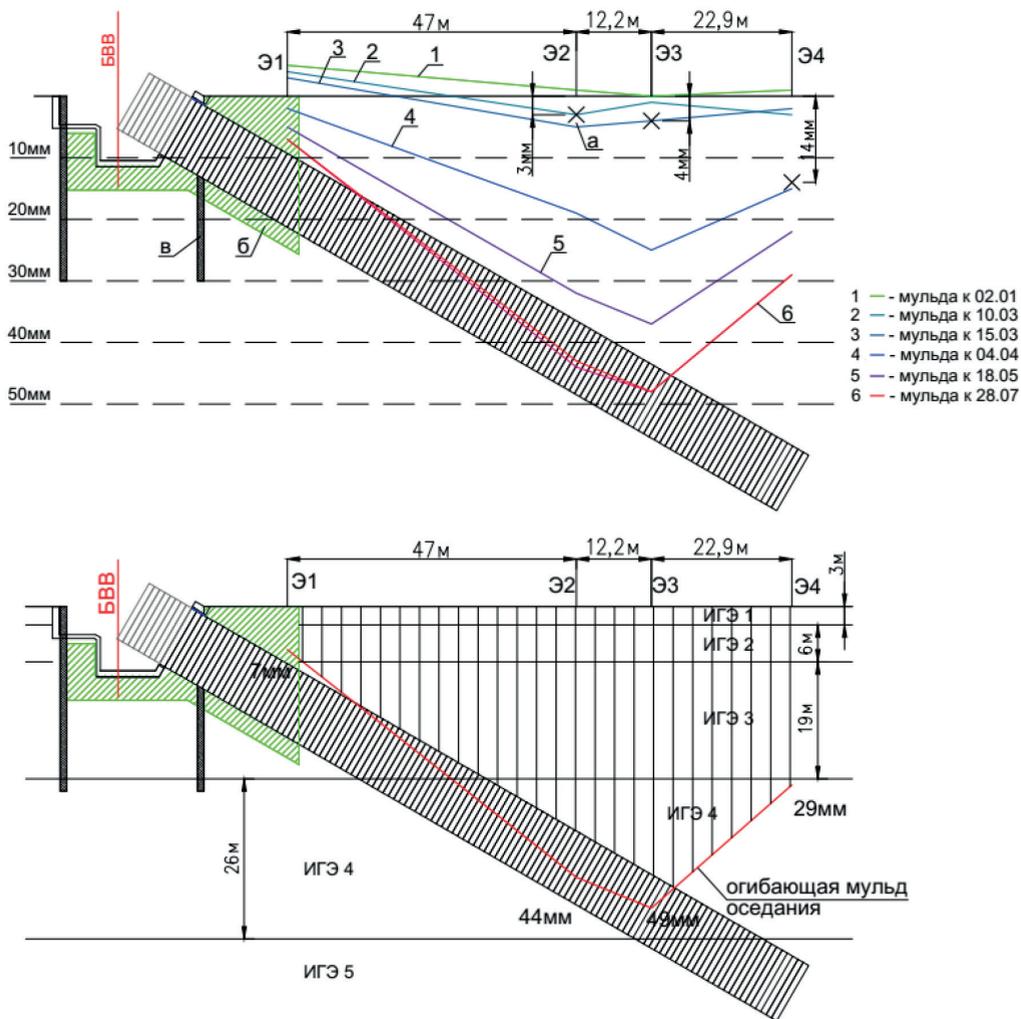


Рис. 7. Характер формирования оседания во времени и окончательные значения оседаний в продольном направлении по устьям скважины Э1–Э4: даты, в которые ротор ТПМК располагался строго под репером (а); зона закрепления грунта (б); стена в грунте (в); ИГЭ 1 – техногенные отложения, ИГЭ 2 – пески, ИГЭ 3 – суглинки текучепластичные, ИГЭ 4 – суглинки мягкопластичные полутвердые, ИГЭ 5 – твердые глины

Fig. 7. Time history and final values of subsidence longitudinally at borehole mouths E1–E4: days when TBM rotor is situated strictly under check point (a); soil densification zone (b); wall in soil (v); IGE 1 – waste, IGE 2 – sand, IGE 3 – yielding plastic loam, IGE 4 – soft and plastic to semisolid loam, IGE 5 – firm clay

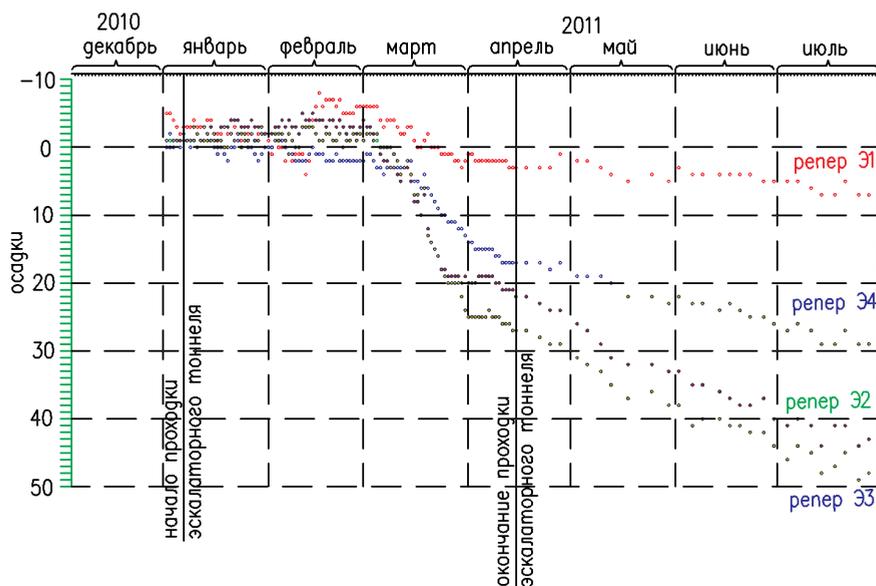


Рис. 8. Графики оседаний устьев скважин Э1 – Э4 во времени  
 Fig. 8. Time curves of subsidence at borehole mouths E1–E4

• устье скважины Э4: не учитывалось (остановка ТПКМ под Э4 15 марта привела к мгновенному увеличению оседаний земной поверхности до 14 мм при том, что тоннель уже заглублен в твердые прочные глины).

На рис. 8 представлен график формирования оседаний реперов во времени в процессе проходки и в течение 3,5 месяцев после окончания проходки. Как и на станции «Обводный канал», графики оседаний реперов можно условно представить тремя прямыми: 1 — горизонтальная площадка, на которой ТПКМ не влияет на оседания, 2 — ин-

тенсивное нарастание оседаний, 3 — длительное оседание с менее интенсивным приращением оседаний.

По табл. 2 величина оседания земной поверхности к концу мониторинга больше оседания к концу проходки примерно в 2 раза, как и на станции «Обводный канал». Кроме того, по графику оседания (рис. 8) видно, что процесс оседания на момент окончания мониторинга еще не закончился. Следовательно, период мониторинга следует увеличить.

На рис. 9 представлены графики оседания экстензометров в скважине Э2: Э2-1 — на глубине 9,5 м, Э2-2 — на

Таблица 2

**Оседания реперов к окончанию проходки тоннеля и окончанию мониторинга**  
**Subsidence of check points by completion of tunneling and monitoring**

	Оседания к окончанию проходки, мм	Оседания к окончанию мониторинга (3,5 мес.), мм
Репер Э1	3	7
Репер Э2	22	44
Репер Э3	27	49
Репер Э4	17	29

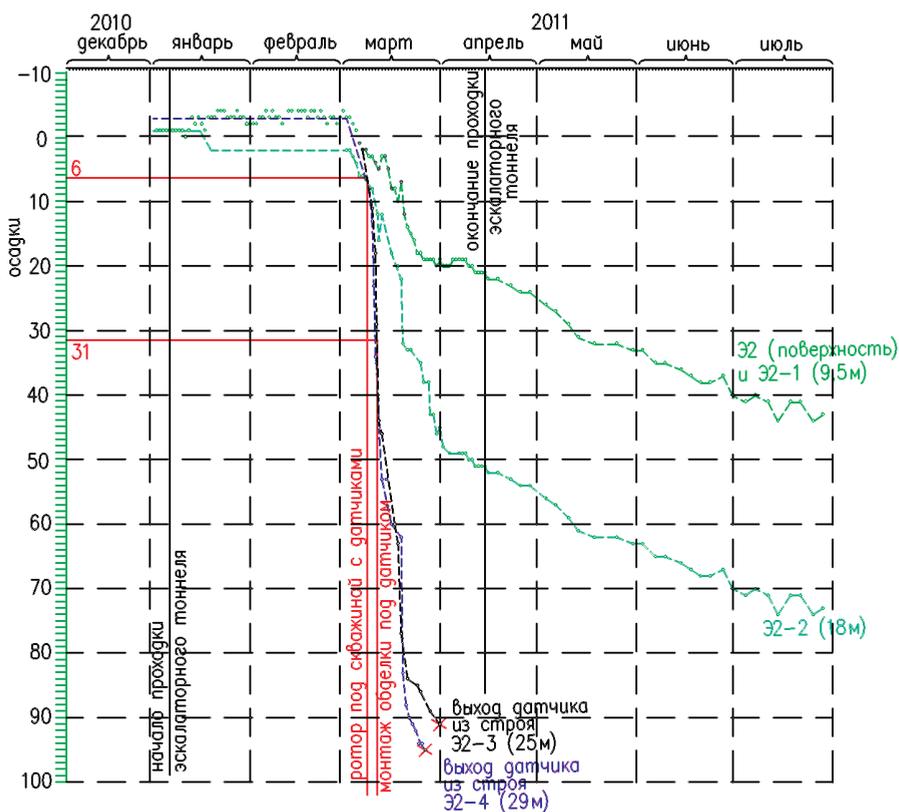


Рис. 9. Графики оседаний оголовка скважины Э2 и экстензометров Э2-1, Э2-2, Э2-3 и Э2-4 во времени  
 Fig. 9. Subsidence at well head of borehole E2 and extensometers E2-1, E2-2, E2-3 and E2-4 in time

глубине 18 м, Э2-3 — на глубине 25 м, Э2-4 — на глубине 29 м. Точка пересечения продольной оси наклонного хода и оси скважины Э2 находится на глубине 42,5 м ( $\approx 36,5$  м до шельги свода). Как видно из рис. 9, оседания по всем датчикам начинаются 1 марта, за несколько дней до положения ротора под осью Э2. Оседание впереди лба забоя ТПМК составило 6 мм для Э2-3 и Э2-4 и 4 мм — для Э2-1 и оголовка скважины Э2. После продвижения ротора экстензометры Э2-3 и Э2-4 резко смещаются вниз до 31 мм. Это смещение произошло из-за наличия строительного зазора между ротором и хвостовой частью щита ТПМК «Аврора». Полная величина зазора, как разница диаметров ро-

тора и щита ТПМК, составляет 60 мм. Необходимо уточнить, что данный зазор состоит из двух: верхнего и нижнего зазоров, так как значение принималось равным разнице диаметров, не радиусов. Однако в процессе проходки по ряду причин верхний строительный зазор может увеличиться за счет уменьшения нижнего зазора. В итоге верхний строительный зазор между щитом и грунтом имеет значение в диапазоне от 30 до 60 мм.

Далее по рис. 9 после монтажа обделки под датчиком и схода щита с обделки смещения резко увеличиваются до 91 — 95 мм. После этого экстензометры Э2-3, Э2-4 выходят из строя. После схода щита с обделки к полной величине

не строительного зазора добавляется зазор между обделкой и щитом. Диапазон этого зазора составляет 130–260 мм. Этот зазор по технологии проходки должен заполняться тампонажным раствором. Смещения датчиков более 95 мм демонстрируют, что зазор был заполнен тампонажным раствором некачественно. Из-за этого участок массива с экстензометрами Э2-3 и Э2-4 мгновенно сместился вниз. Характер смещений датчиков Э2-2 и Э2-1 иной: плавное смещение без резких скачков. После окончания проходки скорости нарастания деформаций одинаковы, то есть массив в зоне этих датчиков оседает совместно.

Оседания же Э2-1 и оголовка скважины Э2 идентичны.

На рис. 10 представлены графики оседания экстензометров в устье скважины Э3: Э3-1 – на глубине 11 м, Э3-2 – на глубине 18 м, Э3-3 – на глубине 29 м, Э3-4 – на глубине 38 м. Точка пересечения продольной оси наклонного хода и оси скважины Э3 находится на глубине 49,5 м (≈43,5 м до шельги свода). Тенденции к смещению по графикам на рис. 10 схожи с рис. 9:

- оседания по всем экстензометрам начинаются 9 марта, за несколько дней до положения ротора под скважиной Э3. Оседание впереди лба забоя ТПМК со-

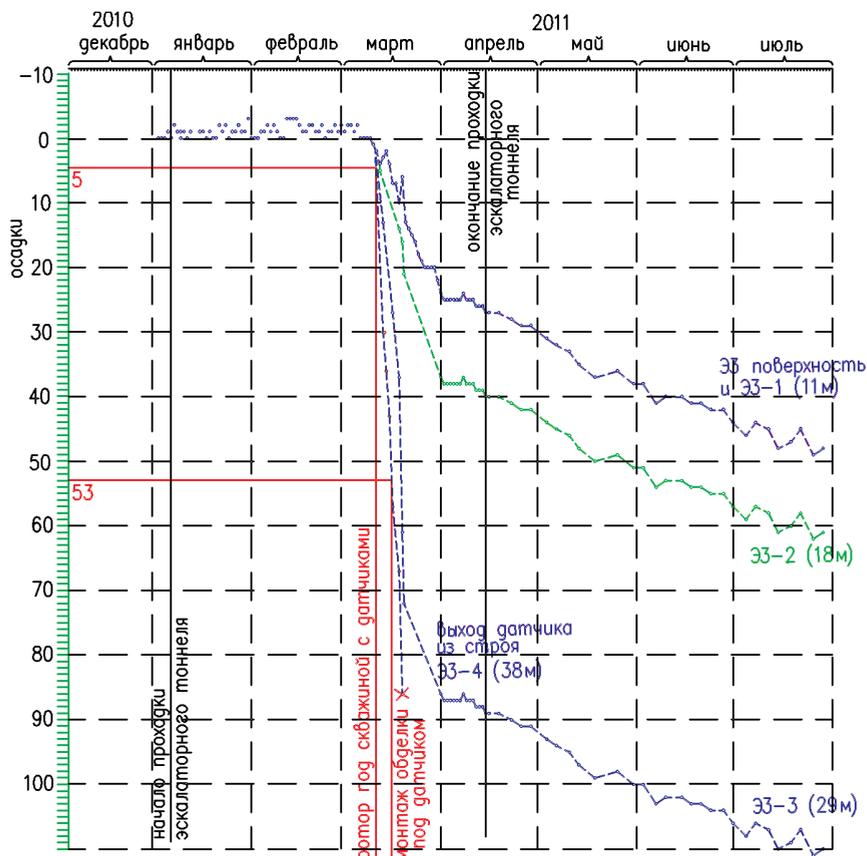


Рис. 10. Графики оседаний оголовка скважины Э3 и экстензометров Э3-1, Э3-2, Э3-3 и Э3-4 во времени

Fig. 10. Subsidence at well head of borehole E3 and extensometers E3-1, E3-2, E3-3 and E3-4 in time

ставило 5 мм для ЭЗ-3 и ЭЗ-4 и 4 мм — для ЭЗ-1 и устья скважины ЭЗ;

- после продвижения ротора ЭЗ-3 и ЭЗ-4 резко смещаются вниз до 53 мм, что попадает в диапазон 30–60 мм строительного зазора между ротором и хвостовой частью щита ТПМК «Аврора»;

- после схода щита с обделки под скважиной ЭЗ смещения ЭЗ-3 и ЭЗ-4 резко увеличиваются до ≈85 мм, после чего экстензометр ЭЗ-4 выходит из строя;

- характер смещений ЭЗ-2 и ЭЗ-1 иной: плавное смещение без резких скачков. После окончания проходки скорость приращения оседаний по ЭЗ-1, ЭЗ-2, ЭЗ-3 совпадает, то есть массив в зоне этих датчиков оседает совместно. Оседания же ЭЗ-1 и устья скважины ЭЗ идентичны.

На рис. 11 представлены графики оседания экстензометров в устье скважины Э4: Э4-1 — на глубине 9,5 м, Э4-2 — на глубине 18 м, Э4-3 — на глубине 35 м, Э4-4 — на глубине 49 м. Точка пересечения продольной оси на-

клонного хода и оси скважины Э4 находится на глубине 63,2 м (≈56,7 м до шельги свода).

Оседания по всем экстензометрам начинаются 18 марта, за несколько дней до положения ротора под скважиной ЭЗ. Оседание впереди лба забоя ТПМК составило 14–16 мм. В данном случае оседания впереди лба забоя ТПМК больше и начались раньше, чем по экстензометрам в других скважинах из-за остановки ТПМК 16 марта на 4 дня с полным снятием давления со лба забоя. После продвижения ротора отсутствуют резкие смещения экстензометров. Небольшое смещение Э4-4 (на 20 мм) происходит после схода щита с кольца обделки, однако затем часть смещения компенсируется резким скачком вверх на 8 мм при тампонаже заобделочного пространства. Далее смещения происходят плавно, с одинаковой скоростью нарастания оседаний по всем экстензометрам. Характер смещений датчиков Э4-1 — Э4-3 и устья скважины Э4 почти одинаков.

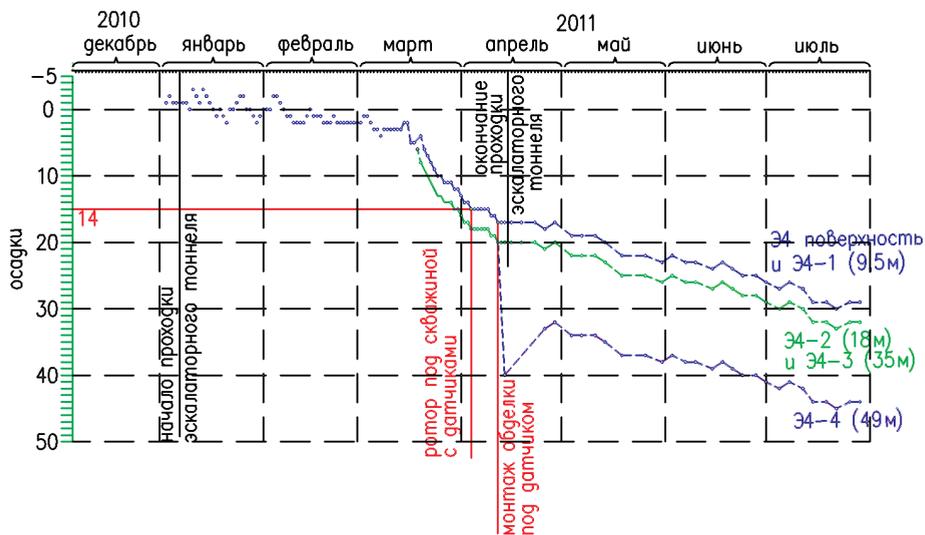


Рис. 11. Графики оседаний оголовка скважины Э4 и экстензометров Э4-1, Э4-2, Э4-3 и Э4-4 во времени

Fig. 11. Subsidence at well head of borehole E4 and extensometers E4-1, E4-2, E4-3 and E4-4 in time

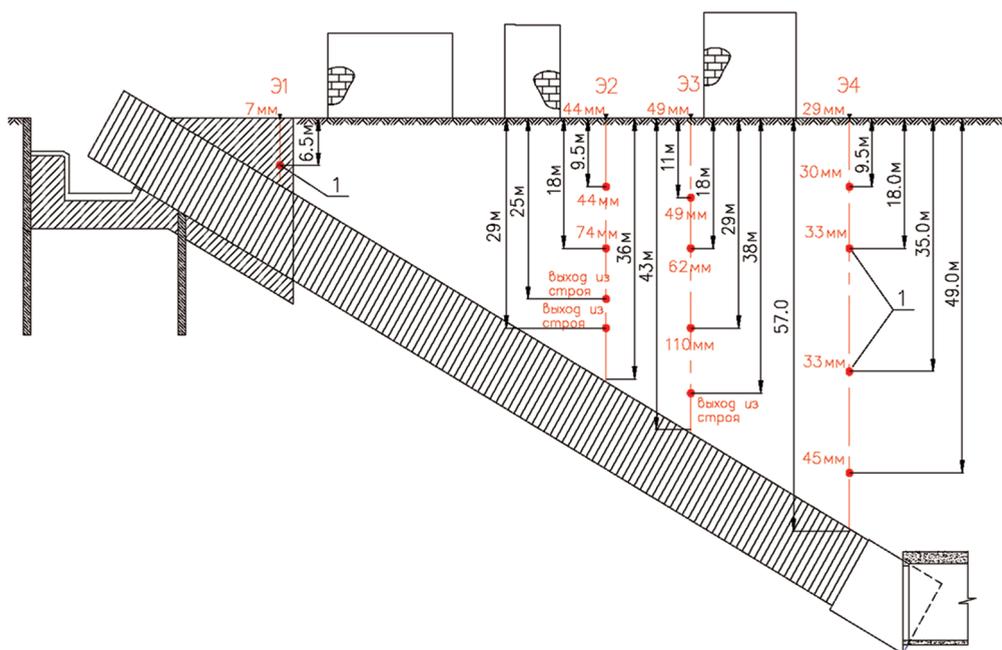


Рис. 12. Продольный разрез по эскалаторному тоннелю ст. метро «Адмиралтейская». Э1–Э4 – скважины, 1 – экстензометрические датчики; приведены смещения экстензометров и земной поверхности к концу геотехнического мониторинга

Fig. 12. Side elevation of escalator tunnel at Admiralty Station: E1–E4 – boreholes, 1 – extensometers; displacements of extensometers and ground surface by completion of geotechnical monitoring are given

Из графиков оседаний датчиков, распределенных по глубине массива, следует: в средней трети тоннеля при большой мощности слабых текучих и мягкопластичных глинистых грунтов смещения массива у шельги свода возрастают не плавно, а достаточно резко. Это обусловлено «конусностью» ТПМК (диаметр ротора ТПМК больше диаметра хвостовой части оболочки щита) и строительным зазором между щитом и обделкой. В процессе проходки возникали сложности с постоянным засорением нагнетательных сопел (для нагнетания тампонажного раствора) в верхней части щита. Зазор был заполнен тампонажным раствором не полностью. В условиях слабых текучих грунтов это отступление от технологии проходки приводило к тому, что грунт заполнял оставшийся объем, деформации резко возрастали.

У экстензометров, расположенных выше, оседания протекали плавно, величины смещений были намного меньше. Следует отметить, что графики оседаний земной поверхности/экстензометров во времени свидетельствует о том, что формирование сдвижений – длительный затухающий процесс. Процесс затухания длится намного дольше, чем период геотехнического мониторинга (3,5 месяца).

### Выводы

В статье были проанализированы итоги проходки двух эскалаторных тоннелей с помощью ТПМК по станциям метрополитена г. Санкт-Петербурга: «Обводный канал» и «Адмиралтейская». Был собран большой объем данных, полученный в рамках геотехнического мониторинга ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс». На основе табличных данных

автором были построены графики и таблицы, проанализированы результаты проходок. Сделаны следующие выводы:

1. Апробация новой технологии проходки эскалаторных тоннелей при помощи ТПМК с грунтопригрузом забоя прошла успешно: оседания земной поверхности меньше, чем при других технологиях проходки (в 4–5 раза меньше, чем при замораживании грунта). При проходке второго эскалаторного тоннеля максимальные оседания посередине длины эскалаторного тоннеля уменьшились в 2,2 раза (с 94 мм до 44 мм).

2. Оседания земной поверхности:

- для станции «Обводный канал»: в первой трети длины эскалаторного тоннеля оседания максимальны и составляют 111 мм, уменьшаясь к концу тоннеля до 64 мм;

- для станции «Адмиралтейская»: в первой половине длины эскалаторного тоннеля фиксация оседаний земной поверхности в зоне без закрепления грунта не производилась (близко расположены здания); во второй половине тоннеля оседания составляют 49–44 мм, уменьшаясь к концу тоннеля до 29 мм.

Можно сделать вывод, что максимальные оседания в мульдe будут уменьшаться от зоны выхода ТПМК из закрепленного грунта к концу эскалаторного тоннеля, что соответствует [13].

3. Оседания впереди лба забоя ТПМК (оседания земной поверхности в точке при подходе ротора в массиве строго под этой точкой) малы и имеют в абсолютных величинах в среднем одинаковое значение; при этом процентное отношение этих оседаний к оседаниям на момент окончания мониторинга будет уменьшаться.

4. На момент завершения геотехнического мониторинга оседания земной поверхности больше оседаний, измеренных по окончании проходки.

«Обводный канал»:

- длительность проходки эскалатора  $\approx 2$  месяца;

- длительность мониторинга после окончания проходки  $\approx 7,5$  месяцев;

- отношение оседаний на момент окончания мониторинга к оседаниям на момент окончания проходки: 1,63 – 2,56.

«Адмиралтейская»:

- длительность проходки эскалатора  $\approx 3$  месяца;

- длительность мониторинга после окончания проходки  $\approx 3,5$  месяцев;

- отношение оседаний на момент окончания мониторинга к оседаниям на момент окончания проходки: 1,71 – 2.

5. Ключевой фактор, влияющий на величину оседаний – качество тампонажа заобделочного пространства, при нарушении которого грунтовый массив получает дополнительные деформации в уровне шельги свода и дополнительные оседания на поверхности земли.

6. Причина оседания земной поверхности при соблюдении технологии проходки – сочетание таких факторов, как слабые неустойчивые грунты и особенности конструкции ТПМК, предполагающей уменьшения диаметра ТПМК от ротора к хвостовой части щита для облегчения проходки. Это создает зазор в 30–60 мм между ТПМК и грунтом, который компенсируется совместно с зазором между обделкой и щитом тампонажным раствором только через  $L/V$  дней, где  $L$  – длина щита,  $V$  – скорость проходки. Для рассмотренных станций это время составило 4–5 дней.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслак В. А., Безродный К. П., Марков В. А. Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга // Метро и тоннели. – 2012. – № 6. – С. 26 – 29.

2. Штерн Г. Я., Сорокин Н. А. Сооружение эскалаторного тоннеля в Москве с помощью ТПМК «Lovat» // *Метро и тоннели*. — 2009. — № 2. — С. 6–7.

3. Безродный К. П., Лебедев М. О. Натурные исследования напряженно-деформированного состояния системы «обделка-массив» в составе горно-экологического мониторинга // *Метро и тоннели*. — 2011. — № 6. — С. 28–30.

4. Безродный К. П., Лебедев М. О. Горно-экологический мониторинг как инструмент понимания геомеханических процессов при строительстве метрополитена // *Метро и тоннели*. — 2016. — № 3. — С. 10–11.

5. Hyunku Park, Ju-Young Oh, Dohyung Kim, Seokbue Chang Monitoring and analysis of ground settlement induced by tunneling with slurr pressure-balanced tunnel boring machine // *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, pp. 10. DOI: 10.1155/2018/5879402.

6. Dongyang Geng, Karel Vojtasik. Measured analysis of ground settlement deformation of underground tunnel // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 310, no. 2, article 022063. DOI: 10.1088/1755-1315/310/2/022063.

7. Безродный К. П., Лебедев М. О., Егоров Г. Д. Строительство эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена // *Метро и тоннели*. — 2015. — № 1. — С. 14–17.

8. El-Nahhas F. M., El-Mossallamy Y. M., El-Shamy A. A. 3D analysis of ground settlement induced by mechanized tunneling // *The Fourteenth International Conference on Structural and Geotechnical Engineering ICSGE 14*, Ain Shams University. 2015. Session 11, Paper No. 3

9. Подаков В. Ф. Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена. — Л.: Стройиздат, 1973. — 58 с.

10. Koukoutas S. P., Sofianos A. I. Settlements due to single and twin tube urban EPB shield tunneling // *Geotechnical and geological engineering*. 2015, vol. 33, pp. 487–510.

11. Binh Thanh Le, Minoru Kuriki, Quoc Phan An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunneling in Ho Chi Minh city // *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. 2020, pp. 305–306. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3\_38.

12. Гульелметти В., Грассо П., Махтаба А. Механизированная проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством: пер. с англ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 602 с.

13. Мазеин С. В., Прудников А. Д., Лехт В. В. Проектные решения по минимизации осадки земной поверхности грунтопригрузом тоннелероходческого механизированного комплекса // *Метро и тоннели*. — 2016. — № 3. — С. 6–9. **ПЧЭС**

## REFERENCES

1. Maslak V. A., Bezrodnyy K. P., Markov V. A. Technologies of constructing subway in the historical centre of Saint-Petersburg with small ground settlements. *Metro i tonneli*. 2012, no. 6, pp. 26–29. [In Russ].

2. Shtern G. Ya., Sorokin N. A. Construction of escalator tunnel in Moscow with TBM «Lovat». *Metro i tonneli*. 2009, no. 2, pp. 6–7. [In Russ].

3. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O. Field investigations of stress-stain state of the system «lining-soil mass». *Metro i tonneli*. 2011, no. 6, pp. 28–30. [In Russ].

4. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O. Mining and environmental monitoring as a tool for understanding the geomechanical processes during the construction of subway. *Metro i tonneli*. 2016, no. 3, pp. 10–11. [In Russ].

5. Hyunku Park, Ju-Young Oh, Dohyung Kim, Seokbue Chang Monitoring and analysis of ground settlement induced by tunneling with slurr pressure-balanced tunnel boring machine. *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, pp. 10. DOI: 10.1155/2018/5879402.

6. Dongyang Geng, Karel Vojtasik. Measured analysis of ground settlement deformation of underground tunnel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 310, no. 2, article 022063. DOI: 10.1088/1755-1315/310/2/022063.

7. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O., Egorov G. D. Construction of escalator tunnels in Saint-Petersburg. *Metro i tonneli*. 2015, no. 1, pp. 14–17. [In Russ].

8. El-Nahhas F. M., El-Mossallamy Y. M., El-Shamy A. A. 3D analysis of ground settlement induced by mechanized tunneling. *The Fourteenth International Conference on Structural and Geotechnical Engineering ICSGE 14*, Ain Shams University. 2015. Session 11, Paper No. 3

9. Podakov V. F. *Posobie po proektirovaniyu meroproyatiy dlya zashchity ekspluatituyemykh zdaniy i sooruzheniy ot vliyaniya gornoprokhodcheskikh rabot pri stroitel'stve metropolitena* [Scientific guide to design protection of buildings and structures from subway tunneling]. Leningrad, Stroyizdat, 1973, 58 p.

10. Koukoutas S. P., Sofianos A. I. Settlements due to single and twin tube urban EPB shield tunneling. *Geotechnical and geological engineering*. 2015, vol. 33, pp. 487–510.

11. Binh Thanh Le, Minoru Kuriki, Quoc Phan An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunneling in Ho Chi Minh city. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. 2020, pp. 305–306. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3\_38.

12. Gulielmetti V., Grasso P., Mahtaba A. *Mechanized tunneling in urban areas*. Turin, Italy, «Geodata S.p.A.», 2013.

13. Masein S. V., Prudnikov A. D., Lekht V. V. Planning solutions for surface settlement minimize using earth pressure balance shield. *Metro i tonneli*. 2016, no. 3, pp. 6–9. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костенко Богдан Валерьевич<sup>1</sup> — инженер;  
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет,  
e-mail: polo\_olop@mail.ru,

Ларионов Роман Игоревич<sup>1</sup> — зав. лабораторией,  
инженер, e-mail: roman.larionov.spmi@gmail.com,

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский,  
проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс».

**Для контактов:** Костенко Б.В., e-mail: polo\_olop@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.V. Kostenko<sup>1</sup>, Engineer, e-mail: polo\_olop@mail.ru;  
Graduate Student, Saint-Petersburg Mining University,  
199106, Saint-Petersburg, Russia,

R.I. Larionov<sup>1</sup>, Head of Laboratory, Engineer,  
e-mail: roman.larionov.spmi@gmail.com,

<sup>1</sup> «Scientific, Research, Design and Surveying  
Institute «Lenmetrogiprotrans» OSC,

191002, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** B.V. Kostenko, e-mail: polo\_olop@mail.ru.

Получена редакцией 22.12.2020; получена после рецензии 16.01.2021; принята к печати 10.08.2021.

Received by the editors 22.12.2020; received after the review 16.01.2021; accepted for printing 10.08.2021.

