ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(4):100-115
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.121.542 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_100

АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭСКАЛАТОРНОГО ТОННЕЛЯ НА СТАНЦИИ МЕТРО «СПАССКАЯ» В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ПРИ ПОМОЩИ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Б.В. Костенко

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: polo_olop@mail.ru

Аннотация: В 2012 г. в г. Санкт-Петербурге была осуществлена проходка эскалаторного тоннеля метрополитена с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК) на станции «Спасская» (апрель-июнь 2012 г.). Это была четвертая в мире проходка по сооружению эскалаторного тоннеля с помощью ТПМК с грунтовым пригрузом забоя. Рассмотрены результаты проходки эскалаторного тоннеля. 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. Проанализированы отдельные этапы проходки, оказывающие наибольшее влияние на величину оседаний: давление грунтопригруза и качество нагнетания тампонажного раствора в заобделочное пространство. Оценена длительность наблюдения за оседанием массива. По результатам натурных данных были подсчитаны значения параметров мульд оседания: расстояние до точки перегиба мульды оседания — i, максимальное оседание в поперечной мульде — $S_{v,max}$, коэффициент учета геологических условий — k, ширина мульды оседания — L, объем мульды оседания — V_s, потерянный объем — V_L. Эти параметры были сопоставлены с их теоретическими значениями.

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

Для цитирования: *Костенко Б. В.* Анализ натурных данных при строительстве эскалаторного тоннеля на станции метро «Спасская» в г. Санкт-Петербурге при помощи тоннелепроходческого механизированного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 100–115. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_100.

Field data analysis in construction of escalator tunnel at Spasskaya Station of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine

B.V. Kostenko

Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotrans», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: polo_olop@mail.ru

© Б.В. Костенко. 2022.

Abstract: In April–June 2012 in the Saint-Petersburg Metro, an escalator tunnel was constructed at Spasskaya Station using a tunnel boring machine (TBM). That was the world's fourth event of the escalator tunnel heading by TBM under additional load applied on the face from the overlying strata. The article discusses the escalator tunnel heading results. The field data were obtained in geotechnical monitoring accomplished by NIPII Lenmetrogiprotrans LLC. It was interesting how the new heading technologies influenced ground surface subsidence. The ground surface subsidence versus time and the subsidence trough by the end of the geotechnical monitoring were plotted. The individual heading factors of the highest effect on ground subsidence were analyzed: overlying strata pressure and quality of mortar grouting injection in the void behind the lining. The subsidence observation duration was taken into account. Based on the field data, the parameters of subsidence troughs were calculated, namely: distance to the subsidence trough bend—i; maximum subsidence in the lateral trough—$S_{v,max}$; coefficient of the site geology—k; subsidence trough width—L; subsidence trough volume—V_s; volume loss—V_L. The calculated parameters were compared with the theoretical values.

Key words: escalator tunnel, subsidence trough, grouting, overlying rock load, field data, geotechnical monitoring.

For citation: Kostenko B. V. Field data analysis in construction of escalator tunnel at Spasskaya Station of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2022;(4):100-115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_100.

Введение

В 2008 г. в Москве впервые в мире был пройден эскалаторный тоннель при помощи ТПМК [1]. В 2009—2011 гг. были пройдены эскалаторные тоннели станций метро «Обводный канал» и «Адмиралтейская» с применением ТПМК фирмы Herrenknecht [2]. В 2012 г. в Санкт-Петербурге был пройден эскалаторный тоннель на станции метро «Спасская» при помощи того же ТПМК фирмы Herrenknecht. Научно-техническое сопровождение строительства, в рамках которого исследовались деформации массива, оседания земной поверхности, напряжения в кольцах обделки, гидростатические давления в массиве, качество заполнения заобделочного пространства [3] и [4], производилось ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс». Технология геотехнического мониторинга, проводимая за рубежом, представлена для условий проходки для г. Сеул в [5], для г. Шицзячжуан (Китай) — в [6].

В соответствии с [7] соблюдение технологии проходки при строительстве эскалаторных тоннелей обеспечивает одни из лучших показателей оседания земной поверхности. В данной статье анализируются особенности проходки эскалаторного тоннеля с помощью ТПМК, оказывающие наибольшее влияние на оседания земной поверхности [8]: давление грунтопригруза на лоб забоя, кольцевые зазоры по длине щита ТПМК и между обделкой и щитом ТПМК, тампонаж заобделочного пространства.

В настоящее время отсутствует аналитическая методика расчета оседания земной поверхности при проходке наклонного хода при помощи ТПМК. Для одиночных горизонтальных тоннелей общеприняты методики, основанные на исследованиях Peck (см. [9]), на исследованиях Verruijt и Booker (см. [10]). Среди отечественных ученых, занимавшихся исследованиями в данной области, можно выделить С.Г. Авершина

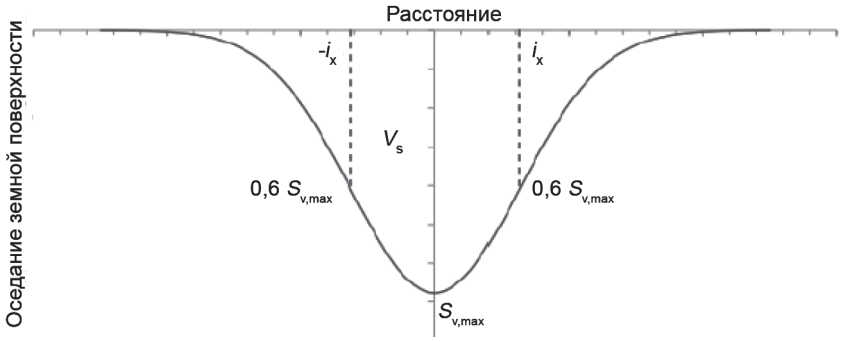

Рис. 1. Схема поперечной мульды оседания с геометрическими параметрами
Fig. 1. Layout and geometrics of lateral subsidence trough

[11], М.А. Иофиса, Ю.А. Лиманова [12], В.П. Хуцкого [13]. В данной статье предлагается рассматривать эскалаторный тоннель как набор обделок единичной длины с постоянно изменяющейся глубиной заложения. Это предположение позволяет построить мульды оседания земной поверхности в сечениях тоннеля с некоторым шагом и в плане, построив соответствующие горизонтали на основе расчета. В статье предложены способы вычисления основных параметров для теоретического расчета мульды оседания при проходке эскалаторного тоннеля (см. рис. 1): точка перегиба мульды оседания — i; максимальное оседание в поперечной мульде — $S_{v;max}$; полная ширина мульды оседания — L; объем мульды оседания — V_s; потерянный объем — V_L; коэффициент учета геологичексих условий — k. При расчете параметров предлагаемым способом теоретическая мульда оседаний соответствует фактической, измеренной в рамках геотехнического мониторинга.

Анализ натурных данных

Проходка осуществлялась в период с 9 апреля 2012 г. (монтаж первого постоянного сборного ж/б кольца обделки) по 2 июня 2012 г. (монтаж последнего 88 кольца обделки). Средняя ско-

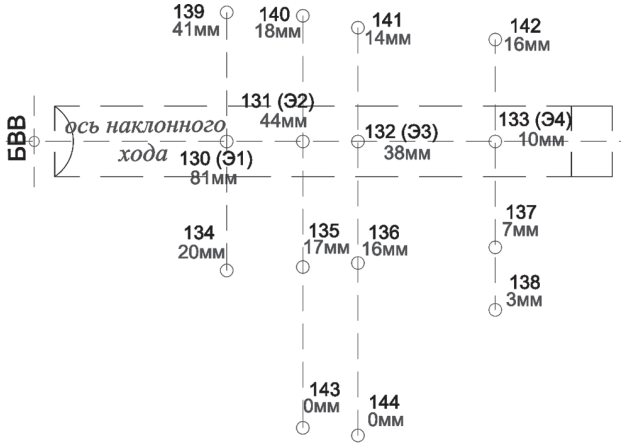

Рис. 2. Схема деформационной сети при проходке эскалаторного тоннеля станции «Спасская». Серым указаны оседания реперов к окончанию мониторинга
Fig. 2. Deformation net in escalator tunnel heading at Spasskaya Station. Gray color marks subsidence of check points by the end of geotechnical monitoring

рость проходки составила 1,6 кольца/сут. Инженерно-геологические условия на участке строительства сложные: под техногенными отложениями и озерно-морскими песками расположены слабые текучие и мягко-пластичные суглинки до глубины в 19–20 м. Ниже расположены суглинки лужской морены тугопластичной и полутвердой (в самом низу слоя) консистенции, ниже — твердые глины. Общая мощность четвертичных отложений составляет ≈31,8 м.

На рис. 2 представлена схема деформационной сети. Для наблюдения за оседаниями земной поверхности были установлены 11 реперов. Оголовки скважин Э1...Э4 использовались для фиксации смещений земной поверхности в дополнение к реперам.

Параметр *i* (точка перегиба мульды оседания)

Для определения параметра *i* воспользуемся результатами мониторинга. По результатам съемки оседания земной поверхности определить параметр *i* не удастся: шаг реперов составляет 15–19 м, что не позволяет установить значение искомого параметра с приемлемой точностью. Несмотря на то, что по рис. 3 (см. Приложение, с. 114) под реперами 135, 140, 136, 141 виден перегиб кривой, данные точки нельзя считать точками перегиба мульды оседания: это лишь реперы, попавшие в зону у точки перегиба.

Для сечения № 2 оседание земной поверхности в точке на расстоянии 18,5 м от оси тоннеля составило 18 мм. При этом максимальное оседание по оси тоннеля в сечении № 2 составило 44 мм. Если принять, что мульду оседания можно описать нормальным законом распределения, то в соответствии с [14] и [15] и [5] оседание в любой точке мульды составляет:

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}, \qquad (1)$$

где $S_{v,\max}$ — величина оседания над осью тоннеля; x — координата; i — координата до точки перегиба мульды оседания. По значениям $S_{v,\max}$ и S_v, полученным по результатам геотехнического мониторинга, можно получить координату точки перегиба мульды оседания i.

При известных значениях $S_{v,\max}$, S_v с координатой x обратным пересчетом можно получить значение параметра i. Данные значения приведены в табл. 1.

Для проверки полученных значений параметра i вычислим теоретический объем мульды оседания по формуле (2) и сравним его с измеренным по рис. 3 фактическим объемом мульды оседания по сечениям 1, 2, 3 и 4.

$$V_s = \sqrt{2\pi} i S_{v,\max}. \qquad (2)$$

Рассчитанные по формуле (2) значения V_s при параметрах i из табл. 1 и значения V, рассчитанные графически по рис. 2, приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты близки: расхождение до 20%. Таким образом, описание мульды оседания законом нормального распределения правомерно, значения параметра i в табл. 1 точно описывают положение точки перегиба в мульде оседания.

В табл. 1 приведены значения параметра i по натурным данным. Необходимо уточнить способ получения тео-

Таблица 1

Значения параметра i для сечений № 1...№ 4
Parameter i per Sections Nos. 1...4

Параметр *i* (точка перегиба мульды), м			
сечение № 1	**сечение № 2**	**сечение № 3**	**сечение № 4**
11,4/16,3*	13,9	13,7	17,7

Таблица 2

Значения объемов мульд оседаний, полученных теоретически и практически
Volumes of subsidence troughs from theoretical estimate and actual data

Метод получения объема	Объем мульды оседания на 1 п.м. тоннеля, м³			
	сечение № 1	сечение № 2	сечение № 3	сечение № 4
По формуле (2), параметр *i* принят по табл. 1	2,32/3,31*	1,53	1,31	0,44
По мониторингу (графически, по рис. 2)	3,5*	1,55	1,3	0,35

ретического значения этого параметра. Согласно [16], значение *i* можно вычислить по табл. 3. Эмпирические зависимости в данной таблице предложены разными авторами при наблюдениях за тоннелями в различных грунтовых условиях. В табл. 3 приведены результаты расчета параметра *i* по различным эмпирическим зависимостям для четырех сечений рассматриваемого в статье эскалаторного тоннеля.

В табл. 3 выделены наиболее близкие к натурным данным результы (см. табл. 1). Различия составляют: для сечения № 2 — 5...11%, для сечения № 3 — 4...10%, для сечения № 4 — 6...11%. Результаты для сечений № 2, № 3 и № 4 по эмпирическим зависимостям (выделены в табл. 3) можно считать приемлемыми.

Для сечения № 1 сравнение затруднительно, так как по результатам мони-

Таблица 3

Эмпирические методики расчета параметра i
Empirical calculation procedures for i

Автор	Область применения	Выражение	Значения параметра *i* в сечении			
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
N.H. Glossop	связные грунты	$i_x = 0{,}5\,z$	10,50	13,50	15,80	21,50
R.B. Peck	—	$i_x = D/2\cdot(z/D)^n$, $n = 0{,}8...1$	9,23	11,28	12,79	16,37
J.H. Atkinson, D.M. Potts	рыхлые пески	$i_x = 0{,}25\,(z + D/2)$	6,63	8,13	9,28	12,13
J.H. Atkinson, D.M. Potts	плотные пески и переуплотненные глины	$i_x = 0{,}25\,(1{,}5\,z + D/4)$	8,56	10,81	12,54	16,81
M.P. O'Reilly, B.M. New	связные грунты (щитовая проходка)	$i_x = 0{,}43\,z + 1{,}1$	10,13	12,71	14,69	19,59
M.P. O'Reilly, B.M. New	сыпучие грунты (щитовая проходка)	$i_x = 0{,}28\,z - 0{,}1$	5,78	7,46	8,75	11,94
R.J. Mair	—	$i_x = 0{,}5\,z$	10,50	13,50	15,80	21,50
P.B. Attewel	—	$i_x = 0{,}5\,z$	10,50	13,50	15,80	21,50
W. Clough, B. Schmidt	глинистые грунты (щитовая проходка)	$i_x = D/2\cdot(z/D)^{0,8}$	9,23	11,28	12,79	16,37
M. Herzog	все типы грунтов	$i_x = 0{,}4\,z + 1{,}92$	10,32	12,72	14,56	19,12
E. Arioglu	глинистые грунты (щитовая проходка)	$i_x = 0{,}4\,z + 1{,}6$	10,00	12,40	14,24	18,80
E. Arioglu	все типы грунтов	$i_x = 0{,}386\,z + 2{,}84$	10,95	13,26	15,04	19,44

Таблица 4

Значения эмпирического коэффициента k
Empirical values of coefficient k

Значения коэффициента k_i для слоев грунта по [14] и [17]	
Бессвязные грунты	**Нормально уплотненные глины**
0,3	0,5

торинга поперечная мульда оказалась несимметричной.

Другой способ теоретического определения параметра i представлен в [17, стр. 149], [14]. Расчет сводится к формуле (3).

$$i = k \cdot z, \qquad (3)$$

где k — эмпирический коэффициент; z — глубина заложения оси тоннеля.

Коэффициент k, зависящий от грунтовых условий, принимался в соответствии с вышеупомянутыми источниками с учетом слоистости массива грунта над шелыгой свода как среднее значение с учетом мощности каждого из слоев и значений k_i для каждого из слоев по табл. 4. На рис. 4 представлены схемы грунтовых условий для каждого из сечений рассматриваемого эскалаторного тоннеля.

Результаты расчета i по формуле (3) представлены в табл. 5.

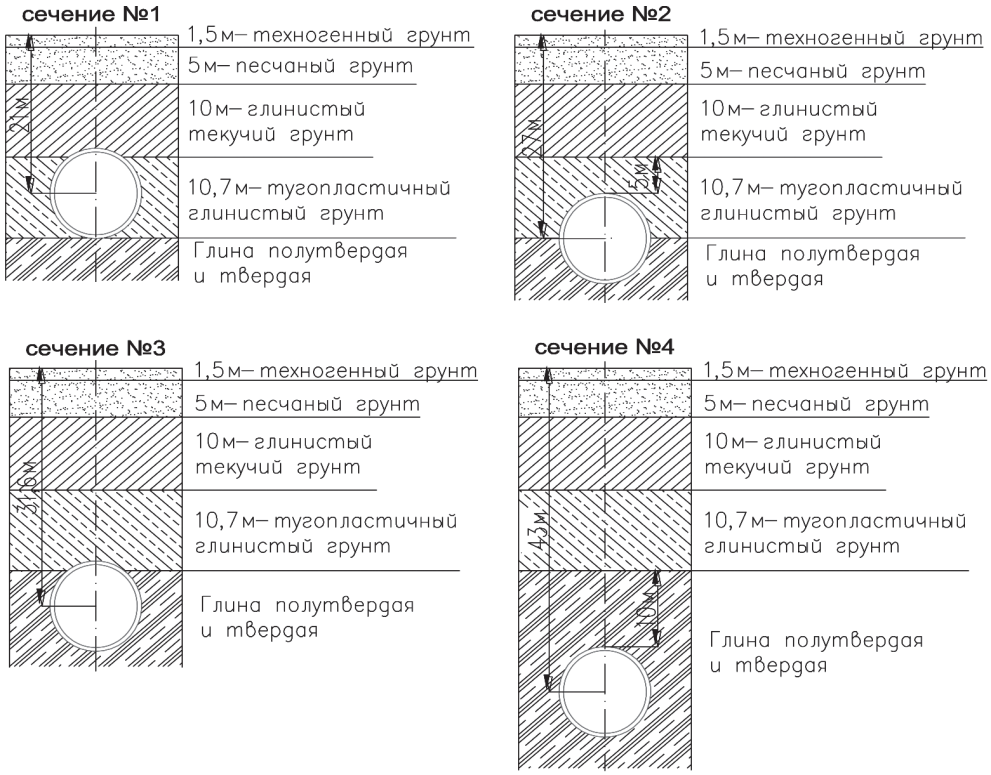

Рис. 4. Схема грунтовых условий по сечениям № 1 (реперы 134 — 139), № 2 (реперы 143 — 140), № 3 (реперы 144 — 141), № 4 (реперы 138 — 142) для расчета коэффициента k (см. формулу (3))

Fig. 4. Ground conditions by Sections No. 1 (check points 134–139), No. 2 (check points 143–140), No. 3 (check points 144–141) and No. 4 (check points 138–142) for calculation of coefficient k (formula (3))

Таблица 5

Значения параметра i, рассчитанного по формуле (3)
Values of i calculated from formula (3)

Параметр *i*, вычисленный с коэффициентами по табл. 4, м			
сечение № 1	**сечение № 2**	**сечение № 3**	**сечение № 4**
8,8	11,9	14,2	20

Полученные по формуле (3) теоретические значения параметра *i* близки к значениям этого параметра, установленного из результатов мониторинга. Отличия составляют: для сечения № 1 — 23%, для сечения № 2 — 14%, для сечения № 3 — 3,6%, для сечения № 4 — 13%. В целом, точность определения параметра *i* по формуле (3) приемлема для расчетов. Однако расчет методом Herzog по табл. 3 дают более точные результаты.

Ширина мульды оседания *L*

Край мульды оседания — точка, в которой оседания земной поверхности нулевые. С учетом погрешности маркшейдерской съемки, случайных воздействий установить эту точку в полевых условиях невозможно. Так, по реперам 143 и 144 (см. рис. 3) видны смещения в 1–4 мм происходящие вниз, а затем вверх до значения в +4 мм еще до подхода ТПМК к рассматриваемым сечениям. Оседания по реперу 142 резко увеличились 09.04, когда ТПМК располагался в 65 м от репера. За смещение принято оседание после 09.04 (оседания под этим репером высчитано как оседание после 09.04 и отмечено *). Такие скачки были исключены из рассмотрения, оседания по данным реперам были приняты нулевыми в огибающей мульде оседаний.

Ширина мульды оседания теоретически (по [16], [18], [17, стр. 142], [13]) оценивается по формуле:

$$L = 2{,}5\ i. \qquad (4)$$

В табл. 6 представлены значения ширины полумульды по каждому из сечений на основе результатов мониторинга и расчета по формуле (4).

По табл. 6 по сечениям № 2 и № 3 можно сделать вывод о том, что формула (4) дает несколько заниженные значения ширины полумульды оседания. Обратным пересчетом можно получить формулу для расчета ширины полумульды оседания:

$$L = 3{,}0\ i. \qquad (5)$$

Объем мульды оседания V_s и потерянный объем V_L

В международной практике расчета мульды оседания ([17, стр. 149], [16] и [18]) принимается, что объем мульды оседания земной поверхности V_s примерно равен потерянному объему V_L с некоторым эмпирическим коэффициентом k_1, зависящим от грунтовых условий:

$$V_s = k_1\ V_L, \qquad (6)$$

где коэффициент k_1 = 0,7 — для дренируемых грунтов, k_1 = 1 — для недренируемых грунтов.

Таблица 6

Значения ширины полумульд
Widths of half-troughs

Метод получения	сечение № 1, м	сечение № 2, м	сечение № 3, м	сечение № 4, м
По результатам мониторинга	не менее 19	42,2	43,2	не менее 31,7
Теоретические значения	28,6/40,8	34,8	34,3	44,3

Таблица 7

Рекомендуемые значения параметра GLR разных исследователей
Recommended values of GLR from different researches

Исследователи	Условия проходки	Значения коэффициента *GLR*
–	проходка с пригрузом забоя в песчаных грунтах	до 0,5%
	проходка с пригрузом забоя в глинистых грунтах	1...2%
Leblais & Bochon	проходка с пригрузом забоя в плотных мелкозернистых песках	при глубине заложения тоннеля 8,7–11,8 м — 0,8–1,3% при глубине заложения более 22–52 м — 0,2–0,9%
Ata	проходка с пригрузом забоя в песках средней плотности	0,2–1%

Потерянный объем в уровне проходки тоннеля принято рассчитывать через коэффициент *GLR*:

$$GLR = V_L / A, \qquad (7)$$

где A — объем одного погонного метра сечения тоннеля (по наружной грани постоянной обделки). Коэффициент *GLR* принимают по опытам проходки тоннеля в процентном отношении от сечения ТПМК по табл. 7.

Для эскалаторного тоннеля станции «Спасская» на основании мониторинга были вычислены объемы мульд оседания земной поверхности для четырех сечений. Данные приведены в табл. 2. На основании этих данных был получен коэффициент *GLR*:

сечение № 1: *GLR* = 3,9%;
сечение № 2: *GLR* = 1,7%;
сечение № 3: *GLR* = 1,4%;
сечение № 4: *GLR* = 0,4%.

Как видно, коэффициент *GLR* уменьшается с увеличением глубины заложения тоннеля. Это же обстоятельство было отмечено Leblais & Bochon при проходке тоннеля «Фонтенбло» [17]. Причина в том, что в среднем на большей глубине залегают более плотные и прочные грунты. Так, для эскалаторного тоннеля станции «Спасская» в сечении № 4 тоннель полностью располагался в полутвердых/твердых глинах (см. рис. 5), над шелыгой свода было 6 м прочного грунта. В сечении же № 3 над шелыгой свода было 10 м глинистого текучего грунта. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента *GLR* от глубины заложения тоннеля. Зависимость для про-

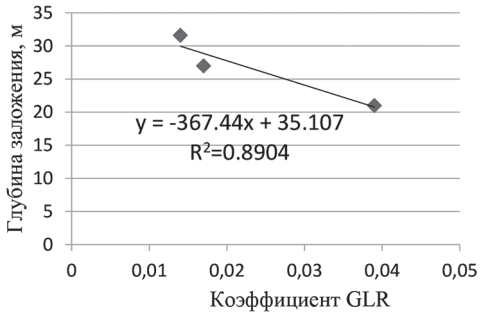

Рис. 5. График зависимости коэффициента GLR от глубины заложения тоннеля для наклонного хода в четвертичных отложениях (не учитывается GLR сечения № 4, расположенного в твердых глинах)
Fig. 5. Plot of GLR coefficient and tunnel depth in inclined heading in overburden (GLR in Section No. 4 in solid clay is neglected)

стоты можно описать линейной функцией в пределах проходки тоннеля в слабых четвертичных грунтах. По мере получения большего количества натурных данных корреляционная кривая будет уточняться, и может быть заменена на функцию более высокого порядка.

Таким образом, при расчете мульды оседания от проходки эскалаторного тоннеля можно воспользоваться зависимостью на рис. 5, определить значение потерянного объема V_L и объема мульды оседания V_S.

Максимальные оседания мульды над осью тоннеля $S_{v,max}$

Значение максимального оседания определяют из решения системы уравнений (8). Первое уравнение — расчет объема мульды оседания исходя из предпосылки, что мульда описывается законом нормального распределения. Второе уравнение — формула (7).

$$\begin{cases} V_s = \sqrt{2\pi} i S_{v,\max} \\ V_s = A \cdot GLR \end{cases}. \qquad (8)$$

Приравнивая правые части уравнений:

$$S_{v,\max} = A \cdot GLR \Big/ \sqrt{2\pi} i. \qquad (9)$$

То есть максимальное оседание не задается напрямую, а рассчитывается через объем мульды оседания, вычисляемый эмпирически. В настоящей статье предлагается задавать максимальное оседание $S_{v,max}$ напрямую, исходя из применяемой технологии проходки.

В технологии проходки с помощью ТПМК к оседанию земной поверхности приводит строительный зазор между грунтом и постоянной обделкой. Как известно, ротор ТПМК несколько больше в диаметре, чем диаметр щита. Кроме того, ТПМК имеет конусообразную форму по длине для облегчения проходки. Этот строительный зазор составляет 15–30 мм (разница диаметров — 30–60 мм) для ТПМК Herrenknecht и существует длительное время (до тампонажа заобделочного пространства). После схода щита с обделки зазор возрастает до 160 мм (разница радиусов ротора ТПМК и постоянной обделки), но тут же заполняется тампонажным раствором из хвостовой части ТПМК. Качество заполнения тампонажным раствором сильно влияет на оседание земной поверхности, так как незаполненный раствором объем — есть потерянный объем.

В рамках мониторинга для эскалаторного тоннеля станции «Спасская» были получены данные о количестве тампонажного раствора, инъецированного за обделку в кольцах под соответствующими сечениями:

кольцо № 29 (под сечением № 1): $V = 6{,}9$ м^3;

кольцо № 42 (под сечением № 2): $V = 6{,}55$ м^3;

кольцо № 51 (под сечением № 3): $V = 5{,}64$ м^3;

кольцо № 74 (под сечением № 4): $V = 5{,}7$ м^3.

Теоретический объем тампонажного раствора, требующегося для закрытия строительного зазора на 100%, составляет 5,3 м^3. Были проверены все кольца из отчета о мониторинге, но ни в одном из колец не обнаружен расход раствора менее, чем 5,3 м^3.

В рамках геотехнического мониторинга проводилось также исследование качества нагнетания тампонажного раствора, в котором две независимые организации (ЗАО Геодизонд и ФГБОУ ВПО ПГУПС) оценивали тампонаж ультразвуковым томографом и методом ЭМИ СШП зондирования. Вывод исследований: хорошее качество нагнетания, практически во всех кольцах мощность тампонажного раствора составляет 25 см с наличием зон пустот в отдельных блоках обделки, заполненных грунтом. Исследованы 24 кольца по длине тоннеля.

Отбор кернов тампонажного раствора показал, что раствор схватился.

Таким образом, строительный зазор заполнен качественно. Оседания же возникли от конусности ТПМК. Как указано выше, строительный зазор составляет 15–30 мм, как разница радиусов. С учетом возможных смещений колец обделки будет рассматриваться наибольший размер строительного зазора в 30–60 мм, как разница диаметров.

По рис. 3 видно, что величины $S_{v,max}$ составляют: 81 мм — для сечения № 1, 44 мм — для сечения № 2, 38 мм — для сечения № 3, 10 мм — для сечения № 4. В первом сечении технология проходки только оттачивалась, поэтому тампонаж сделан не совсем качественно. Кроме того, в кольцах, расположенных близко к поверхности земли, нагнетание с очень большим давлением опасно. Во втором и третьем сечениях тампонаж производился по проекту, значения $S_{v,max}$ попадают в интервал 30–60 мм. В четвертом сечении тоннель располагался уже в твердых глинах (см. рис. 4). Зазор был заполнен полностью. Смещения грунта из-за конусности ТПМК реализованы не были, так как здесь образовался мощный самонесущий свод.

Таким образом, значение $S_{v,max}$ сопоставимо со значением строительного зазора, образующегося между постоянной обделкой и грунтом. При соблюдении технологии проходки значение $S_{v,max}$ попадает в интервал 30–60 мм. При отступлении от технологии проходки значение $S_{v,max}$ больше. Для сечений тоннеля, расположенных в плотных грунтах, необходимо учитывать эффект сводообразования.

Отступления от технологии проходки учесть в расчете заранее нельзя, лишь рассмотреть возможность следующих подходов:

1. Вводится коэффициент качества проходки, учитывающий качество пройденных тоннелей данным ТПМК, данной бригадой в схожих условиях. Так, для условий Санкт-Петербурга эскалаторный тоннель станции метро «Спасская» был третьим эскалаторным тоннелем, пройденным в сложных инженерно-геологических условиях щитом Herrenknecht. Две первые проходки эскалаторных тоннелей привели к оседаниям земной поверхности в средней зоне тоннелей в 111–94 мм для станции метро «Обводный канал» и 44–49 мм для станции метро «Адмиралтейская». При расчете мульды оседаний для станции метро «Спасская» следовало учитывать полученный опыт проходки. Действительно, максимальные оседания в средней зоне тоннеля составили 44–38 мм.

2. Расчет корректируется в период проходки. По результатам мониторинга расчетчику предоставляется расход тампонажного раствора для каждого кольца. Расчетчик уточняет оседания земной поверхности.

Влияние проходки на оседание земной поверхности в продольном направлении

В [17, с. 151] показано, что для щитов с грунтопригрузом и бентонитовым пригрузом опережающее оседание земной поверхности (в продольном направлении) составляет 0,25–0,3 от $S_{v,max}$. Для эскалаторного тоннеля на станции «Спасская» по результатам мониторинга был построен график формирования оседаний во времени.

На рис. 6 (см. Приложение, с. 115) представлен продольный разрез по эскалаторному тоннелю с характером формирования оседаний во времени на момент окончания мониторинга. Крестиками указаны даты, в которые ротор ТПМК находился под соответствующим грунтовым репером — опережающее оседание земной поверхности. В зоне стартового котлована производилось закреп-

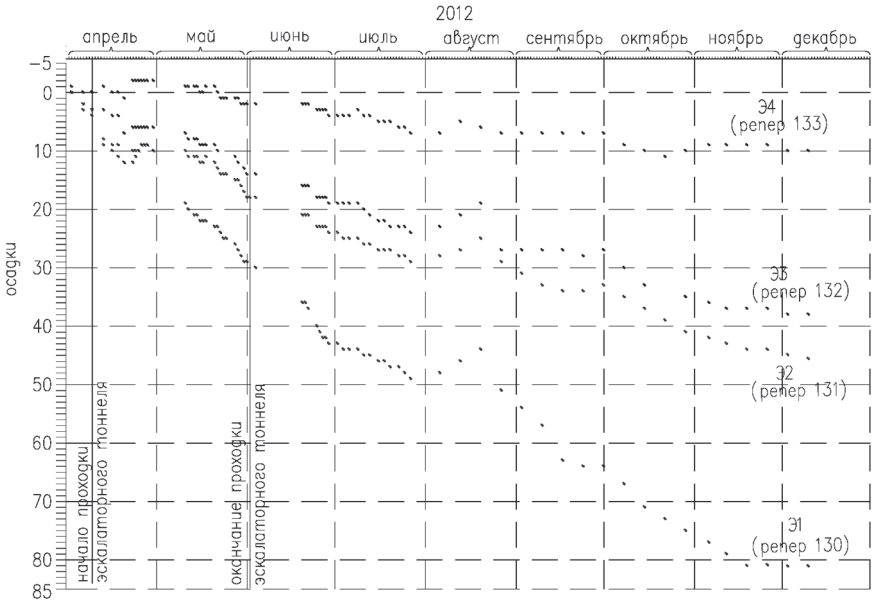

Рис. 8. Графики оседаний наземных реперов по оси тоннеля во времени
Fig. 8. Subsidence of surface check points along the tunnel axis in time

ление грунта. В этой зоне датчиков нет, но стоит ожидать, что оседания в этой зоне малы (по опыту станции «Адмиралтейская»).

В зону цементации полностью попало около двух десятков колец обделки. Оседания земной поверхности после выхода ТПМК из зоны цементации резко увеличились (до 81 мм).

Из продольного разреза на рис. 7 (см. Приложение, с. 115) следует, что оседание впереди лба забоя ТПМК (оседание при подходе ротора к точке под репером) намного меньше, чем оседание по окончании мониторинга. Кроме того, оседание земной поверхности впереди лба забоя имеет почти одинаковое значение (7–9 мм), кроме Э4. Процентное отношение величины оседания впереди лба забоя к полному оседанию составило:

устье скважины Э1: 11%;
устье скважины Э2: 20%;
устье скважины Э3: 18%;
устье скважины Э4: 13%.

На рис. 8 представлены графики развития оседаний земной поверхности по реперам 130–134, расположенных над осью тоннеля. По рис. 8 составлена табл. 8, в которой представлены оседания по вышеуказанным реперам к моменту окончания проходки и к моменту окончания мониторинга. По табл. 8 ве-

Таблица 8

Оседания реперов к концу проходки и к окончанию мониторинга
Subsidence of check points by the end of heading and by the end of geotechnical monitoring

	Оседания к окончанию проходки, мм	**Оседания к окончанию мониторинга (7 мес.), мм**
Э1	29	81
Э2	18	44
Э3	14	38
Э4	2	10

личина оседания земной поверхности к концу мониторинга больше оседания к концу проходки примерно в 2,6–5 раз. Кроме того, по графику на рис. 8 видно, что процесс оседания по Э1, Э2 и Э3 на момент окончания мониторинга еще не закончился. Следовательно, период мониторинга нужно увеличить.

Выводы

В статье были проанализированы итоги проходки эскалаторного тоннеля с помощью ТПМК по станции метрополитена г. Санкт-Петербурга «Спасская». Был собран большой объем данных, полученный в рамках геотехнического мониторинга «НИПИИ «Ленметрогипротранс». Сделаны следующие выводы:

1. Ширина мульды оседания не возрастает линейно с увеличением глубины вдоль всего тоннеля, а ведет себя нелинейно. То есть увеличивается до определенной глубины заложения тоннеля, а затем уменьшается к веерной части тоннеля. По рис. 2: в сечениях № 2 — 3 ширина мульды имеет схожие значения (без учета зон искусственного закрепления грунта), большие, чем на сечении № 4.

3. Влияние ТПМК в продольном направлении в виде оседаний земной поверхности впереди лба забоя мало. Оседания имеют в среднем одинаковое значение в абсолютных величинах.

4. К моменту окончания геотехнического мониторинга оседания земной поверхности больше оседаний, измеренных по окончании проходки:

- длительность проходки эскалатора ≈2 месяца;
- длительность мониторинга после окончания проходки ≈7 месяцев;
- отношение оседаний на момент окончания мониторинга к оседаниям на момент окончания проходки: 2,44 — 2,79.

5. Ключевой фактор, влияющий на величину оседаний — качество тампонажа заобделочного пространства.

6. Причина оседания земной поверхности при соблюдении технологии проходки — сочетание таких факторов, как слабые неустойчивые грунты и особенности конструкции ТПМК, предполагающей уменьшение 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 рассмотренного наклонного хода это время составило 4–5 дней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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. 1 — 10. DOI: 10.1155/2018/5879402.

6. *Geng D., Vojtasik K.* 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. *Лебедев М. О., Егоров Г. Д.* Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 146–159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.

8. *El-Nahhas F. M., El-Mossallamy Y. M., El-Shamy A. A.* 3D analysis of ground settlement induced by mechanized tunneling // International Conference on Structural and Geotechnical Engineering. Ain Shams University, 2015.

9. *Гуськов И. А.*, *Пестрякова Е. А.*, *Харитонов С. С.* Методы оценки осадок при проходке тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов // Транспортные сооружения. — 2019. — № 3. — С. 1—12.

10. *Haiqing Yang, Fang Liu, Shaoze Lin* Investigation on the 3D ground settlements induced by shallow tunneling considering the effects of buildings // Journal of Civil Engineering. 2020, vol. 24, pp. 365—376.

11. *Авершин С. Г.* Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок. — Л.: ВНИМИ, 1960. — 87 с.

12. *Лиманов Ю. А.* Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах. — Л.: ЛИИЖТ, 1957.

13. *Хуцкий В. П.* Сдвижение земной поверхности при строительстве пересадочных узлов метрополитена в условиях Санкт-Петербурга: дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: ПГУПС, 2003. — 132 с.

14. *Карасев М. А.* Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 163—171.

15. *Binh Thanh Le, Minoru Kuriki, Quoc Phan, Neil Taylor* An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunneling in Ho Chi Minh city / Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Lecture Notes in civil Engineering. 2020, pp. 305—312. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_38.

16. *Карасев М. А.* Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: дис. ... докт. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2017. — 307 с.

17. *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.

18. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. 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].

2. 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].

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. 1—10. DOI: 10.1155/2018/5879402.

6. Geng D., Vojtasik K. 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. Lebedev M. O., Egorov G. D. Geotechnical monitoring in construction of escalator tunnels *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 146–159. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.

8. El-Nahhas F. M., El-Mossallamy Y. M., El-Shamy A. A. 3D analysis of ground settlement induced by mechanized tunneling. *International Conference on Structural and Geotechnical Engineering*. Ain Shams University, 2015.

9. Guskov I. A., Petryakova E. A., Kharitonov S. S. Methods for estimating sediment during tunneling using a mechanizes tunneling. *Transportnye sooruzheniya*. 2019, no. 3, pp. 1—12. [In Russ].

10. Haiqing Yang, Fang Liu, Shaoze Lin Investigation on the 3D ground settlements induced by shallow tunneling considering the effects of buildings. *Journal of Civil Engineering*. 2020, vol. 24, pp. 365—376.

11. Avershin S. G. *Raschet deformatsiy massiva gornykh porod pod vliyaniem podzemnykh razrabotok* [Calculation of rock mass deformations under the influence of underground mining], Leningrad, VNIMI, 1960, 87 p.

12. Limanov Yu. A. *Osadki zemnoy poverkhnosti pri sooruzhenii tonneley v kembriyskikh glinakh* [Ground settlements during the construction of tunnels in Cambrian clays], Leningrad, LIIZHT, 1957.

13. Khutskiy V. P. *Sdvizhenie zemnoy poverkhnosti pri stroitel'stve peresadochnykh uzlov metropolitena v usloviyakh Sankt-Peterburga* [Ground settlements during the construction of metro transfer hubs in the conditions of St. Petersburg], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, PGUPS, 2003, 132 p.

14. Karasev M. A. Tunnel induced deformation of strata and formation of surface settlement trought during construction process. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 163—171. [In Russ].

15. Binh Thanh Le, Minoru Kuriki, Quoc Phan, Neil Taylor An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunneling in Ho Chi Minh city. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, Lecture Notes in civil Engineering. 2020, pp. 305—312. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_38.

16. Karasev M. A. *Prognoz geomekhanicheskikh protsessov v sloistykh porodnykh massivakh pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Forecast of geomechanical processes in layered massives during construction of underground structures of complex configuration in condition of dense urban development], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2017, 307 p.

17. Gulielmetti V., Grasso P., Mahtaba A. *Mekhanizirovannaya prokhodka tonneley v gorodskikh usloviyakh*. Metodologiya proektirovaniya i upravleniya stroitel'stvom [Mechanized tunneling in urban conditions. Methodology of design and construction management], Saint-Petersburg, 2013, 602 p.

18. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костенко Богдан Валерьевич — инженер, e-mail: polo_olop@mail.ru,
Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

B.V. Kostenko, Engineer, Scientific, Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotrans», 191002, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: polo_olop@mail.ru.

Получена редакцией 02.07.2021; получена после рецензии 26.01.2022; принята к печати 10.03.2022.
Received by the editors 02.07.2021; received after the review 26.01.2022; accepted for printing 10.03.2022.

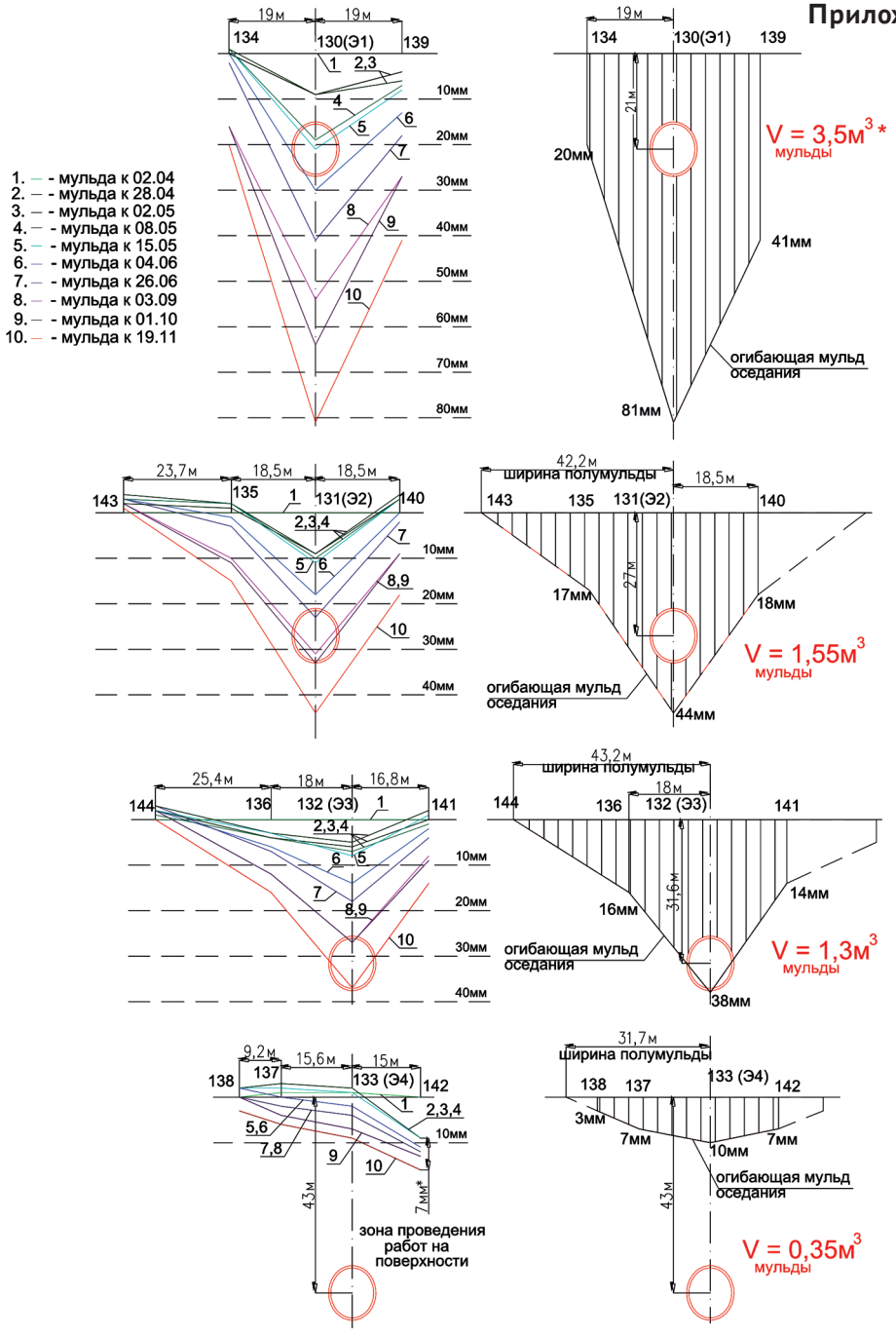

Рис. 3. Характер формирования мульды оседания во времени и окончательный вид мульды по сечениям № 1 (реперы 134—139), № 2 (реперы 143—140), № 3 (реперы 144—141), № 4 (реперы 138—142). Ротор расположен над сечениями в даты: сечение № 1 — 28.04, № 2 — 02.05, № 3 — 08.05, № 4 — 15.05

Fig. 3. Time behavior of subsidence trough and its final appearance in section No. 1 (check points 134–139). Rotor is situated above Section on: No. 1—28.04, No. 2—02.05, No. 3—08.05, No. 4—15.05

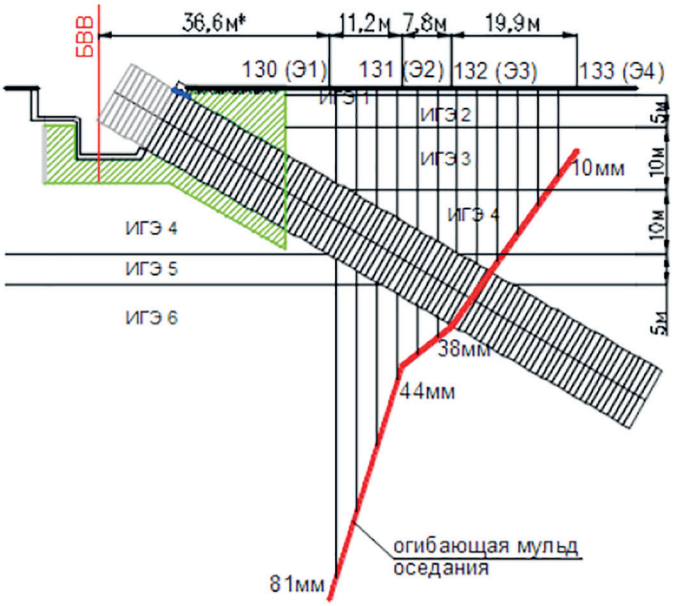

Рис. 6. Оседания в продольном направлении на момент окончания мониторинга: ИГЭ 1 — техногенные отложения; ИГЭ 2 — пески; ИГЭ 3 — суглинки и глины текучепластичные; ИГЭ 4 — суглинки полутвердые; ИГЭ 5 — суглинки тугопластичные; ИГЭ 6 — твердые глины

Fig. 6. Longitudinal subsidence by the end of geotechnical monitoring: EGE 1 — manmade ground; EGE 2 — sand; EGE 3 — loam and very soft clay; IGE 4 — medium hard loam; EGE 5 — tough loam; EGE 6 — hard clay (EGE — engineering geology element)

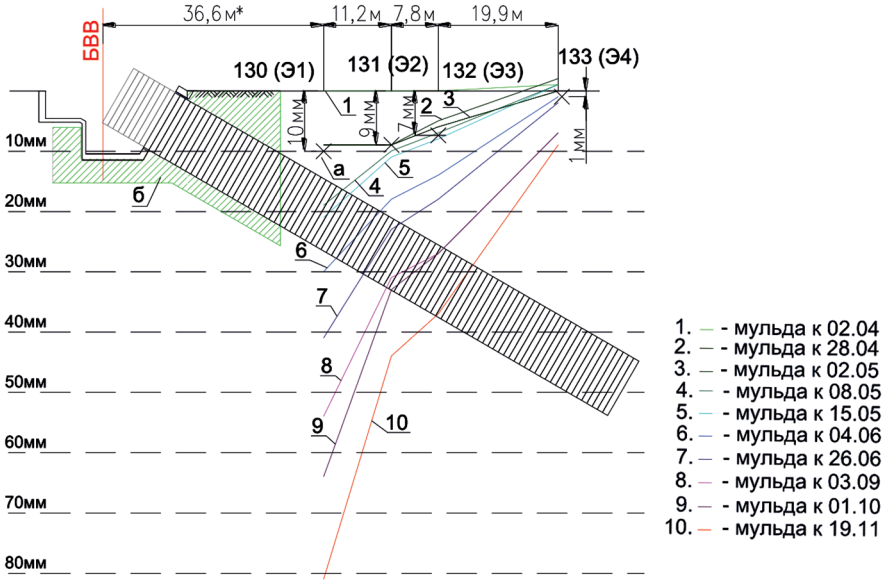

Рис. 7. Характер формирования оседания во времени в продольном направлении: даты, в которые ротор ТПМК располагался строго под репером (а); зона закрепления грунта (б)

Fig. 7. Time behavior of longitudinal subsidence: dates when TBM rotor is situated strictly under check point (a); soil reinforcement zone (b)