

2. Cherdantsev N. V., Presler V. T. Modelirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya anizotropnogo po prochnosti neodnorodnogo massiva gornyykh porod (Simulation of geomechanical state of inhomogeneous rock massif which is anisotropic in its strength). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2011. No. 3. pp. 15–22.
3. Fi Kh. T., Nguen N. M., Strokova L. A. Otsenka i prognoz osedaniya zemnoy poverkhnosti v rezultate izvlecheniya podzemnykh vod v gorode Khanoy (Vietnam) (Assessment and forecast of earth surface settlement due to groundwater extraction in Hanoi (Vietnam)). *Inzhenernaya Geologiya = Engineering Geology*. 2012. No. 2. pp. 52–59.
4. Olovyanny A. G., Chantsev V. P. *Programmnyy kompleks dlya matematicheskogo modelirovaniya treshchinovatykh razrushayushchikhsya massivov gornyykh porod (Destrock Plane)* (The software package for mathematical simulation of fractured destroying rock massifs (Destrock Plane)). Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. 2010. Available at: [http://hge.spbu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3303&Itemid=163](http://hge.spbu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=3303&Itemid=163) (accessed : March 17, 2016).
5. John C. Davis. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* (Statistics and data analysis in geology). Edited by D. A. Rodionov. Moscow : Nedra, 1990. Book 2. 427 p.
6. Porotov G. S. *Matematicheskie metody modelirovaniya v geologii* (Mathematical methods of simulation in geology). Saint Petersburg : Saint Petersburg State Mining Institute, 2006. 223 p.
7. Kazhdan A. B., Guskov O. I. *Matematicheskie metody v geologii* (Mathematical methods in geology: Textbook for High Schools). Moscow : Nedra, 1990. 251 p.
8. Knoring L. D., Dech V. N. *Geologu o matematike. Sovety po prakticheskomu primeniyu* (To tell geologist about mathematics. Practical application advises). Leningrad : Nedra, 1989. 208 p.
9. Grunsky E. C. Statistical analysis in the geosciences. *Geoinformatics*. Vol. II. Available at: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C01/E6-64-03.pdf> (accessed : March 17, 2016).
10. Jöreskog K. G., Klován J. E., Reymont R. A. *Geological Factor Analysis*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 178 p.
11. Kaiser Mark S. Statistical analysis of spatial count data. *Environmetrics*. Available at: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E4-26-02-03.pdf> (accessed : March 17, 2016).
12. Nollau V. Regression analysis. Probability and statistics. Vol. 3. Available at: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-02.pdf> (accessed : March 17, 2016).
13. Nollau V. Correlation analysis. Probability and statistics. Vol. 3. Available at: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-01.pdf> (accessed : March 17, 2016).
14. Mikhalevich I. M., Primina S. P. *Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informatsii (s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologiy: Statistika)*. Chast 3 (Use of mathematical methods for geological information analysis (using computer technologies: Statistical). Part 3). Irkutsk : Irkutsk State University, 2006. 115 p.
15. Borovikov V. P., Borovikov I. P. *STATISTICA – Statisticheskii analiz i obrabotka dannykh v srede Windows (STATISTICA – Statistical analysis and data processing in Windows)*. Moscow : Filin, 1998. 593 p.
16. Nikiforov I. A. *Statisticheskii analiz geologicheskikh dannykh* (Statistical analysis of geological data). Orenburg : Orenburg State University, 2010. 170 p.
17. Kozlov E. N. Ispolzovanie metoda glavnnykh component dlya izucheniya protsessov polimetasomatoza v kontaktakh karbonatitovykh kompleksov Kolskogo poluostrova (Using the principal components method to study the polymetasomatoses processes in the contacts of carbonatite complexes at Kola peninsula). *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Murmansk State Technical University*. 2015. Vol. 18, No. 2. pp. 245–254.
18. *Metod glavnnykh komponent* (Principal components method). Available at: <http://www.myshared.ru/slide/764278/#> (accessed : March 17, 2016). (in Russian)
19. Golynskaya F. A., Kiselev M. G. *Primenenie faktornogo analiza pri modelirovanii protsessov samovozgoraniya ugley* (Use of factorial analysis for simulation of coal self-ignition process). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009. No. 5. pp. 38–40.
20. Belonin M. D., Golubeva V. A., Skublov G. T. *Faktornyy analiz v geologii* (Factorial analysis in geology). Moscow : Nedra, 1982. 269 p.
21. Bakhtin A. I., Nizamutdinov N. M., Khasanova N. M., Nurieva E. M. *Faktornyy analiz v geologii* (Factorial analysis in geology). Kazan : Kazan State University, 2007. 32 p.

УДК 625.42:622.838

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ СТАНЦИОННЫХ ТОННЕЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ



**В. П. ХУЦКИЙ**,  
зав. сектором,  
канд. техн. наук,  
АО «ВНИИ Галургии»,  
Санкт-Петербург, Россия,  
[hucky@galurgy.sp.ru](mailto:hucky@galurgy.sp.ru)

### Введение

Как показывают имеющиеся данные натурных измерений оседания земной поверхности при сооружении станционных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге, процесс сдвижения поверхности растянут во времени и имеет неравномерный характер [1]. Установлено, что процесс развития оседания земной по-

В статье представлены результаты исследований, полученных на основании данных натурных наблюдений, влияния скорости проходки станционных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге на деформации земной поверхности. Результаты исследований показали, что деформации земной поверхности в основном зависят от горно-геологических условий заложения тоннелей и технологических факторов проходки. Скорость проходки станционных тоннелей не оказывает существенного влияния на деформации земной поверхности и, как следствие, на безопасность подработки зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния горнопроходческих работ.

**Ключевые слова:** станционные тоннели, скорость проходки тоннелей, станции метрополитена, скорость нарастания оседания, деформации земной поверхности.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.04>

верхности при сооружении станционных тоннелей метрополитена в городе во времени условно можно разделить на два этапа. Первый этап оседания земной поверхности начинается на некотором расстоянии перед передней частью забоя выработки. Его продолжительность зависит от инженерно-геологических условий, глубины заложения тоннелей и скорости подвигания забоя. На этом этапе наблюдаются самые высокие скорости нарастания оседания и реализуется до 80 % максимальной величины оседания земной поверхности. Здесь, как правило, происходят основные деформации объектов на поверхности. Этап завершается с окончанием влияния подвигания забоя тоннельной выработки на соответствующую точку земной поверхности и характеризуется относительной стабилизацией процесса оседания. Второй этап — затухание процесса оседания земной поверхности. Он характеризуется небольшими скоростями нарастания оседания, плавным их характером и зависит от реологических свойств грунтов. Поскольку самые высокие скорости нарастания оседания земной поверхности и деформации объектов на ней происходят во время прохождения под ними забоя выработки, несомненный интерес представляет исследование влияния скорости проходки тоннелей на величину деформаций земной поверхности.

Если обратиться к аналогичным случаям в горном деле, то, например, при добыче различных полезных ископаемых исследователи, основываясь на наблюдениях за сдвижением земной поверхности, отмечали как увеличение величин деформаций земной поверхности при увеличении скорости проходки, так и их уменьшение.

С. Г. Авершин в труде [2] указывает, что увеличение скорости подвигания забоя способствует выравниванию сдвижений поверхности, уменьшает неравномерность в их распределении (т. е. выполаживает кривую мульды оседания). А в том случае, когда забой на длительное время остановлен, деформации поверхности достигают наибольших значений.

С. А. Батугин в статье [3] отмечает, что для каждого конкретного горнотехнических условий должна существовать такая скорость подвигания очистного забоя, при которой сдвижения и деформации динамической мульды сдвижения становятся равными сдвижениям и деформациям окончательно сформировавшейся мульды сдвижения.

Г. Кратч в монографии [4] утверждает, что с увеличением скорости подвигания проходческих работ склоны мульды сдвижения становятся более пологими и, следовательно, наклоны, кривизна и горизонтальные деформации для промежуточных стадий развития процесса сдвижения оказываются меньшими, чем при малой скорости подвигания. Однако если разработка ведется на небольших глубинах, не превышающих 200 м, то на промежуточных стадиях развития процесса сдвижения форма мульды обычно не отличается от той, которая имеет место в конечной его стадии. В то же время ведение горных работ при больших скоростях подвигания забоя может оказывать повышенное негативное воздействие на подрабатываемые здания, поскольку при этом перемена знака деформаций (от растяжения к

сжатию и обратно) происходит через сравнительно небольшие промежутки времени. При этом в направлении, перпендикулярном направлению подвигания забоя, возникает еще большее постоянное сжатие. В частности, быстрая смена знака нагрузок может вызвать повреждения зданий и сооружений, если продолжительность периода смены знака деформаций недостаточна для консолидации грунта в основании сооружения и у стенок фундамента, а также для уплотнения грунта вследствие изменения его напряженного состояния.

М. Г. Мустафин в работе [5] на основании выполненного численного моделирования делает вывод, что при остановке лавы, отработавшейся с большой скоростью, в краевой части накапливается значительная энергия упругих деформаций, способная реализоваться при разрушении пород с динамическим эффектом. Именно такие случаи наблюдаются в последнее время на шахтах Кузбасса.

Большинство исследователей, изучавших процесс сдвижения массива горных пород при разработке месторождений, — Р. А. Муллер [6], М. А. Иофис [7], А. Ковальски [8] и др., считают, что скорость подвигания очистного забоя не оказывает существенного влияния на величины деформаций земной поверхности, а увеличивает или уменьшает продолжительность и интенсивность процесса сдвижения. К этим же выводам приходят на основании своих исследований, проведенных на шахтах Западного Донбасса, В. А. Назаренко и Н. В. Йощенко [9].

Анализом причин деформаций земной поверхности и моделированием сдвижения грунтового массива в процессе проходки тоннелей занимались многие исследователи: А. Г. Протосеня [10], М. А. Карасев [11], А. Г. Оловянный [12], Е. М. Волохов [13], R. J. Mair [14], P. Lunardi [15] и др.

В исследованиях, выполненных Н. Счасен [16] и Т. Thongpraha [17], отмечается, что наиболее значимым фактором, влияющим на оседание земной поверхности при проходке тоннелей, являются размеры тоннеля и глубина заложения. А, например, М. Н. Vaziar [18] считает, что проходка тоннеля может иметь разнонаправленный эффект на ускорение сдвижения земной поверхности.

Наконец, С. В. Мазеин и А. М. Павленко [19] на основании исследований, выполненных при проходке тоннелей, сооружаемых тоннелепроходческими механизированными комплексами, установили, что скорость проходки не является основным фактором, влияющим на оседание земной поверхности. Это находит подтверждение и в работе [20].

Необходимо отметить, что отработка угольных пластов ведется лавами с плавной посадкой кровли. В отличие от угольных предприятий, проходка транспортных тоннелей выполняется на небольшой глубине с креплением забоя и установкой крепи. Исследований влияния скорости проходки тоннелей глубокого заложения на деформации земной поверхности проводилось недостаточно. Тем не менее традиционно считается, что при увеличении скорости проходки происходит уменьшение деформаций земной поверхности, а небольшие скорости проходки и временные остановки забоя негативно влияют на объекты, расположенные в мульде сдвижения.

**Исследования влияния скорости проходки тоннелей на величину деформации земной поверхности**

В настоящей работе на основании данных натурных наблюдений выполнена оценка влияния скорости проходки станционных тоннелей в условиях Санкт-Петербурга на интенсивность оседания и величину деформаций земной поверхности. Таким образом, предпринята попытка определить, может ли скорость проходки тоннелей являться одним из основных факторов, определяющих параметры процесса сдвижения земной поверхности.

Массив горных пород, в котором осуществляется строительство станций и перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, представляет собой комплекс слабых неустойчивых грунтов (четвертичных отложений), подстилаемых протерозойскими глинами. Станции, как правило, располагаются в толще плотных, достаточно устойчивых нижнепротерозойских глин (тонкослоистые глины, твердые, модуль деформации 200–250 МПа). Толща протерозойских глин в своей верхней части представлена глинами с перемежатой слоистостью (переходный слой), что является следствием ледниковой деятельности. Мощность нарушенных глин колеблется от 2–3 до 10–15 м, а в некоторых местах достигает 25 м. По устойчивости и прочности грунты переходного слоя (модуль деформации, как правило, составляет порядка 100 МПа) занимают промежуточное положение между нижнепротерозойскими глинами и грунтами четвертичных отложений.

В Санкт-Петербурге в настоящее время сооружаются станции метрополитена трех типов: односводчатые, пилонные и колонные. Станционные тоннели сооружают обычными щитовыми проходческими комплексами и горным способом. Строительство односводчатых станций начинается с проходки опорных тоннелей диаметром 5,5 м. После бетонирования опор горным способом сооружается большепролетная конструкция станционного тоннеля

(радиус верхнего свода 11,2 м). Конструкция пилонной станции предполагает независимую проходку параллельных тоннелей кругового сечения, как правило, диаметром 8,5 м с последующим соединением их проходами. Колонная станция представляет собой единую пространственную конструкцию. Сначала сооружают боковые тоннели с оставлением целика между ними и опережением забоев на 25–50 м. Затем в боковых тоннелях возводят несущие конструкции, основным элементом которых являются колонны. После этого сооружают средний станционный тоннель. Диаметр среднего тоннеля обычно составляет 9,8 м, боковых тоннелей — 8,5 или 9,8 м. Проходку боковых тоннелей пилонных и колонных станций осуществляют на полное сечение или способом пилот-тоннеля с последующим раскрытием до проектного диаметра. Проходку среднего тоннеля ведут сплошным забоем с монтажом обделки тоннельным укладчиком. Кроме того, в 1960-е годы активно строили станции без боковых посадочных платформ, которые являются одной из разновидностей станций колонного типа. Поскольку в боковых тоннелях отсутствуют посадочные платформы, их наружный диаметр уменьшен до 5,5 м. Средний тоннель (наружный радиус верхнего свода, как правило, 5,7 м) имеет общие опоры с боковыми тоннелями в виде стенок из чугунных тубингов.

Как известно, над подвигающимся забоем наклоны земной поверхности практически равны скоростям оседания поверхности [2]. Поскольку наклон является одним из характерных показателей деформаций земной поверхности, автором было исследовано влияние скорости проходки станционных тоннелей на интенсивность оседания земной поверхности (т. е. на ее деформацию).

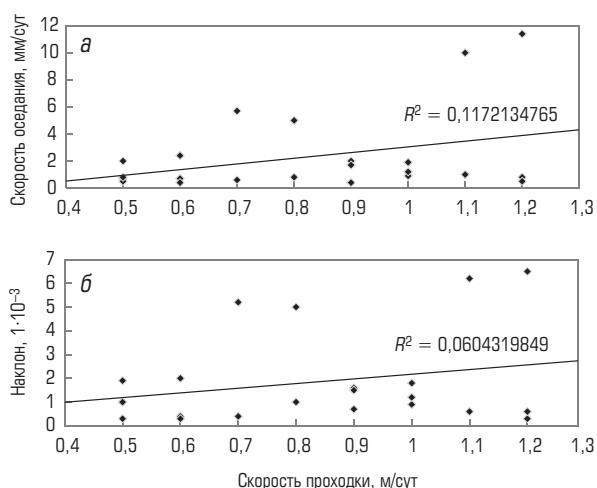
Для исследования влияния скорости проходки на интенсивность нарастания оседания были выбраны репера, по которым имеются наиболее достоверные данные измерений оседания земной поверхности во время проходки под ними станционных тоннелей разного диаметра. Мощность твердых тонкослоистых глин и глин с перемежатой слоистостью над тоннелями станций различных конструктивных особенностей, над которыми расположены эти репера, варьируется в широких пределах.

Результаты исследований показаны в виде графиков на **рис. 1 и 2**.

На рис. 1 приведены зависимости скорости оседания земной поверхности от скорости проходки, полученные по всем исследованным станционным комплексам. Они свидетельствуют о том, что при изменении скорости проходки от 0,5 до 1,2 м/сут скорость оседания изменяется от 0,4 до 11,4 мм/сут, а наклон — от  $0,3$  до  $6,5 \cdot 10^{-3}$ .

Построенные по этим данным линии тренда показывают небольшую тенденцию увеличения скорости оседания и наклона с увеличением скорости проходки при очень низкой достоверности аппроксимации. Из этого можно сделать вывод, что скорость оседания и наклон зависят в большей степени от других факторов.

Отмечено также, что скорость оседания более 5 мм/сут и наклон более  $5 \cdot 10^{-3}$  зафиксированы при проходке станционных тоннелей, над верхним сводом которых мощность слоя твердых



**Рис. 1. Зависимости скорости оседания (а) и наклона земной поверхности (б) от скорости проходки станционных тоннелей**

тонкослоистых протерозойских глин менее 1 м. При фактических скоростях проходки станционных тоннелей от 0,5 до 1 м/сут скорость оседания составляет от 0,4 до 2 мм/сут и при этом от скорости проходки практически не зависит.

На рис. 2 представлены графики зависимости деформации земной поверхности от мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом для тоннелей радиусом 4,25; 4,9; 5,7 и 11,2 м.

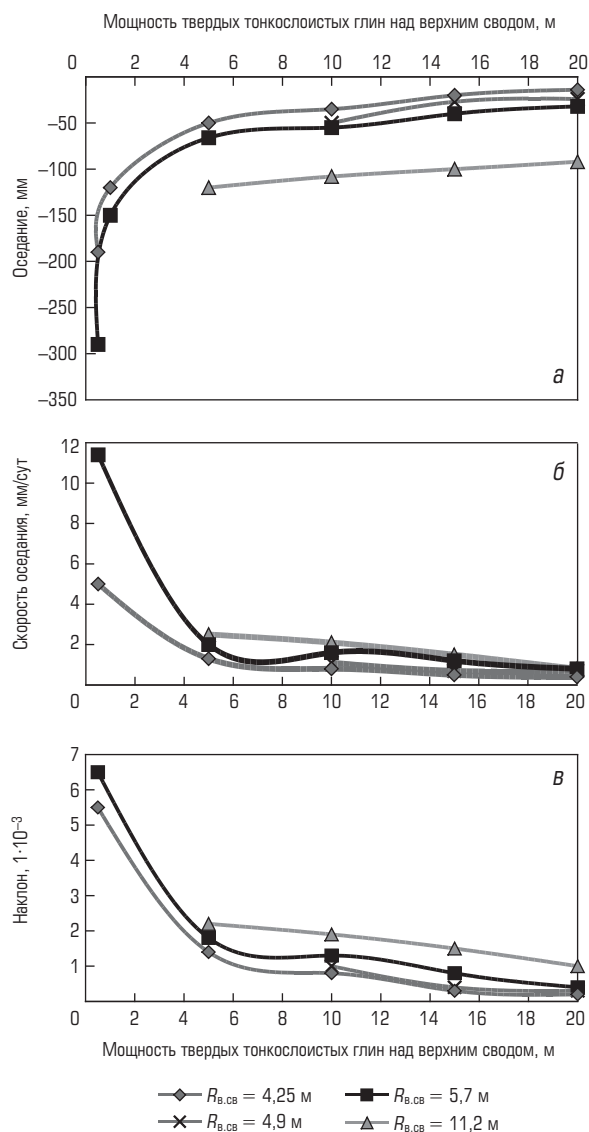
Они свидетельствуют, что все параметры сдвижения земной поверхности имеют тенденцию к увеличению при уменьшении мощности слоя твердых тонкослоистых глин над верхним сводом и при увеличении радиуса верхнего свода тоннеля. Более активный рост оседания, скорости оседания и наклона наблюдается при мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом тоннелей менее 5 м. Резкий рост параметров сдвижения земной поверхности имеет место при мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом тоннелей менее 1 м.

Проведенные ранее исследования показали, что до 80 % оседания земной поверхности реализуется во время проходки тоннеля, т. е. можно утверждать, что сформировавшаяся в процессе проходки тоннеля мульда оседания мало отличается от конечной мульды. Поэтому оседания и деформации во время остановок (в том числе длительных) при надлежащем креплении передней части и кровли забоя и своевременном качественном нагнетании раствора за уже установленную обделку практически не отличаются от их значений при движении забоя. Это подтвердила и практика длительных (на несколько лет) остановок забоя в 1990-е годы в связи с проблемами финансирования работ на станциях «Звенигородская» и «Спасская». После консервации забоев и при возобновлении проходческих работ никаких «всплесков» увеличения оседания и деформаций земной поверхности не произошло.

### Выводы

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. При скоростях проходки станционных тоннелей, которые обычно имеют место при сооружении станционных комплексов в Санкт-Петербурге, скорость оседания и деформации земной поверхности практически не зависит от скорости проходки.
2. Увеличение скорости проходки тоннелей снижает продолжительность активной стадии процесса сдвижения земной поверхности и нахождение объекта, расположенного на земной поверхности, в активной зоне сдвижения.
3. При проходке станционного тоннеля с радиусом верхнего свода до 5,7 м и мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом 15 м и более при любой зафиксированной скорости проходки (в том числе в случае длительных остановок забоя) деформации земной поверхности будут незначительными.




**Рис. 2. Зависимости оседания (а), скорости оседания (б) и наклона (в) земной поверхности от мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом и от радиуса тоннеля R**

4. Основными факторами, влияющими на деформации земной поверхности при проходке тоннелей в Санкт-Петербурге, являются: мощность протерозойских глин над верхним сводом, размеры тоннелей, глубина их заложения, конструктивные особенности станций метрополитена, технологические параметры проходческих работ (минимальный перебор грунта, минимальное время нахождения выработки без крепления, нагнетание раствора за первое установленное кольцо и его качество).



**Библиографический список**

1. Хуцкий В. П. Расчет оседаний земной поверхности во времени при сооружении станций метрополитена в Санкт-Петербурге // Современные и исторические аспекты развития маркшейдерии в России и за рубежом : сб. науч. тр. — СПб. : СПГГИ, 1999. С. 39–42.
2. Авершин С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. — М. : Углетехиздат, 1954. — 323 с.
3. Батугин С. А. Влияние скорости подвигания очистного забоя на сдвиги и деформации земной поверхности // Труды по вопросам горного давления, сдвига и деформации горных пород и методики маркшейдерских работ. — Л. : ВНИМИ, 1963. № 50. С. 83–90.
4. Кратч Г. Сдвиги горных пород и защита подрабатываемых сооружений. — М. : Недра, 1978. — 494 с.
5. Мустафин М. Г. Влияние скорости подвигания очистного забоя на динамику разрушения пород кровли угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 1. С. 17–22.
6. Муллер Р. А. Определение мульды сдвига и скорости деформаций земной поверхности при движущемся забое // Сдвиги горных пород. — Л. : ВНИМИ, 1975. С. 13–27.
7. Иофис М. А., Шмелев А. И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. — М. : Недра, 1985. — 248 с.
8. Kowalsky A. Surface deformations over quick moving front of mining operations // Proceedings IX Congress ISM. — Praha, 1994. P. 320–329.
9. Назаренко В. А., Йощенко Н. В. Закономерности развития максимальных оседаний и наклонов поверхности в мульде сдвига: монография. — Днепропетровск : НГУ, 2011. — 91 с.
10. Протосеня А. Г., Огородников Ю. Н., Демеников П. А., Карасев М. А., Лебедев М. О. и др. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг. — СПб : СПГГУ, 2011. — 355 с.
11. Карасев М. А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки горного института. 2011. № 190. С. 163–171.
12. Оловянный А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. — СПб : Коста, 2012. — 280 с.
13. Волохов Е. М., Потемкин Д. А. Математическое моделирование геомеханических процессов при оценке влияния строительства городских подземных сооружений на подрабатываемый массив // Записки Горного института. 2011. № 190. С. 284–288.
14. Mair R. J. Tunnelling and geotechnics: new horizons // Geotechnique. 2008. No. 9 (58). P. 695–736.
15. Lunardi P. Design and construction of tunnels. — Analysis of controlled deformation in rocks and soil (ADECO-RS). Translation by B. A. James Davis. Springer, Berlin, Germany. 2008. — 576 p.
16. Chacari H., Ozcelic V., Unver B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. Vol. 36. P. 14–23.
17. Thongrapha T., Fuenkajorn K., Daemen J. J. K. Study of surface subsidence above an underground opening using a trap door apparatus // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 46. P. 94–103.
18. Baziari M. H., Moghadam M. R., Kim D.-S., Choo Y. W. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration // Tunnelling and Underground Space Technology. 2014. Vol. 44. P. 10–22.
19. Мазенин С. В., Павленко А. М. Влияние текущих параметров щитовой проходки на осадку поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 5, семинар № 15. С. 133–138.
20. Dindarloo S. R., Siami-Irdemoosa E. Maximum surface settlement based classification of shallow tunnels in soft ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 49. P. 320–327. 

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 4, pp. 20–25  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.04>

**Investigations of the platform tunneling speed effect on the land surface deformations magnitude during metro system construction in Saint-Petersburg**

**Information about author**

V. P. Khutskiy<sup>1</sup>, Divisional Manager, Candidate of Engineering Science, hucky@galurgy.sp.ru

<sup>1</sup> VNII Galurgy Stock Co., St. Petersburg, Russia

**Abstract**

During the construction of the metro stations in dense urban areas is of great importance the preservation of buildings, facilities and various communications from the harmful influence of the deformation of surfaces. In order to reduce surface deformation in tunneling, it is necessary to know which factors have the greatest impact on the shift of soil mass and the earth's surface.

One of the factors that are influencing on the land surface deformations and located on it objects is the tunneling speed. Investigation of the effect of the tunneling speed of gains on the base of observations for land surface movement have noted both land surface deformation magnitudes increasing with tunneling speed increasing and its decreasing. During tunneling it is traditionally considered that with tunneling speed increasing it occurs land surface deformations decreasing.

In this paper, it is analyzed the results of long-term observations of the Earth's surface subsidence during the construction of eighteen metro stations in St. Petersburg. It is considered the influence of different geological factors on the deformation of the earth's surface in the sinking of the station tunnels: the diameter of the tunnels, power solid thin-layered clays above the upper tunnel arches.

In the article (work) there are presented the results of the investigations of the platform tunneling speed effect in the metro system in Saint-Petersburg on the land surface deformations carried out on the base of nature observation data.

The results of carried out investigations have showed that land surface deformations in the main depends on mining and geological conditions of tunnel laying and technological tunneling factors. The platform tunneling speed doesn't have strong effect on the land surface deformations and in the wake of on the buildings and facilities underworking safety, which are located in the mining workings effect zone.

**Keywords:** Platform tunnels, tunneling speed, metro stations, settlement growth speed, land surface deformations.

**References**

1. Khutskiy V. P. Raschet osedaniy zemnoy poverkhnosti vo vremeni pri sooruzhenii stantsiy metropolitena v Sankt-Peterburge (Calculation of earth surface subsidence in time during the construction of Saint Petersburg subway station). *Sovremennye i istoricheskie aspekty razvitiya marksheyderii v Rossii i za rubezhom : sbornik nauchnykh trudov* (Modern and historical aspects of mine surveying development in Russia and abroad : collection of scientific proceedings). Saint Petersburg : Saint-Petersburg State Mining Institute, 1999. pp. 39–42.
2. Avershin S. G. *Gornye raboty pod sooruzheniyami i vodoemami* (Mining under facilities and water reservoirs). Moscow : Ugletekhizdat, 1954. 323 p.
3. Batugin S. A. Vliyaniye skorosti podviganiya ochistnogo zaboya na sdvigheniya i deformatsii zemnoy poverkhnosti (Influence of breakage face advance rate on earth surface movements and deformations). *Trudy po voprosam gornogo davleniya, sdvigheniya gornykh porod i metodiki marksheyderskikh rabot* (Materials on the issues of rock pressure, rock movements and mine surveying methods). Leningrad : VNIIMI (All-union Scientific-research Mine-surveying Institute), 1963. No. 50. pp. 83–90.
4. Kratch G. *Sdvizhenie gornykh porod i zashchita podrabatyvaemykh sooruzheniy* (Rock movement and undermining facilities protection). Moscow : Nedra, 1978. 494 p.
5. Mustafin M. G. Vliyaniye skorosti podviganiya ochistnogo zaboya na dinamiku razrusheniya porod krovli ugolnogo plasta (Effect of breakage face advance rate on the fracture dynamics of coal seam roof rocks). *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008. No. 1. pp. 17–22.
6. Muller R. A. Opredeleniye muldy sdvigheniya i skorosti deformatsiy zemnoy poverkhnosti pri dvizhushchemsya zaboe (Determination of a shift trough and a rate of earth surface deformations with moving face). *Sdvizhenie gornykh porod* (Movement of rocks). Leningrad : VNIIMI (All-union Scientific-research Mine-surveying Institute), 1975. pp. 13–27.
7. Ioifis M. A., Shmelev A. I. *Inzhenernaya geomekhanika pri podzemnykh razrabotkakh* (Engineering geomechanics in underground mining). Moscow : Nedra, 1985. 248 p.
8. Kowalsky A. Surface deformations over quick moving front of mining operations. *Proceedings IX Congress ISM*. Praha, 1994. pp. 320–329.
9. Nazarenko V. A., Eshchenko N. V. *Zakonomernosti razvitiya maksimalnykh osedaniy i naklonov poverkhnosti v mulde sdvigheniya: Monografiya* (Development regularities of maximum subsidences and slopes of surface in a shift trough: Monograph). Dnepropetrovsk : National Mining University of Ukraine, 2011. 91 p.
10. Protoseny A. G., Ogorodnikov Yu. N., Demeniok P. A., Karasev M. A., Lebedev M. O. et al. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy. Prostranstvennyye modeli i monitoring*. (Mechanics of underground facilities. Spatial models and monitoring). Saint Petersburg : Saint-Petersburg State Mining Institute, 2011. 355 p.

11. Karasev M. A. Analiz prichin deformatsii zemnoy poverkhnosti i kharakter formirovaniya muldy osedaniya, vyzvannoy stroitelstvom transportnykh tonneley (Analysis of earth surface deformation reasons and a nature of subsidence trough formation caused by the construction of transport tunnels). *Zapiski gornogo instituta = Proceedings of the Mining Institute*. 2011. No. 190. pp. 163–171.
12. Olovyanyy A. G. *Mekhanika gornyykh porod. Modelirovanie razrusheniy* (Rock mechanics. Simulation of destruction). Saint Petersburg : Kosta, 2012. 280 p.
13. Volokhov E. M., Potemkin D. A. Matematicheskoe modelirovanie geomekhanicheskikh protsessov pri otsenke vliyaniya stroitelstva gorodskikh podzemnykh sooruzheniy na podrabatyvaemyy massiv (Mathematical simulation of geomechanical processes in evaluation of the impact of urban underground facilities construction on undermining massif). *Zapiski gornogo instituta = Proceedings of the Mining Institute*. 2011. No. 190. pp. 284–288.
14. Mair R. J. Tunnelling and geotechnics: new horizons. *Geotechnique*. 2008. No. 9(58). pp. 695–736.
15. Lunardi P. Design and construction of tunnels – Analysis of controlled deformation in rocks and soil (ADECO-RS). Translation by B. A. James Davis. Springer, Berlin, German, 2008. 576 p.
16. Chaceri H., Ozcelic V., Unver B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 36. pp. 14–23.
17. Thongprapha T., Fuenkajorn K., Daemen J. J. K. Study of surface subsidence above an underground opening using a trap door apparatus. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 46. pp. 94–103.
18. Baziar M. H., Moghadam M. R., Kim D.-S., Choo Y. W. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. Vol. 44. pp. 10–22.
19. Mazein S. V., Pavlenko A. M. Vliyaniye tekhnicheskikh parametrov shchitovoi prokhodki na osadku poverkhnosti (Effect of the current parameters of shield tunneling on the surface subsidence) *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007. No. 5, seminar No. 15. pp. 133–138.
20. Dindarloo S. R., Siami-Irdemoosa E. Maximum surface settlement based classification of shallow tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 49. pp. 320–327.

УДК 622.83

## БОКОВОЙ РАСПОР И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД



**А. Г. ОЛОВЯННЫЙ,**  
ведущий научный сотрудник,  
АО «ВНИИ Галургии»,  
канд. техн. наук,  
Санкт-Петербург, Россия,  
agolov2009@hgepro.ru

### Введение

Напряженное состояние нетронутого массива горных пород формируется под действием сил тяжести, движения литосферных плит, сил гидростатического взвешивания, других природных воздействий и служит исходной информацией для расчета подземных сооружений и элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых [1–4]. Основной и активно формирующей напряженное состояние в массивах горных пород является сила тяжести, определяющая вертикальную составляющую действующих напряжений. Считают, что в верхних слоях литосферы (земной коры) вблизи ее поверхности главные напряжения отличаются друг от друга в разных точках пласта пород из-за местных нарушений их равновесия под действием собственного веса. Однако ниже приповерхностной зоны состояние равновесия с увеличением глубины быстро становится приблизительно гидростатическим и характеризуется во всех точках, расположенных в горизонтальной плоскости, равными давлениями, действующими

Статья посвящена актуальной проблеме расчета и учета боковых напряжений в нетронутом массиве горных пород, возникающих под действием гравитационных и тектонических напряжений. Анализируя известные подходы к определению напряжений бокового распора, автор представляет новый способ оценки напряженного состояния массивов с учетом упругих и вязкоупругих деформаций горных пород.

Предложенные новые подходы к расчету начального поля напряжений в массиве горных пород имеют большое научное и практическое значение для принятия обоснованных инженерных решений в проектах освоения недр, в том числе на больших глубинах.

**Ключевые слова:** массивы горных пород, напряженное состояние, гравитационные и тектонические напряжения, боковой распор, упругие и вязкоупругие деформации, нарушение сплошности массива, начальные и граничные условия.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.05>

одинаково во всех направлениях [5], что отражает так называемую гипотезу А. Гейма о гидростатическом напряженном состоянии. Другой широко распространенный подход предполагает, что гравитационные напряжения в нетронутом массиве чаще всего соответствуют гипотезе А. Н. Динника, согласно которой по условиям упругого поведения боковой распор

$$\lambda_0 = \nu/(1 - \nu), \quad (1)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.