

**В.П.ХУЦКИЙ**, канд. техн. наук, главный научный сотрудник, *hucky@galurgy.sp.ru*  
Всероссийский научно-исследовательский институт Галургии, Санкт-Петербург

**V.P.KHUTSKY**, PhD in eng. sc., chief research assistant, *hucky@galurgy.sp.ru*  
Scientific Research Institute of Mineral-salt Production, Saint Petersburg

## БЕЗОПАСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Представлены результаты исследований и методика определения условий строительства станций метрополитена в Санкт-Петербурге, обеспечивающих безопасную подработку зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния горно-проходческих работ.

**Ключевые слова:** станционные тоннели, станции метрополитена, деформации земной поверхности, условия безопасной подработки.

## SAFE PARAMETERS FOR SHIFTING OF THE EARTH SURFACE AT CONSTRUCTING OF METROPOLITAN RAILWAY IN SAINT-PETERSBURG CITY

The results of investigations and the technique for determination of conditions of construction of underground stations in St. Petersburg, providing protection of buildings and installations in the area of operations with the earth surface, are presented.

**Key words:** station tunnels, underground stations, deformations of the earth surface, criteria of safe operation.

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых, как правило, сопровождается сдвижением земной поверхности. В густонаселенных районах в зону влияния горных работ попадает большое количество зданий, сооружений и инженерных коммуникаций и неизбежно возникают проблемы, связанные с их деформированием. Значительные затраты на ремонт поврежденных сооружений, обеспечение безопасности населения и бесперебойной работы предприятий и различного рода коммуникаций определяют поиск мероприятий по их защите от негативного влияния подработки. С целью предотвращения или уменьшения деформаций земной поверхности в ряде случаев предусматривается принятие различных горно-технических решений. Осно-

вой выбора защитных мероприятий может служить прогноз ожидаемых деформаций земной поверхности.

Проблемы охраны подрабатываемых территорий и обеспечения безопасных параметров сдвижения земной поверхности остро стоят и при строительстве метрополитена. Проходка тоннелей метрополитена приводит к изменению напряженно-деформированного состояния грунтового массива и его сдвижению, проявляющемуся в образовании зоны сдвижения в массиве и мульты сдвижения на земной поверхности.

Наибольшие деформации земной поверхности, которые зачастую приводили к деформациям конструкций зданий, наблюдались в Санкт-Петербурге при оттаивании льдогрунтового ограждения наклонных хо-

дов для выхода на поверхность и подземных вестибюлей станций («Невский проспект», «Новочеркасская», «Садовая»). Значительные деформации земной поверхности и зданий наблюдались также при проходке станционных тоннелей на границе протерозойских глин и четвертичных отложений (станция «Маяковская») и в перемятых глинах (станции «Московские ворота» и «Электросила»).

Условия строительства метрополитена в Санкт-Петербурге осложнены большим количеством рек и каналов, а также значительным слоем неустойчивых грунтов. Вследствие этого станции метрополитена и перегонные тоннели в Санкт-Петербурге сооружаются горным или щитовым, т.е. закрытым способом, на значительной глубине (кроме конечных станций линий, расположенных на земной поверхности). При таком способе строительства метрополитена при проходке тоннелей происходит плавное сдвигание грунтового массива, которое достигает земной поверхности и распространяется на большую площадь. Основания зданий и сооружений, попадающие в мульдуг сдвигания земной поверхности, в большинстве случаев также плавно оседают вслед за опусканием земной поверхности, что не нарушает эксплуатационную способность этих зданий. При этом полностью отсутствуют те негативные факторы, которые могут иметь место при строительстве зданий и подземных сооружений открытым способом рядом с существующей застройкой, а именно:

- нарушение устойчивости (несущей способности) грунта основания близрасположенного здания вследствие разработки котлована;
- вибрации конструкций существующего здания и грунта основания от различного вида строительных работ по сооружению здания;
- просадки основания от суффозного выноса частиц грунта из несущих слоев основания здания при водоотливе;
- увеличение давления на основания фундаментов существующих зданий от загрузки оснований рядом строящихся сооружений.

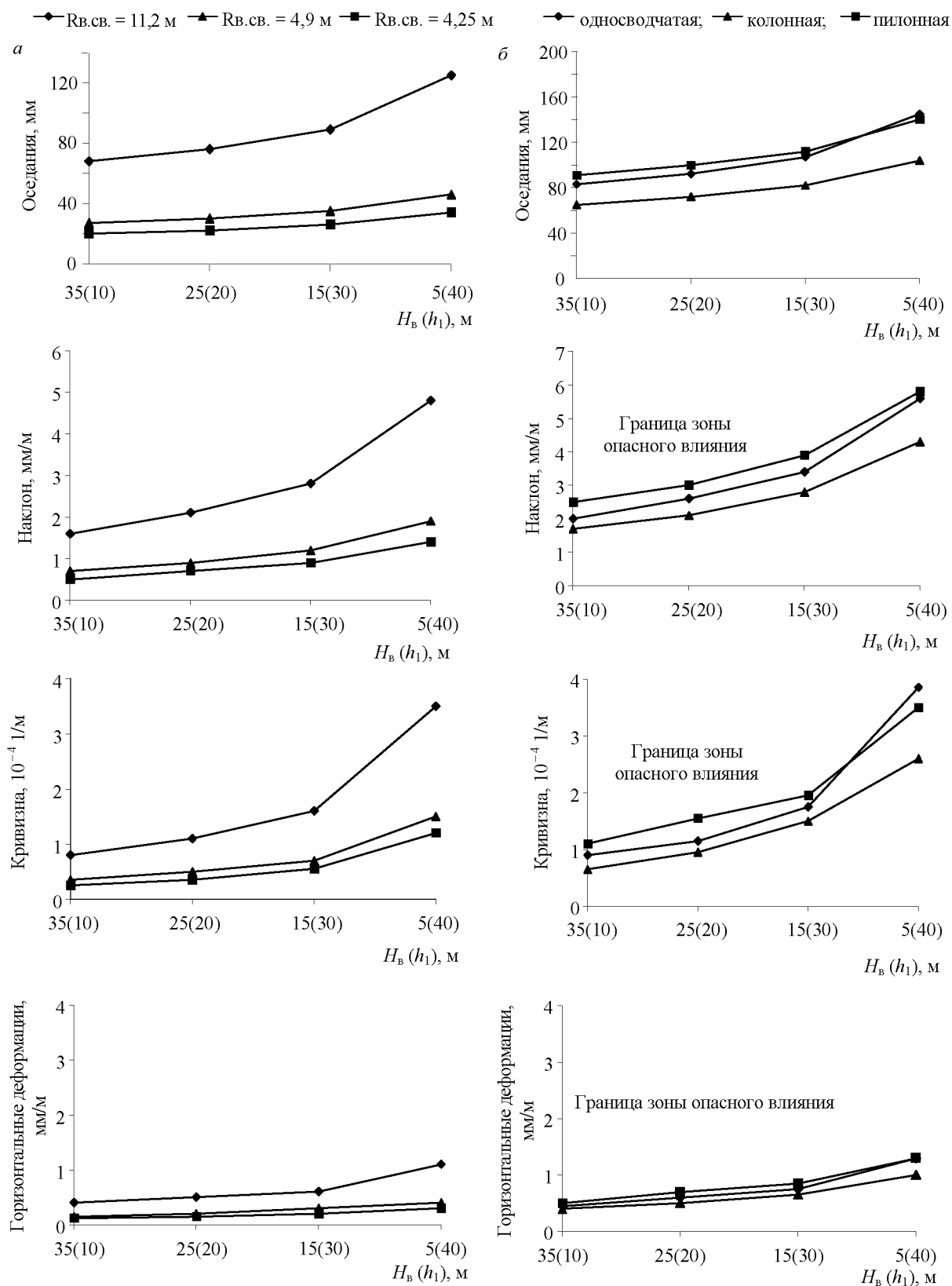
Размеры зоны влияния проходки тоннелей закрытым способом в Санкт-Петербурге, размер и характер деформаций земной поверхности в большой степени зависят от грунтов, в которых производится проходка: четвертичных отложениях или протерозойских глинах. Большинство станций и перегонных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге сооружаются в протерозойских глинах. В этом случае основными влияющими на размеры зоны влияния и деформаций факторами являются:

- мощность твердых тонкослоистых глин над верхним сводом тоннелей;
- размеры поперечного сечения тоннеля;
- глубина заложения тоннелей;
- технология сооружения тоннелей.

При проходке тоннелей закрытым способом в четвертичных отложениях основным влияющим фактором является технология производства работ. Так, например, при применении щитов с грунтопригрузом деформации земной поверхности минимальны и незначительно зависят от деформативных свойств вмещающих тоннель грунтов и размеров поперечного сечения выработки. При этом имеется возможность управления процессом сдвигания при помощи изменения давления грунтопригруза на забой.

В настоящей работе предпринята попытка определения условий строительства метрополитена в Санкт-Петербурге, при которых не требуются меры защиты зданий и сооружений, и установления применимости выбранных критериев зоны опасных деформаций.

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, расположены в толще плотных, достаточно устойчивых нижнепротерозойских глин (тонкослоистые глины, твердые). Толща протерозойских глин в своей верхней части представлена глинами с перемятой слоистостью (переходный слой), что является следствием ледниковой деятельности.



Зависимость максимальных расчетных значений оседаний, наклона, кривизны, горизонтальных деформаций земной поверхности от отношения мощностей протерозойских глин ( $H_b$ ) и четвертичных отложений ( $h_1$ ) над верхним сводом станционных тоннелей: *а* – при проходке отдельных станционных тоннелей с разным радиусом верхнего свода; *б* – при сооружении станций разной конструкции

В Санкт-Петербурге проходка перегонных тоннелей осуществляется механизированными щитовыми комплексами КТ-5,6. Станции глубокого заложения сооружаются трех типов: односводчатые, пилонные и колонные. Строительство односводчатых станций начинается с проходки опорных тоннелей. После бетонирования опор горным способом сооружается большепролетная конструкция станционного тоннеля. Сборная конструкция свода обделки односводчатых станций обычно имеет пролет верхнего свода 19 м, радиус 11,2 м. Диаметр опорных тоннелей 5,5 м.

Конструкция пилонной станции предполагает независимую, последовательную проходку параллельных тоннелей кругового сечения наружным диаметром 8,5 м с последующим соединением их проходами.

Колонная станция представляет собой единую пространственную конструкцию со сборной железобетонной обделкой. Сначала сооружаются боковые тоннели с оставлением целика между ними и опережением забоев на 25-50 м. Затем в боковых тоннелях возводятся несущие конструкции, основным элементом которых являются колонны. После этого сооружается средний станционный тоннель. Как правило, наружный диаметр боковых тоннелей 8,5 или 9,8 м, среднего тоннеля – 9,8 м.

Для определения зависимости максимальных значений оседания и деформаций земной поверхности от строения толщи пород над верхним сводом станционных тоннелей использовался программный комплекс «City-Tunnel» [1]. Расчет максимальных параметров процесса сдвижения земной поверхности производился для условий проходки отдельных тоннелей разного диаметра, а также после сооружения трех основных станционных тоннелей станций различной конструкции (пилонных, колонных и односводчатых). Расчет производился в диапазоне таких отношений мощности протерозойских глин и четвертичных отложений над верхним сводом станционных тоннелей, которые встречаются при строительстве станций метрополитена глубокого заложения в Санкт-Петербурге.

Для определения необходимости введения конструктивных мер защиты в здания требуется знать размер максимальных ожидаемых деформаций земной поверхности, которые рекомендуется принимать с учетом коэффициентов перегрузок [3]. Значения коэффициентов перегрузок принимались следующие: наклон – 1,4; кривизна – 1,8, горизонтальные деформации – 1,4. Расчетные деформации получены путем умножения ожидаемых деформаций земной поверхности на соответствующие коэффициенты перегрузки.

Как известно, большинство станций петербургского метрополитена построено и сооружается на глубине 50 м и более. Проведенные исследования показали, что параметры процесса сдвижения земной поверхности от влияния строительства более глубоких станций при любых отношениях мощностей протерозойских глин и четвертичных отложений будут меньше, чем для станций, расположенных на глубине 50 м. Поэтому в качестве примера рассмотрим результаты исследований, выполненные для глубины заложения станционных тоннелей 50 м, которые представлены в виде графиков на рисунке. Здесь прослеживается четкая тенденция увеличения оседания и деформаций земной поверхности по мере уменьшения мощности протерозойских глин над верхним сводом станционных тоннелей одного диаметра и одинаковой конструкции станции. При одном и том же значении мощности протерозойских глин увеличение мощности четвертичных отложений незначительно увеличивает оседания и деформации, т.е. значения параметров сдвижения земной поверхности в большей степени зависят от мощности протерозойских глин над верхним сводом тоннелей.

Из рисунка видно, что оседания и деформации земной поверхности после проходки отдельных тоннелей станций колонного и пилонного типа отличаются незначительно. Проходка станционного тоннеля односводчатой станции при любых сочетаниях мощностей протерозойских глин и четвертичных отложений над верхним сводом дает значительно большие значения оседаний и

деформаций, чем проходка в аналогичных условиях тоннелей пилонных и колонных станций. После проходки трех основных станционных тоннелей наименьшие оседания и деформации наблюдаются при строительстве станций колонного типа. Максимальные оседания и деформации земной поверхности после сооружения станций пилонного типа и односводчатых близки по значению.

Теперь оценим степень возможного влияния полученных значений деформаций земной поверхности на здания и сооружения.

Как известно, степень деформирования земной поверхности зависит от различных горно-геологических и горно-технических факторов (строения и физико-механических свойств толщи горных пород, глубины, размера выработанного пространства, технологии горных работ и др.). Условия безопасного ведения горных работ определяются на основании расчета деформаций земной поверхности и их сравнения с допустимыми деформациями в основаниях объектов на земной поверхности. В тех случаях, когда расчетные деформации больше допустимых, для уменьшения степени воздействия и обеспечения нормальной эксплуатации зданий и сооружений рассматривается применение различных защитных мероприятий.

Для принятия решения безопасной подработки необходимо определить критерий безопасности. Критерием возможности безопасной подработки зданий и сооружений могут являться допустимые деформации наиболее уязвимых объектов на земной поверхности или разработанные в результате многочисленных исследований нормативные показатели. В данном случае в качестве критерия безопасной подработки принимаем критерии на основании классификации действующего нормативного документа [2], регламентирующего возможность подработки зданий и сооружений при закрытом способе производства горных работ. Согласно этому нормативному документу, при определении границ зоны влияния подземных разработок приняты следующие значения деформаций земной поверхности: наклоны  $i = 0,5 \cdot 10^{-3}$ ; горизонтальные дефор-

мации (растяжение)  $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ . В пределах зоны влияния подземных разработок выделяют зону опасного влияния. Для определения границ зоны опасного влияния приняты следующие значения деформаций земной поверхности: наклон  $i = 4 \cdot 10^{-3}$ ; кривизна  $k = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ ; горизонтальные деформации (растяжение)  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ . Здания и сооружения, попадающие в зону опасного влияния, могут потребовать введения конструктивных мер защиты или принятия горно-технических мер защиты, уменьшающих деформации земной поверхности. При этом оседания земной поверхности в нормативных документах [2, 3] не являются критериями опасности подработки зданий и сооружений при сдвигении грунтового массива на большой площади без разрыва сплошности. Кроме того, при подземных разработках месторождений полезных ископаемых существует понятие безопасной глубины разработки. Горные работы, выполняемые ниже безопасной глубины разработки, не вызывают в сооружениях деформаций, превышающих допустимые.

По аналогии с безопасной глубиной, используя выбранный нами критерий зоны опасных деформаций, находим такие отношения мощности твердых тонкослоистых глин и четвертичных отложений над верхним сводом станционных тоннелей, при которых меры защиты зданий и сооружений не требуются.

Из рисунка видно, что для отдельных станционных тоннелей станций пилонного и колонного типа при максимальном оседании земной поверхности 35-45 мм по критериям зоны опасных деформаций безопасной будет мощность толщи твердых тонкослоистых глин  $H_b > 5 \text{ м}$  над верхним сводом, при любых значениях мощности четвертичных отложений  $h_1$ . Для станционного тоннеля односводчатой станции при максимальном оседании 90 мм безопасной будет  $H_b > 15 \text{ м}$ .

Для станций всех типов при максимальном оседании 80-115 мм безопасной будет мощность толщи твердых тонкослоистых глин более 15 м над верхним сводом при любой мощности толщи четвертичных отложений.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены следующие условия, при которых обеспечиваются безопасные параметры сдвижения земной поверхности при глубине заложения станций метрополитена в Санкт-Петербурге 50 м и более:

- последовательная проходка отдельных тоннелей станций глубокого заложения пилонного и колонного типа при мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом более 5 м и любой мощности толщи четвертичных отложений;

- проходка станционного тоннеля односводчатой станции при мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом более 15 м и любой мощности четвертичных отложений;

- сооружение станций всех типов при мощности твердых тонкослоистых глин над верхним сводом более 15 м и любой мощности четвертичных отложений.

Данные проведенных исследований подтверждены данными натурных наблюдений за оседанием земной поверхности и зданий при строительстве многих станций метрополитена. Так, на станции пилонного типа «Обводный канал» ( $h_1 = 38$  м,  $H_b = 10$  м) максимальное оседание составило 123 мм, деформации не превысили порога зоны опасных деформаций. В зону влияния горно-проходческих работ попало 36 зданий, причем многие здания имели значительную степень износа. На станции колонного типа «Звенигородская» ( $h_1 = 39$  м,  $H_b = 9$  м) при сооружении станционных тоннелей максимальное оседание составило 100 мм. В зону влияния горно-проходческих работ попало 8 зданий. На станции пилонного типа «Спасская» ( $h_1 = 31$  м,  $H_b = 15$  м) максимальное оседание составило 95 мм, деформации не превысили порога зоны опасных деформаций. В зону влияния горно-проходческих работ попало 30 зданий. Все здания при сооружении этих станционных комплексов сохранили свою эксплуатационную способность. Это говорит о том, что критерий зоны опасных деформаций, определенный в нор-

мативном документе [2], может применяться в условиях сооружения закрытым способом тоннелей и станций метрополитена в Санкт-Петербурге.

Таким образом, можно констатировать, что сооружение тоннелей метрополитена глубокого заложения закрытым способом вместе с применением специальных щитовых комплексов для проходки горизонтальных и наклонных выработок специальными щитовыми комплексами с грунтопригрузом забоя являются наиболее безопасными способами подземного строительства. Эти способы производства горно-проходческих работ позволяют выполнять задачи строительства метрополитена с минимальным воздействием на окружающую застройку и объекты городской инфраструктуры. Кроме того, не отчуждается земная поверхность над строящимися и эксплуатируемыми объектами метрополитена, и она продолжает использоваться для городских нужд.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин М.И. Программная система анализа, прогнозирования и оптимизации сдвижений земной поверхности при проходке тоннелей «City-Tunnel» / М.И.Вершинин, Л.П.Вершинина, В.П.Хуцкий // Компьютерные учебные программы и инновации. 2005. № 3.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. СПб, 1998.
3. СНиП 2.01.09-91 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах / Госстрой СССР. М., 1992.

#### REFERENCES

1. Vershinin M.I., Vershinina L.P., Khutsky V.P. Software system for analysis, forecasting and optimization of the earth surface shifting when driving tunnels of «City-Tunnel» type // Training computer programs and innovations. 2005. N 3.
2. Regulations for protection of structures and natural objects from harmful effect of underground mining at coal deposits. Saint Petersburg, 1998.
3. Construction Standards and Regulations 2.01.09-91 Buildings and structures on the territories being undermined and sagging (subsiding) grounds / GosStroy (Construction Administration) of the USSR. Moscow, 1992.