

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2823944

### СПОСОБ МОНИТОРИНГА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Гусев Владимир Николаевич (RU), Волохов Евгений Михайлович (RU), Выстрчил Михаил Георгиевич (RU), Бритвин Илья Александрович (RU)*

Заявка № 2024105096

Приоритет изобретения **28 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **30 июля 2024 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **28 февраля 2044 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Zubov*







ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*E21C 39/00 (2024.01)*

(21)(22) Заявка: 2024105096, 28.02.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.02.2024

Дата регистрации:  
30.07.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.02.2024

(45) Опубликовано: 30.07.2024 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,  
ФГБОУ ВО СПбГУ, Патентно-лицензионный  
отдел

(72) Автор(ы):

Гусев Владимир Николаевич (RU),  
Волохов Евгений Михайлович (RU),  
Выстрчил Михаил Георгиевич (RU),  
Бритвин Илья Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II"  
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: Инструкция по наблюдениям за  
сдвижением горных пород и земной  
поверхности при подземной разработке  
рудных месторождений, Москва, Недра, 1988.  
RU 2155866 C1, 10.09.2000. RU 2738633 C1,  
15.12.2020. RU 2472930 C1, 20.01.2013. RU  
2796197 C1, 17.05.2023. RU 2206740 C2,  
20.06.2003.

## (54) СПОСОБ МОНИТОРИНГА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

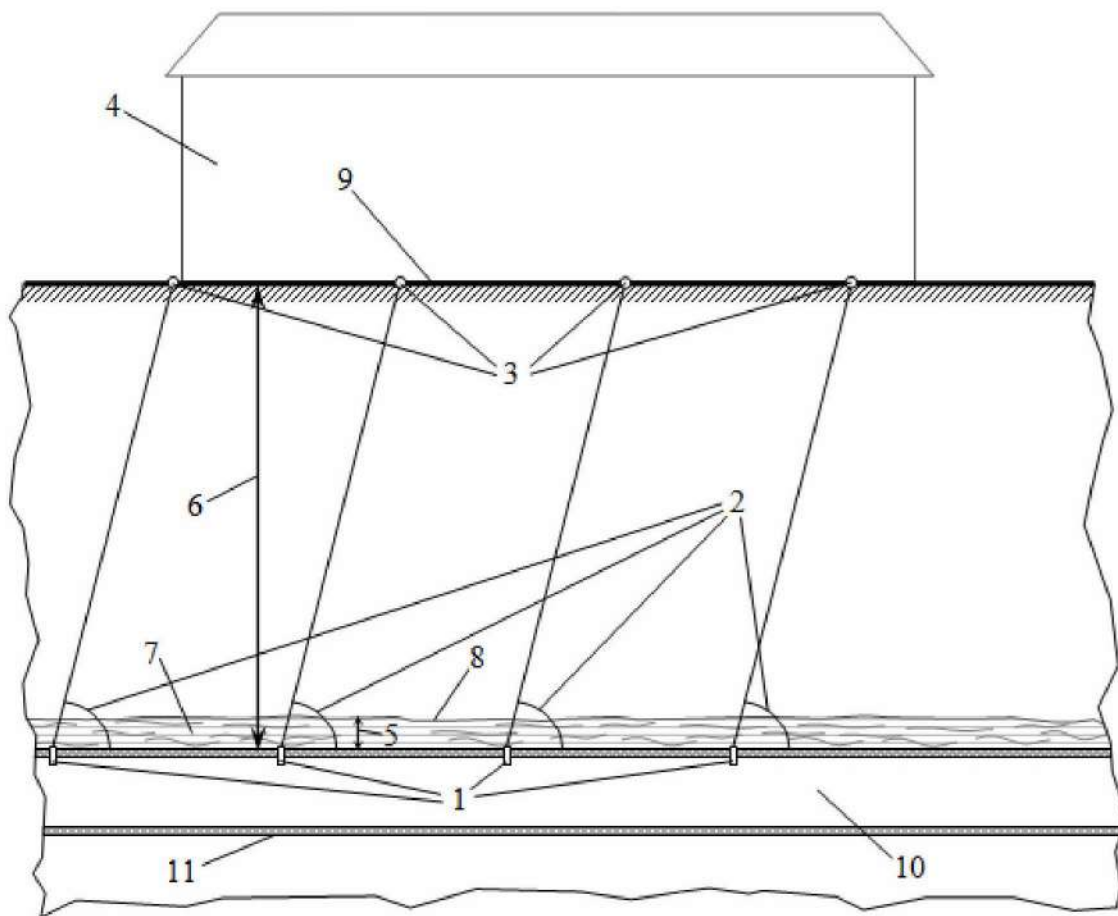
(57) Реферат:

Изобретение относится к области строительства тоннелей и подземных станционных выработок метро, коллекторов в условиях плотной городской застройки и может быть использовано для контроля за безопасностью подработки зданий на поверхности, попавших в зону влияния строительства подземных сооружений метро, а также для выбора мер их защиты. Способ мониторинга вертикальных сдвижений и деформаций при строительстве тоннелей метрополитенов включает закладку реперов в кровлю по оси тоннеля, проведение наблюдений за вертикальными сдвигами реперов, определение их оседаний, наклонов и кривизны. Закладывают четыре репера по мере проходки

тоннеля, место закладки первого репера определяют по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, который проведен от контура здания до пересечения с кровлей проектного положения тоннеля, остальные реперы закладывают по мере проходки тоннеля через определенный интервал. Систематические нивелировки начинают сразу после заложения первого репера, а затем продолжают по мере закладки остальных реперов. Оседания земной поверхности определяют в точках, которые получены пересечением с поверхностью углов влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, которое проведен от заложённых

реперов в тоннеле, величины оседаний этих точек определяют из условия, что отношение оседания любого подземного репера к оседанию соответствующей точки на земной поверхности равно коэффициенту соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля, умноженному на корень квадратный из отношения вертикального расстояния от подземного репера до земной поверхности к вертикальному расстоянию от подземного репера до верхней границы зоны расслоения кровли тоннеля. По полученным из мониторинга оседаниям в точках на поверхности определяют наклоны и кривизну, как первое и второе производные от оседаний. Мониторинговые наблюдения завершают, когда в двух очередных

сериях наблюдений будут получены оседания первой точки на земной поверхности, которые отличаются друг от друга не более чем на 5%, это означает, что этой точкой зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию начала формирования плоского дна. Технический результат состоит в обеспечении контроля за развитием вертикальных сдвижений и деформаций на плотно застроенной поверхности по линии, совпадающей с осью строящегося тоннеля, оценки безопасного воздействия, получаемых из мониторинга деформаций на здания, сооружения, расположенные в этой зоне, и выбора мер их охраны. 1 пр., 5 табл., 1 ил.



Фиг. 1

RU 2823944 C1

RU 2823944 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*E21C 39/00 (2024.01)*

(21)(22) Application: **2024105096, 28.02.2024**

(24) Effective date for property rights:  
**28.02.2024**

Registration date:  
**30.07.2024**

Priority:

(22) Date of filing: **28.02.2024**

(45) Date of publication: **30.07.2024** Bull. № 22

Mail address:

**190106, Sankt-Peterburg, 21 liniya, V.O., 2, FGBOU  
VO SPGU, Patentno-litsenziionnyj otdel**

(72) Inventor(s):

**Gusev Vladimir Nikolaevich (RU),  
Volokhov Evgenii Mikhailovich (RU),  
Vystrchil Mikhail Georgievich (RU),  
Britvin Ilya Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniia «Sankt-Peterburgskii gornyi  
universitet imperatritsy Ekateriny II» (RU)**

(54) **METHOD OF MONITORING VERTICAL DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS DURING CONSTRUCTION OF METRO TUNNELS**

(57) Abstract:

FIELD: construction.

SUBSTANCE: invention relates to construction of tunnels and underground station workings of metro, collectors in conditions of dense urban development and can be used to control the safety of undermining of buildings on the surface, which have fallen into the zone of influence of the construction of underground structures of the subway, as well as to select measures for their protection. Method of monitoring vertical displacements and deformations during construction of metro tunnels involves laying reference points into the roof along the axis of the tunnel, observing vertical displacements of reference points, determining their subsidence, inclinations and curvature. Four reference points are laid as the tunnel is being drilled, the location of the first reference point is determined by the angle of influence of the tunnel working on the earth's surface in the main section of the shift trough, which is drawn from the building outline to the intersection with the roof of the design position of the tunnel, the rest of the reference points are laid as the tunnel is being driven through a certain interval. Systematic levelling begins immediately after the first reference point is laid, and

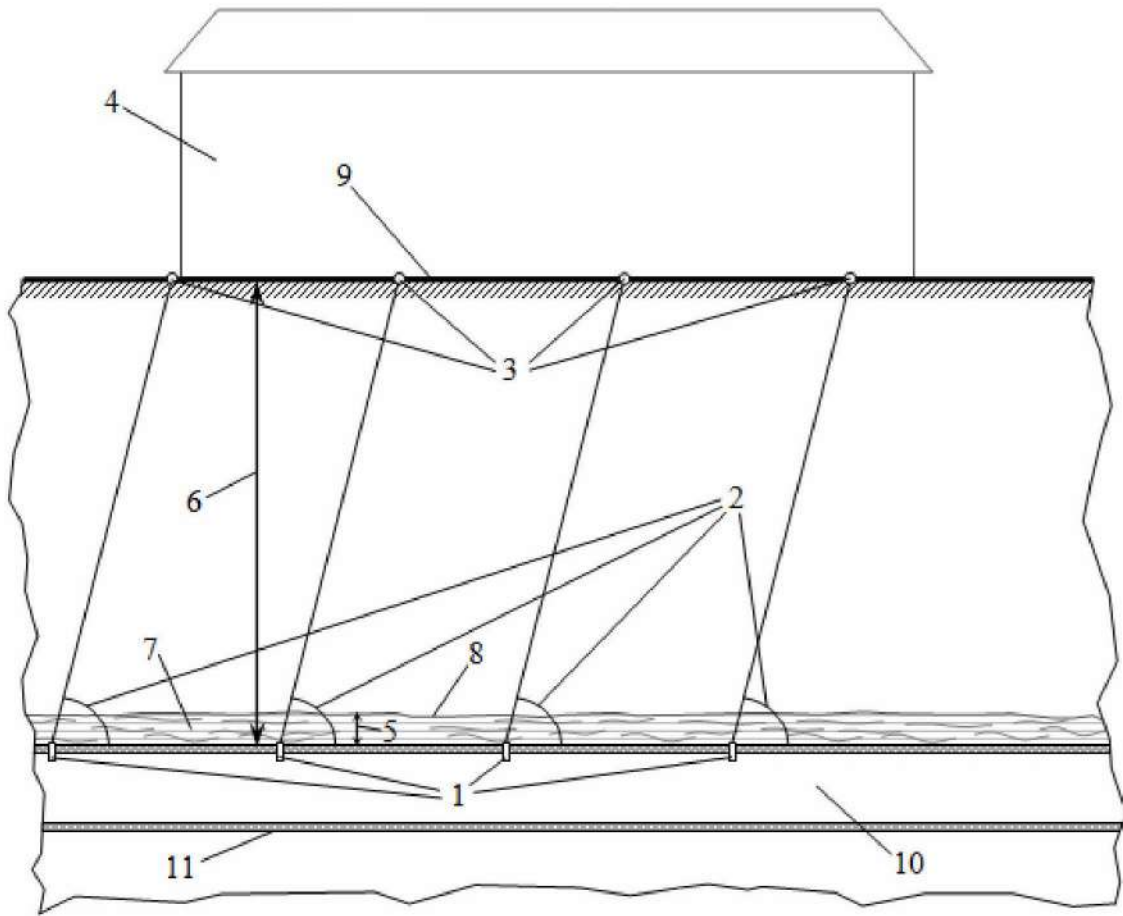
then continues as the remaining reference points are laid. Earth surface subsidence is determined at points, which are obtained by intersection with surface of corners of influence of tunnel working on earth surface in main section of shift trough, which is drawn from the laid reference points in the tunnel, the subsidence values of these points are determined from the condition that the ratio of the subsidence of any underground reference point to the subsidence of the corresponding point on the earth's surface is equal to the coefficient of compliance with mining and geological conditions of tunnel construction, multiplied by the square root of the ratio of the vertical distance from the underground reference point to the earth's surface to the vertical distance from the underground reference point to the upper boundary of the delamination zone of the tunnel roof. Obtained from monitoring subsidence at points on the surface is used to determine inclination and curvature as the first and second derivatives of subsidence. Monitoring observations are completed when, in two next series of observations, subsidence of the first point on the earth's surface is obtained, which differ from each other by no more than 5 %, this means

that this point fixes all stages of development of displacements and deformations of the shift trough moving after the movement of the bottom of the tunnel, including the stage of the beginning of the flat bottom formation.

EFFECT: providing control over development of vertical displacements and deformations on a densely

built-up surface along the line coinciding with the axis of the tunnel under construction, assessment of safe impact obtained from monitoring deformations on buildings, structures located in this zone, and selection of measures for their protection.

1 cl, 1 ex, 5 tbl, 1 dwg



Фиг. 1

RU 2823944 C1

RU 2823944 C1

Изобретение относится к области строительства тоннелей и подземных станционных выработок метро, коллекторов в условиях плотной городской застройки и может быть использовано для контроля за безопасностью подрботки зданий на поверхности, попавших в зону влияния строительства подземных сооружений метро, а также для  
5 выбора мер их защиты.

Известен способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных выработок, пройденных с замораживанием грунтов (патент РФ № 2738633 опубл. 15.12.2020). Способ включает закладку профильных линий на  
10 поверхности в пределах границ мульды сдвижения в различных направлениях, включая в главном сечении мульды сдвижения. Проводят нивелирование по реперам профильных линий на поверхности, затем для каждой серии наблюдений, получают распределение пучений, которые вызваны активной стадией замораживания. Далее рассчитывают значения наклонов и кривизны, которые отражают состояние земной поверхности до начала сдвижений и состояние того же участка на определенной стадии процесса  
15 сдвижения в период активной и пассивной стадии замораживания.

Недостатками этого способа являются большие объемы работ по закладке реперов нескольких профильных линий реперов на поверхности, включая профильную линию реперов в главном сечении мульды сдвижения, соответствующей оси проходимой  
20 горной выработки. Кроме того, в условиях плотной городской застройки здания и сооружения являются непреодолимым препятствием для закладки профильных линий реперов в требуемом направлении и необходимой длины.

Известен способ определения вертикальных сдвижений и деформаций (патент РФ № 2472930, опубл. 20.01.2013), основанный на производстве лазерно-сканирующей съемки потенциальной зоны подрботки земной поверхности до начала сдвижений и  
25 повторные съемки того же участка после начала сдвижений. По результатам лазерно-сканирующей съемки получают трехмерные точечные модели участка подрботки земной поверхности, используя которые, определяют оседания как разность соответствующих профилей точечной модели, отражающей состояние поверхности участка до начала сдвижений, и профилей модели, отражающей состояние того же  
30 участка на определенную стадию процесса сдвижения, включая стадию окончания процесса сдвижения. При этом, сравниваемые профили получают как линии пересечения поверхностей моделей, отражающих различные стадии процесса сдвижения, с вертикальными плоскостями, однозначное положение которых определяют через координатные привязки к маркам внешнего ориентирования, отображаемым на  
35 точечных трехмерных моделях. Вычисляют наклоны и кривизну, соответственно, как первая и вторая производные от оседаний.

Недостатками этого способа является то, что при лазерно-сканирующей съемке плотно застроенных участков земной поверхности на снятой трехмерной точечной модели отразятся все здания, попавшие в поле зрения лазерного сканера. В результате,  
40 эти здания будут являться виртуальным препятствием для прокладки профильных линий на снятой трехмерной точечной модели в требуемом направлении и необходимой длины для получения информации о распределении вертикальных сдвижений и деформаций в этом направлении.

Известен способ контроля участков провалов земной поверхности над калийными рудниками (патент РФ № 2186972, опубл. 10.08.2002), который, осуществляется прогноз развития негативных экзогенных процессов техногенно-природного генезиса на  
45 подрабатываемых территориях. Это достигается тем, что просадочные явления фиксируют с помощью каркасного и площадного геологического маршрутирования.

Затем буровыми работами вскрывают коренные породы и выявляют морфологию поверхности коренного ложа в местах просянок. Одновременно определяют динамику проявления экзогенных геологических процессов дешифрированием космо-аэрофотоматериалов разных лет и наблюдениями на профильных линиях поверхностных грунтовых и глубинных реперов. Изучение строения и состояния водозащитной толщи проводят с помощью невзрывной сейсморазведки высокого разрешения методом общей глубинной точки с геомеханическим анализом по результатам напряженно-деформированного состояния горного массива. Гидродинамику надсолевых вод контролируют измерением уровня подземных вод в наблюдательной гидрогеологической скважине. При этом в процессе ее бурения производят отбор образцов горных пород для определения их физико-механических свойств. В результате поставленная цель прогноза развития негативных экзогенных процессов техногенно-природного генезиса на подрабатываемых территориях достигается тем, что участки провальных оседаний земной поверхности контролируются комплексом геологических, гидрогеологических, геофизических, геомеханических и маркшейдерских методов.

Недостатками, в части применения наблюдений на профильных линиях поверхностных грунтовых и глубинных реперов, является большой объем работ, связанный с закладкой грунтовых реперов. И еще больший объем работ требуется при закладке глубинных реперов, которые закладываются в специально пробуренные для этого скважины. Если на участке закладки будут расположены здания, сооружения, то они являются препятствием для закладки профильных линий грунтовых реперов необходимой длины и в требуемом направлении, что также является недостатком.

Известен способ определения границ зон опасных сдвижений месторождения (патент РФ № 2155866, опублик. 10.09.2000), который включает закладку реперов основных профильных линий на поверхности, располагаемых по простиранию и вкрест простирания залежей, и дополнительных профильных линий, располагаемых в зоне влияния горных работ. Точки пересечения основных профильных линий соединяют между собой дополнительными линиями, по которым закладывают репера. Таким образом, создается единая система профильных линий. За смещениями реперов единой системы профильных линий проводят наблюдения. По результатам этих наблюдений строят изогипсы оседаний земной поверхности. Границы зон опасных сдвижений определяют в зависимости от характера изменения изогипс.

Недостатками этого способа является большой объем работ, связанный с закладкой профильных линий на поверхности, располагаемых по простиранию и вкрест простирания залежей, и дополнительных профильных линий, располагаемых в зоне влияния горных работ. К недостаткам относится и то, что на застроенных территориях здания и сооружения будут являться препятствием для закладки основных и дополнительных профильных линий в определенных направлениях относительно рудных залежей и определенной длины.

Известен способ определения сдвижений и деформаций, (Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / М-во цв. мет. СССР. Горное управление: Введ. 3.07.86. - Разраб. ВНИМИ, ВНИПИГорцветмет. - М.: Недра. 1988, стр. 19 - 23, стр. 30 - 33) принятый за прототип, который включает в себя закладку реперов в подземных горных выработках, проведение периодических наблюдений за вертикальными и горизонтальными смещениями реперов и получение по результатам наблюдений распределение сдвижений и деформаций, оседаний, наклонов, кривизны, горизонтальных деформаций, по реперам, заложенным в подземных горных выработках.

Недостатками этого способа является ограниченность в его использовании, а именно, применяется только для получения вертикальных и горизонтальных смещений реперов профильных линий, заложенных в подземных горных выработках, без оценки их влияния на земную поверхность. К недостаткам также относится то, что периодические наблюдения, нивелировки реперов и измерений длин между ними, начинают после закладки всей профильной линии в уже существующих подземных капитальных и подготовительных горных выработках, т.е. после завершения проходки этих выработок. В результате оседания и горизонтальные сдвигения, которые развиваются в процессе проходки подземной горной выработки, не фиксируются такими периодическим наблюдениями.

Техническим результатом является контроль за развитием вертикальных сдвижений и деформаций на плотно застроенной поверхности по линии, совпадающей с осью строящегося тоннеля.

Технический результат достигается тем, что закладывают четыре репера по мере проходки тоннеля, место закладки первого репера определяют по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, который проведен от контура здания до пересечения с кровлей проектного положения тоннеля, остальные реперы закладывают по мере проходки тоннеля через определенный интервал, при этом систематические нивелировки начинают сразу после заложения первого репера, а затем продолжают по мере закладки остальных реперов, оседания земной поверхности определяют в точках, которые получены пересечением с поверхностью углов влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, который проведен от заложенных реперов в тоннеле, величины оседаний этих точек определяют из условия, что отношение оседания любого подземного репера к оседанию соответствующей точки на земной поверхности равно коэффициенту соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля, умноженному на корень квадратный из отношения вертикального расстояния от подземного репера до земной поверхности к вертикальному расстоянию от подземного репера до верхней границы зоны расслоения кровли тоннеля, по полученным из мониторинга оседаниям в точках на поверхности определяют наклоны и кривизну, как первая и вторая производные от оседаний, мониторинговые наблюдения завершают, когда в двух очередных сериях наблюдений будут получены оседания первой точки на земной поверхности, которые отличаются друг от друга не более, чем на 5%, которое означает, что этой точкой зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию начала формирования плоского дна.

Способ поясняется чертежами:

фиг. 1 - схема получения распределения вертикальных сдвижений и деформаций на плотно застроенной земной поверхности города, где:

- 1 - реперы подземной профильной линии, заложенные в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля;
- 2 - угол влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, определяющий влияние сдвижения реперов подземной профильной линии на земную поверхность;
- 3 - точки влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности;
- 4 - здание в зоне влияния строительства тоннеля;
- 5 - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до верхней границы



зоны расслоения;

6 - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности;

7 - зона расслоения проходимого тоннеля;

8 - верхняя граница зоны расслоения проходимого тоннеля;

5 9 - земная поверхность с плотной городской застройкой;

10 - тоннель;

11 - тубинговая крепь тоннеля.

Способ осуществляют следующим образом. На плотно застроенном участке города, где здания препятствуют закладке профильной линии реперов на поверхности вдоль  
10 оси строящегося тоннеля, реперы подземной профильной линии закладывают в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), по которым организуются мониторинговые наблюдения за их вертикальными смещениями. Эти реперы закладывают через интервал проходки тоннеля от 12 до 13 тубинговых колец, что соответствует, при ширине тубинга 0.76 м, от 9.1 до 9.9 м проходки. Оптимальное количество закладываемых реперов -  
15 четыре. Это количество реперов обосновывается следующим. Для получения наклона как первой производной от оседаний требуется информация об оседаниях двух реперов. Для получения кривизны, которая является первой производной от наклонов и второй производной от оседаний, требуется информация об оседаниях по трем реперам. Четвертый репер закладывается для контроля получения кривизны по первым трем  
20 реперам.

Перед началом мониторинговых наблюдений закладывают опорные реперы, не менее двух в 20 - 30 м до места заложения первого подземного репера в кровле тоннеля. Место закладки первого подземного репера определяют, исходя из начала влияния проходимого тоннеля на здание в зоне влияния строительства тоннеля 4, по углу влияния  
25 тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвигения, определяющий влияние сдвигения реперов подземной профильной линии на земную поверхность ( $\delta$ ) 2, проведенному от ближайшего в плане к забою тоннеля контура здания на поверхности до пересечения с кровлей тоннеля 10 и с учетом направления его движения (фиг. 1). Одновременно точка поверхности, от которой проводится угол  
30  $\delta$ , будет являться первой точкой влияния сдвигения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1). После установки первого репера подземной профильной линии, заложеного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), проводят первое наблюдение способом нивелирования, определяя его начальное высотное положение относительно опорных реперов. После того как забой  
35 тоннеля 10 переместится на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 - 7 смонтированных колец тубинговой крепи тоннеля 11, производится вторая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого репера подземной профильной линии, заложеного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Сравнение его высотного положения, определенного  
40 в этой серии наблюдений с его начальным даст оседание. Оседание в первой точке влияния сдвигения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после второй серии наблюдений определится из соотношения

$$45 \frac{\eta_{012}}{\eta_{12}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (1)$$

откуда

$$\eta_{12} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{012} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \quad (2)$$

где  $\eta_{1_2}$  - оседание в первой точке влияния сдвижения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения второй серии наблюдений, обозначенной индексом «2»;  $\eta_{01_2}$  - оседание первого репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после проведения второй серии наблюдений, обозначенной индексом «2»;  $a_\eta$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней границы 8 зоны расслоения проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1).

После того как забой тоннеля 10 переместится на интервал от 12 до 13 колец тубинговой крепи тоннеля 11 или от 9.1 до 9.9 м относительно первого заложенного в кровлю тоннеля репера, производится установка второго репера подземной профильной линии, закладываемого в кровлю и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). После его закладки проводится третья текущая серия наблюдений способом нивелирования по определению высотного положения первого и второго репера подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), относительно опорных реперов. Для первого репера подземной профильной линии сравнение его высотного положения, определенного в этой серии наблюдений с его начальным даст оседание. Для второго репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1, этой текущей серией наблюдений будет определено его начальное высотное положение, а по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, определяющий влияние сдвижения реперов подземной профильной линии на земную поверхность 2, проведенного от второго репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1, до земной поверхности с плотной городской застройкой 9, определится местоположение на поверхности второй точки влияния сдвижения второго репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1). Оседание в первой точке на поверхности после третьей серии наблюдений определится по формуле (2), в которую вместо оседания первого репера, заложенного в тоннеле, определенного после проведения второй серии наблюдений, подставляется оседание первого репера, определенное в третьей серии наблюдений.

После того как забой тоннеля 10 переместится относительно второго репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1, на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. от 6 до 7 смонтированных колец тубинговой крепи тоннеля 11, производится четвертая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого и второго реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов. Оседание в первой и второй точках влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после четвертой серии наблюдений определится из соотношений:

$$\frac{\eta_{01_4}}{\eta_{1_4}} = a_\eta \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{02_4}}{\eta_{2_4}} = a_\eta \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (3)$$

откуда

$$\eta_{1_4} = \frac{1}{a_\eta} \eta_{01_4} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{2_4} = \frac{1}{a_\eta} \eta_{02_4} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{1_4}, \eta_{2_4}$  - соответственно оседание первой и второй точек влияния сдвижения  
 5 первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения четвертой серии наблюдений, обозначенной индексом «4»;  
 $\eta_{01_4}, \eta_{02_4}$  - соответственно оседание первого и второго реперов подземной профильной  
 линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после  
 10 проведения четвертой серии наблюдений, обозначенной индексом «4»;  $a_\eta$  - коэффициент  
 соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние  
 по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней границы 8 зоны расслоения  
 проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого  
 тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1). Полученные из четвертой серии наблюдений  
 15 оседания первой и второй точек поверхности (4) позволяют определить, на этой стадии  
 мониторинга, наклон интервала между этими точками как первая производная от этих  
 оседаний:

$$i_{1_4} = \frac{\eta_{1_4} - \eta_{2_4}}{l}, \quad (5)$$

где  $i_{1_4}$  - наклон интервала между первой и второй точками влияния сдвижения  
 20 первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  
 $\eta_{1_4}, \eta_{2_4}$  - соответственно оседание первой и второй точек влияния сдвижения  
 первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3  
 25 (фиг. 1) после проведения четвертой серии наблюдений, обозначенной индексом «4»;  $l$   
 - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии  
 на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной  
 линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1).

После того как забой тоннеля 10 переместится на интервал от 12 до 13 колец  
 30 тубинговой крепи тоннеля 11 или от 9.1 до 9.9 м относительно второго, заложенного  
 в кровлю тоннеля, репера, производится установка третьего репера подземной  
 профильной линии, закладываемого в кровлю и вдоль оси проходимого тоннеля 1 и  
 проводится пятая серия наблюдений по определению высотного положения первого,  
 второго и третьего реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и  
 35 вдоль оси проходимого тоннеля 1 относительно опорных реперов (фиг. 1). Для первого  
 и второго реперов подземной профильной линии сравнение их высотных положений,  
 определенных в этой серии с их начальными высотными положениями даст оседания  
 этих реперов. Для третьего репера подземной профильной линии, заложенного в кровле  
 и вдоль оси проходимого тоннеля 1, этой текущей серией наблюдений будет определено  
 40 его начальное высотное положение, а по углу влияния тоннельной выработки на земную  
 поверхность в главном сечении мульды сдвижения, определяющий влияние сдвижения  
 реперов подземной профильной линии на земную поверхность 2, проведенного от  
 третьего репера подземной профильной линии до поверхности, определится  
 местоположение на земной поверхности с плотной городской застройкой 9 третьей  
 45 точки влияния сдвижения третьего репера подземной профильной линии на земной  
 поверхности 3 (фиг. 1). Оседания первой и второй точек влияния сдвижения реперов  
 подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после пятой серии  
 наблюдений определится из соотношений:

$$\frac{\eta_{015}}{\eta_{15}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{025}}{\eta_{25}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, (6)$$

откуда

$$\eta_{15} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{015} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{25} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{025} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, (7)$$

где  $\eta_{15}, \eta_{25}$  - соответственно оседание первой и второй точек влияния сдвижения первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения пятой серии наблюдений, обозначенной индексом «5»;  $\eta_{015}, \eta_{025}$  - соответственно оседание первого и второго реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после проведения пятой серии наблюдений, обозначенной индексом «5»;  $a_{\eta}$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней границы 8 зоны расслоения проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1). Полученные из пятой серии наблюдений по формуле (7) оседания первой и второй точек земной поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклон интервала между этими точками как первая производная от этих оседаний :

$$i_{15} = \frac{\eta_{15} - \eta_{25}}{l}, (8)$$

где  $i_{15}$  - наклон интервала между первой и второй точками влияния сдвижения первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{15}, \eta_{25}$  - соответственно оседание первой и второй точек влияния сдвижения первого и второго реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения пятой серии наблюдений, обозначенной индексом «5»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1).

После того как забой тоннеля переместится относительно третьего репера на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. от 6 до 7 смонтированных колец тубинговой крепи тоннеля 11 (фиг. 1), производится шестая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов. Оседание в первой, второй и третьей точек влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после шестой серии наблюдений определится из соотношений:

$$\frac{\eta_{016}}{\eta_{16}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{026}}{\eta_{26}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{036}}{\eta_{36}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, (9)$$

откуда

$$\eta_{16} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{016} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{26} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{026} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{36} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{036} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, (10)$$



где  $\eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}$  - соответственно оседание первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения шестой серии наблюдений, обозначенной индексом «6»;  $\eta_{01_6}, \eta_{02_6}, \eta_{03_6}$  - соответственно оседание первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после проведения шестой серии наблюдений, обозначенной индексом «6»;  $a_\eta$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней границы 8 зоны расслоения проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1). Полученные из шестой серии наблюдений по формуле (10) оседания первой, второй и третьей точек на земной поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{1_6} = \frac{\eta_{1_6} - \eta_{2_6}}{l}; i_{2_6} = \frac{\eta_{2_6} - \eta_{3_6}}{l} \quad (11)$$

где  $i_{1_6}, i_{2_6}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}$  - соответственно оседания первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения шестой серии наблюдений, обозначенной индексом «6»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Полученные из шестой серии наблюдений наклоны (11) позволяют, на этой стадии мониторинга, получить кривизну во второй точке влияния сдвижения второго репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) как первая производная от наклонов (11) или вторая производная от оседаний (10):

$$K_{1_6} = \frac{i_{2_6} - i_{1_6}}{l} = \frac{\eta_{1_6} - 2\eta_{2_6} + \eta_{3_6}}{l}, \quad (12)$$

где  $K_{1_6}$  - кривизна во второй точке влияния сдвижения второго репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1), выявленная в результате проведения шестой серии наблюдений;  $i_{1_6}, i_{2_6}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}$  - соответственно оседания первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения шестой серии наблюдений, обозначенной индексом «6»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Далее, на этой стадии мониторинговых наблюдений производится сравнение полученного значения кривизны ( $K_{1_6}$ ) с допустимой кривизной для здания ( $K_D$ ), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. Если  $K_{1_6} \leq K_D$ , то проходка тоннеля под зданием будет

безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации. Если  $K_{1e} > K_d$ , то необходимо применение конструктивных мер защиты здания от влияния строительства тоннеля. В связи с этим, в силу инерционности процессов сдвижения горных пород, достигнутый уровень деформаций кривизны второй точки земной поверхности проявится через 1.5 - 2 месяца после фиксации вертикальных смещений по второму реперу подземной профильной линии, заложенному в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля. То есть, появляется возможность еще до начала проявления деформаций на поверхности определить их уровень, оценить безопасность проходки тоннелей, и если потребуется, выбрать и реализовать одну из конструктивных мер защиты для подрабатываемого здания, к числу которых относятся устройство деформационных швов, траншей по периметру здания, компенсирующих деформации и др.

После проходки тоннеля на интервал от 12 до 13 колец тубинговой крепи тоннеля 11 или от 9.1 до 9.9 м относительно третьего заложенного в кровлю тоннеля репера, производят установку четвертого, последнего, репера подземной профильной линии, закладываемый в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1) и проводят седьмое текущее наблюдение способом нивелирования по определению высотного положения первого, второго, третьего и четвертого реперов подземной профильной линии относительно опорных реперов. Для первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1) сравнение их высотных положений, определенных в этой серии, с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов. Для четвертого репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 этой текущей серией наблюдений будет определено его начальное высотное положение, а по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, определяющий влияние сдвижения реперов подземной профильной линии на земную поверхность 2, проведенного от четвертого подземного репера до земной поверхности с плотной городской застройкой 9, определится местоположение на поверхности четвертой точки влияния сдвижения четвертого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1). Оседания первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после седьмой серии наблюдений определится из соотношений:

$$\frac{\eta_{017}}{\eta_{17}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{027}}{\eta_{27}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{037}}{\eta_{37}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (13)$$

откуда

$$\eta_{17} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{017} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{27} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{027} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{37} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{037} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \quad (14)$$

где  $\eta_{17}, \eta_{27}, \eta_{37}$  - соответственно оседание первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения седьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «7»;  $\eta_{017}, \eta_{027}, \eta_{037}$  - соответственно оседание первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после проведения седьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «7»;  $a_{\eta}$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней

границы 8 зоны расслоения проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1). Полученные из седьмой серии наблюдений по формуле (14) оседания первой, второй и третьей точек на земной поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{17} = \frac{\eta_{17} - \eta_{27}}{l}; i_{27} = \frac{\eta_{27} - \eta_{37}}{l} \quad (15)$$

где  $i_{17}, i_{27}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{17}, \eta_{27}, \eta_{37}$  - соответственно оседания первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения седьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «7»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Полученные из седьмой серии наблюдений наклоны (15) позволяют, на этой стадии мониторинга, получить кривизну во второй точке влияния сдвижения второго репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) как первая производная от наклонов (15) или вторая производная от оседаний (14):

$$K_{17} = \frac{i_{27} - i_{17}}{l} = \frac{\eta_{17} - 2\eta_{27} + \eta_{37}}{l}, \quad (16)$$

где  $K_{17}$  - кривизна во второй точке влияния сдвижения второго репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1), выявленная в результате проведения седьмой серии наблюдений;  $i_{17}, i_{27}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{17}, \eta_{27}, \eta_{37}$  - соответственно оседания первой, второй и третьей точек влияния сдвижения первого, второго и третьего реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения седьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «7»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). На основании сравнения с допустимым значением кривизны решают вопрос либо продолжать мониторинговые наблюдения, либо потребуется, выбирать и реализовать конструктивные меры защиты для подрабатываемого здания.

Если сравнительный анализ покажет, что не требуется применения конструктивных мер защит для здания, то после того как забой тоннеля переместится относительно четвертого репера подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1, на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля 10, т.е. от 6 до 7 смонтированных колец тубинговой крепи тоннеля 11, производится восьмая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого, второго, третьего и четвертого реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг.1). Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов. Оседание в первой,

второй, третьей и четвертой точек влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности после восьмой серии наблюдений определится из соотношений

$$\frac{\eta_{01g}}{\eta_{1g}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{02g}}{\eta_{2g}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{03g}}{\eta_{3g}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}; \frac{\eta_{04g}}{\eta_{4g}} = a_{\eta} \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}, \quad (17)$$

откуда

$$\eta_{1g} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{01g} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{2g} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{02g} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{3g} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{03g} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}; \eta_{4g} = \frac{1}{a_{\eta}} \eta_{04g} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \quad (18)$$

где  $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения восьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «8»;

$\eta_{01g}, \eta_{02g}, \eta_{03g}, \eta_{04g}$  - соответственно оседание первого, второго, третьего и четвертого реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1), после проведения восьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «8»;  $a_{\eta}$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля;  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля 5 до верхней границы 8 зоны расслоения проходимого тоннеля 7 (фиг. 1);  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до земной поверхности 6 (фиг. 1). Полученные по формуле (18) из восьмой серии наблюдений оседания четырех точек на поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{1g} = \frac{\eta_{1g} - \eta_{2g}}{l}; i_{2g} = \frac{\eta_{2g} - \eta_{3g}}{l}; i_{3g} = \frac{\eta_{3g} - \eta_{4g}}{l}, \quad (19)$$

где  $i_{1g}, i_{2g}, i_{3g}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения восьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «8»;  $l$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). По наклонам этой серии наблюдений определяют кривизну во второй и третьей точках влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) как первая производная от наклонов (19) или вторая производная от оседаний (18):

$$K_{1g} = \frac{i_{2g} - i_{1g}}{l} = \frac{\eta_{1g} - 2\eta_{2g} + \eta_{3g}}{l}; K_{2g} = \frac{i_{3g} - i_{2g}}{l} = \frac{\eta_{2g} - 2\eta_{3g} + \eta_{4g}}{l}, \quad (20)$$

где  $K_{1g}, K_{2g}$  - соответственно кривизна во второй и третьей точках влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1), выявленная в результате проведения восьмой серии наблюдений;  $i_{1g}, i_{2g}, i_{3g}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1);  $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек влияния сдвижения реперов подземной профильной линии



на земной поверхности 3 (фиг. 1) после проведения восьмой серии наблюдений, обозначенной индексом «8»;  $I$  - интервал между точками влияния сдвижения реперов подземной профильной линии на земной поверхности 3, равный интервалу установки реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1). Из полученных в этой серии наблюдений значений кривизны (20) выбирается максимальное и сравнивается с допустимой кривизной для здания ( $K_d$ ), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. Если это значение кривизны не превышает допустимую кривизну для подрабатываемого здания, то проходка тоннеля под ним будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации. Если больше допустимой кривизны для подрабатываемого здания, то необходимо применение конструктивных мер защиты здания от влияния строительства тоннеля.

По истечении времени перемещения забоя тоннеля на интервал от 12 до 13 колец тубинговой крепи тоннеля 11 или от 9.1 до 9.9 м относительно четвертого заложенного в кровлю тоннеля репера, но уже без закладки очередного репера, проводится девятая серия наблюдений способом нивелирования по определению высотного положения первого, второго, третьего и четвертого реперов подземной профильной линии, заложенных в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 (фиг. 1) относительно опорных реперов. Обработка результатов наблюдений этой серии наблюдений проводится в полном соответствии с обработкой результатов восьмой серии мониторинговых наблюдений.

Девятая серия наблюдений проводилась по сформированной к этому моменту профильной линии из четырех реперов, заложенных в кровле проходимого тоннеля. Для решения вопроса о завершении мониторинговых наблюдений следует поочередно, через интервал проходки тоннеля от 6 до 7 смонтированных тубинговых колец, провести еще две серии наблюдений: десятую и одиннадцатую. Методика проведения этих серий наблюдений та же, что и при проведении девятой серии наблюдений только с подстановкой данных измерений, актуальных для каждой из этих серий. Если оседания в первой точке влияния сдвижения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 после проведения десятой и одиннадцатой сериях наблюдений будет показывать одно и то же значение, изменяясь в пределах 5% от максимальной величины определенных в этих сериях оседаний, то это означает, что первой точкой влияния сдвижения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 и первым репером подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию формирования плоского дна мульды сдвижения, и мониторинговые наблюдения можно завершить (фиг. 1). Если изменчивость больше 5%, то следует провести очередную двенадцатую серию наблюдений. В общем случае, мониторинговые наблюдения проводятся до тех пор, пока два последних значения оседаний первой точки влияния сдвижения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 (фиг. 1) будут отличаться друг от друга не более, чем на 5% от максимальной величины определенных в этих сериях оседаний.

Поскольку вслед за перемещением забоя тоннеля на поверхности перемещается мульда с подобным распределением оседаний, наклонов и кривизны, то данными о распределении этих вертикальных сдвижений и деформаций проведенного мониторинга можно воспользоваться при оценке безопасной подработки других зданий, попадающих в зону влияния строительства этого тоннеля при его дальнейшей проходке.

Способ поясняется следующим примером.

Пример. На одном из участков проходки тоннеля в горно-геологических условиях строительства Санкт-Петербургского метрополитена в зону влияния сдвижений и деформаций от его строительства на земную поверхность попадает жилое здание. Расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до участка земной поверхности, где расположено подрабатываемое здание, составило 46 м. Высота зоны расслоения над кровлей проходимого тоннеля в кембрийских глинах распространяется на высоту порядка 2 м, что является расстоянием по вертикали от кровли проходимого тоннеля до верхней границы зоны расслоения. Угол влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения ( $\delta$ ) для условий строительства Санкт-Петербургского метрополитена составляет  $48^\circ$ . Коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства подземного сооружения ( $a_\eta$ ) из опыта строительства Санкт-Петербургского метрополитена составляет  $a_\eta = 0.73$ .

Допустимый показатель деформаций для здания, попавшего в зону влияния строящегося тоннеля определяется по формуле:

$$[\Delta l_D] = [\Delta l_D]_H \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot n_5, \quad (21)$$

где  $[\Delta l_D]_H$  - нормативный допустимый показатель деформаций, зависящий от назначения здания и его этажности;  $n_1$  - коэффициент, зависящий от грунтовых условий;  $n_2$  - коэффициент, учитывающий материал и толщину наружных стен здания;  $n_3$  - коэффициент, учитывающий износ наружных стен здания;  $n_4$  - коэффициент, учитывающий наличие «жестких» перекрытий, определяется, исходя из того, что здание либо с монолитными железобетонными перекрытиями, либо с деревянными перекрытиями;  $n_5$  - коэффициент, учитывающий форму здания в плане.

Здание, попавшее в зону влияния строительства тоннеля, является жилым и 5-ти этажным, для него  $[\Delta l_D]_H = 130$  мм. Здание построено на грунте с низкой несущей способностью, исходя из этого  $n_1 = 1,2$ . Материал стен - кирпичная кладка, толщина стен - 380 мм, для этих условий  $n_2 = 1,0$ . Износ стен - более 30%, тогда  $n_3 = 0,5$ . Здание с деревянными перекрытиями, поэтому  $n_4 = 1,0$ . Здание простой формы в плане, в этом случае  $n_5 = 1,0$ . Тогда допустимый показатель деформаций для рассматриваемого здания составит величину

$$[\Delta l_D] = 130 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 78 \text{ мм} . \quad (22)$$

В качестве допустимых деформаций для подрабатываемых зданий используется допустимая кривизна, связанная с допустимым показателем деформаций следующим образом:

$$K_D = [\Delta l_D] / l \cdot m_K \cdot H, \quad (23)$$

где  $K_D$  - допустимая кривизна, 1/м;  $[\Delta l_D]$  - допустимый показатель деформаций для здания, мм;  $l$ ,  $H$  - соответственно длина здания, мм, и его высота от подошвы фундамента, м;  $m_K$  - коэффициент условий работы при учете воздействия на здание кривизны.

При допустимом показателе деформаций  $[\Delta l_D] = 78$  мм, длине здания  $l = 80\,000$  мм, его высоте  $H = 30$  м и коэффициенте условий работы  $m_K = 0.5$  допустимое значение кривизны составит:

$$K_D = 78 \text{ мм} / 80\,000 \text{ мм} \cdot 0.5 \cdot 30 \text{ м} = 0.000065 \text{ 1/м} = 0.65 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м} . \quad (24)$$

В процессе строительства тоннеля метро были последовательно заложены в кровлю

и вдоль оси проходимого тоннеля четыре репера подземной профильной линии. Реперы закладывали через интервал проходки тоннеля 12 тубинговых колец, что соответствует, при ширине тубинга 0.76 м, интервалу проходки 9.1 м. Два опорных репера были заложены в 20 - 30 м от первого тоннельного репера подземной профильной линии.

5 Место закладки первого тоннельного репера определялось, исходя из начала влияния проходимого тоннеля на здание по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвигения ( $\delta$ ), проведенного от ближайшего в плане к забою тоннеля контура здания до пересечения с кровлей тоннеля. Точка поверхности, от которой проводится угол  $\delta$ , является первой точкой поверхностной  
10 профильной линии. Заложив в этом месте первый тоннельный репер подземной профильной линии, было проведено первое наблюдение способом нивелирования относительно опорных реперов. В результате было определено его начальное высотное положение (таблица 1).

15 Таблица 1 - высотное положение реперов, заложенных в кровле тоннеля, по данным периодических нивелировок тоннеля

№ репера	Высотное положение реперов, заложенных в кровле тоннеля, м										
	1 серия наблюдений	2 серия наблюдений	3 серия наблюдений	4 серия наблюдений	5 серия наблюдений	6 серия наблюдений	7 серия наблюдений	8 серия наблюдений	9 серия наблюдений	10 серия наблюдений	11 серия наблюдений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20 01	56.209 (начальное)	56.204	56.202	56.185	56.174	56.168	56.162	56.159	56.157	56.156	56.156
02			56.207 (начальное)	56.201	56.199	56.181	56.174	56.167	56.159	56.156	56.154
03					56.212 (начальное)	56.207	56.204	56.187	56.177	56.170	56.166
04							56.210 (начальное)	56.204	56.202	56.186	56.176

25 После того как забой тоннеля переместится на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец, производилась вторая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого тоннельного репера (таблица 1). Сравнение его высотного положения, определенного в этой серии наблюдений с его начальным даст оседание (таблица 2).

30 Таблица 2 - оседания реперов, заложенных в кровле тоннеля, по данным периодических нивелировок

№ репера	Оседания реперов, заложенных в кровле тоннеля, мм										
	1 серия наблюдений	2 серия наблюдений	3 серия наблюдений	4 серия наблюдений	5 серия наблюдений	6 серия наблюдений	7 серия наблюдений	8 серия наблюдений	9 серия наблюдений	10 серия наблюдений	11 серия наблюдений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
35 01		5	7	24	35	41	47	50	52	53	53
02				6	8	26	33	40	48	51	53
03						5	8	25	35	42	46
40 04								6	8	24	34

40 Оседание в первой точке на поверхности после второй серии наблюдений составит величину формула (2):

$$\eta_{1_2} = \frac{1}{a_\eta} \eta_{01_2} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \frac{1}{0.73} 5 \sqrt{\frac{2}{46}} = 1.4 \text{ мм (25)}$$

45 где  $\eta_{1_2}$  - оседание в первой точке на поверхности после проведения второй серии наблюдений (таблица 3);

Таблица 3 - оседания точек профильной линии на земной поверхности

№ ТОЧКИ	Оседания точек поверхности, мм										
	1 серия наблюдений	2 серия наблюдений	3 серия наблюдений	4 серия наблюдений	5 серия наблюдений	6 серия наблюдений	7 серия наблюдений	8 серия наблюдений	9 серия наблюдений	10 серия наблюдений	11 серия наблюдений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1.4	2.0	6.9	10.0	11.7	13.4	14.3	14.9	15.2	15.2
2				1.7	2.3	7.4	9.4	11.4	13.7	14.6	15.2
3						1.4	2.3	7.2	10.0	12.0	13.2
4								1.7	2.3	6.9	9.7

$\eta_{01_2}$  - оседание первого репера, заложенного в тоннеле, после проведения второй серии наблюдений (таблица 2);  $a_\eta$  - коэффициент соответствия горно-геологическим условиям строительства Санкт-Петербургского метрополитена ( $a_\eta = 0.73$ );  $H_1$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля до верхней границы зоны расслоения;  $H_2$  - расстояние по вертикали от кровли проходимого тоннеля (станционной выработки) до земной поверхности.

Для оперативности получения оседаний в первой, второй, третьей и четвертой точках поверхностной профильной линии в процессе проведения мониторинга отдельно была получена величина постоянной составляющей формулы (25):

$$c = \frac{1}{a_\eta} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \frac{1}{0.73} \sqrt{\frac{2}{46}} = 0.286. \quad (26)$$

После того как забой тоннеля переместится на интервал 12 тубинговых колец или на интервал 9.1 м относительно первого заложенного в кровлю тоннеля репера, производилась закладка в кровлю тоннеля второго репера. После его закладки проводилась третья серия наблюдений (нивелировок) по определению высотного положения первого и второго реперов относительно опорных реперов. Для первого подземного репера сравнение его высотного положения, определенного в этой серии наблюдений с его начальным даст оседание (таблица 2). Для второго подземного репера этой текущей серией наблюдений было определено его начальное высотное положение (таблица 1), а по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность, проведенного от второго подземного репера до поверхности, определилось местоположение на поверхности второй точки поверхностной профильной линии (фиг. 1). Оседание в первой точке на поверхности после третьей серии наблюдений определится по формуле (25) с учетом формулы (26), в которую подставлялось оседание первого тоннельного репера, определенное в третьей серии наблюдений (таблица 2):

$$\eta_{1_2} = c \cdot \eta_{01_2} = 0.286 \cdot 7 \text{ мм} = 2 \text{ мм}, \quad (27)$$

где  $\eta_{1_2}$  - оседание в первой точке на поверхности после проведения третьей серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_2}$  - оседание первого репера, заложенного в тоннеле, после проведения третьей серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26).

После того как забой тоннеля переместится относительно второго репера на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец, производится четвертая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого и второго тоннельных реперов (таблица 1). Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 2). Оседание в первой и второй точках на поверхности после четвертой серии составит



$$\eta_{1_4} = c \cdot \eta_{01_4} = 0.286 \cdot 24 \text{ мм} = 6.9 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_4} = c \cdot \eta_{02_4} = 0.286 \cdot 6 \text{ мм} = 1.7 \text{ мм}, \quad (28)$$

где  $\eta_{1_4}, \eta_{2_4}$  - соответственно оседание первой и второй точки на поверхности после проведения четвертой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_4}, \eta_{02_4}$  - соответственно оседание первого и второго репера, заложенных в тоннеле, после проведения четвертой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26). Полученные из четвертой серии наблюдений оседания первой и второй точек поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклон интервала между этими точками как первая производная от оседаний (28):

$$i_{1_4} = \frac{\eta_{1_4} - \eta_{2_4}}{l} = \frac{0.0069 - 0.0017}{9.1} = 0.00057, \quad (29)$$

где  $i_{1_4}$  - наклон интервала между точками один и два поверхностной профильной линии после проведения четвертой серии наблюдений (Таблица 4);

Таблица 4 - наклоны интервалов между точками профильной линии поверхности

№ ТОЧКИ	Наклоны интервалов между точками профильной линии поверхности										
	1 серия наблюдений	2 серия наблюдений	3 серия наблюдений	4 серия наблюдений	5 серия наблюдений	6 серия наблюдений	7 серия наблюдений	8 серия наблюдений	9 серия наблюдений	10 серия наблюдений	11 серия наблюдений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				0.00057	0.00085	0.00047	0.00044	0.00032	0.00013	0.00006	0.000
2						0.00066	0.00078	0.00046	0.00041	0.00028	0.00022
3								0.00060	0.00085	0.00056	0.00038
4											

$\eta_{1_4}, \eta_{2_4}$  - см. формулу (28);  $l$  - интервал закладки реперов подземной профильной линии в кровле тоннеля ( $l = 9.1$  м).

После того как забой тоннеля переместится на интервал 12 тубинговых колец или на интервал 9.1 м относительно второго заложенного в кровлю тоннеля репера, производится закладка в кровлю тоннеля **третьего** репера (фиг. 1) и проводилась пятая серия наблюдений по определению высотного положения первого, второго и третьего реперов относительно опорных реперов (таблица 1). Для первого и второго подземных реперов сравнение их высотных положений, определенных в этой серии с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 2). Для третьего подземного репера этой текущей серии наблюдений было определено его начальное высотное положение (таблица 2), а по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность ( $\delta$ ), проведенного от третьего подземного репера до поверхности, определилось местоположение на поверхности третьей точки поверхностной профильной линии (фиг. 1). Оседания первой и второй точек на поверхности после пятой серии наблюдений определялось из выражений (28), только после подстановки в них оседаний тоннельных реперов, определенных в пятой серии наблюдений:

$$\eta_{1_5} = c \cdot \eta_{01_5} = 0.286 \cdot 35 \text{ мм} = 10 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_5} = c \cdot \eta_{02_5} = 0.286 \cdot 8 \text{ мм} = 2.3 \text{ мм}, \quad (30)$$

где  $\eta_{1_5}, \eta_{2_5}$  - соответственно оседание первой и второй точек на поверхности после проведения пятой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_5}, \eta_{02_5}$  - соответственно оседание первого и второго репера, заложенных в тоннеле, после проведения пятой серии

наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26). Значение наклона на этой стадии мониторинга составит

$$i_{1_5} = \frac{\eta_{1_5} - \eta_{2_5}}{l} = \frac{0.010 - 0.0023}{9.1} = 0.00085, \quad (31)$$

5 где  $i_{1_5}$  - наклон интервала между первой и второй точками поверхностной профильной линии после проведения пятой серии наблюдений (Таблица 4);  $\eta_{1_5}, \eta_{2_5}$  - см. формулу (30);  $l$  - см. формулу (29).

10 После того как забой тоннеля переместился относительно третьего репера на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец, производилась шестая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого, второго и третьего тоннельных реперов (таблица 1). Из сравнения высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями были получены оседания этих реперов (таблица 2). Оседание в первой, второй и третьей точек на поверхности 15 после шестой серии наблюдений определили в соответствии со структурой формул (30):

$$\eta_{1_6} = c \cdot \eta_{01_6} = 0.286 \cdot 41 \text{ мм} = 11.7 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_6} = c \cdot \eta_{02_6} = 0.286 \cdot 26 \text{ мм} = 7.4 \text{ мм},$$

$$20 \quad \eta_{3_6} = c \cdot \eta_{03_6} = 0.286 \cdot 5 \text{ мм} = 1.4 \text{ мм}, \quad (32)$$

где  $\eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}$  - соответственно оседание первой, второй и третьей точки на поверхности после проведения шестой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_6}, \eta_{02_6}, \eta_{03_6}$  - соответственно оседание первого, второго и третьего репера, заложенных в тоннеле, 25 после проведения шестой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26). По полученным из шестой серии наблюдений оседаниям первой, второй и третьей точек на поверхности были определены наклоны интервалов между этими точками как первые производные от оседаний (32):

$$30 \quad i_{1_6} = \frac{\eta_{1_6} - \eta_{2_6}}{l} = \frac{0.0117 - 0.0074}{9.1} = 0.00047;$$

$$i_{2_6} = \frac{\eta_{2_6} - \eta_{3_6}}{l} = \frac{0.0074 - 0.0014}{9.1} = 0.00066 \quad (33)$$

где  $i_{1_6}, i_{2_6}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками поверхностной профильной линии (Таблица 4);  $\eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}$  - см. 35 формулу (32);  $l$  - см. формулу (29). Полученные из шестой серии наблюдений наклоны по оседаниям трех точек профильной линии поверхности позволил, на этой стадии мониторинга, получить кривизну во второй точке профильной линии поверхности как первая производная от наклонов (33) или вторая производная от оседаний (32):

$$40 \quad K_{1_6} = \frac{i_{2_6} - i_{1_6}}{l} = \frac{\eta_{1_6} - 2\eta_{2_6} + \eta_{3_6}}{l} = \frac{0.00066 - 0.00047}{9.1} = 0.21 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (34)$$

где  $K_{1_6}$  - кривизна второй точке профильной линии на поверхности, выявленная в результате проведения шестой серии наблюдений (таблица 5);

Таблица 5 - кривизна в точках профильной линии поверхности

45

№ ТОЧКИ	Кривизна в точках профильной линии поверхности, 1/м										
	1 серия наблюдений	2 серия наблюдений	3 серия наблюдений	4 серия наблюдений	5 серия наблюдений	6 серия наблюдений	7 серия наблюдений	8 серия наблюдений	9 серия наблюдений	10 серия наблюдений	11 серия наблюдений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2						0.21·10 <sup>-4</sup>	0.37·10 <sup>-4</sup>	0.15·10 <sup>-4</sup>	0.31·10 <sup>-4</sup>	0.24·10 <sup>-4</sup>	0.24·10 <sup>-4</sup>
3								0.15·10 <sup>-4</sup>	0.48·10 <sup>-4</sup>	0.31·10 <sup>-4</sup>	0.18·10 <sup>-4</sup>
4											

5  $i_{1_6}, i_{2_6}, \eta_{1_6}, \eta_{2_6}, \eta_{3_6}, l$  - см. формулы (32) и (33). Далее, на этой стадии мониторинговых наблюдений производилось сравнение полученного значения кривизны (34) с допустимой кривизной для здания (24), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. В результате сравнения получено, что  $0.21 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , а это значит, что проходка тоннеля под зданием на этой стадии мониторинга будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации.

10 После того как забой тоннеля переместится на интервал 12 тубинговых колец или на интервал 9.1 м относительно третьего заложенного в кровлю тоннеля репера, была произведена закладка в кровлю тоннеля **четвертого**, последнего, репера (фиг. 1) и проведена седьмая серия наблюдений по определению высотного положения первого, второго, третьего и четвертого реперов относительно опорных реперов (таблица 1). Для первого, второго и третьего подземных реперов сравнение их высотных положений, определенных в этой серии, с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 2). Для четвертого репера этой текущей серии наблюдений это определение является его начальным высотным положением (таблица 1), а по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность ( $\delta$ ), проведенного от четвертого подземного репера до поверхности, определили местоположение на поверхности четвертой точки поверхностной профильной линии (фиг. 1). Оседания первой, второй и третьей точек на поверхности после седьмой серии наблюдений определилось из соотношений (32), в которые вместо оседаний первого, второго и третьего тоннельных реперов, определенных после проведения шестой серии наблюдений, подставлялись оседания этих реперов, определенных в седьмой серии наблюдений (таблица 2):

$$\eta_{1_7} = c \cdot \eta_{01_7} = 0.286 \cdot 47 \text{ мм} = 13.4 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_7} = c \cdot \eta_{02_7} = 0.286 \cdot 33 \text{ мм} = 9.4 \text{ мм},$$

$$\eta_{3_7} = c \cdot \eta_{03_7} = 0.286 \cdot 8 \text{ мм} = 2.3 \text{ мм}, \quad (35)$$

35 где  $\eta_{1_7}, \eta_{2_7}, \eta_{3_7}$  - соответственно оседание первой, второй и третьей точки на поверхности после проведения седьмой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_7}, \eta_{02_7}, \eta_{03_7}$  - соответственно оседание первого, второго и третьего репера, заложенных в тоннеле, после проведения седьмой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26). Полученные из седьмой серии наблюдений оседания первой, второй и третьей точек на поверхности позволяют определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками по формулам (33), подставляя в них значения оседаний первой, второй и третьей точек на поверхности, полученные из седьмой серии наблюдений (Таблица 4).

$$i_{1_7} = \frac{\eta_{1_7} - \eta_{2_7}}{l} = \frac{0.0134 - 0.0094}{9.1} = 0.00044;$$

$$i_{27} = \frac{\eta_{27} - \eta_{37}}{l} = \frac{0.0094 - 0.0023}{9.1} = 0.00078 \quad (36)$$

где  $i_{17}, i_{27}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей точками поверхностной профильной линии после проведения седьмой серии наблюдений (Таблица 4);  $\eta_{17}, \eta_{27}, \eta_{37}$  - см. формулу (27);  $l$  - см. формулу (29). Далее, подставляя в формулу (34) эти наклоны, полученные после проведения седьмой серии наблюдений, определяют кривизну во второй точке профильной линии поверхности как первая производная от наклонов (36) или вторая производная от оседаний (35):

$$K_{17} = \frac{i_{27} - i_{17}}{l} = \frac{\eta_{17} - 2\eta_{27} + \eta_{37}}{l} = \frac{0.00078 - 0.00044}{9.1} = 0.37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (37)$$

где  $K_{17}$  - кривизна второй точке профильной линии на поверхности, выявленная в результате проведения седьмой серии наблюдений (таблица 5);  $i_{17}, i_{27}, \eta_{17}, \eta_{27}, \eta_{37}, l$  - см. формулы (35) и (36). Сравнение полученной кривизны в седьмой серии наблюдений (37) с допустимой кривизной (24) показало, что  $0.37 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , то есть проходка тоннеля под зданием на этой стадии мониторинга будет также безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации. Применять конструктивные меры защиты для подрабатываемого здания не потребуется.

После того как забой тоннеля переместится относительно четвертого репера на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец, производится восьмая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого, второго, третьего и четвертого тоннельных реперов. Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 1). Оседание в первой, второй, третьей и четвертой точках на поверхности после восьмой серии наблюдений определим по аналогии с предыдущей серией наблюдений:

$$\eta_{1g} = c \cdot \eta_{01g} = 0.286 \cdot 50 \text{ мм} = 14.3 \text{ мм};$$

$$\eta_{2g} = c \cdot \eta_{02g} = 0.286 \cdot 40 \text{ мм} = 11.4 \text{ мм},$$

$$\eta_{3g} = c \cdot \eta_{03g} = 0.286 \cdot 25 \text{ мм} = 7.2 \text{ мм},$$

$$\eta_{4g} = c \cdot \eta_{04g} = 0.286 \cdot 6 \text{ мм} = 1.7 \text{ мм}, \quad (38)$$

где  $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек на поверхности после проведения восьмой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01g}, \eta_{02g}, \eta_{03g}, \eta_{04g}$  - соответственно оседание первого, второго, третьего и четвертого реперов, заложенных в тоннеле, после проведения восьмой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26).

Полученные по формуле (38) из восьмой серии наблюдений оседания четырех точек на поверхности позволили определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{1g} = \frac{\eta_{1g} - \eta_{2g}}{l} = \frac{0.0143 - 0.0114}{9.1} = 0.00032;$$

$$i_{2g} = \frac{\eta_{2g} - \eta_{3g}}{l} = \frac{0.0114 - 0.0072}{9.1} = 0.00046$$

$$i_{3g} = \frac{\eta_{3g} - \eta_{4g}}{l} = \frac{0.0072 - 0.0017}{9.1} = 0.00060 \quad (39)$$



где  $i_{1g}, i_{2g}, i_{3g}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками поверхностной профильной линии (Таблица 4);  $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}$  - см. формулу (38);  $l$  - см. формулу (29). По наклонам этой

5 серии наблюдений определяют кривизну во второй и третьей точках профильной линии на поверхности как первая производная от наклонов (39) или вторая производная от оседаний (38):

$$K_{1g} = \frac{i_{2g} - i_{1g}}{l} = \frac{\eta_{1g} - 2\eta_{2g} + \eta_{3g}}{l} = \frac{0.00046 - 0.00032}{9.1} = 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м};$$

$$K_{2g} = \frac{i_{3g} - i_{2g}}{l} = \frac{\eta_{2g} - 2\eta_{3g} + \eta_{4g}}{l} = \frac{0.00060 - 0.00046}{9.1} = 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (40)$$

где  $K_{1g}, K_{2g}$  - соответственно кривизна во второй и третьей точках профильной линии на поверхности, выявленная в результате проведения восьмой серии наблюдений (таблица 5);  $i_{1g}, i_{2g}, i_{3g}, \eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}, l$  - см. формулу (38) и (39). Из полученных в

15 этой серии наблюдений значений кривизны выбирается максимальное и сравнивается с допустимой кривизной для здания (24), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. Сравнение показало, что  $0.15 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , то есть значение кривизны, полученное после проведения восьмой серии наблюдений, не превышает допустимую

20 кривизну для подрабатываемого здания, следовательно проходка тоннеля под ним будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации.

После того как забой тоннеля переместится относительно четвертого репера на интервал 12 тубинговых колец или на интервал 9.1 м, производится девятая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого,

25 второго, третьего и четвертого тоннельных реперов. Сравнение высотных положений этих реперов, определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 1). Оседание в первой, второй, третьей и четвертой точках на поверхности после проведения девятой серии наблюдений определится по аналогии с предыдущей серией наблюдений:

$$\eta_{1o} = c \cdot \eta_{01o} = 0.286 \cdot 52 \text{ мм} = 14.9 \text{ мм};$$

$$\eta_{2o} = c \cdot \eta_{02o} = 0.286 \cdot 48 \text{ мм} = 13.7 \text{ мм},$$

$$\eta_{3o} = c \cdot \eta_{03o} = 0.286 \cdot 35 \text{ мм} = 10.0 \text{ мм},$$

$$\eta_{4o} = c \cdot \eta_{04o} = 0.286 \cdot 8 \text{ мм} = 2.3 \text{ мм}, \quad (41)$$

где  $\eta_{1o}, \eta_{2o}, \eta_{3o}, \eta_{4o}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек на поверхности после проведения девятой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01o}, \eta_{02o}, \eta_{03o}, \eta_{04o}$  - соответственно оседание первого, второго, третьего и четвертого

40 реперов, заложенных в тоннеле, после проведения девятой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26).

Полученные по формуле (41) из девятой серии наблюдений оседания четырех точек на поверхности позволили определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{1o} = \frac{\eta_{1o} - \eta_{2o}}{l} = \frac{0.0149 - 0.0137}{9.1} = 0.00013;$$

$$i_{2o} = \frac{\eta_{2o} - \eta_{3o}}{l} = \frac{0.0137 - 0.0100}{9.1} = 0.00041$$

$$i_{3_9} = \frac{\eta_{2_9} - \eta_{4_9}}{l} = \frac{0.0100 - 0.0023}{9.1} = 0.00085 \quad (42)$$

где  $i_{1_9}, i_{2_9}, i_{3_9}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками поверхностной профильной линии (Таблица 4);  $\eta_{1_9}, \eta_{2_9}, \eta_{3_9}, \eta_{4_9}$  - см. формулу (41);  $l$  - см. формулу (29). По наклонам этой серии наблюдений определяют кривизну во второй и третьей точках профильной линии на поверхности как первая производная от наклонов (42) или вторая производная от оседаний (41):

$$K_{1_9} = \frac{i_{2_9} - i_{1_9}}{l} = \frac{\eta_{1_9} - 2\eta_{2_9} + \eta_{3_9}}{l} = \frac{0.00041 - 0.00013}{9.1} = 0.31 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м};$$

$$K_{2_9} = \frac{i_{3_9} - i_{2_9}}{l} = \frac{\eta_{2_9} - 2\eta_{3_9} + \eta_{4_9}}{l} = \frac{0.00085 - 0.00041}{9.1} = 0.48 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (43)$$

где  $K_{1_9}, K_{2_9}$  - соответственно кривизна во второй и третьей точках профильной линии на поверхности, выявленная в результате проведения девятой серии наблюдений (таблица 5);  $i_{1_9}, i_{2_9}, i_{3_9}, \eta_{1_9}, \eta_{2_9}, \eta_{3_9}, \eta_{4_9}, l$  - см. формулу (41) и (42). Из полученных в этой серии наблюдений значений кривизны выбирается максимальное и сравнивается с допустимой кривизной для здания (24), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. Из сравнения следует, что  $0.48 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , то есть значение кривизны, полученное после проведения девятой серии наблюдений, не превышает допустимую кривизну для подрабатываемого здания, следовательно проходка тоннеля под ним будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации.

После того как забой тоннеля переместится относительно последнего положения, при котором была реализована девятая серия наблюдений, на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец, была произведена десятая серия наблюдений по определению на этот момент времени высотного положения первого, второго, третьего и четвертого тоннельных реперов. Сравнение высотных положений этих реперов (таблица 1), определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 2). Оседание в первой, второй, третьей и четвертой точках на поверхности после проведения девятой серии наблюдений определится по аналогии с предыдущей серией наблюдений:

$$\eta_{1_{10}} = c \cdot \eta_{01_{10}} = 0.286 \cdot 53 \text{ мм} = 15.2 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_{10}} = c \cdot \eta_{02_{10}} = 0.286 \cdot 51 \text{ мм} = 14.6 \text{ мм},$$

$$\eta_{3_{10}} = c \cdot \eta_{03_{10}} = 0.286 \cdot 42 \text{ мм} = 12.0 \text{ мм},$$

$$\eta_{4_{10}} = c \cdot \eta_{04_{10}} = 0.286 \cdot 24 \text{ мм} = 6.9 \text{ мм}, \quad (44)$$

где  $\eta_{1_{10}}, \eta_{2_{10}}, \eta_{3_{10}}, \eta_{4_{10}}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек на поверхности после проведения десятой серии наблюдений (таблица 3);  $\eta_{01_{10}}, \eta_{02_{10}}, \eta_{03_{10}}, \eta_{04_{10}}$  - соответственно оседание первого, второго, третьего и четвертого реперов, заложенных в тоннеле, после проведения десятой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26).

Полученные по формуле (44) из десятой серии наблюдений оседания четырех точек на поверхности позволили определить, на этой стадии мониторинга, наклоны интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$i_{1_{10}} = \frac{\eta_{1_{10}} - \eta_{2_{10}}}{l} = \frac{0.0152 - 0.0146}{9.1} = 0.00006;$$

$$i_{2_{10}} = \frac{\eta_{2_{10}} - \eta_{3_{10}}}{l} = \frac{0.0146 - 0.0120}{9.1} = 0.00028$$

$$i_{3_{10}} = \frac{\eta_{3_{10}} - \eta_{4_{10}}}{l} = \frac{0.0120 - 0.0069}{9.1} = 0.00056 \quad (45)$$

где  $i_{1_{10}}, i_{2_{10}}, i_{3_{10}}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками поверхностной профильной линии (Таблица 4);  $\eta_{1_{10}}, \eta_{2_{10}}, \eta_{3_{10}}, \eta_{4_{10}}$  - см. формулу (44);  $l$  - см. формулу (29). По наклонам этой серии наблюдений определяют кривизну во второй и третьей точках профильной линии на поверхности как первая производная от наклонов (45) или вторая производная от оседаний (44):

$$K_{1_{10}} = \frac{i_{2_{10}} - i_{1_{10}}}{l} = \frac{\eta_{1_{10}} - 2\eta_{2_{10}} + \eta_{3_{10}}}{l} = \frac{0.00028 - 0.00006}{9.1} = 0.24 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м};$$

$$K_{2_{10}} = \frac{i_{3_{10}} - i_{2_{10}}}{l} = \frac{\eta_{2_{10}} - 2\eta_{3_{10}} + \eta_{4_{10}}}{l} = \frac{0.00056 - 0.00028}{9.1} = 0.31 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (46)$$

где  $K_{1_{10}}, K_{2_{10}}$  - соответственно кривизна во второй и третьей точках профильной линии на поверхности, выявленная в результате проведения десятой серии наблюдений (таблица 5);  $i_{1_{10}}, i_{2_{10}}, i_{3_{10}}, \eta_{1_{10}}, \eta_{2_{10}}, \eta_{3_{10}}, \eta_{4_{10}}, l$  - см. формулу (44) и (45). Из полученных в этой серии наблюдений значений кривизны выбирается максимальное и сравнивается с допустимой кривизной для здания (24), попавшего в зону влияния строительства тоннеля. Из сравнения следует, что  $0.31 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , то есть значение кривизны, полученное после проведения десятой серии наблюдений, не превышает допустимую кривизну для подрабатываемого здания, следовательно проходка тоннеля под ним будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации.

Следует отметить, что оседание первой точки на поверхности, полученное в десятой серии наблюдений, отличается от оседания, полученное в девятой серии наблюдений, на величину не более 5% от величины этих оседаний (таблица 3):

$$[(15.2 - 14.9) / 15.2] \cdot 100\% \approx 2\%, \quad 2\% < 5\%.$$

Это означает, что первой точкой влияния сдвижения первого репера подземной профильной линии на земной поверхности 3 и первым репером подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию формирования плоского дна мульды сдвижения (фиг. 1). Для подтверждения, что развитие сдвижений и деформаций в перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды не развиваются и перешли в стадию формирования плоского дна мульды сдвижения, необходимо провести дополнительную серию наблюдений, одиннадцатую по счету.

Одиннадцатая серия наблюдений проводилась после того как забой тоннеля переместился относительно последнего положения, при котором была реализована десятая серия наблюдений, на половину интервала закладки реперов в кровле тоннеля, т.е. на 6 смонтированных тубинговых колец. В результате, на этот момент времени, были определены высотные положения первого, второго, третьего и четвертого тоннельных реперов. Сравнение высотных положений этих реперов (таблица 1), определенных в этой серии наблюдений с их начальными высотными положениями даст оседания этих реперов (таблица 2). Оседание в первой, второй, третьей и четвертой точках на поверхности после проведения одиннадцатой серии наблюдений определится

по аналогии с предыдущей серией наблюдений:

$$\eta_{1_{11}} = c \cdot \eta_{01_{11}} = 0.286 \cdot 53 \text{ мм} = 15.2 \text{ мм};$$

$$\eta_{2_{11}} = c \cdot \eta_{02_{11}} = 0.286 \cdot 53 \text{ мм} = 15.2 \text{ мм},$$

$$5 \quad \eta_{3_{11}} = c \cdot \eta_{03_{11}} = 0.286 \cdot 46 \text{ мм} = 13.2 \text{ мм},$$

$$\eta_{4_{11}} = c \cdot \eta_{04_{11}} = 0.286 \cdot 34 \text{ мм} = 9.7 \text{ мм}, \quad (47)$$

где  $\eta_{1_{11}}, \eta_{2_{11}}, \eta_{3_{11}}, \eta_{4_{11}}$  - соответственно оседание первой, второй, третьей и четвертой точек на поверхности после проведения одиннадцатой серии наблюдений (таблица 3);

10  $\eta_{01_{11}}, \eta_{02_{11}}, \eta_{03_{11}}, \eta_{04_{11}}$  - соответственно оседание первого, второго, третьего и четвертого реперов, заложенных в тоннеле, после проведения одиннадцатой серии наблюдений (таблица 2);  $c$  - см. формулу (26).

Полученные по формуле (47) из одиннадцатой серии наблюдений оседания четырех точек на поверхности позволили определить, на этой стадии мониторинга, наклоны

15 интервалов между этими точками как первая производная от этих оседаний:

$$0.00038 \quad (48)$$

где  $i_{1_{11}}, i_{2_{11}}, i_{3_{11}}$  - соответственно наклон интервала между первой и второй, между второй и третьей, между третьей и четвертой точками поверхностной профильной линии

20 (Таблица 4);  $\eta_{1_{11}}, \eta_{2_{11}}, \eta_{3_{11}}, \eta_{4_{11}}$  - см. формулу (47);  $l$  - см. формулу (29). По наклонам

этой серии наблюдений определяют кривизну во  $i_{1_{11}} = \frac{\eta_{1_{11}} - \eta_{2_{11}}}{l} = \frac{0.0152 - 0.0152}{9.1} =$

0.0;

$$25 \quad i_{2_{11}} = \frac{\eta_{2_{11}} - \eta_{3_{11}}}{l} = \frac{0.0152 - 0.0132}{9.1} = 0.00022$$

$$i_{3_{11}} = \frac{\eta_{3_{11}} - \eta_{4_{11}}}{l} = \frac{0.0132 - 0.0097}{9.1} =$$

поверхности как первая производная от наклонов (48) или вторая производная от оседаний (47):

$$30 \quad K_{1_{11}} = \frac{i_{2_{11}} - i_{1_{11}}}{l} = \frac{\eta_{1_{11}} - 2\eta_{2_{11}} + \eta_{3_{11}}}{l} = \frac{0.00022 - 0.0}{9.1} = 0.24 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м};$$

$$K_{2_{11}} = \frac{i_{3_{11}} - i_{2_{11}}}{l} = \frac{\eta_{2_{11}} - 2\eta_{3_{11}} + \eta_{4_{11}}}{l} = \frac{0.00038 - 0.00022}{9.1} = 0.18 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}, \quad (49)$$

где  $K_{1_{10}}, K_{2_{10}}$  - соответственно кривизна во второй и третьей точках профильной

35 линии на поверхности, выявленная в результате проведения одиннадцатой серии

наблюдений (таблица 5);  $i_{1_{11}}, i_{2_{11}}, i_{3_{11}}, \eta_{1_{11}}, \eta_{2_{11}}, \eta_{3_{11}}, \eta_{4_{11}}, l$  - см. формулу (47) и (48).

Из полученных в этой серии наблюдений значений кривизны выбирается максимальное и сравнивается с допустимой кривизной для здания (24), попавшего в зону влияния

40 строительства тоннеля. Из сравнения следует, что  $0.24 \cdot 10^{-4} < 0.65 \cdot 10^{-4}$ , то есть значение кривизны, полученное после проведения одиннадцатой серии наблюдений, не превышает допустимую кривизну для подрабатываемого здания, следовательно проходка тоннеля под ним будет безопасной, без нарушения его нормальной эксплуатации.

Здесь также следует отметить, что оседание первой точки на поверхности, полученное

45 в одиннадцатой серии наблюдений, отличается от оседания, полученное в десятой серии наблюдений, на величину не более 5% от величины этих оседаний (таблица 3):

$$[(15.2 - 15.2) / 15.2] \cdot 100\% \approx 0\%, \quad 0\% < 5\%.$$

Это означает, что первой точкой влияния сдвижения первого репера подземной



профильной линии на земной поверхности 3 и первым репером подземной профильной линии, заложенного в кровле и вдоль оси проходимого тоннеля 1 зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию формирования плоского дна мульды сдвижения (фиг. 1). То есть, одиннадцатой серией наблюдений подтвердилось, что сдвижения и деформации в перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды не развиваются и перешли в стадию формирования плоского дна мульды сдвижения.

В общем случае, мониторинговые наблюдения проводятся до тех пор, пока два последних значения оседаний первой точки профильной линии поверхности будут отличаться друг от друга не более чем на 5% от величины этих оседаний. В приведенном примере этому условию соответствует полученные два последних значения оседаний не только первой точки профильной линии поверхности, но и два последних значения оседаний второй точки профильной линии поверхности (таблица 3):

$$[(15.2-14.6)/15.2] \cdot 100\% \approx 3.9\%, 3.9\% < 5\%.$$

Поскольку вслед за перемещением забоя тоннеля на поверхности перемещается мульда с подобным распределением оседаний, наклонов и кривизны, то результатами проведенного мониторинга можно воспользоваться при оценке безопасной подработки других зданий, попадающих в зону влияния строительства этого тоннеля при его дальнейшей проходке.

Преимуществом способа является то, что реперы закладывают в кровлю по оси тоннеля по мере его проходки, систематические нивелировки начинают сразу после заложения первого репера, оседания земной поверхности определяют в точках, получаемых пересечением с поверхностью углов влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, проведенным от заложенных реперов тоннеля, величины оседаний этих точек определяют из условия, что отношение оседания любого подземного репера к оседанию соответствующей точки на земной поверхности равно коэффициенту соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля, умноженному на корень квадратный из отношения вертикального расстояния от подземного репера до земной поверхности к вертикальному расстоянию от подземного репера до верхней границы зоны расслоения кровли тоннеля, по полученным из мониторинга оседаниям в точках на поверхности определяют наклоны и кривизну, соответственно как первая и вторая производные от оседаний.

Способ применяют для обеспечения безопасности строительства тоннелей и подземных станционных выработок метро, коллекторов под плотно застроенными участками земной поверхности на основе мониторинговых наблюдений за развитием вертикальных сдвижений и деформаций земной поверхности в зоне влияния этого строительства, оценки безопасного воздействия, получаемых из мониторинга, деформаций на здания, сооружения, расположенные в этой зоне, и выбора мер их охраны.

#### (57) Формула изобретения

Способ мониторинга вертикальных сдвижений и деформаций при строительстве тоннелей метрополитенов, включающий закладку реперов в кровлю по оси тоннеля, проведение наблюдений за вертикальными сдвигами реперов, определение их оседаний, наклонов и кривизны, отличающийся тем, что закладывают четыре репера по мере проходки тоннеля, место закладки первого репера определяют по углу влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения,

который проведен от контура здания до пересечения с кровлей проектного положения тоннеля, остальные реперы закладывают по мере проходки тоннеля через определенный интервал, при этом систематические нивелировки начинают сразу после заложения первого репера, а затем продолжают по мере закладки остальных реперов, оседания 5 земной поверхности определяют в точках, которые получены пересечением с поверхностью углов влияния тоннельной выработки на земную поверхность в главном сечении мульды сдвижения, которое проведено от заложённых реперов в тоннеле, величины оседаний этих точек определяют из условия, что отношение оседания любого подземного репера к оседанию соответствующей точки на земной поверхности равно 10 коэффициенту соответствия горно-геологическим условиям строительства тоннеля, умноженному на корень квадратный из отношения вертикального расстояния от подземного репера до земной поверхности к вертикальному расстоянию от подземного репера до верхней границы зоны расслоения кровли тоннеля, по полученным из мониторинга оседаниям в точках на поверхности определяют наклоны и кривизну, как 15 первое и второе производные от оседаний, мониторинговые наблюдения завершают, когда в двух очередных сериях наблюдений будут получены оседания первой точки на земной поверхности, которые отличаются друг от друга не более чем на 5%, это означает, что этой точкой зафиксированы все стадии развития сдвижений и деформаций перемещающейся вслед за движением забоя тоннеля мульды сдвижения, включая стадию 20 начала формирования плоского дна.

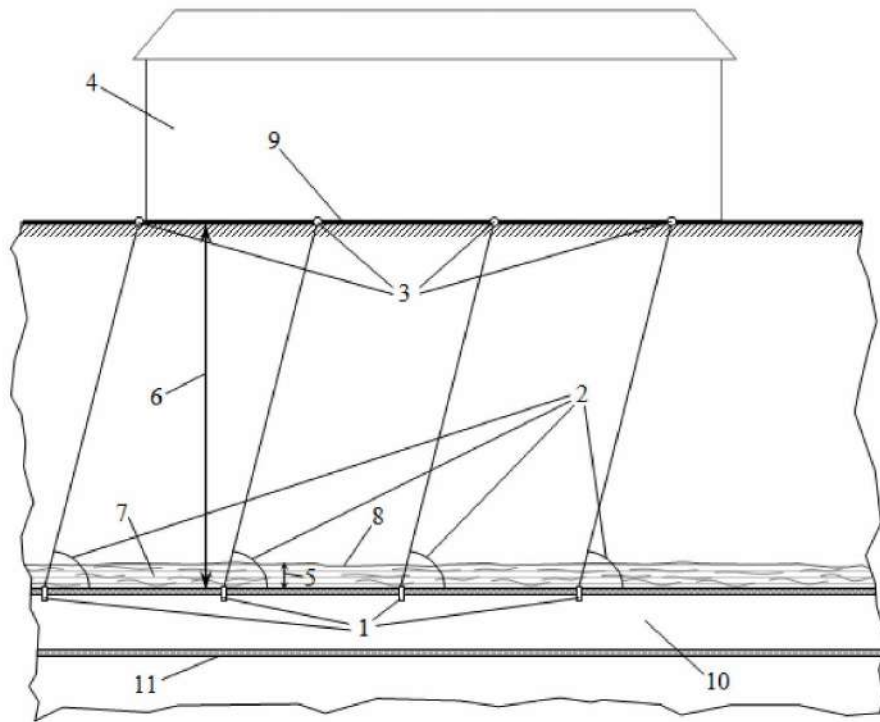
25

30

35

40

45



Фиг. 1