

УДК 528.482

## Комплексный мониторинг геологической среды в пределах горного отвода строящегося тоннеля

П. В. Бобарыкин, Н. Н. Богомолова, Т. М. Немченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Бобарыкин П. В., Богомолова Н. Н., Немченко Т. М. Комплексный мониторинг геологической среды в пределах горного отвода строящегося тоннеля // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 783–792. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-783-792

### Аннотация

**Цель:** Рассмотреть пример осуществления комплексного мониторинга, основанного на сборе и анализе различной информации о перемещениях грунтовой среды для последующего прогноза состояния массива и своевременных корректировок проектных решений. Установить последовательность и периодичность этапов реализации мониторинга для получения своевременной информации о состоянии грунтового массива. Выявить возможные пути статистической обработки результатов наблюдений для обеспечения достоверности прогноза развития деформаций. **Методы:** Бесконтактный метод регистрации электромагнитной эмиссии, георадиолокационный метод, метод сейсмоакустики, геодезический метод, метод тензометрии, статистические методы. **Результаты:** Изучена возможность реализации комплексного мониторинга деформаций на конкретном примере. Описана возможная последовательность этапов мониторинга с применением современных методов и технологий. Показано, что сбор данных о состоянии грунтового массива из разных источников позволяет делать достоверные выводы о безопасности горных работ и проверять их путем использования методов статистического анализа. Рассмотрены результаты реальных наблюдений за деформациями в пределах горного отвода. Даны рекомендации по организации наблюдений в период активизации склоновых процессов. Описана возможность организации мониторинга деформаций с комплексным применением различных средств измерений, таких как инклинометрические зонды, высокоточные нивелиры, электронные тахеометры, тензодатчики. Изучен вопрос необходимости проектирования и создания геодезических опорных сетей, служащих основой для производства наблюдений за смещениями конструкций сооружения и окружающих его объектов. **Практическая значимость:** Результаты могут быть использованы при организации работ по наблюдению за смещениями горных выработок, деформациями дневной поверхности (окружающей застройки), при проектировании наблюдательных станций.

**Ключевые слова:** Деформации, комплексный мониторинг, подземные сооружения, геодезические наблюдения.

## Введение

Геодезические наблюдения за сдвижением земной поверхности от вредного влияния горных работ предназначены для выявления основных закономерностей процесса сдвижения, а также для своевременного принятия мер безопасности и предупреждения аварийных ситуаций. В настоящее время организация мониторинга деформаций включает в себя периодические наблюдения за горизонтальными и вертикальными смещениями установленных марок, а также сопутствующие наблюдения за геологической средой и грунтовыми водами.

Перед началом проведения горных работ выполняют обследование зданий и сооружений, находящихся в мульде сдвижения, чтобы определить состояние их конструкций. Для реализации мониторинга составляется программа работ, которая определяет схемы расположения марок, их тип и конструкцию, точность, методику наблюдений, периодичность и продолжительность.

Система комплексного мониторинга геологической среды возводимого транспортного тоннеля является частью этапов изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружения. Комплексный мониторинг должен осуществляться в пределах границ горного земельного участка, представленного для ведения горных работ, и окружающей застройки.

Комплексный мониторинг осуществляется для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций в период проходки, а также для оперативной разработки рекомендаций по применению тех или иных типов тоннельных конструкций с целью оптимизации проектной документации.

## Материалы и методы

Система комплексного мониторинга деформаций была реализована путем организации наблюдений за смещениями в период строительства двух параллельных тоннелей. В пределах исследуемого района были обнаружены эрозионные, оползневые и другие экзогенные геологические процессы. В районе строительства широко развиты ландшафтные формы оползневого рельефа. В настоящее время фронтальные части оползней глубокого заложения в различной степени перерабатываются вторичными эрозионными и вторичными оползневыми процессами, образуют довольно крутые (40–50°) откосы высотой до 10–12 м. Они являются слабоактивными или неактивными. Поверхности оползней имеют слабонаклонные, плавно бугристые формы рельефа, сильно переработанные позднейшими денудационными процессами. Трасса тоннелей в районе пересекает тектонические нарушения. Материал зон дробления охарактеризован как суглинок твердый, щебенистый, слабонабухающий. Содержание щебня — до 40 %.

При укреплении откосов выемки на припортальных участках необходимо было учитывать сильную тектоническую нарушенность пород с изменением их залегания с очень пологого до субгоризонтального. Пологие залегания по склону пород, сильно тектонически-трещиноватых и выветрелых на припортальных участках, благоприятны для формирования оползней соскальзывания при сооружении любых выемок без опережающих мероприятий инженерной защиты.

В полосе отвода встречаются твердые и полутвердые глины, твердые суглинки с наличием обломочного материала. Гидрогеологические условия района характеризуются выборочным обводнением грунтов коренного субстрата. В ненарушенном залегании он является водоупором. Слабая циркуляция подземных вод происходит по пластам песчаников. Это обусловлено их повышенной пористостью и трещиноватостью по сравнению с аргиллитами.

Основная циркуляция подземных вод происходит по зонам тектонической трещиноватости. Благоприятны участки дробления с условиями,

характерными для зон субмеридиональных тектонических трещин, в зоне трещиноватости коренных пород и в пределах оползней по интервалам блоковых смещений коренных пород, характеризующихся многочисленными трещинами, в том числе приоткрытыми и зияющими. Ситуация усугубляется наличием на этом участке мощной зоны выветривания.

В качестве методов комплексного мониторинга рассматриваются следующие: бесконтактный метод регистрации электромагнитной эмиссии, георадиолокационный метод, метод сейсмоакустики, геодезический метод, метод тензометрии.

### **Методика измерений, обработка данных**

В настоящее время для наблюдений за состоянием грунтового массива при строительстве подземных сооружений часто используется метод, в основе которого лежит обнаружение и фиксирование естественных импульсов электромагнитного поля Земли (далее — ЕИМПЗ) [1].

Он базируется на явлении электромагнитной эмиссии при разрушении геоматериалов и позволяет оперативно оценивать изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива. При наблюдениях осуществляется прием электромагнитных импульсов коренных пород впереди забоя на глубину 10–15 метров по пройденной части тоннелей.

Результаты измерений сравнивают с критериальными величинами и судят об уровне геомеханических напряжений и степени устойчивости призабойной зоны, а также изменении напряженного состояния массива по мере отхода забоя.

В результате изменения напряженно-деформированного состояния в прилегающей к забою тоннелей части горного массива происходят механоэлектрические преобразования. Это вызывает появление свободных электрических зарядов, их накопление и искровые разряды в трещинах породы. Разряды генерируют высокочастотное

электромагнитное излучение в диапазоне частот от 5 до 500 кГц, имеющее импульсный характер.

Содержание обработки результатов таких измерений часто зависит от алгоритмов, заложенных в программное обеспечение, включая алгоритмы опознания и подавления промышленных помех.

При реализации мониторинга по мере продвижения забоя тоннелей на интервал не более двух поперечных сечений выработки выполнялись наблюдения ЕИМПЗ. Для выполнения серии наблюдений в забое выбирался момент времени проходческого цикла, когда в нем отсутствовала работа техники и механизмов. Данные наблюдений анализировались с помощью прикладной программы после их копирования из памяти прибора в компьютер. В качестве показателя степени устойчивости пород на забое были использованы средние значения контролируемых параметров. Графические материалы показывали характер изменения параметров в зависимости от положения забоя. По сочетанию параметров определялась категория устойчивости участка на очередной цикл проходки тоннелей.

По трассе тоннеля выделено 2 оползня, осложняющих проходку. Оползневые склоны требуют контроля для предупреждения возможных оползневых процессов. Для своевременного реагирования на возможные процессы был организован мониторинг напряженно-деформационного состояния оползневых склонов.

Экзогенные процессы солифлюкции и оползнеобразования, степени их проявления обуславливаются несколькими основными причинами: крутизна склонов; литология образующих склон горных пород; влажность, обводненность горного склона. Последние факторы носят ярко выраженный сезонный характер, что необходимо учитывать при планировании наблюдений за состоянием склонов.

Анализ распределения полей напряжений в оползневой массе горных пород показал, что в ее

фронтальной части внизу склона располагается зона максимальных напряжений грунтов. Вверху, в тыловой части породы испытывают растяжение вплоть до образования оползневых рвов. Таким образом, профилируя горный склон сверху вниз и наоборот, можно с помощью измерения естественной электромагнитной эмиссии выделить по повышенным значениям ЕЭМИ фронт оползня и по пониженным — его тыловую часть. Определив тело оползня в плане, по изменениям параметров интенсивности ЕЭМИ возможно предсказать критические периоды развития оползня, когда скорость его может увеличиваться, и он требует тщательных наблюдений.

Шаг по профилям был выбран около 5 метров и в местах проявления оползневых процессов около 1–2 метров между точками. На основании наблюдений были установлены зоны, различные по степени опасности.

Работы по оценке устойчивости оползневых склонов выполнялись ежеквартально, увязывая во времени с основными этапами строительства тоннеля (раскрытия сечения тоннеля по частям) и дополнительно в период интенсивных атмосферных осадков.

Прогноз инженерно-геологических и гидро-геологических условий впереди забоев тоннелей осуществлялся методом сверхширокополосной георадиолокации, использующим в своей основе электромагнитное поле, формируемое электромагнитными импульсами, мощность которых достигает 10 ватт, а частота их следования — 10 кГц.

Метод сверхширокополосного импульсного зондирования (далее — СШП), или георадиолокационный метод, основывается на получении изображения состояния геологической среды по отраженному сигналу [2, 3]. Задачей геофизического обследования является выявление в массиве горных пород зон физико-механических нарушений, интервалов повышенной водонасыщенности пород, осложняющих проходку тоннеля.

Записанный в точках измерения СШП-сигнал подвергается математической обработке. После обработки сигналов интерпретируются полученные данные и строится геолого-геофизический план тоннеля по точкам СШП-зондирования, где отображаются выявленные особенности строения массива горных пород.

Расшифровка сигналов и получение изображения геологического разреза выполняется в камеральных условиях и является наиболее трудоемким этапом работ.

По мере продвижения забоя необходимо уточнять фактические деформационно-прочностные свойства массива для введения их в расчеты крепей и обделок с целью установления наиболее оптимальных конструкций.

Определение фактических деформационно-прочностных характеристик массива в натуральных условиях для введения их в расчеты крепей и обделок реализуют в следующей последовательности: по трассе тоннеля выбирают места с различными инженерно-геологическими условиями для проведения работ; проводят тарировочные изыскания с использованием сейсмического метода; выполняют работы по определению величин скоростей продольных и поперечных волн; осуществляют обработку данных полевых работ с получением деформационно-прочностных характеристик массива. Определение фактических деформационно-прочностных свойств массива выполняют этапами, которые по времени увязываются с интенсивностью проходки, равной 400–500 метрам.

Напряженно-деформированное состояние крепей и обделок контролируется путем установления в них струнных датчиков для измерения местных деформаций. Сечения, оснащаемые деформометрами, располагаются в различных инженерно-геологических условиях. После нанесения набрызг-бетона выполняют нулевой цикл опроса датчиков. После каждого опроса по измеренным деформациям вычисляют напряжения

в крепи. Во время монтажа замерных станций с деформометрами необходимо определить геометрические параметры их установки по высоте тоннелей, расположения друг относительно друга и контура штольни, пикеты по тоннелям, глубину заложения от поверхности земли, инженерно-геологические условия в месте установки, способы проходки.

В процессе проходки на конструкциях временной крепи и конечной обделки устанавливают отражательные пленки, по координатам которых в смежных циклах наблюдений определяют смещение всего контура. Для реализации наблюдений используют электронные тахеометры.

При определении смещения контуров тоннелей число марок и их месторасположение проектируют таким образом, чтобы иметь достаточно информации о перемещениях ограждающих конструкций по всей длине тоннеля. После установки отражательных пленок выполняют нулевой цикл измерений. Сечения с марками располагают через 5 м метров на расстоянии 25 м по обе стороны от сечения, оснащенного деформометрами, а также в местах с нарушенными грунтами.

По мере проходки тоннеля должны оцениваться водопроявления и выявляться участки с максимальными дебетами воды. Для контроля гидростатического давления перед разработкой штроссовой части тоннеля в трех сечениях в предварительно пробуренные скважины через крепь устанавливают датчики.

Для наблюдения за деформациями откосов припортальных участков и участков оползневых склонов создается система наблюдательных станций. Наблюдение за деформациями склонов заключается в определении координат XYZ пространственного положения станции, анализа их изменения во времени и пространстве. Установка реперной сети и первичное координирование выполняется до производства горнопроходческих работ.

Контрольные серии измерений выполняются по мере производства горнопроходческих работ, по результатам которых выявляются величины смещений дневной поверхности и выполняется оценка устойчивости склонов. В каждом цикле наблюдений производится контрольное измерение расстояний между базовыми пунктами. Периодичность контрольных измерений определяется степенью интенсивности оседаний, но должна быть не реже одного раза в 1,5 месяца и должна продолжаться до полного затухания осадок (не менее 3 месяцев после окончания горнопроходческих работ).

Границы деформационных профилей должны выходить за пределы расчетной мульды оседания дневной поверхности.

Марки, координаты которых используют для определения смещений, закрепляют отражательными пленками или поворотными призмами. Местами установки марок служат конечная обделка, временная крепь, порталные части, сваи. По результатам наблюдений вычисляют осадку, продольный и поперечный сдвиг, сближение стен и другие деформации.

Деформационные марки, закрепленные в сводовой части тоннеля, должны закрепляться через каждые 10–20 м. В зоне влияния тоннеля марки устанавливают на ограждающие конструкции и фундаменты окружающих строений [4–6].

Для реализации мониторинга перед началом работ должна быть создана геодезическая опорная сеть, точность которой будет обеспечивать выполнение наблюдений за смещениями.

### **Анализ результатов наблюдений**

Результаты комплексного мониторинга включают в себя разнородную информацию, позволяющую выполнять разносторонний анализ развития деформационных процессов, протека-

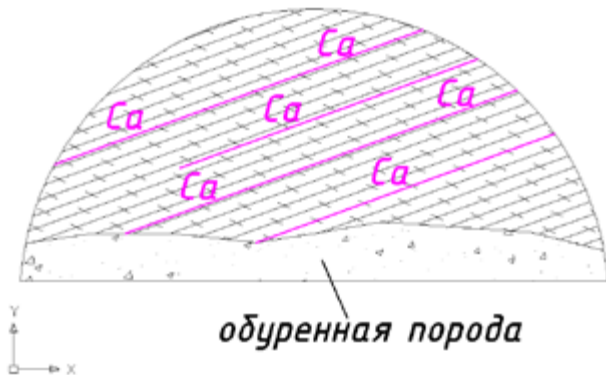


Рис. 1. Результаты геофизических наблюдений

ющих как в пределах окружающей застройки, так и в самом тоннеле. Отчеты по реализации мониторинга содержат информацию об этапах проходческих работ, результатах визуального обследования, зондирования, опросов датчиков, геодезических наблюдений и пр.

Так, например, в результате проведения геофизических работ методами сейсморазведки и электроразведки на припортальном участке тоннелей

были определены границы скольжения, установлены характеристики пород по составу. На рис. 2 представлены аргиллиты темно-серые, плотные, тонкослоистые, имеются редкие прослои песчаников мощностью от 1 мм до 2 см, по тектонике породы трещиноватые по напластованию — 15–20 трещин на 1 пог. м, трещины ровные, гладкие. Секущая трещиноватость представлена двумя системами трещин: субвертикальная, параллельная плоскости забоя, трещины ровные прерывистые; вторая система трещин располагается под углом около  $30^\circ$  к плоскости забоя и углом падения примерно  $70^\circ$ . Трещины ровные, гладкие, закрытые. По напластованию прослеживаются прожилки кальцита мощностью от 1 мм до 5 мм. Водоприток в виде слабого межпластового высачивания с кровли.

На рис. 2 по результатам обработки данных локации картированы зоны разгрузки напряжений в массиве. Прочность, приведенная к шкале  $R_{сж}$ ,

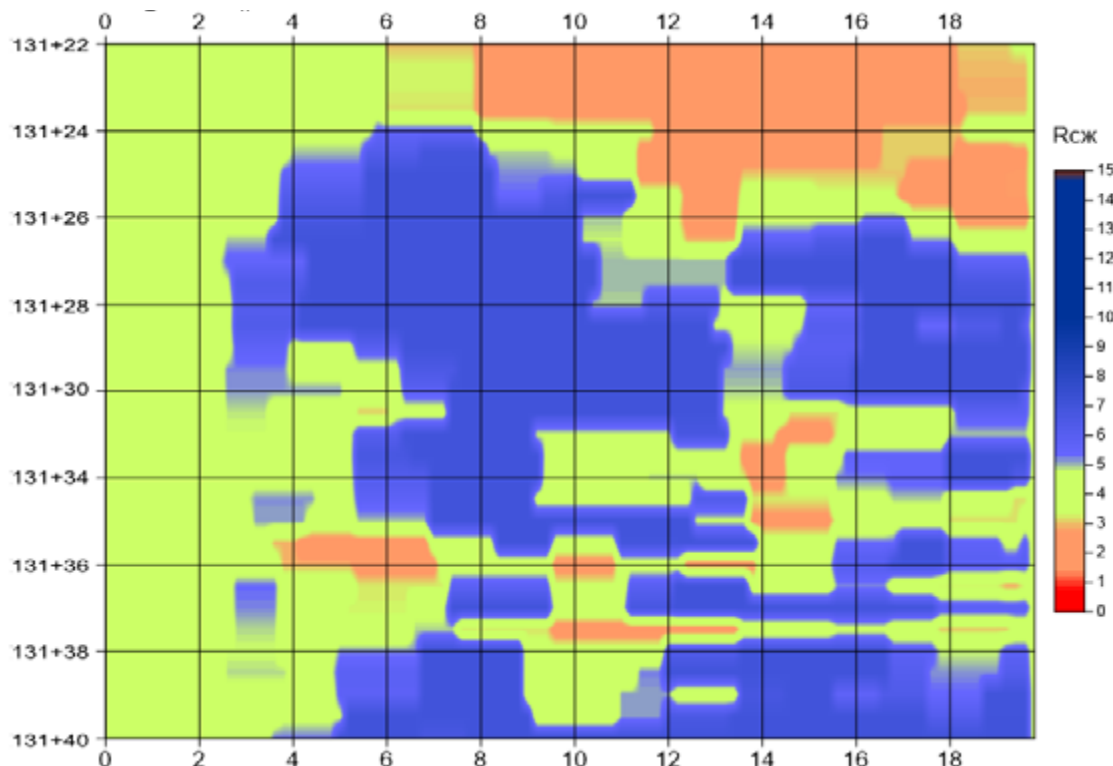


Рис. 2. Распределение динамической прочности, приведенной к  $R_{сж}$

## Результаты геодезического мониторинга деформаций

Марка 4									
Цикл наблюдений	$X$	$\Delta$ общ. +/- мм	$\Delta$ сут. +/- мм	$Y$	$\Delta$ общ. +/- мм	$\Delta$ сут. +/- мм	$H$	$\Delta$ общ. +/- мм	$\Delta$ сут. +/- мм
0	484,331	0	0	867,981	0	0	57,046	0	0
1	484,329	-2	-2	867,980	-1	-1	57,047	1	1
2	484,329	-2	0	867,979	-2	-1	57,048	2	1
3	484,331	0	2	867,981	0	2	57,051	5	3
4	484,329	-2	-2	867,975	-6	-6	57,052	6	1
5	484,326	-5	-3	867,976	-5	1	57,053	7	1
6	484,327	-4	1	867,975	-6	-1	57,052	6	-1
7	484,325	-7	-2	867,971	-10	-4	57,057	11	5
8	484,326	-5	1	867,975	-6	4	57,050	4	-7
9	484,326	-5	0	867,970	-11	-5	57,053	7	3
10	484,325	-6	-1	867,972	-9	2	57,052	6	-1
11	484,325	-6	0	867,972	-9	0	57,051	5	-1
12	484,327	-4	2	867,977	-4	5	57,053	7	2
13	484,327	-4	0	867,972	-9	-5	57,054	8	1
14	484,322	-9	-5	867,971	-10	-1	57,054	8	0
15	484,327	-4	5	867,969	-12	-2	57,053	7	-1
16	484,329	-2	2	867,974	-7	5	57,058	12	5
17	484,328	-3	-1	867,975	-6	1	57,052	6	-6
18	484,328	-3	0	867,964	-17	-11	57,053	7	1
19	484,328	-3	0	867,962	-19	-2	57,055	9	2
20	484,337	6	9	867,939	-42	-23	57,033	-13	-22
21	484,339	8	2	867,932	-49	-7	57,025	-21	-8
22	484,335	4	-4	867,922	-59	-10	57,023	-23	-2
23	484,332	1	-3	867,918	-63	-4	57,018	-28	-5
24	484,334	3	2	867,921	-60	3	57,018	-28	0
25	484,334	3	0	867,923	-58	2	57,023	-23	5
26	484,344	13	10	867,914	-67	-9	57,023	-23	0
27	484,345	14	1	867,916	-65	2	57,028	-18	5
28	484,354	23	9	867,906	-75	-10	57,015	-31	-13
29	484,352	21	-3	867,911	-70	5	57,025	-21	10
30	484,353	22	1	867,915	-66	4	57,017	-29	-8

варьируется в интервале 2,7–4,3 МПа в зоне активной разгрузки (до 6 м) и 4,1–7 МПа далее 6 м.

В период сооружения тоннеля наблюдения геодезическими методами выполнялись еженедельно, при необходимости частота циклов увеличивалась. При определении смещений порталных частей использовался способ свободного стационарирования [7]. Координаты марок определялись с помощью электронного

тахеометра, координаты которого получали обратной засечкой с ошибкой, не превышающей 5 мм.

Рассмотрим один из участков мониторинга в районе порталной зоны возводимого тоннеля. Суточные и накопленные величины смещений по осям координат, вычисленные по координатам деформационной марки 4, представлены в таблице.

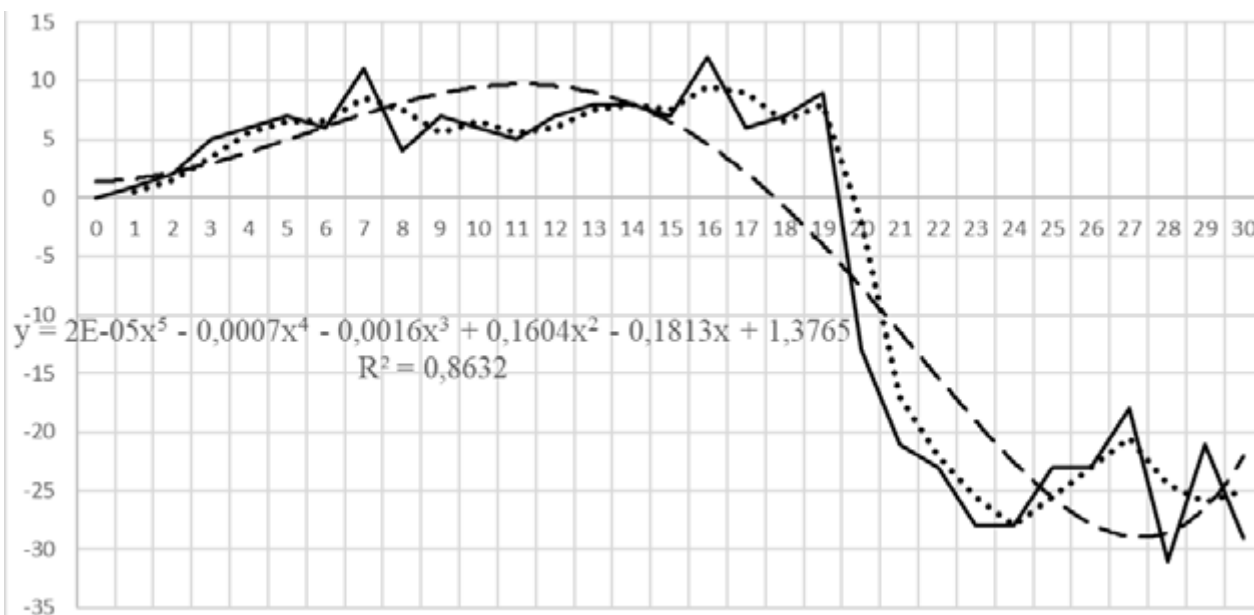


Рис. 3. Модель развития осадки

Для исключения мелких случайных колебаний и достоверного прогноза было произведено сглаживание рядов (точечный пунктир рис. 3) [8, 9]. В результате подбора прогнозной модели была определена полиномиальная функция (штриховой пунктир рис. 3). Перед экстраполяцией временного ряда по тенденции необходимо проверить остатки на нормальность распределения [10, 11].

Таким образом, анализ результатов комплексного мониторинга позволяет определять не только величины деформаций традиционными геодезическими замерами, но и определять расчетную устойчивость пород, мощность зоны разгрузки напряжений, глубину участков с понижением прочностных характеристик, гидрогеологические условия.

### Заключение

При реализации комплексного мониторинга деформаций на различных этапах строительства данные наблюдений сравниваются с проектными (расчетными), после чего осуществляется оценка работы строительных конструкций, анализируется гидрогеологическая ситуация в массиве, его устойчивость. При необходимо-

сти результаты мониторинга используются для оперативного принятия решения о внесении изменений в проектную документацию при расчете конструкций обделки. Сбор данных о состоянии грунтового массива из разных источников позволяет делать достоверные выводы о безопасности горных работ и проверять их путем использования методов статистического анализа.

### Библиографический список

1. Романевич К. В. Горно-экологический мониторинг при строительстве транспортных тоннелей в г. Сочи / К. В. Романевич // Вестник СГУТиКД. — 2011. — Вып. 3. — С. 272–278.
2. Bezrodniy K. P. An advanced underground imaging radar / K. P. Bezrodniy, V. B. Boltinzev, V. M. Efanov et al. // Proceedings of the World Tunnel Congress '99. — Norway, Oslo, 1999. — Pp. 31–34.
3. Пур Х. Ф. Разработка методов анализа деформаций подземных сооружений: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — МИИГАиК, 2007. — 24 с.
4. Подземное строительство. Современные методы устройства котлованов // Стройматериал. — 2011. — № 2. — URL: <http://psk-holding.ru/library/publication/>.



5. Технические рекомендации по научно-техническому сопровождению и мониторингу строительства большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений: ТР 182-08. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/54/54692/index.htm>.
6. Зайцев А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев и др. — М.: Недра, 1991. — 272 с.
7. Курошев Г. Д. Геодезия и география / Г. Д. Курошев. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та, 1999. — 372 с.
8. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений: МДС 13-22.2009. — URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59892/>.
9. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стюарт / М.: Наука, 1976. — Т. 3. — 736 с.
10. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 656 с.
11. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. — М.: Мир, 1976. — 757 с.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 04.08.2022

#### Контактная информация:

БОБАРЫКИН Павел Владимирович — канд. техн. наук, доц.; [65465@pgups.ru](mailto:65465@pgups.ru)

БОГОМОЛОВА Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доц.; [nbogomolova@pgups.ru](mailto:nbogomolova@pgups.ru)

НЕМЧЕНКО Татьяна Михайловна — канд. техн. наук, доц.

## Integrated Monitoring of Geological Environment in the Limits of Mining Allotment of Being Constructed Tunnel

P. V. Bobarykin, N. N. Bogomolova, T. M. Nemchenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Bobarykin P. V., Bogomolova N. N., Nemchenko T. M. Integrated Monitoring of Geological Environment in the Limits of Mining Allotment of Being Constructed Tunnel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 783–792. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-783-792

### Summary

**Purpose:** To consider the example of the implementation of integrated monitoring based on various information collection and analysis on soil environment movements for further prognosis on massif state and timely corrections of construction decisions. To establish sequence and rhythm of monitoring implementation stages for to obtain timely information on soil massif state. To reveal possible ways of statistical processing of observation results for to ensure deformation development prediction reliability. **Methods:** No-touch registration method for electromagnetic emission, ground penetrating radar method, seismic-acoustics method, geodetic method, strain gauge method, statistical methods. **Results:** Possibility to embody deformation complex monitoring on certain example has been studied. Possible sequence of monitoring stages with the use of modern methods and technologies has been described. It has been shown that the collection of data on soil massif state from various sources makes it possible to make reliable conclusions on mining operation safety and to verify them by using statistical analysis methods. The results of real observations of deformations in the limits of mining allotment have been considered. Recommendations are given on observation organization during flank process activation.

It has been described the possibility of deformation monitoring organization with complex use of various means for measurement such as inclinometric probes, high precision levels, electronic tacheometers, load cells. Geodetic monitoring (geodetic measurements) of deformations during tunnel construction should be carried out. The paper considers the need to project and create geodetic monitoring planned-altitude networks serving as a base to make observations with required accuracy on offset of construction's structures and objects surrounding the construction. **Practical significance:** The results can be used in job organization to monitor offsets in excavation outputs, day surface (surrounding buildings) deformations, in the design of observation stations.

**Keywords:** Deformations, integrated monitoring, underground constructions, geodetic observations.

## References

1. Romanevich K. V. Gorno-ekologicheskii monitoring pri stroitel'stve transportnykh tonneley v g. Sochi [Mining and environmental monitoring during the construction of transport tunnels in Sochi]. *Vestnik SGUTiKD* [Vestnik SGUTiKD]. 2011, I. 3, pp. 272–278. (In Russian)
2. Bezrodnii K. P., Boltinzev V. B., Efanov V. M., Iljakhin V. N., Tolstobrov M. G. An advanced underground imaging radar. Proceedings of the World Tunnel Congress'99. Norway, Oslo. 1999, pp. 31–34.
3. Pur Kh. F. *Razrabotka metodov analiza deformatsiy podzemnykh sooruzheniy. Kand. Diss* [Development of methods for analysis of deformations of underground structures. Cand. Diss]. MIIGAiK Publ., 2007. 24 p. (In Russian)
4. Podzemnoe stroitel'stvo. Sovremennye metody ustroystva kotlovanov [Underground construction. Modern methods of construction of pits]. *Stroy metall* [Story metall]. 2011, I. 2. Available at: <http://psk-holding.ru/library/publication/> (In Russian)
5. *Tekhnicheskie rekomendatsii po nauchno-tekhnikeskomu soprovozhdeniyu i monitoringu stroitel'stva bol'sheproletnykh, vysotnykh i drugikh unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy: TR 182-08* [Technical recommendations on scientific and technical support and monitoring of the construction of large-span, high-rise and other unique buildings and structures: TR 182-08]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/54/54692/>. (In Russian)
6. Zaytsev A. K. *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy* [Geodetic methods for studying the deformations of structures]. Moscow: Nedra Publ., 1991. 272 p. (In Russian)
7. Kuroshev G. D. *Geodeziya i geografiya* [Geodesy and geography]. St. Petersburg: S.Peterb. gos. un-t Publ., 1999. 372 p. (In Russian)
8. *Metodika geodezicheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysotnykh i unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy: MDS 13-22.2009* [Methodology for geodetic monitoring of the technical condition of high-rise and unique buildings and structures: MDS 13-22.2009]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59892/>. (In Russian)
9. Kendall M. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady* [Multivariate statistical analysis and time series]. Moscow: Nauka Publ., vol. 3, 1976. 736 p. (In Russian)
10. Ayvazyan S. A. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow: "Yuniti" Publ., 1998. 656 p. (In Russian)
11. Anderson T. *Statisticheskiy analiz vremennykh ryadov* [Statistical analysis of time series]. Moscow: Mir Publ., 1976. 757 p. (In Russian)

Received: August 04, 2022

Accepted: September 16, 2022

### Author's information:

Pavel V. BOBARYKIN — PhD in Engineering,

Associate Professor; 65465@pgups.ru

Natalia N. BOGOMOLOVA — PhD in Engineering,

Associate Professor; nbogomolova@pgups.ru

Tatiana M. NEMCHENKO — PhD in Engineering,

Associate Professor