

**Н.Н.БОГОМОЛОВА**, ассистент, *geodesy.pgups@gmail.com*  
*Петербургский государственный университет путей сообщения*

**N.N.BOGOMOLOVA**, assistant lecturer, *geodesy.pgups@gmail.com*  
*Petersburg State Transport University*

## МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА ТОННЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Предложена методика комплексного мониторинга тоннеля. Представлены результаты и выводы экспериментальных исследований деформаций при сооружении тоннеля, а именно: исследования деформаций грунта и тоннельных конструкций. Рассмотрены вопросы обработки результатов измерений с помощью корреляционного анализа и анализа временных рядов. В частности, показан алгоритм совместной обработки измерений и произведен подбор прогнозной модели.

**Ключевые слова:** мониторинг деформаций, инклинометры, тоннели.

## THE MONITORING METHODOLOGY TUNNELS BASED INTEGRATED APPLICATIONS GEODETIC MEASUREMENT MEANS AND METHODS OF STATISTICAL

The technique of complex monitoring tunnel. The results and conclusions of experimental studies in the construction of the tunnel deformation, namely, research, ground deformation and tunnel structures. The problems of processing the results of measurements using correlation analysis and time series analysis. In particular, it shows the algorithm of joint processing of measurements and made the selection of the forecast model.

**Key words:** monitoring deformations, inclinometers, tunnels.

**Введение.** Развитие тоннелестроения в новейшей истории России характеризуется стремительным ростом освоения подземного пространства. Лишь в рамках подготовки к зимней Олимпиаде-2014 для доставки зрителей и участников соревнований на горные стадионы Красной Поляны планируется построить крупный комплексный транспортный узел, в состав которого входят шесть железнодорожных тоннелей, три автодорожных тоннеля, три сервисно-эвакуационных тоннеля. Общая длина строящихся тоннелей 29,4 км [1]. Несомненно, столь широкий размах тоннелестроения связан с совершенствованием отечественных технологий и

модернизацией средств механизации. Ведущие строительные корпорации страны активно перенимают зарубежный опыт и успешно адаптируют европейские технологии тоннелепроходческих работ к российским условиям. Все чаще реализуются уникальные проекты в сложных гидрогеологических условиях или проекты, предусматривающие строительство вблизи исторических центров городов (автодорожный тоннель в историческом районе Лефортово, г.Москва), что требует ответственного геодезического сопровождения. Пренебрежение особыми условиями строительства тоннелей зачастую является причиной возникновения аварий с

последующим разрушением и выходом из строя несущих конструкций сооружения.

Наибольшую опасность при строительстве тоннеля представляет неконтролируемое горное давление и возможность прорыва водогрунтовых масс. Проблема защиты несущих конструкций от разрушающего действия воды решается рациональным выбором типа гидроизоляции. Более актуальным вопросом является возможность установления контроля за изменением горного давления в грунтовом массиве. Такую возможность в полной мере позволяет реализовать мониторинг грунтового массива и тоннельных конструкций. Однако руководящие строительные документы [2, 6] рекомендуют устаревшие на сегодняшний день методики наблюдений за деформациями, не отвечающие современному уровню развития геодезических приборов (приемники GPS/ГЛОНАСС, высокоточные электронные тахеометры, электронные нивелиры).

Систему мониторинга тоннеля предлагается рассматривать как комплекс, состоящий из измерительных приборов и аппарата сбора, хранения и обработки полевой информации методами статистического анализа: с помощью высокоточного электронного тахеометра и системы отражательных пленок, установленных на ответственных конструкциях сооружения, реализуется сбор информации о перемещениях самого тоннеля. Процессы деформаций, происходящие в грунтовом массиве зоны влияния тоннеля, достаточно точно выявляются путем внедрения в грунтовый массив инклинометрических скважин и опроса их с установленной периодичностью. После сбора полевой информации возникает необходимость в анализе направлений и скоростей зафиксированных перемещений. Для этого предлагается использовать методы статистического анализа: корреляционный анализ, позволяющий определить достоверность результатов измерений, и анализ временных рядов для наилучшей аппроксимации функции изменения деформаций во времени и подбора адекватной прогнозной модели.

**Корреляционный анализ результатов тахеометрических и инклинометрических**

**измерений деформаций тоннеля.** На объекте строительства «г.Сочи. Дублер Курортного проспекта. Тоннели 8, 8а» в соответствии с программой мониторинга на одном из порталных участков (постоянные железобетонные конструкции – обвязочный ростверк, свайная стена) были установлены отражательные марки (16 шт.). Их координаты были определены в системе координат объекта со средней квадратической ошибкой измерений 2 мм. Пункты исходной сети закреплялись в виде пунктов принудительного центрирования вне зоны влияния тоннеля, на расстоянии более 100 м от портала. Наблюдения проводились с периодичностью три раза в неделю, а в период активизации подвижек – каждый день.

В то же время в грунтовый массив были погружены инклинометрические скважины глубиной от 30 до 50 м (3 шт.). Их расположение было выбрано в местах наиболее вероятного возникновения склоновых процессов вблизи портала. С периодичностью раз в неделю производился опрос скважин с помощью инклинометрического зонда, фиксирующего перемещение грунта через каждый метр. Наблюдения проводились в течение трех месяцев, результаты измерений подвергались анализу с целью исключения грубых ошибок. По результатам тахеометрических измерений были установлены значения и направления деформаций тоннельных конструкций. Информация о глубине залегания слабонесущих пластов грунтов, расположенных вблизи порталов тоннелей, и границах их скольжения была получена в результате опросов инклинометрических скважин.

Для установления достоверности результатов измерений данные, полученные в результате тахеометрических и инклинометрических измерений (см. таблицу), подвергались корреляционному анализу. Корреляционный анализ – это совокупность методов, позволяющих установить силу и тесноту связи между двумя ( $\delta$  и  $\lambda$ ) и более переменными. В качестве переменной  $\delta$  была выбрана деформация, зафиксированная в результате тахеометрических измерений (вычислена для каждого цикла измерений

**Результаты тахеометрических и инклинометрических измерений деформаций**

№ п/п	Смещение скважины I 1, мм	Смещение марки S 18, мм	Смещение марки S 22, мм	Смещение марки 1, мм	Смещение марки 2, мм
1	4,0	45,5	40,9	97,6	96,3
2	5,7	44,5	39,9	96,3	95,4
3	7,3	43,6	39,0	95,0	94,6
4	9,0	42,6	38,1	93,7	93,0
5	9,4	43,3	38,6	96,1	94,8
6	9,9	42,5	40,1	95,7	95,1
7	10,4	41,8	41,6	95,3	95,4
8	10,8	41,0	43,0	94,9	95,7
9	11,2	40,3	44,5	94,5	96,0
10	11,7	40,7	44,0	94,2	94,9
11	12,2	41,2	43,6	93,9	93,9
12	12,6	41,6	43,1	93,6	92,9
13	13,1	41,6	45,3	93,5	93,2
14	13,5	41,7	47,7	93,3	93,6
15	13,9	41,8	49,8	93,2	94,0
16	14,4	41,8	52,0	93,1	94,3
17	14,9	41,8	52,0	95,1	99,1
18	15,4	41,8	52,1	97,2	99,5
19	15,9	41,8	52,1	99,2	99,8
20	16,4	46,6	51,8	99,7	100,4
21	16,9	51,5	51,2	100,2	101,3
22	17,5	56,3	50,8	100,7	121,3
23	17,9	61,1	50,4	101,1	100,6
24	18,5	56,7	52,0	121,6	121,3
25	19,0	53,3	50,4	107,6	106,7
26	19,8	56,4	51,2	100,4	100,5
27	20,0	59,6	51,9	85,6	85,3
28	20,6	62,0	59,0	105,4	101,4
29	21,0	67,0	62,4	111,6	110,8
30	21,4	68,4	64,1	125,1	123,0

по формуле  $\delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ , где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – перемещение отражательной пленки по осям  $x$  и  $y$  соответственно, мм), в качестве переменной  $\lambda$  – перемещения, зафиксированные инклинометрическим зондом, мм. Теснота связи устанавливалась между деформациями инклинометрической скважины и перемещениями светоотражающих марок, закрепленных на конструктивах тоннеля и расположенных вблизи рассматриваемой инклинометрической скважины.

В качестве примера произведен расчет коэффициента корреляции  $r_{\delta\lambda}$  и оценка его статистической значимости для скважины I 1 и четырех ближайших к скважине марок (размещение марок и скважины приведено на рис.1).

Коэффициент корреляции

$$r_{\delta\lambda} = \frac{\sum (\delta_i - \bar{\delta})(\lambda_i - \bar{\lambda})}{\sqrt{\sum (\delta_i - \bar{\delta})^2 \sum (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}}$$

где  $\delta_i$  – значения, принимаемые в первой выборке;  $\lambda_i$  – значения, принимаемые во второй выборке;  $\bar{\delta}$  – средняя по первой выборке результатов измерений;  $\bar{\lambda}$  – средняя по второй выборке результатов измерений.

Коэффициенты корреляции переменных следующие:

Переменные	Коэффициент корреляции
I1-S18	0,75
I1-S22	0,89
I1-1	0,53
I1-2	0,54

Оценка коэффициента корреляции, вычисленная по ограниченной выборке, практически всегда отличается от нуля. Но из этого еще не следует, что коэффициент корреляции генеральной совокупности также отличен от нуля. Требуется оценить значимость выборочной величины коэффициента или, в соответствии с постановкой задач проверки статистических гипотез, проверить гипотезу о равенстве нулю коэффициента корреляции. Если гипотеза  $H_0$  о равенстве нулю коэффициента корреляции ( $H_0 : r_{\delta\lambda} = 0$ ) будет отвергнута, то выборочный коэффициент значим, а соответствующие величины связаны линейным соотношением. Если гипотеза  $H_0$  будет принята, то оценка коэффициента не значима, и величины линейно не связаны друг с другом.

В качестве критерия проверки нулевой гипотезы  $H_0$ , как правило, применяют случайную величину  $t$  – критерий Стьюдента. Если модуль коэффициента корреляции относительно далек от единицы, то величина  $t$  при справедливости нулевой гипотезы распределена по закону Стьюдента с  $(n - 2)$ -мя степенями свободы. Конкурирующая гипотеза  $H_1$  соответствует утверждению, что значение коэффициента корреляции не равно нулю (больше или меньше нуля). Поэтому критическая область двусторонняя.

Проверка гипотезы  $H_0$  о равенстве нулю генерального коэффициента парной корреляции двумерной случайной величины производится в следующей последовательности: вычисляется значение статистики  $t_p$ , при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  для двусторонней области определяется точка распределения Стьюдента  $t_{кр}$ ; если условие  $t_p \geq t_{кр}$ , то нулевая гипотеза отвергается, что свидетельствует о существенной статистической зависимости между переменными  $\delta$  и  $\lambda$ .

Для оценки статистической значимости вычисленных коэффициентов корреляции [4] произведен расчет и сравнение критериев Стьюдента:

Марка	$t_p / t_{кр}$
S 18	6,021/2,05
S 22	10,588/2,05
1	3,335/2,05
2	3,406/2,05

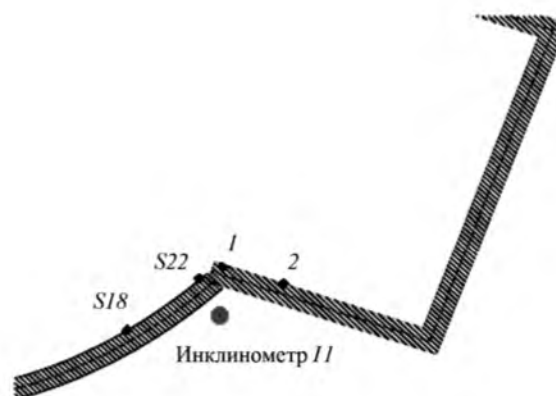


Рис. 1. Размещение измерительного оборудования

Во всех четырех комбинациях переменных установлена тесная статистически значимая связь. Вычисленные коэффициенты корреляции имеют положительные значения во всех четырех комбинациях. Это означает, что рост деформаций в грунте сопровождается ростом деформаций, развивающихся в конструкциях тоннеля, и наоборот: если перемещения грунтового массива замедляются, то наблюдается затухание деформационных процессов и в конструкциях тоннеля.

Следует отметить, что возможен расчет множественного коэффициента корреляции. Для выбранной совокупности (четыре отражательные пленки и одна инклинометрическая скважина) он будет равен 0,91. Однако в корреляционную модель не рекомендуется включать взаимосвязанные факторы. Если парный коэффициент корреляции между двумя факторами больше 0,85 (в рассмотренном примере все переменные имеют тесную связь), то по правилам корреляционного анализа один из них необходимо исключить, иначе произойдет искажение результатов анализа [5]. Применительно к данной совокупности двумерный анализ и расчет парного коэффициента корреляции позволяет более точно судить о расположении участков активизации и затухания склоновых процессов.

Таким образом, корреляционный анализ результатов комплексного мониторинга решает задачу установления их достоверности. Следующим этапом комплексного мониторинга тоннеля является составление прогнозной модели.

**Прогнозирование состояния системы «тоннель – грунтовый массив».** Как известно, мониторинг – это наблюдение, оценка и прогноз состояния объекта исследования. Для составления прогноза напряженно-деформированного состояния тоннеля на стадии сооружения предлагается рассматривать накопленную полевую информацию как упорядоченную последовательность измерений, или временной ряд. Рассмотрим задачу анализа временного ряда на примере перемещений отражательной пленки S 18 (рис.2). Анализ временного ряда включает в себя, в общем случае, разложение ряда на три компоненты: тренд, эффект

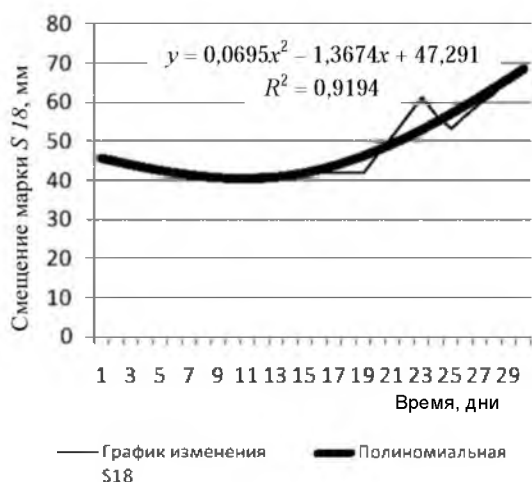
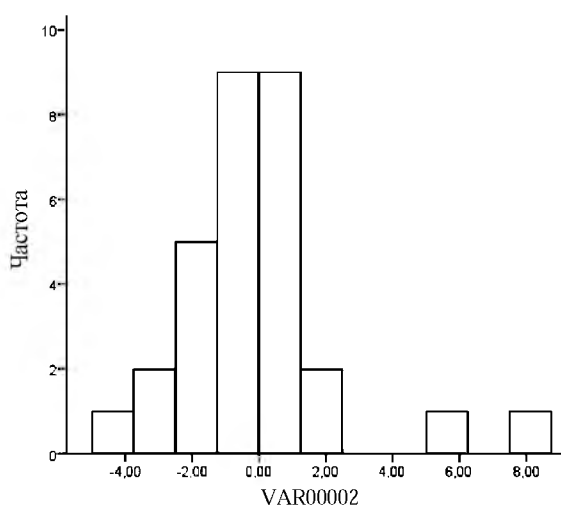


Рис.2. Анализ временного ряда



Среднее стандартное отклонение равно 2,483  
N = 30

Рис.3. Диаграмма распределения остатков

сезонности, случайная составляющая. Поскольку наблюдения за деформациями производились в течение трех месяцев, выделить сезонность в данном случае нельзя. Используя метод наименьших квадратов, можно получить полином, наиболее точно (среди полиномов) отражающий эволюцию членов ряда. Однако график функции изменения деформации во времени имеет множество пиков и описать его наиболее точно можно, лишь используя полином наивысшего порядка (рис.2). В то же время повышение точности за счет усложнения трендовой модели влечет за собой неустойчивость коэффициентов полинома к выборочным ошибкам [3]. В результате в качестве трендовой модели, описывающей характер изменений перемещения геодезической марки S 18, выбран полином 2-й степени. Об адекватности построенной модели свидетельствует коэффициент детерминации, близкий к единице ( $R^2 = 0,919$ ).

После исключения трендовой составляющей возникает необходимость анализа остатков (разность эмпирических и теоретических значений ряда) на нормальность («белый шум») с целью выявления периодической составляющей, которую необходимо будет учесть при составлении модели прогноза.

Анализ остатков на нормальность производился при помощи одновыборочного теста Колмогорова – Смирнова (также известного как критерий согласия Колмогорова – Смирнова):

Переменная N	30
Нормальные параметры <sup>a, b</sup>	
Среднее	-0,0054
Стандартное отклонение	2,48282
Разности экстремумов	
Модуль	0,194
Положительные	0,194
Отрицательные	-0,108
Статистика Z Колмогорова – Смирнова	1,060
Асимптотическое значение	0,211

Получены характеристики распределения, подтверждающие его близость к нормальному распределению. Отклонение от

нормального распределения считается существенным при значении  $p < 0,05$ ; в этом случае для соответствующих переменных следует применять непараметрические тесты. В рассматриваемом примере (значение  $p = 0,211$ ), т.е. вероятность ошибки является не значимой; поэтому значения переменной достаточно хорошо подчиняются нормальному распределению. Об этом же свидетельствует и графический анализ диаграммы остатков (рис.3).

В результате рассмотренного анализа установлено, что для составления прогноза роста перемещений отражательной пленки S 18 достаточно использовать трендовую модель. Таким образом, задача составления прогноза сводится к подбору наиболее адекватной трендовой модели, в достаточной мере объективно описывающей реальные процессы деформаций тоннеля и окружающего его грунтового массива.

В целом, можно сделать вывод, что комплексное применение средств измерений и использование методов статистического анализа при обработке результатов измерений позволяет достоверно и своевременно оценить состояние грунтового массива и тоннельных конструкций и на момент проходки служит основой для принятия мер по исключению чрезвычайных ситуаций в зоне забоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инновационный дайджест / Электронный сайт. М.: Справочно-информационный портал, 2009. Режим доступа: <http://www.rzd-expo.ru/>, свободный.
2. Инструкция по геодезическим и маркшейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей (ВСН 160-69). М.: Минтрасстрой, 1970.
3. *Кендалл М.* Многомерный статистический анализ и временные ряды / М.Кендалл, А.Стьюарт. М.: Наука, 1976.
4. *Машимов М.М.* Методы математической обработки астрономо-геодезических измерений / ВИА. М., 1990.
5. *Савицкая Г.В.* Анализ хозяйственной деятельности предприятия. Минск: ООО «Новое знание». 2000.
6. Строительные нормы и правила «Тоннели автомобильные и железнодорожные» (СНиП 32-04-97). М.: Госстрой, 1997.

## REFERENCES

1. Innovative digest / Electronic sayt. Moscow: Reference and Information Portal, 2009. Access: <http://www.rzd-expo.ru/>, free.
2. Instructions for geodetic and surveying work in the construction of transport tunnels (VSN 160-69). Moscow: Mintrastroy, 1970.
3. *Kendall M., Stuart A.* Multivariate statistical analysis and time series. Moscow: Nauka, 1976.
4. *Mashimov M.M.* Methods of mathematical processing astronomical and geodetic measurements / VIA Publishing. Moscow, 1990.
5. *Savitskaya G.V.* Analysis of the business enterprise. Minsk: LLC «New Knowledge», 2000.
6. Building regulations «Tunnels road and rail» (SNIP 32-04-97). Moscow: Ministry of Construction, 1997.