

**КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ  
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ  
ОБЪЕКТОВ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ РИСКОВ**

***Юрий Евгеньевич Федосеев***

*Руководитель центра геодезии и кадастра, эксперт ООО НПЦ «Геодинамика», г. Москва,  
внештатный научный сотрудник Московского государственного университета геодезии  
и картографии, кандидат технических наук*

К сожалению, конец прошлого столетия и начало текущего омрачены громкими техногенными катастрофами, сопряженными с людскими потерями, большими материальными и моральными издержками. Необходимо отметить, что подобные прискорбные факты имели место и ранее, но они, по тем или иным причинам, замалчивались. Поэтому такого негативного воздействия на самосознание широких масс населения не оказывали.

В подавляющем большинстве случаев расследование сводится к беспредметным рассуждениям о невероятном стечении обстоятельств, о «бунте машин» и т.п. В действительности, во всех случаях можно говорить о развитии негативных процессов, на которые либо не обращалось внимания, либо это внимание носило формальный характер, а принимаемые меры были явно недостаточны. Далее следует фаза развития катастрофических явлений, которым просто нечего противопоставить. Затем следует поиск «виноватых»..., а в системе, претерпевшей катастрофу, наступает фаза релаксации, сопровождаемая или не сопровождаемая инженерными работами. Фазу релаксации можно рассматривать как начало подготовки следующей катастрофы, которая произойдет, может быть, не в этой системе, в неизвестное время, но, в числе прочего, будет следствием неучтенных уроков рассматриваемого события.

Исключение развития по оговоренному печальному сценарию возможно только при условии организации всеобъемлющего мониторинга состояния строящихся и эксплуатируемых объектов. Общей целью такого мониторинга должно являться объективное суждение о состоянии объекта, полученное на основании реальных результатов натурных наблюдений и исследований.

Геодезический мониторинг деформационных процессов является одной из форм изучения состояния инженерных объектов или урбанизированных территорий, на которых расположены эти объекты. Целями проведения рассматриваемых мероприятий является:

- оценка рисков, связанных с развитием процессов деформации сооружений и прилегающей к ним территории.
- поиск ранних предвестников возможных катастрофических деформационных процессов, могущих привести к полной (частичной) утрате

объекта или к созданию препятствий к нормальной эксплуатации сооружений, оказавшихся в зоне негативного воздействия.

В наиболее общей форме, при обсуждении последствий негативно-го развития деформационных процессов можно говорить о некотором риске  $R$ , то есть о некоторой сумме средств, необходимых для ликвидации негативных последствий события [1].

Оценка этого риска может быть описана в виде следующего выражения:

$$R = P_{dn} * P_y * C, \quad (1)$$

где  $P_{dn}$  – вероятность проявления деформационных процессов, могущих нанести ощутимый ущерб;

$P_y$  – вероятность того, что данный уровень деформаций превзойдет допустимое значение для данного объекта;

$C$  – ущерб, обусловленный стоимостью объекта, либо расходы по проведению восстановительных операций и т.п.

Выражение носит весьма формальный характер, так как в реальной жизни мы имеем дело с целой комбинацией возможных деформационных процессов. Можно говорить о некотором сценарии. Рассмотрим это утверждение более подробно на некотором условном объекте [2]. Схема представлена на рис. 1.

Предположим, что основным объектом, ради безопасности которого организован геодезический мониторинг, является некоторое технологическое оборудование, расположенное внутри инженерного сооружения. Нежелательное развитие процесса деформаций может привести к нарушению в работе технологического оборудования. Предположим также, что само по себе технологическое оборудование может выйти из рабочего режима только за счет внешних воздействий, неспровоцированных этим оборудованием. При оговоренных условиях негативный процесс может начаться только за счет смещений и деформаций строительных конструкций, непосредственно на которых смонтировано рассматриваемое оборудование.

Даже поверхностный анализ схемы, приведенной на рис. 1, позволяет утверждать, что формула (1) имеет скорее декларативный характер. Нежелательное событие – выход из строя технологического оборудования – может произойти под совместным воздействием нескольких процессов, вероятность возникновения которых не определена. Кроме того, причины, порождающие эти процессы, могут оказывать воздействие на конечный результат через иные процессы. В рассматриваемом случае можно указать на воздействие агрессивных вод, появившихся на площадке и, предположительно, не предусмотренных мерами проектной инженерной защиты, или вибрацию, вызванную неизвестно чем.

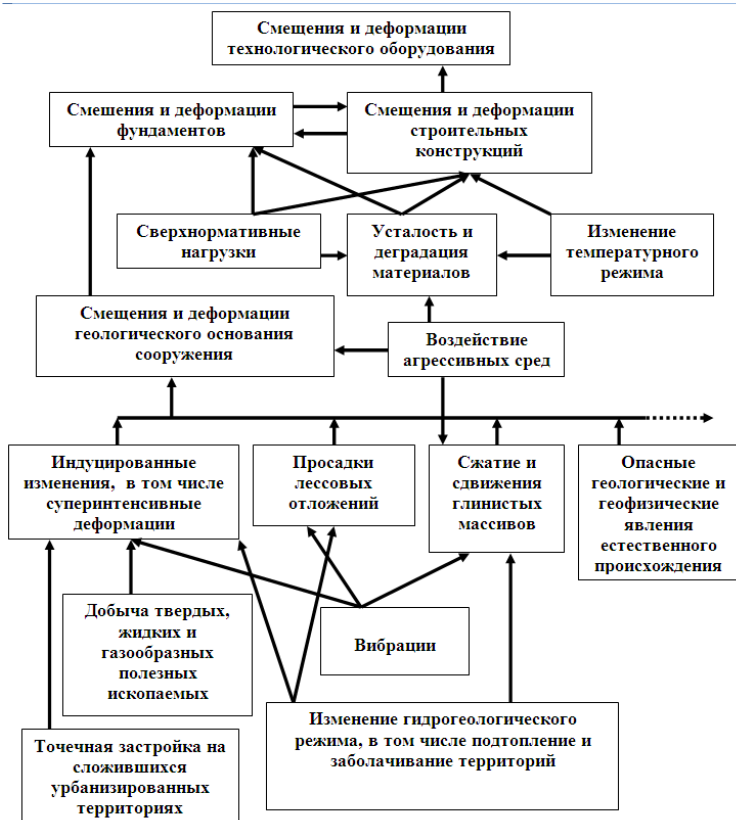


Рис. 1. Схема причинно-следственных связей развития гипотетического деформационного процесса

В порядке обобщения можно утверждать, что процессы деформаций являются следствием некоторой композицией воздействия порождающих их процессов, которые действуют по неизвестному сценарию. Эту ситуацию приближенно можно описать следующим соотношением. Пусть  $\Phi_i(x, y, z, t_i)$  – состояние системы в момент  $t_i$ , известное в точках с координатами  $(x, y, z)$ :

$$\Phi_i(x, y, z, t_i) = [G_0(x, y, z, t_0) + T_i(x, y, z, t_i)] * P(x, y, z, t_i). \quad (2)$$

Рассмотрим компоненты выражения (2) более подробно.

1. Вектор  $\Phi_i(x, y, z, t_i)$  содержит значение всех факторов, известных на момент  $t_i$ , описывающих состояние объекта.
2.  $x, y, z$  – адресные координаты точек или областей сооружения, для которых определены оговоренные факторы.

3. Жесткость системы  $G_0(x,y,z,t_0)$  – ее способность компенсировать внешнее воздействие на момент  $t_0$ , то есть на момент начала проведения мониторинга.
4.  $T_i(x,y,z,t_i)$  – изменения  $G$  на момент  $t_i$  с момента начала проведения мониторинга.
5. Вектор  $P(x,y,z,t_i)$  содержит значение всех воздействий на объект мониторинга, известных на момент  $t_i$ , влияющих на его состояние.

Большинство факторов, составляющих содержательную часть выражения  $[G_0(x,y,z,t_0)+T_i(x,y,z,t_i)]$ , измерить в процессе мониторинга не представляется возможным.

Отметим, что жесткость системы  $G_0(x,y,z,t_0)$  возможно оговорить двояко:

- декларировать проектные представления;
- оценить по результатам обследования здания или сооружения.

Во втором случае представляется целесообразным проведение деформационного мониторинга хотя бы в течение года.

Большинство факторов, составляющих содержательную часть выражения  $P(x,y,z,t_i)$ , то есть всевозможные воздействия на объект, можно только предположить, измерить их так же либо очень трудно, либо невозможно. Мало того, существует совокупное влияние неучтенных факторов  $F_\Theta(\Theta(x,y,z,t_i))$ , о которых мы даже и не подозреваем, но они могут быть весьма значительными.

В числе факторов, описание которых содержится в компонентах вектора  $\Phi_i(x,y,z,t_i)$ , могут появиться такие, которые содержат в качестве аргументов перемещения точек  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , и  $\Delta z$ . Пусть эти компоненты имеют вид

$$\Phi_i[(x,y,z,t_i, \Psi(\Delta x, \Delta y, \Delta z))],$$

где  $\Psi$  – некоторая обратная функция, связывающая перемещения  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  и вызвавшая их воздействие  $P_\Psi(x,y,z,t_i)$ .

Величины смещений  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  могут быть вычислены по результатам натурных геодезических вычислений  $\beta$ .

В этом случае можно говорить, что выражение  $\Psi(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  есть некоторая параметрическая деформационная характеристика при условии, что вид функции  $\Psi$  остается неизменным.

Потребителю (Заказчику) необходимо суждение (описание) о ходе процесса деформаций, а не массивы значений содержательной части информации  $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_t)$ . Если такое суждение, полученное на основании анализа вида и коэффициентов описания обратной функции  $\Psi(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , оказалось затруднительным или результат не устраивает по какой-либо причине, то возможно иное решение.

Нами в работе [8] показано, что в качестве некоторого эквивалента  $\Psi(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  можно использовать семейство простых геометрических об-

разов, например прямых, на основании рассмотрения которых можно с точностью до шага точек (положение которых определяется из геодезических измерений) получить информацию о предполагаемых местах возможных разрушений.

Пусть на момент  $t_2$  состояние системы можно представить в следующем виде:

$$\Phi_2 = \Phi_1 + f_{1,2},$$

где  $f_{1,2}$  – изменения в системе произошедшие за время между моментами проведения циклов измерений, то есть за промежуток времени  $\Delta t_{1,2}$ .

В свою очередь

$$f_{1,2} = F(P(x,y,z, \Delta t_{1,2})) + \Delta(G_1(x,y,z, \Delta t_{1,2})) + F_{\Theta}(\Theta(x,y,z, \Delta t_{1,2})), \quad (3)$$

где  $F(P(x,y,z, \Delta t_{1,2}))$  – остаточные последствия внешних воздействий, имевших место за промежуток времени  $\Delta t_{1,2}$ , на момент времени  $t_2$  (с учетом релаксации);

$\Delta(G_1(x,y,z, \Delta t_{1,2}))$  – изменение жесткости системы за тот же период;

$F_{\Theta}(\Theta(x,y,z, \Delta t_{1,2}))$  – совокупное влияние неучтенных факторов.

Отметим, что все перечисленные компоненты могут содержать как некоторый тренд, то есть являться функциями времени, так и импульсные компоненты, моменты воздействия которых носят случайный характер. Продолжительность воздействия последних из упомянутых процессов может быть больше или меньше  $\Delta t_{1,2}$ . Высказанные утверждения может пояснить рис. 2.

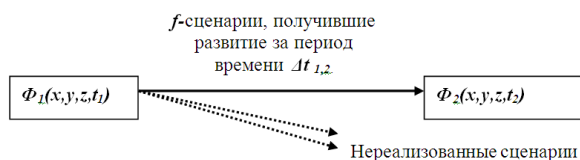


Рис.2

На практике данными о деформациях сооружений и технологического оборудования служат результаты периодических геодезических измерений. Это не единственный, но один из основных методов получения информации. Одной из особенностей геодезической информации о деформациях инженерных сооружений является то, что она получена в результате нерандомизированного эксперимента. Под рандомизированным экспериментом понимается эксперимент, спланированный и выполненный таким образом, что его результаты содержат в основном информацию о реакции объекта исследований на изменение какого-либо одного фактора, а влияние изменений прочих факторов сведено до минимума или совсем исключено. Идеальный эксперимент должен быть спланиро-

ван и выполнен таким образом, чтобы получаемая информация удовлетворяла следующим условиям: однозначно отражала характер исследуемого явления, была удобна для обработки и интерпретации, равноточна, независима.

В результате проведения геодезических измерений, выполняемых в процессе деформационного мониторинга, получают некоторые базы пространственно распределенных данных. Число таких баз соответствует числу циклов наблюдений и может быть сколь угодно большим. В первом приближении геодезические данные о деформациях объекта для каждого цикла измерений можно представить в виде схемы, приведенной на рис.3.

На рис.3 под  $\alpha$  понимаются всевозможные внешние воздействия на объект исследования, то есть  $P(x,y,z,t_i)$ , суть которых рассматривалась несколько ранее. Отметим, что в дополнение к сказанному, одной из  $\alpha$  может быть приписано время, которое рассматривается как формальная причина деформаций. Под символом  $Q$  понимается реакция сооружения объекта именно на это воздействие, рассматриваемое нами ранее, например, в выражении (2) как элемент вектора  $\Phi_i(x,y,z,t_i)$ ,  $V$  – их совместное влияние, то есть вектор  $\Phi_i(x,y,z,t_i)$ , причем его компоненты предполагаются независимыми, что является упрощением представлений, иллюстрируемых на рис.1.

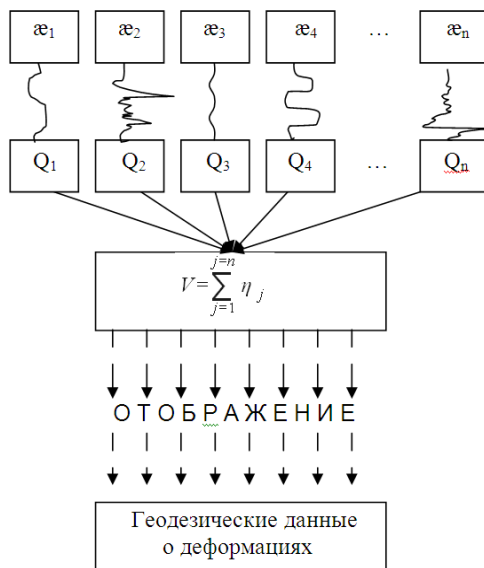


Рис. 3. Схема образования геодезических данных о деформациях

Геодезическими методами возможно только определить смещения отдельных точек, принадлежащих объекту, и эти определения окажутся отнесенными к конкретному моменту времени. Подобная геодезическая информация всегда является дискретным во времени и пространстве отображением объективного непрерывного процесса. Упомянутая информация имеет сложную структуру, которую можно описать следующей схемой:

- имеется адресная компонента ( $x, y, z$  и  $t$ ), однозначно определяющая, к какой точке и моменту времени относится содержательная часть;
- содержательная часть ( $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_t$ ) – смещения контролируемой точки за промежуток времени  $\Delta_t$ .

Если ( $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ ) меньше  $2TK_p$ , где коэффициент 2 обусловлен использованием разностей координат, а коэффициент  $T$  зависит от избранной доверительной вероятности, то можно говорить, что за период  $\Delta_t$  смещения рассматриваемой точки незначимы. Назначение (нормирование) интервалов  $\Delta_t$  зависит от скорости протекания изучаемых процессов и от технологической точности измерительных операций, характеризуемых матрицей  $K_{\mu}$ . С другой стороны, на определение координат как в первый из сравниваемых моментов времени, так и во второй момент, необходимо некоторое время  $\delta_t$ . Если смещения, произошедшие за это время, окажутся значимы, то появится специфический источник искажения информации («смаз изображения»). Так как адресная компонента содержит момент времени  $t$ , назовем его административным моментом, назначаемым по оговоренному правилу, а интервал времени  $\delta_t$  – продолжительностью проведения измерений, очевидно, что  $\delta_t$  должно лежать внутри  $t$ .

Геодезия должна рассматривать свои объекты изучения в динамике их развития. Следовательно, совокупность геодезической информации о состоянии объекта является отнесенной к оговоренному административному моменту  $t$ . При затягивании времени сбора информации, то есть промежутка времени, затраченного на измерения  $\delta_t$ , может быть еще и существенно искажена.

Сведение интервалов  $\Delta_t$  к минимуму приводит к необходимости работы в режиме мониторинга, что выгодно для пользователя, но приводит к резкому увеличению затрат. Период  $\delta_t$  также желательно свести к минимуму, но это сопряжено не только с экономическими затратами, но и с технологическими возможностями. Выбор технологии, в свою очередь, ограничен допустимыми затратами, так что необходимо искать компромисс, то есть оптимальное решение. Проиллюстрируем оговоренное на рис.4.

Целью мониторинга сооружения является получение обоснованного суждения о процессах  $f(3)$ , а целью геодезической составляющей этого мониторинга – получение обоснованного суждения о кинематике изучаемого процесса, то есть о развитии процессов смещений элементов сооружений и изменения их формы.

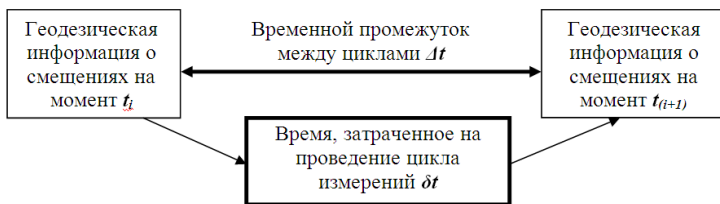


Рис.4

Возвращаясь к рис. 1, на основании большого опыта можно утверждать, что на практике причинами деформаций, а тем более катастроф сооружений, прослуживших несколько лет, очень редко оказывались ошибки, допущенные при проектировании на основании результатов доброкачественных изысканий. Подавляющее большинство значимых происшествий приходится на долю четырех причин:

- деградация строительных конструкций, приведшая к изменению несущей способности;
- деформации, приведшие к нарушению работы несущих конструкций (крены, внецентренные аномальные нагрузки и т.п.);
- аномальные нагрузки на основание, связанные, например, с точечной застройкой;
- деградация геологической среды, обусловленная аномальными условиями эксплуатации.

Перечисленные причины образуют целый класс работ по изучению деформаций урбанизированных территорий. Принципы оценки риска проявления негативных процессов и их влияния на нормальную работу сооружения очень похожи на рассмотренные выше, однако, желательно разделить всю поверхность исследуемой территории на участки, в пределах которых деформационные процессы имеют большое сходство по кинематическим признакам. Это важно, так как возможно наложение воздействия различных процессов. Задача районирования по кинематическим признакам приводит к необходимости использования специфических приемов.

В порядке обобщения [4] исходную полевую информацию, получаемую при изучении деформации, можно представить в виде некоторого набора трёх согласованных массивов:

- $N_i$  – имена или коды точек и их комбинации;
- $\beta$  – результаты всех геодезических измерений, выполненных в поле;
- $t$  – моменты получения значений, помещенных в массиве  $\beta$ .

Негеодезическую информацию можно представить в виде массивов  $N_1$ ,  $\varphi$  и  $t_l$  – имена или адреса точек, в которых определялись значе-



ния  $\varphi$ ,  $\varphi$  – числовые параметры, изменения которых могут рассматриваться как причины возникновения деформации;  $t_l$  – моменты получения (определения) этих параметров.

В процессе традиционной математической обработки результатов натуральных измерений получают  $X, Y, H, T$  – адресную компоненту геодезической информации о деформациях, где  $X, Y, H$  – координаты точки, смещения которой фиксируются (эта же информация может содержаться в  $N$  – именах точек),  $T$  – условный момент (эпоха), к которому отнесена вся информация;

$\Delta$  – вектор разности координат одноименных точек, содержащий численные значения смещений;

$K_{\Delta}$  – корреляционная матрица, характеризующая точность вычисленных элементов вектора  $\Delta$ .

Будем различать две разновидности вектора  $\Delta$ :

1.  $\Delta$  – абсолютные смещения, вычисленные как разности координат, соответствующих моменту  $T_0$ , где  $T_0$  – момент выполнения начальной эпохи наблюдений и  $T_j$  – момент выполнения эпохи номера  $J$ .

$$\Delta a_j = X_j - X_0, \quad (4)$$

где  $X$  – векторы, содержащие точные значения вычисленных координат, принадлежащие разным эпохам;

$\Delta t_{j,(j-1)}$  – текущие смещения, вычисленные как разности координат, соответствующих моменту  $T_j$  – момент выполнения эпохи номера  $J$  и  $T_{(j-1)}$  – момент выполнения эпохи номера  $J-1$ .

$$\Delta t_j(j-1) = X_j - X_{(j-1)}. \quad (5)$$

Отметим, что каждому из векторов  $\Delta a$  и  $\Delta t$  соответствует своя матрица  $K_{\Delta}$ . Эти матрицы в общем случае различны, они порождены ошибками измерений и последующей совместной обработкой полевых материалов  $\beta$  и вычислены по этим материалам (апостериорная оценка) или назначены, исходя из каких-то инженерных соображений (априорная оценка).

Отметим, что вектор  $\Delta a$  содержит сведения с учетом накопления, начиная с момента  $T_0$ . Иногда можно встретить термин аккумуляционная характеристика. Под термином  $T_0$  понимается некоторый промежуток времени  $\Delta t$ , затраченный на проведение полевых работ, а само численное значение момента  $T_0$  имеет некоторый административный смысл – оно назначено. Вектор  $\Delta t$  не содержит сведений о предыстории развития процесса смещений.

Рассмотренные геодезические данные о деформациях по своей сути являются громоздкими таблицами, которые визуальным образом весьма трудно

поддаются анализу, проводимому с целью выявления фактического состояния объекта и оценки тенденции развития процесса его деформирования в пространстве и во времени. В процессе такого анализа желатель-но выявить значимые на фоне ошибок величин  $\Delta_{3ni}$

$$\Delta_{3ni} \leq t \sqrt{(\text{diag} K_{\Delta i})}, \quad (6)$$

где  $i$  – номер деформационной марки, смещения которой рассматриваются;

$t$  – нормирующий множитель.

Если условие (6) не выполнено, то можно говорить об аномальном смещении, подразумевая, что нарушение стабильности – аномалия.

Для решения задач анализа результатов наблюдений за деформациями необходимо представить сведения, содержащиеся в векторах  $\Delta$  и  $K_{\Delta}$ , в некотором ином виде, удобном для осмысления. Речь идет о некоторых деформационных характеристиках, освещающих ту или иную сторону изучаемого процесса. В наиболее общем виде эти характеристики можно описать как некоторую матрицу  $K^*_{\Delta}$ . В данном случае это символ, под которым можно понимать и корреляционные матрицы, характеризующие физическую корреляцию, то есть корреляцию физическими процессами или геометрической взаимообусловленностью смещений отдельных деформационных марок, или иные числовые характеристики и модели, иллюстрирующие ту или иную сторону этих связей. Когда речь идет об корреляционных матрицах, в первую очередь мы говорим об автокорреляционной матрице  $K^*_{\Delta,i,j}$ .

$$K^*_{\Delta,i,j} = E\{\Delta^T \Delta\}, \quad (7)$$

где  $E\{\}$  – усреднение в обычном смысле теории вероятности.

В случае оценки степени зависимости смещений от предполагаемых причин развития процесса деформации целесообразно говорить об  $K^*_{\Delta\varphi}$ , где  $\varphi$  – вектор численных характеристик параметров, рассматриваемых как гипотетические причины деформаций, сформированный путем преобразования содержания  $\varphi$  таким образом, что можно определить  $K^*_{\Delta\varphi}$ .

$$K^*_{\Delta\varphi} = E\{\Delta^T \varphi\}. \quad (8)$$

В рассматриваемом случае каждому элементу вектора  $\text{diag} K^*_{\Delta}$  будут соответствовать адресные компоненты  $X, Y, H$  и  $T$  или  $N$  и  $T$ , что позволит рассматривать распределение данных деформационных характеристик по топографической поверхности, то есть использовать элементы ГИС-технологии.

Наиболее часто встречается на практике частный случай наблюдения за деформациями – изучение только вертикальной компоненты. Поэтому представляется целесообразным в качестве примера рассмотреть

именно этот случай. В соответствии с рассмотренной структурной геодезической информацией о деформациях будем оперировать  $\Delta a$  и  $\Delta t$ , представленными в форме каталогов, то есть упомянутых баз пространственно-распределенных данных. Пусть каталоги сформированы так, как это показано на рис. 5.

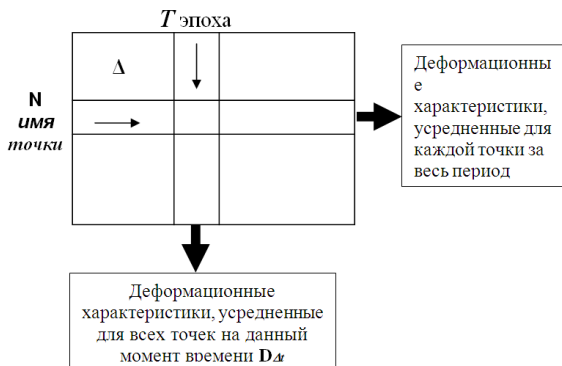


Рис. 5

Просматривая каталоги абсолютных осадок, трудно проследить накопление медленных смещений, небольших по модулю, но одинаковых по знаку. Зоны аномальных смещений можно оценить только весьма приблизительно, на интуитивном уровне. Просмотр абсолютных каталогов смещений позволяет выявить аномальные смещения, накопившиеся с начала периода наблюдений. Можно проследить закономерность этого накопления, но, так же, как и в первом случае, трудно выявить пространственную, а тем более, временную локализацию систем таких знаков. То есть в обоих случаях трудно достоверно определить границу зоны аномальных смещений, что является одной из главных задач нашего анализа.

Выход из создавшегося положения, по нашему мнению, лежит в подборе такой деформационной характеристики, которая хорошо отображала бы интенсивность протекания процесса в данной точке. Такое решение нами рассмотрено в предыдущем разделе, однако, в данном случае предложим его к автокорреляционной матрице  $K^*_{\Delta,i,i}$ .

Для определения численных значений деформационных характеристик, в качестве которых будем использовать элементы вектора *diag*  $K^*_{\Delta}$ , вовсе не обязательно определять всю матрицу  $K^*_{\Delta,i,i}$ , так как искомый вектор содержит дисперсии, вычисленные по столбцам или строкам каталогов  $\Delta a$  и  $\Delta t$ , рассматриваемых в данном случае как прямоугольные матрицы. При выполнении анализа всегда удобно, чтобы анализируемые массив, в данном случае – это элементы матриц  $\Delta a$  или  $\Delta t$ , и обобщающая их деформационная характеристика имели одинаковую размерность. По-

этому в данном случае в качестве деформационных характеристик используются элементы вектора средних квадратических смещений, усредненные по времени или по номеру деформационной марки, то есть за весь период наблюдения. Введем обозначение  $D$  для оговоренной характеристики, для выделения разновидностей этих характеристик будем использовать индексы.

Для деформационной характеристики данного пункта, усредненной за все время наблюдений, будем иметь  $D_{\Delta t}$ .

Для деформационной характеристики состояния всего объекта на данную эпоху, то есть усредненной по всем деформационным маркам на момент  $t$ , будем иметь  $D_{\Delta t}$ .

В обобщенном виде суть предлагаемой технологии проиллюстрирована на рис. 5.

Для более уверенного решения перечисленных проблем необходимо найти такую численную характеристику, которая обобщала бы все определения смещений в данной точке наблюдения. В этом случае каждой точке наблюдений будут соответствовать три числа: две плановые координаты и упомянутая численная характеристика. В качестве искомой характеристики можно предложить дисперсию, то есть центральный статистический момент второго порядка.

При реализации этого предложения необходимо в качестве вектора, характеризующего дисперсией, использовать некий случайный вектор, отвечающий двум условиям:

- Вектор должно быть можно рассматривать как некоторый подвектор, являющийся частью обобщенного вектора, элементы которого подчинялись бы нормальному закону распределения.
- Вектор должен содержать всю совокупность численных характеристик, описывающих смещения именно данной точки.

Очевидно, что этим условиям в наибольшей степени удовлетворяется вектор текущих осадок. Действительно, вся совокупность чисел, описывающая все текущие осадки всех точек и за весь период наблюдений, будет подчиняться нормальному закону распределения в силу действия предельных теорем. Выбранная совокупность численных характеристик полностью описывает смещения, произошедшие в данной точке. Можно привести еще одну такую характеристику – это скорости осадок, вычисленные за промежутки времени, прошедший между циклами наблюдений. Однако, у этой характеристики есть два свойства, которые заставили нас воздержаться от ее использования:

- трудно говорить о более или менее точном значении отрезка времени, прошедшего между циклами, так как выполнение цикла измерения иногда затягивается на несколько недель;
- использование скоростей заставит нас делать еще один шаг анализа для того, чтобы вернуться к нормативным требованиям.

Описанная технология неоднократно была применена нами при анализе архивных материалов по изучению деформационных процессов, так как этот приём хорошо зарекомендовал себя и дал интересные суждения. Он был применен нами вновь.

Анализируемый временной ряд содержит численные значения средних квадратических осадок всех деформационных марок. Данные отнесены к некоторому административному моменту, то есть протяженность работ в каждом цикле игнорируется. Если за время, прошедшее между двумя упомянутыми административными моментами, на объекте сохранялось «относительное деформационное спокойствие», то эта характеристика будет иметь минимальное значение и, по своей сути, будет косвенной оценкой точности определения текущих осадок. В этом же качестве можно рассматривать среднее арифметическое значение характеристик, подсчитанное по всему ряду. Если за рассматриваемый период имели место деформационные события, то предлагаемая характеристика позволит судить об их суммарном воздействии.

На рис. 6 приведены диаграммы, позволяющие оценить интенсивность развития деформационных процессов в различные промежутки времени.

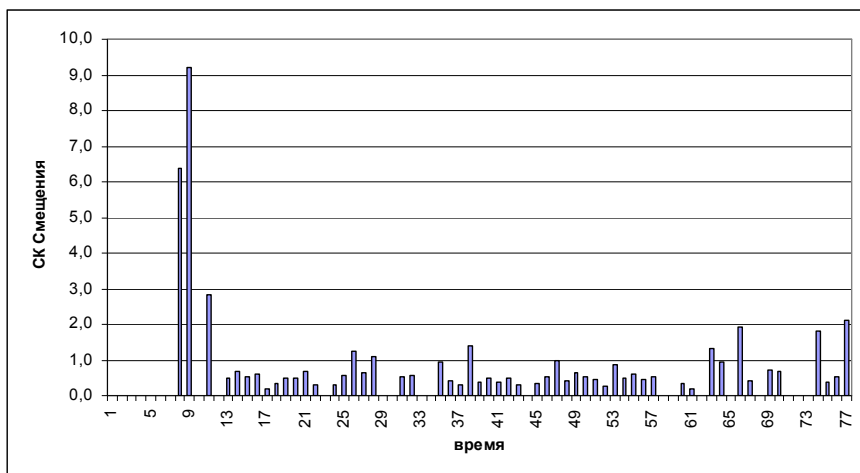


Рис.6. Интенсивность вертикальных смещений на территории Кремля

В левой части диаграммы видны три пика, соответствующие времени возведения Кремлевского дворца съездов. Отметим, что Соборная площадь, для объектов которой построена эта диаграмма, отстоит от места строительства на несколько сот метров.

Возвратимся к рис.5. В предыдущих разделах нами рассмотрены результаты анализа данных геодезических измерений по численным значениям деформационных характеристик, полученных путем среднеквадратического осреднения текущих осадок для каждого цикла.

Настало время рассмотреть вторую ветвь описанной ранее технологии. В соответствии с рис.5 возможно получение деформационных характеристик путем среднеквадратического осреднения текущих осадок для каждой марки, но за весь период наблюдений. В результате осреднения упомянутых временных рядов получают пространственно распределенные данные, то есть каждой деформационной характеристике в соответствие поставлены ее координаты. Суть анализа сводится к визуализации пространственного распределения численных характеристик по территории исследуемого объекта, то есть на топографической подложке. Эту операцию удобно сделать путем построения изолиний равных значений деформационных характеристик. Если данная группа осадочных марок расположена на стабильном участке, то изолинии, построенные для данной территории, будут редкими и, как правило, иметь сглаженный вид. Если же, наоборот, данная группа осадочных марок расположена на активном, мобильном участке, то с возрастанием степени активности протекания деформационных процессов, будет возрастать и плотность изолиний. Эти ступки будут покрывать весь активный участок.

Рассмотрим описанные технологические приемы применительно к участку территории г. Москвы, примыкающему к большому котловану. В процессе строительства по причинам недофинансирования пришлось после сооружения котлована прекратить на время строительные работы, в результате чего оказался нарушен гидрогеологический режим и начаты работы по водопонижению, что усугубило ситуацию.

На рис.7 приведена схема котлована, и в виде изолиний показаны среднеквадратические значения вертикальных смещений.

Для более подробного рассмотрения изменения объекта во времени можно воспользоваться методом построения пространственно-временных диаграмм. Эти диаграммы строятся следующим образом. По горизонтальной оси в условном масштабе откладываются расстояния между деформационными марками по выбранному сечению. По второй координате откладываются моменты проведения циклов наблюдений. Каждому узлу полученной сетки в соответствие ставятся значения смещений, накопившихся с момента начала наблюдений. По полученным данным строятся изолинии равных смещений. На рис.8 представлена пространственно-временная диаграмма для сечения а-а (см. рис. 7). На рис 9 представлена аналогичная диаграмма для сечения б-б.

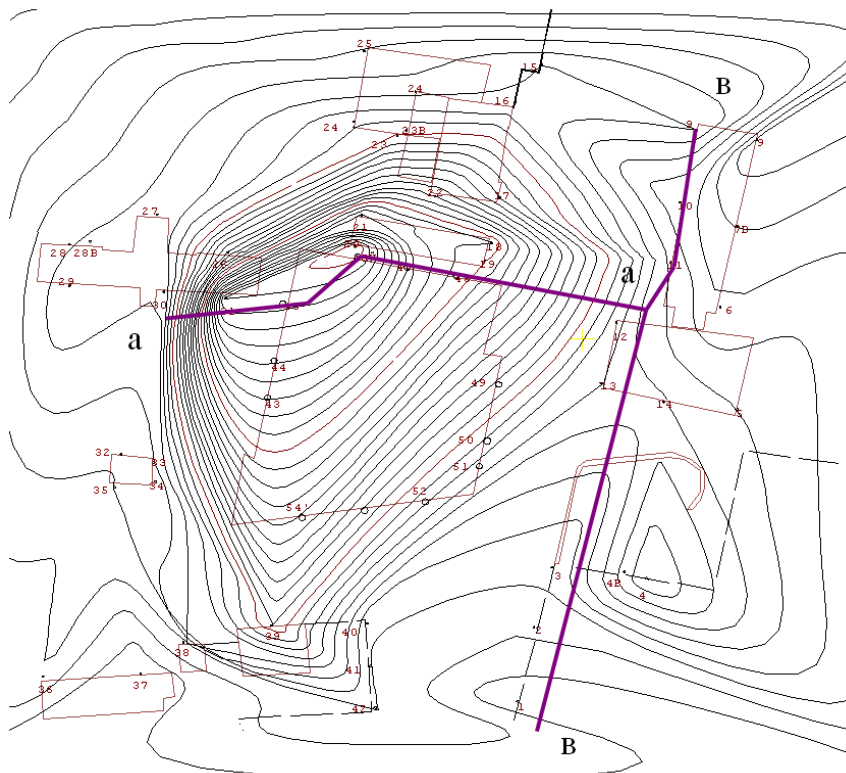


Рис.7. Схема изолиний равных значений среднеквадратических значений осадок

В процессе строительства, после вскрытия и облицовки котлована, произошел сбой в финансировании работ, строительные работы были приостановлены более, чем на год. В результате начались аномальные осадки.

На пространственно-временной диаграмме видно, что процесс оседания проходил в несколько стадий:

1. Первый период котлован никак не реагировал на нарушение процесса производства работ.
2. Произошло скачкообразное оседание в центральной части котлована.
3. Процесс начал развиваться в сторону продольных стенок.
4. Произошло резкое оседание по левой стенке (см. рис.7).
5. Произошло выпучивание в центре котлована.
6. Выпучивание сменилось плавным оседанием.

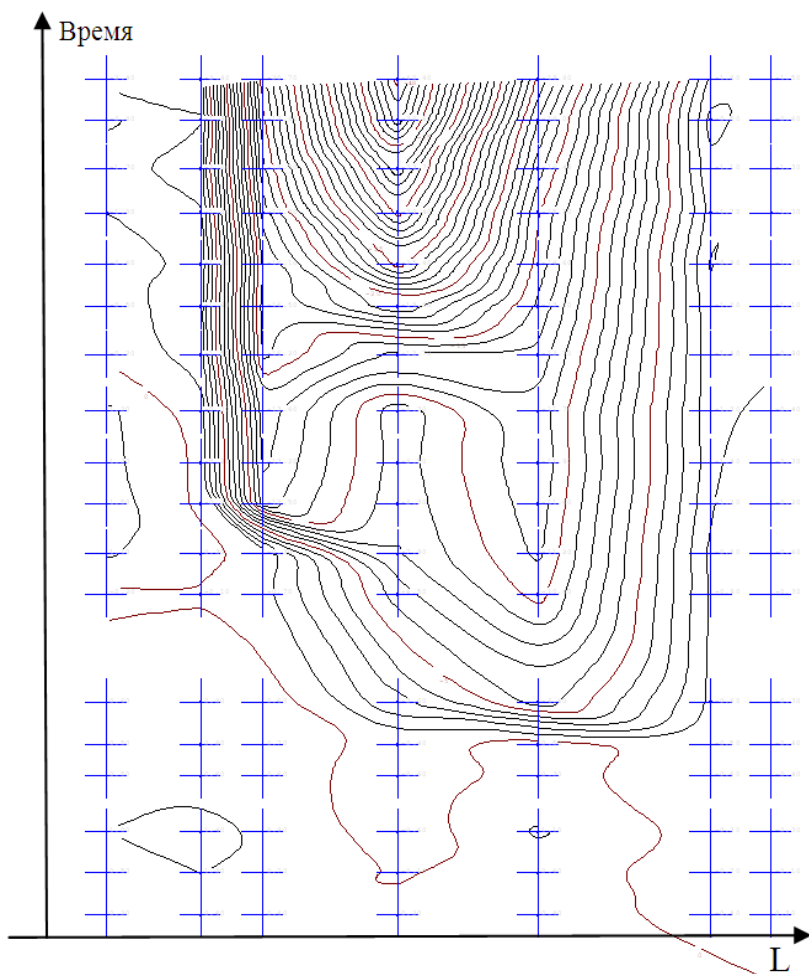


Рис.8. Сечение а-а

На рис 9 показано сечение в-в, проходящее по торцевым стенам жилых домов. Облицовочный кирпич на этих стенах отслоился от несущих конструкций. Сами стены начали совершать хаотическое вертикальное колебание. Периоды сжатия сменялись растяжением. Всего зафиксировано 6 таких циклов, которые никак не совпадают с сезонными колебаниями. В правой и левой частях диаграммы видны специфические срывы изображения, что свидетельствует о том, что зона активных деформаций оказалась больше территории, на которой были предусмотрены геодезические наблюдения.



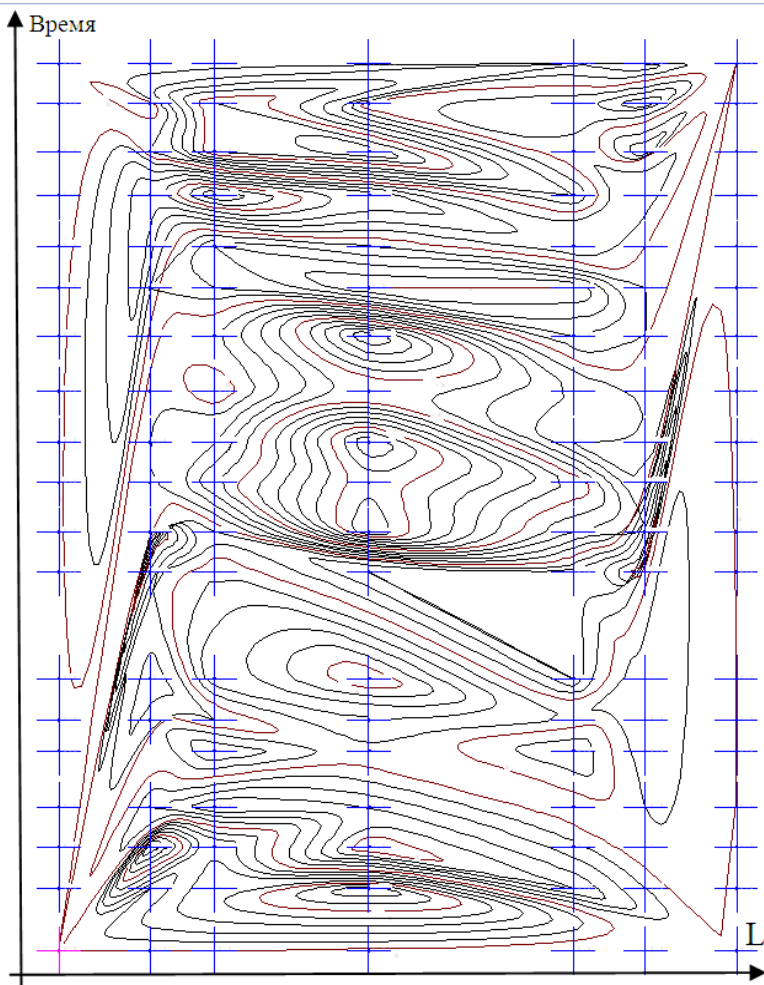


Рис. 9. Сечение в-в

Диаграмма, показанная на рис. 9, специфична для весьма опасного индуцированного процесса, известного как суперинтенсивные деформации (СД-процессы) [1]. Такие процессы были инструментально выявлены при строительстве рекреационно-торгового комплекса на Манежной площади в г. Москва [10].

В связи с новизной понятия “СД-процесс” для широкого круга специалистов представляется необходимым рассмотреть существо этого явления. К настоящему моменту сформулированы новые представления о современном геодинамическом состоянии земных недр. Имеют место совре-

менные деформации земной поверхности со скоростями до 50-70 мм/год и более, приуроченные к зонам тектонических нарушений (разломы и разрывы различного типа и порядка). При этом наиболее неожиданный вывод заключается в том, что наибольшая интенсивность геодинамических аномалий наблюдается в зонах платформенных, асейсмических разломов. Этот вывод позволяет рассматривать СД-процессы как некоторую аномалию по отношению к сложившимся ранее представлениям о современном геодинамическом режиме платформенных регионов. Обсуждаемые аномалии короткопериодичны (от 0,01 года до первых лет), пространственно локализованы (от 0,01 км до первых десятков км) и обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. В качестве причин, порождающих СД, выступают процессы, протекающие внутри самих зон разломов.

Из основ классической механики следует, что вывод механической системы из состояния равновесия возможен двумя путями: либо за счет внешнего, силового воздействия, либо за счет изменения внутренних параметров системы. Физико-механические свойства горных пород, слагающих верхние слои земной коры, существенно зависят от флюидодинамических процессов, отличаются повышенными емкостными характеристиками и пониженными параметрами жесткости и прочности в разломных зонах и т.п. Эти особенности способствуют формированию локально-неоднородных, нестабильных во времени полей напряженности. Можно полагать, что возникновение СД непосредственно не вызвано временным ходом региональных изменений (внешнего по отношению к объему среды, контролируемому системой наблюдений) поля напряжений, а обусловлено изменением параметров среды (модуль жесткости, коэффициент трения и т.п.) внутри самих разломных зон, которые можно рассматривать как параметрические деформации земной коры [2].

На рис.10 показано распределение аномальных смещений на примере одной из двух фаз СД-процесса (сжатие-растяжение). Во второй фазе картина смещений просто сменит знак на противоположный.

На рис. 10 по горизонтальной оси отложены расстояния от оси разломной зоны в км, а по вертикальной оси – смещения в см. Ряд 1 характеризует вертикальные смещения, а ряд 2 – горизонтальные.

Приведенное распределение вертикальных и горизонтальных смещений приповерхностного слоя геологического основания определено для модели среды, содержащей активизированный фрагмент зоны разлома. Из рисунка видно, что распределение горизонтальных смещений имеет такую конфигурацию, что внутри зоны разлома ближайшая к нему точка будет иметь меньшую амплитуду, чем отстоящая дальше. Таким образом, если имеет место активизация СД-процессов в районе р. Неглинки, то их деформационное влияние будет больше для первого пути, чем для второго.

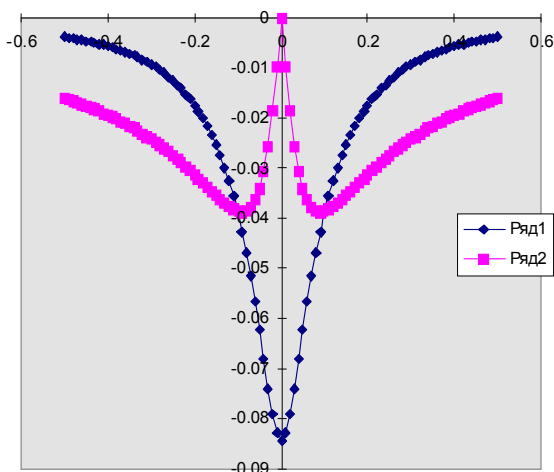


Рис.10

Целью анализа данных натуральных геодезических измерений являлась оценка деформационных характеристик эксплуатируемых тоннелей в плане. В процессе работы были получены аномальные, по сравнению с предрасчетными смещения отделки тоннелей: величины горизонтальных смещений превзошли ожидаемые более чем в два раза и имели знакопеременный характер. Наибольшие смещения зафиксированы на тоннеле Сокольнической линии. Среднее смещение составило 12,8 мм в сторону котлована. При этом обращает на себя внимание наличие знакопеременной составляющей. Ситуация иллюстрируется рис. 11.

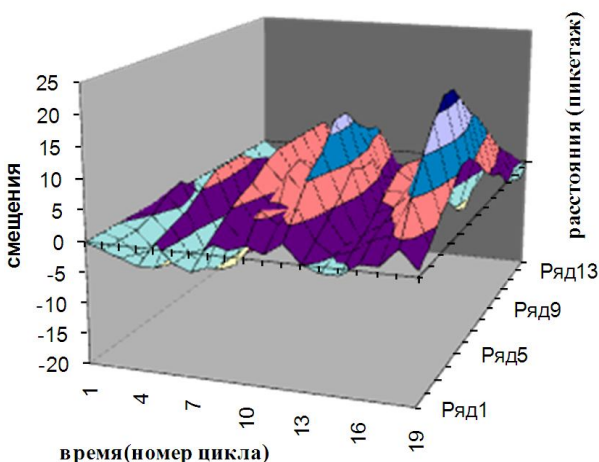


Рис.11. Смещения тоннеля к котловану

Наряду с прогибами в сторону котлована, приходящимися на участок, расположенный в непосредственной близости от стенки в грунте, оконтуривающей котлован, необходимо отметить возвратные движения. Это явление невозможно объяснить статическим давлением грунта. Сами величины более чем в 4 раза превосходят СКО своего определения.

Единственной, из известных, причиной движения тоннеля в сторону, противоположенную давлению грунта, могут быть СД-процессы. Остановимся на проверке этой гипотезы. Для этого построим диаграмму смещений, отнесенных (центрированных) к среднему смещению в несколько иной форме, удобной для детального рассмотрения развития процесса смещений во времени (рис. 12).

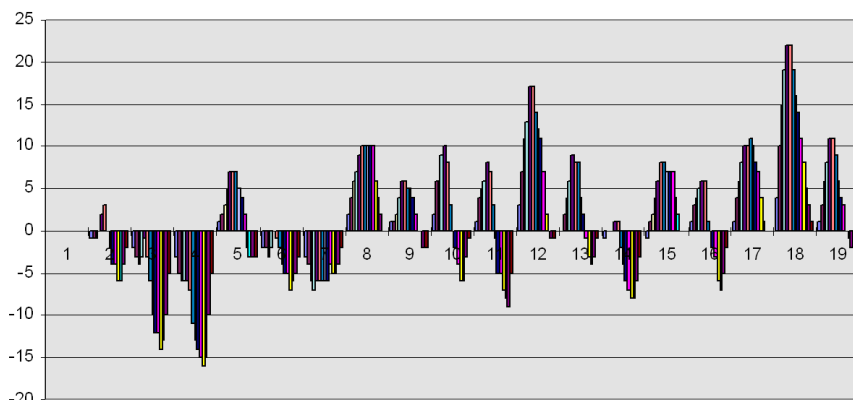


Рис.12

Необходимо отметить, что наиболее волнующий фактор, отражающий прогиб тоннеля к котловану, описывается нулевой гармоникой, график распределения этих амплитуд для различных реперов представлен отдельно на рис.13.

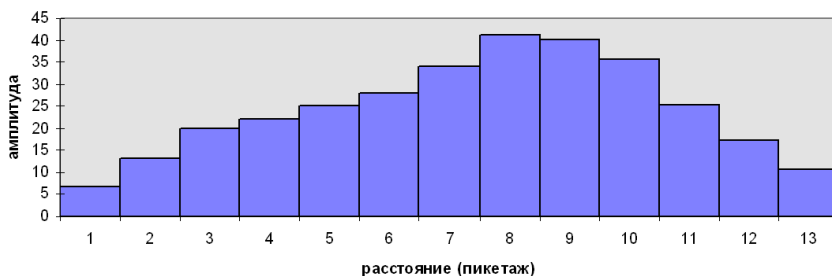


Рис.13. Амплитуды нулевой гармоники

На рис.12 по горизонтальной оси отложено время (номер цикла), а по вертикальной оси – смещения, причем каждому реперу в соответствие поставлен столбик. На диаграмме хорошо просматриваются спорадические знакопеременные смещения, длительность которых составляет примерно 1-3 месяца. Естественно, что это явление наиболее ярко проявляется на участке, максимально приближенном к котловану, и замедляется по мере удаления от него. Тем не менее, можно утверждать, что активный участок превосходит размеры котлована и значительно простирается за линии фасада Манежа и гостиницы “Москва”, то есть в не очень потревоженные строительством массивы.

Численные значения смещений примерно в 1,6 раза превосходят расчетные, их максимум приходится на точки, практически примыкающие к котловану, все смещения направлены к котловану. Среднее значение по участку тоннеля практически точно соответствует расчетному и составляет 24,6 мм.

При рассмотрении спектрального представления смещений обратим особое внимание на первую и вторую гармоники, отражающие влияние годового и сезонного циклов изменений внешних условий (рис.14). Первая гармоника может быть рассмотрена как характеристика влияния годового хода температур. Хотя амплитуда этой гармоники значима только в середине участка, да и то с вероятностью порядка 65%, тем не менее, можно говорить о вкладе этого фактора в горизонтальные смещения тоннеля.

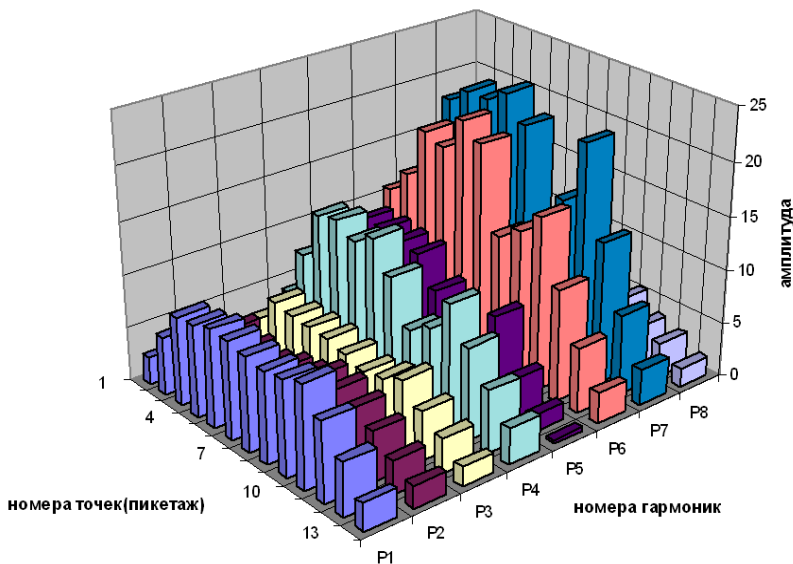


Рис.14. Спектрограмма

Вторую гармонику можно рассматривать как отражение сезонного хода влагонасыщенности грунта в результате впитывания атмосферных осадков. До вскрытия котлована атмосферные осадки не попадали на грунт. Снятие дорожных одежд сделало этот процесс значимой с вероятностью примерно 65% причиной знакопеременных смещений. Однако эти составляющие не являются преобладающими. Максимальный вклад приходится на четвертую, пятую, шестую и седьмую гармоники.

Обращает на себя внимание тот факт, что для распределения амплитуд этих гармоник вдоль профиля характерен провал в районе знаков С-17 и С-19, то есть как раз в том месте, где начинается ветка, соединяющая Сокольническую и Филевскую линии. Эта ветка пересекает исследуемый тоннель поверху. Здесь же расположен забетонированный ствол. Третья-шестая гармоники, периоды которых лежат в промежутке от 4 до 1,5 месяцев, как раз приходятся на временной интервал, специфический для СД-процессов. Восьмая гармоника соответствует затуханию процесса. Отметим, что не существует естественных процессов с подобными спектральными характеристиками.

При наблюдении за плановыми смещениями здания Оружейной палаты, расположенной на территории Кремля, но ниже по течению р.Неглинки. Выявлен интересный факт годового хода фасада, обращенного в сторону р. Москвы.

Концы вектора смещений практически описывают замкнутую кривую. Максимум смещений направлен вдоль р.Москвы, но перпендикулярно р.Неглинке. Можно предположить, что и здесь нами выявлены СД-процессы.

### Библиографический список

1. Кузмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // Геологическое изучение и использование недр // Н-т сборник «Геоинформмарк». – М., 1996. Вып. №4. С.43.
2. Fedoseev J.E. Technology of all deformation researches. Poster of reports IAG regional symposium on deformation and crystal movement investigations using geodetic techniques. Hungari, 1996.
3. Федосеев Ю.Е., Попова Е.А. Общие принципы наблюдений за кренами плоских элементов сооружений // Известия вузов «Геодезия и Аэрофотосъемка». – М.: МИИГАиК, 1996. №1-2.
4. Федосеев Ю.Е., Хоанг Нгок Лам. Новая технология оценки формы и динамики развития мульд по результатам наземных измерений // Автоматизированные технологии CREDO. – Минск, 2000. №1.

5. Федосеев Ю.Е. Технологическая схема геодезических наблюдений за деформациями природных и инженерных объектов // Известия вузов «Геодезия и Аэрофотосъемка». – М.: МИИГАиК, 1989. №3.
6. Исследование особенностей накопления ошибок измерений при создании высокоточных сетей с использованием электронных нивелиров: Сборник статей по итогам научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 229-летию МИИГАиК / А.Э. Зубарев, В.Я. Лобазов, Ю.Е. Федосеев, В.М. Шкурко. – М., 2008.
7. Михайлович К. Геодезия. Перевод с сербско-хорватского С.В. Лебедева, под ред. В.Д. Большакова. – М.: Недра, 1984. – 448 с.
8. ГОСТ 24846-81 Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
9. Федосеев Ю.Е. Прогнозирование места появления трещин в строительных конструкциях по геодезическим данным: Сборник «Теоретические и экспериментальные исследования мостов». – Омск: СИБАДИ, 1980.
10. Власенко Е.П., Кузьмин Ю.О., Федосеев Ю.Е. Оценка влияния современных геодинамических процессов на деформации тоннелей Московского метрополитена в зоне ведения земляных работ. Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Вып. II. – М., 1998.
11. Кузьмин Ю.О. Механизм формирования современной геодинамической активности разломных зон: Труды Международного симпозиума КАПГ по изучению современных движений земной коры. – Воронеж, 1988. С.163-166.