

УДК 528.482

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-25-37

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Сергей Георгиевич Могильный

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 49600, Украина, г. Днепрпетровск, ул. Чернышевского, 24-а, доктор технических наук, профессор кафедры землеустройства, строительства автодорог и геодезии, тел. +38(050)606-43-54, e-mail: mogilnysg@mail.ru

Андрей Аркадьевич Шоломицкий

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

Елена Константиновна Лагутина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@ssga.ru

Екатерина Леонидовна Соболева

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 38, кандидат технических наук, декан факультета дизайна и искусств, тел. (383)209-17-50, доб. 1513, e-mail: e.l.soboleva@mail.ru

Информационные технологии и моделирование находят все более широкое применение при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений, и в большинстве случаев этого достаточно для безаварийной эксплуатации. Однако есть категория зданий, для которой неотъемлемой частью строительства и эксплуатации должен быть мониторинг технического состояния. К сожалению, развитие этих технологий в РФ находится не на таком уровне, чтобы ответить на вопросы о поведении объектов при изменяющихся условиях окружающей среды и выявить скрытые закономерности в данных мониторинга. На основе анализа литературных источников авторы рассмотрели различные методики выявления скрытых закономерностей в данных геодезических измерений при мониторинге зданий и сооружений. Отмечается, что современные методы анализа основаны на статистической обработке результатов измерений и на статистической методике прогноза. Однако есть попытки применения моделей, учитывающих конструктивные особенности и температурный режим объекта. К такому типу относятся и две предложенные модели, которые используют для моделирования трехмерные координаты деформационных марок в модели 3D и только отметки марок в модели 1-Z. В статье приведено обоснование моделируемых геометрических элементов и свойств объекта. Показано решение уравнений обеих моделей и анализ результатов и параметров модели на эпохи измерений. Моделирование показано на примере реального объекта, мониторинг которого выполнялся авторами в 2015–2016 гг. Авторы считают, что мониторинг большепролетных сооружений и поиск закономерностей их поведения должен быть составной частью информационной системы для таких сооружений.

Ключевые слова: геодезические измерения, параметры среды, мониторинг, термомодель, деформации, большепролетные сооружения, анализ закономерности

Введение

ВМ-технологии, применяемые для проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений, в большинстве случаев позволяют обеспечить безаварийную эксплуатацию данных объектов.

Однако для определенной категории зданий, таких как общественные большепролетные сооружения, неотъемлемой частью строительства и эксплуатации является мониторинг их технического состояния. В настоящее время в России уровень развития ВМ-технологий в строительной индустрии стремительно рас-

тет, но, к сожалению, пока не позволяет решать вопросы наблюдения за поведением объектов при изменяющихся условиях окружающей среды и выявления скрытых закономерностей в данных мониторинга. Это обусловлено тем фактором, что системы мониторинга технического состояния объектов не включены в BIM и являются отдельными системами. Данный фактор ограничивает область их применения и снижает пользу содержащейся в базе данных информации, поскольку она не связана с расчетными моделями, являющимися составной частью BIM.

Мониторинг объектов различных типов в общем случае предполагает измерение вертикальных смещений отдельных деформационных марок, закрепленных в характерных точках объекта или местах, где могут возникнуть критические деформации. Такие измерения, выполняемые в течение длительного промежутка времени, дают большой объем информации. Новые методы геодезического мониторинга, такие как лазерное сканирование и цифровая фотограмметрия, дают исследователю огромные объемы данных, из которых можно извлечь много полезных сведений о точности измерений, деформации объекта и его реакции на изменение условий окружающей среды. Идея не новая: примерно 20 лет назад появилось направление исследований, которое называется «data mining», – нахождение новых закономерностей в совокупности данных [1, 2]. В первую очередь эти методы были использованы для анализа клиентских данных банков и магазинов, выделения категорий клиентов для унификации обслуживания.

Позже появились методы для интеллектуального анализа и классификации пространственной информации [3, 4], которые в большей степени относятся к геоинформационным системам.

Развиваются методы поиска, выделения и учета систематических и случайных ошибок при многократных измерениях [5]. Все шире используются предрасчет точности и методы прогнозирования деформаций при мониторинге тоннелей [6, 7], открытых разработок [8]. Поиск закономерностей при мониторинге объектов осуществляется в совокупности с моделированием процессов, которые

вызывают деформации объектов [9]. Новые задачи, возникающие при мониторинге, требуют новых схем и методов измерений [10] и прогнозирования деформаций: нейронными сетями [11], методом конечных элементов [12] и др. При моделировании деформаций предлагается учитывать в моделях температурные деформации объекта, вызванные изменением температуры окружающей среды [13–16].

Все чаще для мониторинга и моделирования исторических зданий [17] и большепролетных сооружений [18] используется лазерное сканирование.

Очень интересным является подход авторов статьи [19] по совместной обработке спутниковых и геодезических наблюдений при мониторинге плотины, в которой авторы предположили, что объект нужно рассматривать как геометрически связанные точки наблюдений.

Для моделирования поведения объекта в изменяющихся условиях окружающей среды также применяют различные подходы: общий детерминистский [20], где автор не приводит конкретной реализации для реальных объектов. Второе направление – это статистическое моделирование и прогнозирование поведения объекта [21–23]. В связи с большим количеством литературы по данному направлению авторы надеются, что им удалось осветить хотя бы основные тенденции.

Авторы считают, что мониторинг состояния объектов не может быть полным и информативным, если модель не будет учитывать физические связи между деформационными марками, расположенными на исследуемом объекте, и реакцию этого объекта на изменяющиеся параметры окружающей среды.

Термомодель деформации опорного кольца

При мониторинге деформаций и смещений инженерных объектов используется методология периодических геодезических измерений координат закрепленных на объекте контрольных реперов, перемещение которых в пространстве характеризует состояние наблюдаемого объекта. Как правило, анализируется изменение координат каждого репера отдельно, и на основе анализа делается заключение о состоянии объекта наблюдения.

Анализируя свойства объекта наблюдения, рассматриваемого в настоящей работе (рис. 1), можно отметить следующие его особенности:

- объект (опорное кольцо) представляет собой цельную железобетонную конструкцию, не содержащую элементов, которые могут смещаться относительно друг друга;

- конструкция может изменять положение в пространстве под влиянием гравитационных сил, но упругие напряжения внутри конструкции остаются неизменными;

- размеры конструкции подвержены в определенной мере изменениям под влиянием температуры окружающей среды.

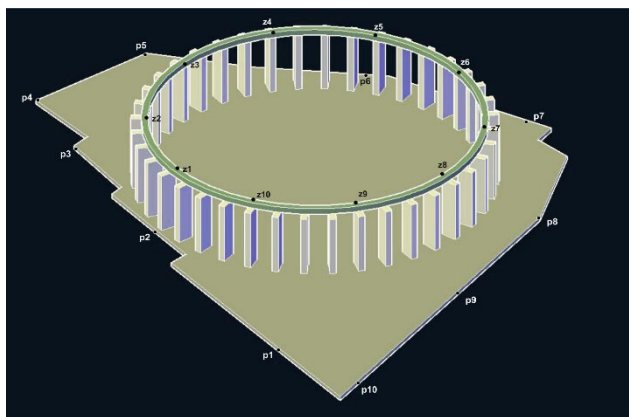


Рис. 1. Схема расположения деформационных марок

Все это дает основание предполагать, что смещения реперов, закрепленных в опорном кольце, подчиняются определенной общей закономерности, математическое описание которой является моделью изменений состояния объекта во времени. Поскольку на размеры опорного кольца оказывает влияние и температура внешней среды, то в модель следует включить фактор температуры, поэтому можно говорить о термомодели описания поведения объекта во времени.

Геодезические наблюдения за поведением опорного кольца следует разделить на два варианта: первый вариант, когда измерялись пространственные координаты реперов z_1, \dots, z_{10} , расположенных на опорном кольце (см. рис. 1), и второй вариант – измерялась только координата Z всех реперов,

включая точки p_1, \dots, p_{10} , расположенные на плите ростверка (см. рис. 1).

Первые десять циклов измерения деформационных марок опорной кольцевой балки выполнялись в условиях, которые давали возможность надежно и точно определять трехмерные координаты точек z_1, \dots, z_{10} . В последующих циклах измерений марки уничтожались при монтажных и отделочных работах, внутренняя геодезическая сеть усложнялась, и в последних циклах измерений можно было надежно определять только вертикальные оседания деформационных марок кольцевой балки. Для деформационных марок ростверка p_1, \dots, p_{10} форма геодезической сети и методика измерений не позволяли надежно определять плановые координаты, поэтому при моделировании учитывались только их высотные деформации. На рис. 2 показаны изменения высот для деформационных марок опорной кольцевой балки за весь период наблюдений, а на рис. 3 показан график изменения температуры окружающей среды за тот же период.

Визуальный анализ графиков (см. рис. 2, 3) позволяет сделать вывод о наличии закономерных изменений высот деформационных марок и температуры окружающей среды. Наличие такой закономерности можно проверить моделированием поведения объекта при изменении параметров окружающей среды.

Модель 3D. Первый вариант включает 10 циклов геодезических наблюдений. Поскольку измерялись все три координаты реперов, то они включаются в модель, называемую 3D-моделью. В модели вычислялось изменение положения кольца в период от начального цикла к текущему.

Приведение измерений реперов к начальной эпохе выполнялось, исходя из следующих предположений:

- кольцо является единой целой железобетонной конструкцией;
- в пределах конструкции взаимное положение реперов неизменно;
- конструкция может наклоняться и перемещаться в пространстве как единое целое;
- температурное расширение по оси Z происходит от уровня опорной плиты кольца;
- температурное расширение в горизонтальной плоскости исходит от центра кольца по радиусу.

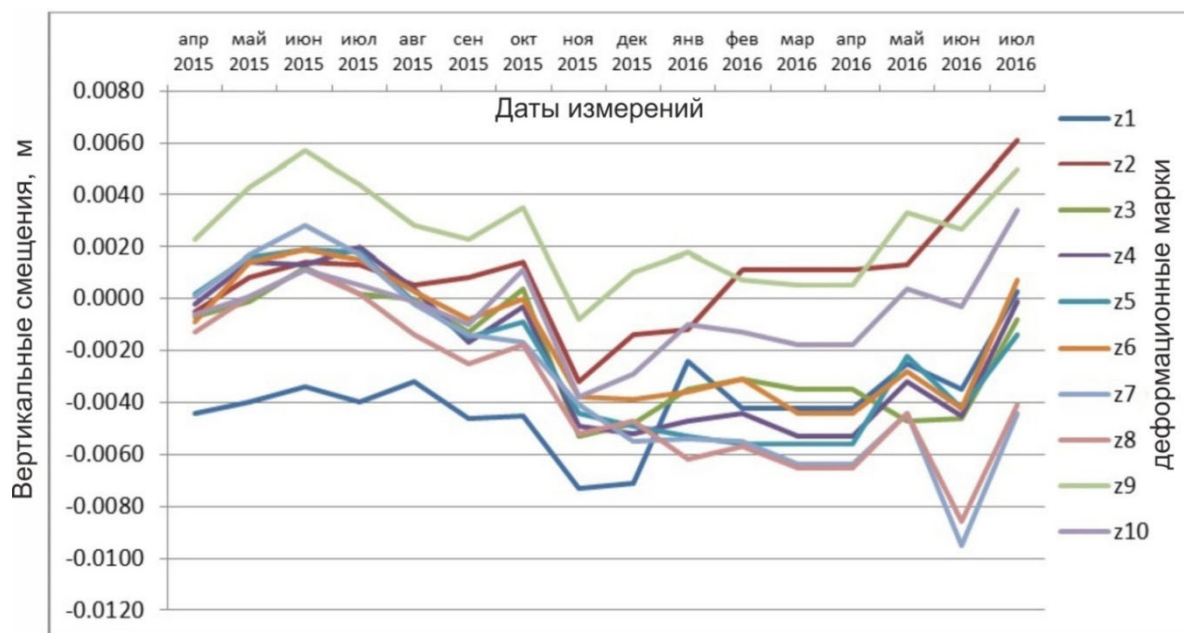


Рис. 2. График смещений марок железобетонной кольцевой балки

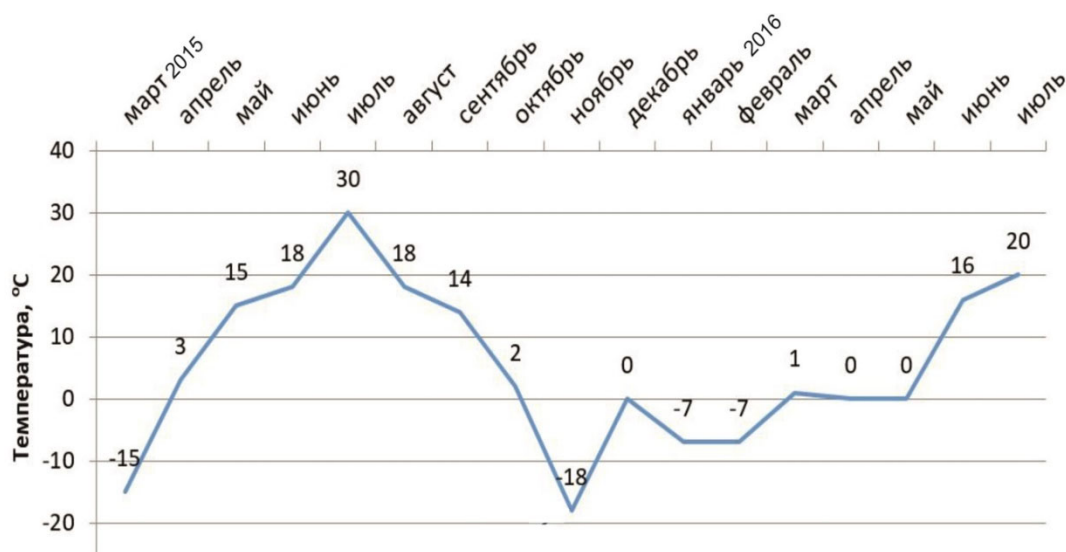


Рис. 3. График изменения температуры окружающей среды

Перевычисление координат репера серии измерений в начальную эпоху описывается в общем виде следующим уравнением:

$$X_{i,0} = A_j (X_{i,j} - \Delta_{i,j}^{(t)}) + C_j, \quad (1)$$

где $X_{i,0}$ – вектор координат репера i в начальную (нулевую) эпоху; $X_{i,j}$ – вектор измеренных координат репера i в текущую эпоху j ;

$\Delta_{i,j}^{(t)}$ – вектор температурного смещения ре-

пера i в эпоху j ; $C_j = \begin{pmatrix} c_{x,j} \\ c_{y,j} \\ c_{z,j} \end{pmatrix}$ – вектор смеще-

ния начала координат в эпоху j ; A_j – матрица поворота конструкции на углы Эйлера $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ в эпоху j , которая определяется из выражения

$$A_j = \begin{vmatrix} \cos \alpha_j \cos \beta_j & \cos \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j - \sin \alpha_j \cos \gamma_j & \cos \alpha_j \sin \beta_j \cos \gamma_j + \sin \alpha_j \sin \gamma_j \\ \sin \alpha_j \cos \beta_j & \sin \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j + \cos \alpha_j \cos \gamma_j & \sin \alpha_j \sin \beta_j \sin \gamma_j - \cos \alpha_j \sin \gamma_j \\ -\sin \beta_j & \cos \beta_j \sin \gamma_j & \cos \beta_j \cos \gamma_j \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где α_j – угол поворота вокруг оси Z , а β_j и γ_j – наклон соответственно осей X и Y .

Параметрические уравнения поправок в измеренные координаты реперов в эпоху j будут иметь вид

$$V_{i,j} = A_j (X_{i,j} - \Delta_{i,j}^{(t)}) + C_j - X_{i,0}, \quad (3)$$

где $V_{i,j}$ – вектор поправок в измеренные координаты репера в эпоху j .

В линейном виде уравнение (3) примет вид

$$V_{i,j} = B_{i,j} \Omega_j - \alpha_t D_{i,j} + L_{i,j}, \quad (4)$$

где $B_{i,j}$ – матрица коэффициентов в параметрических уравнениях поправок на ре-

пере i в эпоху j ; $\Omega_j = \begin{vmatrix} \delta \alpha_j \\ \delta \beta_j \\ \delta \gamma_j \\ \delta c_{x,j} \\ \delta c_{y,j} \\ \delta c_{z,j} \end{vmatrix}$ – вектор по-

правок в параметры наклона и смещения

$$\left. \begin{array}{l} B_1^T B_1 \Omega_1 \\ B_2^T B_2 \Omega_2 \\ \dots \\ B_n^T B_n \Omega_n \\ D_1^T B_1 \Omega_1 + D_2^T B_2 \Omega_2 + \dots + D_n^T B_n \Omega_n \end{array} \right\} \begin{array}{l} + \alpha_t B_1^T D_1 + B_1^T L_1 = 0 \\ + \alpha_t B_2^T D_2 + B_2^T L_2 = 0 \\ \dots \\ + \alpha_t B_n^T D_n + B_n^T L_n = 0 \\ + \alpha_t [D_j^T D_j] + [D_j^T D_j] = 0 \end{array} \quad (7)$$

Из решения системы определяются параметры всех эпох и, соответственно, деформации и смещения конструкции во времени.

Векторы V_j характеризуют случайную погрешность геодезических измерений координат, по ним можно вычислить μ – среднюю

конструкции в эпоху j ; α_t – температурный коэффициент расширения конструкции; $L_{i,j} = \hat{A}_j^T (X_{i,0} - \hat{C}_j) - \hat{\Delta}_{i,j}^{(t)} - X_{i,j}$ – вектор свободных членов на репере i , вычисленный по приближенным значениям величин, отмеченных значком «^».

Параметрические уравнения для всех реперов в эпоху j представляются следующим уравнением поправок:

$$V_j = B_j \Omega_j - \alpha_t D_j + L_j, \quad (5)$$

где матрицы B_j состоят из соответствующих матриц уравнений (4).

Нормальные уравнения для поправок в параметры будут иметь вид

$$\left. \begin{array}{l} B_j^T B_j \Omega_j + \alpha_t B_j^T D_j + B_j^T L_j = 0 \\ D_j^T B_j \Omega_j + \alpha_t D_j^T D_j + D_j^T L_j = 0 \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Для надежного определения температурного коэффициента α_t необходимо объединить системы уравнений для всех эпох измерений в общую систему, которую представляет следующее выражение:

квадратическую ошибку (СКО), используя следующую формулу:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum V_j^T V_j}{3r(c-1) - p}}, \quad (8)$$

где r – число реперов; c – число циклов наблюдений; p – количество параметров.

Оценка СКО – m_k параметра k определяется из выражения

$$m_k = \mu \sqrt{Q_{k,k}}, \quad (9)$$

где $Q_{k,k}$ – диагональный элемент обратной матрицы коэффициентов нормальных уравнений (7), соответствующий k -му параметру.

При решении системы уравнений (7) следует учитывать меру обусловленности матрицы коэффициентов, которая зависит от формы сети и колебаний температуры. В качестве меры обусловленности использовано отношение наибольшего и наименьшего собственных чисел матрицы (7). Если вычислять все неизвестные параметры, то мера обу-

словленности получается равной 2 500. Это объясняется тем, что все реперы расположены практически в одной горизонтальной плоскости в верхней части кольца, поэтому разделить влияние температуры и смещение по оси Z затруднительно, так как эти параметры коррелированы.

Если предположить, что смещение по оси Z вызвано только температурным фактором, а параметр $c_{z,j}$ во всех циклах равен нулю, то мера обусловленности равна 300, и вычисляемые параметры между собой слабо коррелированы. Основные результаты вычислений при определении всех параметров модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки измерений первого варианта наблюдений

№ п/п	Дата (месяц, год)	Температура, °С	Углы наклона (")			Смещение $c_{z,j}$, мм	Линия ската	
			α_j	β_j	γ_j		наклон, секунды	азимут, градусы
1	05.2015	+15	0	0	0	0	0	0
2	06.2015	+18	-58,7	0,6	-2,8	+1,5	2,8	78,6
3	07.2015	+30	-67,2	5,0	-3,4	+0,8	6,0	34,4
4	08.2015	+18	-68,0	6,6	-2,0	+1,5	6,9	17,0
5	09.2015	+14	-43,3	8,3	-2,9	-0,5	8,8	19,5
6	10.2015	+2	-43,3	8,3	-3,3	-0,7	9,0	21,7
7	11.2015	-18	-66,4	5,9	-0,2	-17,1	5,9	2,2
8	12.2015	0	15,4	10,5	1,5	-7,8	10,7	8,2
9	01.2016	-7	70,9	12,0	-3,8	-11,4	12,6	17,7
10	02.2016	-7	-71,1	17,2	-2,5	-11,4	17,4	8,3

Погрешность из формулы (8) получилась равной $\mu = \pm 3,4$ мм, в этом случае СКО угловых параметров получается равной 7", температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_t = (0,56 \pm 0,02)10^{-5} 1/^\circ\text{C}$.

Соотношение углов β_j и γ_j зависит от направления осей системы координат, поэтому нагляднее будет рассматривать угол наклона линии ската плоскости осей координат X_j и Y_j в цикле j , нормаль к которой есть вектор \vec{n}_j , состоящий из элементов третьего столбца матрицы A , формула (2).

Угол наклона ε_j линии ската определяется из выражения

$$\varepsilon_j = \arcsin(\sqrt{1 - n_{j,z}^2}), \quad (10)$$

а ее азимут Θ_j – по формуле

$$\Theta_j = \arctan\left(\frac{n_{y,j}}{n_{x,j}}\right). \quad (11)$$

В табл. 1 приведены результаты вычислений линии ската, а на рис. 4 показано графическое представление углов ε_j для всех циклов наблюдений.

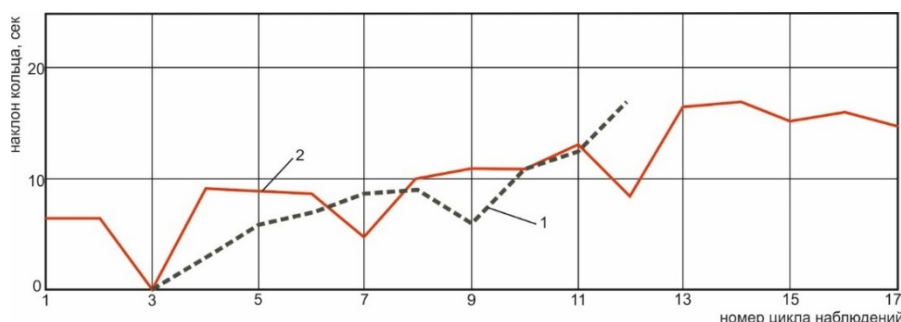


Рис. 4. Графики наклона кольца:

1 – модель 3D; 2 – модель 1-Z

Модель 1-Z. Второй вариант наблюдений за положением кольца обусловлен тем, что условия действующей строительной площадки не всегда обеспечивали возможность определять все три координаты реперов, поэтому ограничивались только измерением высот точек.

Этот вариант наблюдений охватывает весь период измерений и состоит из 17 циклов.

Приведение измерений реперов к начальной эпохе выполнялось, исходя из следующих предположений:

- кольцо является единой целой бетонной конструкцией;
- конструкция может наклоняться и подниматься/опускаться в пространстве как единое целое;

– в пределах конструкции взаимное положение реперов неизменно;

– температурное расширение по оси Z происходит от уровня опорной плиты кольца (ростверка);

– температурные расширения в горизонтальной плоскости исходят от центра кольца по радиусу (в данной модели не учитываются);

– реперы, как единое целое, наклоняются, поворачиваясь вокруг точки с координатами, равными среднему арифметическому из их координат;

– реперы наклоняются относительно осей X и Y на малые углы, соответственно, γ и ε , так что взаимное положение реперов в плане не учитывается, а анализируется только изменение координаты Z.

Матрица направляющих косинусов наклона системы координат в принятых предположениях будет иметь вид

$$A_j = \begin{vmatrix} 1 & \sin \beta_j \sin \gamma_j & \sin \beta_j \cos \gamma_j \\ 0 & \cos \gamma_j & -\sin \gamma_j \\ \sin \beta_j & \cos \beta_j \sin \gamma_j & \cos \beta_j \cos \gamma_j \end{vmatrix}, \quad (12)$$

поскольку в данной модели угол α_j принимается равным нулю.

С учетом малости углов наклона β_j и γ_j , а также анализа только координаты Z реперов, уравнение (3) в линейном виде упростится и примет вид

$$v_{Zi,j} = X_i \delta \beta_j + Y_i \delta \gamma_j + \delta c_{z,j} + \Delta Z_{i,j} - \alpha_i (Z_i - Z_{осн})(T_j - T_0), \quad (13)$$

где $v_{Zi,j}$ – поправка из-за случайных погрешностей измерений в высоту репера i в эпоху j ; X_i, Y_i, Z_i – координаты репера i ; $\Delta Z_{i,j}$ – изменение высоты репера i в эпоху j ; $Z_{осн}$ – высота основания кольца; T_0, T_j – температура окружающей среды при измерениях, соответственно начальному и j -му циклам наблюдений.

Уравнения (13), объединенные в общую систему, обрабатывались в соответствии с формулами (5)–(11). Результаты вычислений представлены в табл. 2, где за нулевой цикл наблюдений приняты измерения в мае 2015 г., чтобы удобнее было сопоставлять результаты первого и второго вариантов моделей обработки.

Случайная погрешность измерений из формулы (8) получилась равной $\mu = \pm 2,6$ мм, в этом случае СКО угловых параметров полу-

чается равной $\pm 4''$, температурный коэффициент $\alpha_t = (0,77 \pm 0,07)10^{-5} 1/^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что параметры модели 1–Z определяются более точно, дальнейший анализ

выполним для этой модели. Для этого введем поправки за температуру в данные фактических измерений оседаний (см. рис. 2). Величины смещений с учетом влияния температурных изменений приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 2

Результаты обработки второго варианта наблюдений

№ п/п	Дата (месяц, год)	Температура, °С	Углы наклона (секунды)		Смещение $c_{z,j}$, мм	Линия ската	
			β_j	γ_j		наклон, секунды	азимут, градусы
1	03.2015	-18	1,7	6,2	3,4	6,4	74,4
2	04.2015	+5	-1,5	6,3	0,7	6,5	103,8
3	05.2015	+17,50	0	0	0	0	0
4	06.2015	+18	-8,8	-2,4	0,4	9,1	195,0
5	07.2015	+31	-8,7	-2,4	-2,0	9,0	195,5
6	08.2015	+19	-8,3	-2,3	-1,2	8,6	195,6
7	09.2015	+15	4,6	-1,3	-0,4	4,8	344,8
8	10.2015	+2	9,8	2,6	1,8	10,2	14,8
9	11.2015	-18	10,9	-1,1	-0,7	11,0	354,3
10	12.2015	0	10,7	2,0	-1,0	10,9	10,6
11	01.2016	-2	12,2	5,0	-0,7	13,2	22,2
12	02.2016	+1	8,2	1,7	-0,5	8,4	11,5
13	03.2016	+5	15,4	6,4	-2,6	16,7	22,7
14	04.2016	+8	16,3	4,8	-2,7	17,0	16,5
15	05.2016	+9	12,8	8,3	-2,5	15,2	32,8
16	06.2016	+17	15,6	4,1	-2,6	16,2	14,8
17	07.2016	+22	13,7	5,9	-1,0	14,9	23,2

Таблица 3

Результаты анализа термомодели 1–Z

№ п/п	Дата	Смещение реперов по высоте относительно начальной сессии в июне 2015 г., мм										Смещение реперов по высоте из-за температуры, мм
		z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	
1	04.2015	-4,43	-4,75	-4,83	-4,62	-4,21	-3,76	-3,43	-3,36	-3,57	-3,98	5,43
2	05.2015	-1,16	-1,16	-0,94	-0,58	-0,22	0,01	0,01	-0,21	-0,57	-0,93	1,91
3	06.2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	07.2015	-0,86	-0,62	-0,40	-0,29	-0,33	-0,50	-0,75	-0,97	-1,08	-1,04	-0,08
5	08.2015	1,51	1,44	1,50	1,65	1,85	2,01	2,07	2,01	1,86	1,67	-2,07
6	09.2015	0,10	0,04	0,37	0,97	1,60	2,04	2,10	1,77	1,17	0,54	-0,23
7	10.2015	-0,02	0,20	0,90	1,80	2,57	2,90	2,67	1,98	1,07	0,31	0,38
8	11.2015	-2,97	-2,87	-2,19	-1,19	-0,26	0,26	0,16	-0,52	-1,51	-2,45	2,37
9	12.2015	0,06	0,15	0,25	0,32	0,35	0,31	0,23	0,13	0,05	0,02	5,43
10	01.2016	1,54	1,92	2,55	3,20	3,63	3,66	3,29	2,65	2,00	1,57	2,68
11	02.2016	-1,01	-0,49	0,80	2,35	3,59	4,02	3,50	2,21	0,66	-0,58	2,99
12	03.2016	-0,43	-0,25	0,76	2,22	3,56	4,28	4,10	3,08	1,63	0,29	2,53
13	04.2016	0,00	0,00	1,63	3,54	0,00	5,98	5,58	4,15	2,25	0,58	1,91
14	05.2016	0,75	0,94	2,11	3,81	5,39	6,24	6,05	4,88	3,18	1,60	1,45
15	06.2016	-0,16	0,40	1,56	2,87	3,83	4,08	3,52	2,36	1,05	0,09	1,30
16	07.2016	2,40	0,00	4,03	5,40	6,46	6,82	6,33	5,19	3,82	2,76	0,08
17	08.2016	-1,38	-1,14	-0,07	1,43	2,78	3,47	3,24	2,17	0,67	-0,68	-0,69

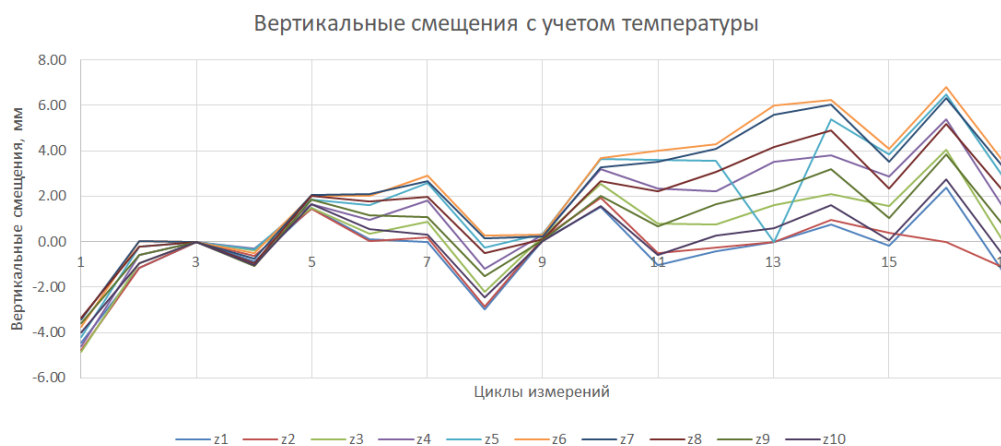


Рис. 5. График вертикальных смещений с учетом влияния температуры

Анализ графика на рис. 5 показывает, что при учете температурных изменений окружающей среды и объекта диапазон разброса смещений по деформационным маркам уменьшился для первых 10 циклов, по сравнению с рис. 2. Последующие циклы измерений, с 11 по 17, характеризуются более сложными условиями измерений и возрастанием случайных ошибок измерений, но и для этих циклов измерений разброс тоже уменьшился, хотя и в незначительной степени.

Выводы

По результатам моделирования поведения объекта по моделям 3D и 1-Z можно сделать вывод: кроме оседания кольцевой балки, вызванного уплотнениями грунта и изменением строительной нагрузки, имели место температурные деформации (см. табл. 3) и наклон (см. рис. 4).

По обеим моделям можно определить общий коэффициент линейного температурного расширения по изменению размеров объекта. Причем в модели 1-Z этот коэффициент ближе к справочным данным для железобетона. Однако многие исследователи отмечают, что линейные коэффициенты температурного расширения для реальных объектов могут сильно отличаться от справочных значений [24–26]. Это отличие определяется многими факторами конструкции и условиями строительства. В нашем случае разница этого коэффициента в моделях 3D и 1-Z обу-

словлена тем, что в модели 3D все деформационные марки z_1, \dots, z_{10} располагаются на одной высоте, и невозможно отделить температурные деформации от собственно оседаний. А в модели 1-Z точки z_1, \dots, z_{10} и p_1, \dots, p_{10} расположены на разных уровнях, с перепадом высот 15 м, поэтому и коэффициент определился точнее.

На рис. 6 показана развертка на плоскость профилей по деформационным маркам кольцевой железобетонной балки на три даты. Форма этих профилей хорошо согласуется с предположением о наклоне кольцевой балки. На рис. 6 видно, что наклон балки увеличивается во времени от начала наблюдений.

Анализ наклона кольцевой опорной балки показывает (см. рис. 4), что наклон кольцевой балки увеличивался до 13–14 цикла измерений, а затем стабилизировался и начал уменьшаться, что, возможно, связано с распределением строительной нагрузки при завершении строительства объекта.

Конечно, приведенные в статье модели не являются универсальными – для других объектов, с другими конструктивными особенностями, возможно, придется использовать другие системы уравнений, основанные на других гипотезах. Однако такой подход позволяет выявить закономерности поведения объектов на различные эпохи при различных параметрах окружающей среды и при благоприятных условиях измерений позволяет определить долю температурного фактора в общих деформациях объекта.

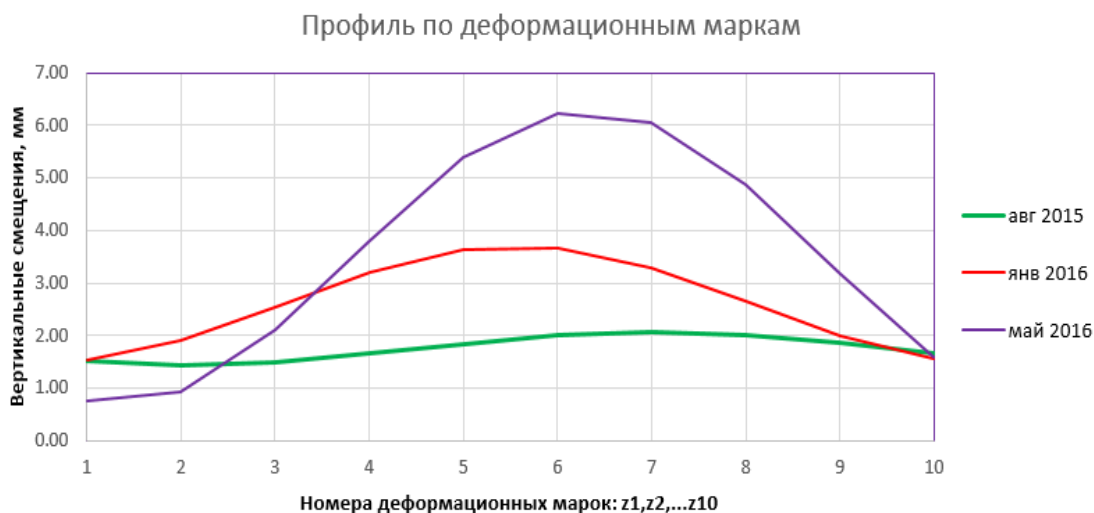


Рис. 6. Профили по деформационным маркам кольцевой балки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Han J., Kamber M. *Data Mining: Concepts and Techniques*. – Third Edition. – Elsevier Inc., 2012. – 673 p.
2. Witten I., Frank E. *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques*. – Second Edition. – Elsevier Inc., 2005. – 525 p.
3. Li D., Wang S., Li Deyi. *Spatial Data Mining. Theory and Application*. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2015. – 308 p.
4. Li D., Wang S. *Concepts, principles and applications of spatial data mining and knowledge discovery // ISSTM 2005 (August, 27–29)*. – Beijing, China, 2005. – P. 1–12.
5. Герасименко М. Д., Каморный В. М. Уравнивание повторных геодезических измерений при наличии систематических ошибок // *Геодезия и картография*. – 2014. – № 9. – С. 7–8.
6. Горохова Е. И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 65–72.
7. Афонин Д. А., Богомолова Н. Н., Брынь М. Я. Предрасчет точности геодезических измерений при организации мониторинга деформаций порталных частей транспортных тоннелей // *Геодезия и картография*. – 2014. – № 1. – С. 7–11.
8. Brown N., Kaloustian S., Roeckle M. *Monitoring of Open Pit Mines using Combined GNSS Satellite Receivers and Robotic Total Stations // International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. – Perth, Western Australia, 2007. – P. 417–429.
9. Costantino D., Angelini M. G. *Structural Monitoring With Geodetic Survey of Quadrifoglio Condominium (Iecce) // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Vol. XL–5/W3, The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk (27–28 February 2013)*. – Padua, Ital. – P. 179–187.
10. Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowski A., Steeves R. *Reliability and Efficiency of Dam Deformation Monitoring Schemes // CDA 2011 Annual Conference, Congres annuel 2011 de l'ACB (October 15–20, 2011)*. – Fredericton, NB, Canada, 2011. – P. 1–15.
11. Miima J. B., Niemeier W. *Adapting neural networks for modelling structural behavior in geodetic deformation monitoring // ZfV*. – 2004. – Vol. 129 (3). – P. 160–167.
12. Shan A. C. *Analytical Research on Deformation Monitoring of Large Span Continuous Rigid Frame Bridge during Operation // Engineering*. – 2015. – Vol. 7. – P. 477–487.
13. *Monitoring and analysis of ground temperature and deformation within Qinghai–Tibet Highway subgrade in permafrost region / Y. H. Tian, Y. P. Shen, W. B. Yu, J. H. Fang // Sciences in Cold and Arid Regions*. – 2015. – Vol. 7, Issue 4. – P. 370–375.
14. Bliuger F. *Temperature Effects in Buildings with Panel Walls // Building and Environment*. – 1982. – Vol. 17 (I). – P. 17–21.

15. Bureš J., Švábenský O., Kalina M. Long-term Deformation Measurements of Atypical Roof Timber Structures // INGENEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, TS 7 – Monitoring of structures (April 3–4, 2014). – Prague, Czech republic, 2014. – P. 249–254.
16. Zhang P., Xia Y., Ni Y. Q. Prediction of Temperature Induced Deformation of a Supertall Structure Using Structural Health Monitoring Data // Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring (July 3–6, 2012). – Dresden, Germany, 2012. – P. 879–885.
17. Vacca G., Mistretta F., Stochino F., Dessi A. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings // 2016 XXIII ISPRS Congress: Vol. XLI–B5, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (12–19 July 2016). – Prague, Czech Republic, 2016. – P. 453–460.
18. Mill T., Ellmann A. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure // INGENEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, TS 5 – Deformation measurement (April 3–4, 2014). – Prague, Czech Republic, 2014. – P. 179–186.
19. Ягер Р., Шпон П., Шайхутдинов Т., Горохова Т., Янкуш А. Математические модели и техническая реализация GOCA – онлайн системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 9–32.
20. Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно–временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.
21. Кобелева Н. Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 55–66.
22. Кобелева Н. Н., Хорошилов В. С. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно–Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007–2009 годов) // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 5–12.
23. Кобелева Н. Н., Хорошилов В. С. Построение математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно–Шушенской ГЭС для периода эксплуатации 2007–2009 гг. // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 73–86.
24. Бедов А. И., Знаменский В. В., Габитов А. И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. – М. : Изд-во АСВ. – 2014. – Ч. 1. – 704 с.
25. Симонян В. В., Шмелин Н. А., Зайцев А. К. Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. – 2-е изд. – М. : НИУ МГСУ, 2016. – 144 с.
26. Снегирев А. И., Альхименко А. И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 8–16.

Получено 29.04.2020

© С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева, 2021

MONITORING, MODELING AND BEHAVIOR ANALYSIS OF STRUCTURES

Sergey G. Mogilny

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskogo St., Dnepr, 49600, Ukraine, D. Sc., Professor, Department of Land Management, Road Construction and Geodesy, phone: +38(050)606-43-54, e-mail: mogilnysg@mail.ru

Andrei A. Sholomitskii

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

Elena K. Lagutina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Teacher, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@ssga.ru

Ekaterina L. Soboleva

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyy prospekt St., Novosibirsk, 630099, Russia, Ph. D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Design and Arts, phone: (383)209-17-50 (1513), e-mail: e.l.soboleva@mail.ru

Information technology and modeling are becoming more widely used, mainly in the design and operation of buildings and structures, and in most cases this is enough for trouble-free operation. Nevertheless, there is a category of buildings for which the monitoring of the technical condition should be an integral part of the construction and operation. Unfortunately, the development of these technologies in the Russian Federation is not at level, sufficient for answering questions about the behavior of objects under changing environmental conditions and revealing hidden patterns in monitoring data. Based on analysis of literary sources, the authors reviewed various methods for identifying hidden patterns in geodetic measurement data when monitoring buildings and structures. It is noted that modern analysis methods are based on statistical processing of measurement results and on statistical forecasting method. However, there are attempts to apply models that take into account object's design features and temperature regime. This type includes two proposed models, which are used to model three-dimensional coordinates of strain marks in the 3D model and only elevations of marks in the 1-Z model. The article presents the rationale for the simulated geometric elements and properties of the object. The solution of the equations of both models and the analysis of the results and parameters of the model for measurement epochs are shown. The simulation is shown on the example of a real object, which was monitored by the authors in 2015–2016. The authors believe that the monitoring of large-span structures and the search for patterns of their behavior should be an integral part of the information system for such structures.

Keywords: geodetic measurements, environmental parameters, monitoring, thermal model, deformations, large-span structures, pattern analysis

REFERENCES

1. Han, J., & Kamber, M. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques* (3rd ed.). Elsevier Inc., 673 p.
2. Witten, I. H., & Frank, E. (2005). *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques* (2nd ed.). Elsevier Inc., 525 p.
3. Li, D., Wang, Sh. & Li, Deyi (2015). *Spatial Data Mining. Theory and Application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 308 p.
4. Li, D., & Wang, Sh. (2005). Concepts, principles and applications of spatial data mining and knowledge discovery. ISSTM 2005 (pp. 1–12). Beijing, China.
5. Gerasimenko, M. D., & Kamornyj, V. M. (2014). Adjustment of repeated geodetic measurements in case the systematic errors presence. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 9, 7–8 [in Russian].
6. Gorohova, E. I. (2016). Geomonitoring of engineering structures and forecasting their deformations using laser scanning data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 65–72 [in Russian].
7. Afonin, D. A., Bogomolova, N. N., & Bryn', M. Ya. (2014). Preliminary calculation of the accuracy of geodetic measurements during the monitoring of deformation of gantry parts of transport tunnels. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 1, 7–11 [in Russian].
8. Brown, N., Kaloustian, S., & Roeckle, M. (2007). Monitoring of Open Pit Mines Using Combined GNSS Satellite Receivers and Robotic Total Stations. *Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering* (pp. 417–429). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
9. Costantino, D., & Angelini, M. G. (2013). Structural Monitoring with Geodetic Survey of Quadri-foglio Condominium (Iecce). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Vol. XL-5/W3. The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk* (pp. 179–187). Padua, Ital.

10. Chrzanowski, A., Szostak-Chrzanowski, A., & Steeves, R. (2011). Reliability and Efficiency of Dam Deformation Monitoring Schemes. CDA 2011 Annual Conference, Congres annuel 2011 de l'ACB (pp. 1–15). Fredericton, NB, Canada.
11. Miima, J. B., & Niemeier, W. Adapting neural networks for modelling structural behavior in geodetic deformation monitoring. *ZfV*, 129(3), 160–167.
12. Shan, A. C. (2015). Analytical Research on Deformation Monitoring of Large Span Continuous Rigid-Frame Bridge during Operation. *Engineering*, 7, 477–487.
13. Tian, Y. H., Shen, Y. P., Yu, W. B., & Fang, J. H. (2015). Monitoring and analysis of ground temperature and deformation within Qinghai-Tibet Highway subgrade in permafrost region. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 7(4), 370–375.
14. Bliuger, F. (1982). Temperature Effects in Buildings with Panel Walls. *Building and Environment*, 17(I), 17–21.
15. Bureš, J., Švábenský, O., & Kalina, M. (2014). Long-term Deformation Measurements of Atypical Roof Timber Structures. *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying. TS 7 – Monitoring of structures* (pp. 249–254). Prague, Czech Republic.
16. Zhang, P., Xia, Y., & Ni, Y. Q. (2012). Prediction of Temperature Induced Deformation of a Supertall Structure Using Structural Health Monitoring Data. *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring* (pp. 879–885). Dresden, Germany.
17. Vacca, G., Mistretta, F., Stochino, F., & Dessi, A. (2016). Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Vol. XLI-B5. 2016 XXIII ISPRS Congress* (pp. 453–460). Prague, Czech Republic.
18. Mill, T., & Ellmann, A. (2014). Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure. *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, TS 5 – Deformation measurement* (pp. 179–186). Prague, Czech Republic.
19. Yager, R., Shpon, P., Shajhutdinov, T., Gorohova, T., & Yankush, A. (2012). Mathematical models and technical realization of GOGA – on-line system of geodetic monitoring and reporting deformations of natural and technogenic objects, based on accurate satellite (GNSS) and ground-based (LPS/LS) observations. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Plenarnoe zasedanie [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Plenary Session]* (pp. 9–32). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
20. Bugakova, T. Yu. (2015). Modelling of spatio-temporal variations for engineering structures and natural objects by geodetic data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 34–42 [in Russian].
21. Kobeleva, N. N. (2017). Methodical Peculiarities of Prognostic Mathematical Modelling for Deformation Survey of High Dams. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 55–66 [in Russian].
22. Kobeleva N. N., & Horoshilov V. S. (2015). Creation of forecast model of dam crest displacement of Sajano-Shushenskaja PS based on geodetic data, operation years 2007–2009. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 5–12 [in Russian].
23. Kobeleva, N. N., & Horoshilov, V. S. (2016). Creation of mathematical models for forecast of horizontal displacements of Sajano-Shushenskaja dam for the operation period 2007–2009. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 73–86 [in Russian].
24. Bedov, A. I., Znamenskij, V. V., & Gabitov, A. I. (2014). *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vostanovlenie i usilenie osnovaniy i stroitel'nykh konstruktsiy ekspluatiruemyykh zdaniy i sooruzheniy: Ch. 1 [Estimation of technical conditions, reconstruction and reinforcement of foundations in engineering structures and buildings in operation: Part I]*. Moscow: ASV Publ., 704 p. [in Russian].
25. Simonyan, V. V., Shmelin, N. A., & Zajcev, A. K. (2016). *Geodezicheskiy monitoring zdaniy i sooruzheniy kak osnova kontrolya za bezopasnost'yu pri stroitel'stve i ekspluatatsii inzhenernykh sooruzheniy [Geodetic monitoring of buildings and constructions as a basis of safety control in building and exploitation of engineering structures]* (2nd ed.). Moscow: NIU MGSU Publ., 144 p. [in Russian].
26. Snegirev, A. I., & Al'himenko, A. I. (2008). Temperature influence onto bearing constructions strain. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, 2, 8–16.

Received 29.04.2020

© S. G. Mogilny, A. A. Sholomitskii, E. K. Lagutina, E. L. Soboleva, 2021