

УДК 528.48+[514.7:004.9]

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-36-46

Прогноз деформационного процесса по геодезическим наблюдениям на основе кинематической модели

Ю. А. Новиков^{1✉}, В. С. Хорошилов², Т. В. Мальцева¹

¹ Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: 969118@mail.ru

Аннотация. Принимая во внимание повышение среднегодовой температуры воздуха и температуры в грунтах, учитывая особенности мерзлотно-грунтовых условий, а именно значимость его первоначального температурного режима, возникает необходимость проведения систематических геодезических наблюдений за деформациями, возможности прогнозирования деформаций как эксплуатируемых, так и вновь строящихся зданий и сооружений. В статье представлены результаты натурных геодезических наблюдений за развитием осадок блочно-модульного здания на территории Саха Якутии. По данным натурных наблюдений выполнена инверсная верификация кинематической модели. Представлены результаты прогнозирования в программном комплексе Кредо Расчет Деформаций. Выполнен сравнительный анализ данных натурных наблюдений и данных моделирования. Высказано мнение об адекватности и возможности применения того или иного метода прогнозирования наблюдаемых деформационных процессов.

Ключевые слова: геодезические наблюдения, мониторинг, осадка здания, деформации, прогноз, математические модели, кинематические и динамические модели

Для цитирования:

Новиков Ю. А., Хорошилов В. С., Мальцева Т. В. Прогноз деформационного процесса по геодезическим наблюдениям на основе кинематической модели // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 36–46. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-36-46

Введение

Принято считать, что процесс деформации сооружений – это достоверное событие, развивающееся во времени и пространстве. Систематические геодезические наблюдения за осадками и горизонтальными смещениями зданий и сооружений формируют основу главного метода изучения развития деформационных процессов. Наличие и скорость развития деформационных процессов на протяжении многих десятилетий эффективно выявляются различными геодезическими методами. Геодезические данные позволяют с большой точностью не только дать оценку степени риска и уязвимости зданий и сооружений при наличии тех или иных деформаций, но и строить прогнозные математиче-

ские модели наблюдаемых деформационных процессов. Совершенствование инструментальной основы повышает оперативность и точность получаемых геодезических данных, но при этом анализу и особенно прогнозированию уделяется недостаточно должного внимания.

Следовательно, целью статьи является изучение существующих математических прогнозных моделей, строящихся на основе геодезических данных, возможность их применения и проверка достоверности полученных прогнозных значений путем сравнения с данными натурных наблюдений [1–6]. В качестве объекта исследования рассмотрено блочно-модульное здание на территории Саха Якутии, построенное по I принципу использования многолетнемерзлых грунтов.

Предмет исследования – наблюдаемый процесс деформации сооружения (осадки).

Методы и прогнозные модели

Математические модели деформационных процессов могут быть построены как в кинематических, так и динамических фор-

мах, исходя из полноты, видов и форм имеющихся данных [7–13].

Динамической моделью служит математическое описание процесса перемещений, в котором учитываются инерционные свойства системы «сооружение – основание» и действие во времени основных сил, вызывающих перемещения:

$$\frac{dX(t)}{dt} = f[X(t), t, \theta] + B[U(t), t, \theta] + \Gamma(\theta)W(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – вектор, называемый состоянием данной системы, составленный из перемещений $y(t) = x(t)$ и их производных;

$U(t)$ – вектор входных воздействий;

θ – вектор неизвестных параметров модели;

$W(t)$ – вектор эквивалентного шума, приведенный ко входу и включающий действие всех неучтенных факторов;

$\varphi[X(t), t, \theta], B[U(t), t, \theta]$ – известные непрерывные и в общем случае вектор-функции времени t , характеризующие соответственно динамические свойства системы и влияния входного воздействия на состояние системы;

$\Gamma(\theta)$ – матрица, отражающая степень влияния неучтенных факторов.

На входе системы действуют ряд переменных динамических нагрузок, а также постоянная нагрузка и шумовая компонента. Шумовая компонента включает в себя случайные и другие воздействия, которые невозможно по незнанию учесть и отнести к другим составляющим. Выходными переменными являются перемещения элементов конструкций.

Когда входное воздействие становится постоянными и равным U_0 , и стабилизируется необратимая предельная деформация X_∞ , можно пренебречь шумовой компонентой и записать:

$$X_\infty = \Phi X_\infty + BU_0, \quad (2)$$

откуда

$$X_\infty = (E - \Phi)^{-1}BU_0, \quad (3)$$

где E – единичная матрица;

$R = (E - \Phi)^{-1}B$ – матрица жесткости изучаемой системы.

Возможен переход от динамической к модели упругой линейной деформации:

$$X_\infty = RU_0. \quad (4)$$

Частным случаем динамической модели служит статическая модель построенные по геодезическим данным по величине стабилизировавшихся перемещений (равновесие тел под действием сил).

При определённых условиях можно перейти от динамической модели к используемой в строительной механике и механике грунтов модели упругой линейной деформации. Стоит отметить, что в механике грунтов также большое внимание уделяется прогнозированию возможных деформаций грунтового основания, которое выполняется как эмпирическими и аналитическими методами, так и в результате численного моделирования в различных программных комплексах Plaxis, FEMmodels, Frost 3d, Ansis и т. д.

Кинематической моделью служит математическое описание процесса перемещений, отражающее зависимость величины перемещения от времени, без учета влияния внешних факторов. Осуществляется в виде эмпирического закона распределения случайного процесса. Модель К. Острема [14] строится для всех статистически однородных реализаций процесса путем определения аппроксимации статистических параметров закона распределения перемещений по нескольким циклам:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} (\det K_X)^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - m_X)^T K_X^{-1} (X - m_X) \right\}, \quad (5)$$

где $X = (X_1^T, X_2^T, \dots, X_n^T)$ – N -мерный вектор;

m_X – n -мерный вектор математического ожидания;

K_X – корреляционная матрица порядка $N \times N$, составленная из элементов матричных корреляционных функций $K_{X_i X_j} = (t_i, t_j)$, $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Для перехода к прогнозной модели, согласно работе Ю. П. Гуляева [15], необходимо использовать две первые условные моментные функции процесса – математическое ожидание и корреляционную функцию.

1. Математическое ожидание перемещения любой наблюдаемой точки при условии, что известно перемещение в момент времени t_1 , можно записать в виде выражения:

$$\hat{M} \{X(t_2) / X(t_1)\} = \hat{M} \{X(t_2)\} + \hat{K}_X(t_2, t_1) \tilde{K}_X^{-1}(t_1, t_1) [X(t_1) - \tilde{m}_X(t_1)], \quad (6)$$

где $X(t)$ – случайный вектор процесса перемещения наблюдаемых точек сооружения;

t_1, t_2 – моменты времени, соответствующие концам периодов основания прогноза и утверждения;

M – символ оператора математического ожидания;

$\tilde{m}_X(t)$ – вектор математического ожидания процесса перемещений;

$K_X(t_2, t_1) = M \left\{ [X(t_2) - m_X(t_2)] [X(t_1) - m_X(t_1)]^T \right\}$ – матрица автокорреляционной функции процесса.

2. Корреляционная функция (матрица ошибок) отражает рассеивание плотности нормального распределения, а также дает возможность определить оценку точности прогноза и записывается в виде:

$$\hat{K}_e = \hat{K}_X(t_2, t_2) - \hat{K}_X(t_2, t_1) \tilde{K}_X^{-1}(t_1, t_1) \hat{K}_X(t_1, t_2). \quad (7)$$

Значения статистических параметров закона распределения, вычисляемых на период основания прогноза, выполняется по формулам, представленным в работе Е. С. Вентцеля [16]:

$$\begin{cases} \hat{M}_x(t_j) = a + bt_j; \\ \hat{\sigma}_x(t_j) = \frac{t_j}{c + dt_j}; \\ \hat{r}_x(t_j, t_k) = e^{-a(t_k - t_j)}. \end{cases} \quad (8)$$

Прогнозирование как на весь период наблюдения, так и на заданную дату может

быть реализовано в программном комплексе Кредо Расчет Деформаций. Задача прогнозирования решается путем аппроксимации априорно заданных данных с использованием метода наименьших квадратов. Результатом является построение графика развития осадок во времени, на котором будет отображена линия тренда, наиболее достоверная аппроксимирующая квадратичная функция:

$$f(x) = ax^2 + bx + c. \quad (9)$$

Искомые коэффициенты a, b, c находят через систему линейных уравнений, записанную в матричном виде:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i & n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Величина достоверности аппроксимации рассчитывается как

$$R^2 = \frac{\delta_f^2}{\delta_{\text{общ}}^2}, \quad (11)$$

где δ_f^2 и $\delta_{\text{общ}}^2$ находятся по формулам:

$$\delta_f^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{n}; \quad (12)$$

$$\delta_{\text{общ}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n}; \quad (13)$$

n – количество измерений;

$\bar{y}$ – среднее арифметическое из всех измерений.

Оценки надежности тренда выполняются путем сравнения расчетного значения (критерия Фишера) F_p с теоретическим (табличным) значением F_T . Расчетный критерий Фишера определяется по формуле:

$$F_p = \frac{(n-k) \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(k-1) \sum (\hat{y}_i - y)^2}, \quad (14)$$

где k – число параметров (членов) выбранного уравнения тренда;

n – количество измерений;

$\bar{y}$ – усредненное значение фактических данных.

Если выполняется условие $F_p > F_T$, то считается, что выбранная математическая модель ряда данных адекватно отражает обнаруженный в нем тренд.

Исходные данные

Отсутствие в достаточном объеме данных о влиянии внешних воздействующих факторов на систему не позволяет в полной мере оценить возможность использования динамической модели для прогнозирования наблюдаемых деформационных процессов на исследуемом объекте, поэтому основной акцент в статье будет направлен на применение кинематической модели прогнозирования.

Исходными данными для моделирования являются результаты геодезических наблюдений блочно-модульного здания на территории Саха Якутии, проведенного одним из авторов статьи. Деформационно-осадочные марки были установлены на свайном основании из металлических труб. Общий вид марки представлен на рис. 1. Схема расположения деформационных марок представлена на схеме на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид осадочно-деформационной марки

Работы проводились с цикличностью 1 раз в месяц, всего было выполнено 13 циклов наблюдений. Измерения превышений между деформационными марками выполнялись по методике геометрического нивелирования II класса точности [17, 18] высокоточным цифровым нивелиром DiNi 03 в комплекте с кодовыми рейками LD 12. Схема нивелирного хода представлена на рис. 3.

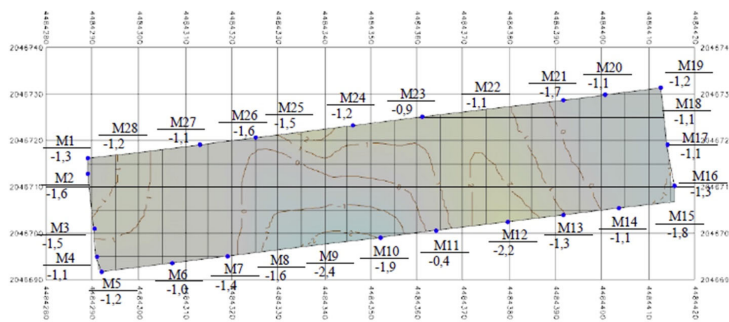


Рис. 2. Схема расположения осадочно-деформационных марок

перемещений с 10-го по 13-й цикл. Полученные результаты прогнозных значений марки М2 на период упреждения (10–13 цикл) отоб-

ражены на рис. 2. Все расчеты производились в программном продукте Excel, Mathcad, Credo.

Таблица 1

Общие данные геодезических наблюдений за маркой М2

№ цикла	Дата	Осадка, мм	№ цикла	Дата	Осадка, мм
0	26.11.22	0	7	29.06.23	-1,5
1	07.12.22	-0,1	8	27.07.23	-1,5
2	20.01.23	0	9	28.08.23	-1,5
3	25.02.23	-0,2	10	30.09.23	-1,6
4	31.03.23	-0,3	11	26.10.23	-1,6
5	28.04.23	-0,3	12	25.11.23	-1,7
6	26.05.23	-0,9	13	20.12.23	-1,6

Результаты исследования

Результаты прогнозной кинематической модели, рассчитанные по алгоритму, представленному в работе [19], базировались на определении двух первых условных моментных функций: математического ожидания и его среднеквадратического отклонения, характеризую-

щего ожидаемую погрешность прогнозирования. Для выбора тренда, наиболее близко описывающего результаты натурных наблюдений, выполнено прогнозирование по кинематической модели с линейным и нелинейным трендом. Прогнозирование перемещения марки М2 для периода упреждения на 13-й цикл наблюдений выглядит следующим образом:

$$\hat{m}_{x_i}(t_2 / t_1) = \hat{m}_x(t_2) + \hat{r}_x(t_2, t_1) \frac{\hat{\sigma}_x(t_2)}{\hat{\sigma}_x(t_1)} \&_{x_i}(t_1) = \hat{m}_{x_2}(13 / 9) = \hat{m}_x(13) + \hat{r}_x(13 / 9) \frac{\hat{\sigma}_x(13)}{\hat{\sigma}_x(9)} \&_{x_2}(9) =$$

$$-1,436 + 0,914 \frac{0,241}{0,258} (-1,5 - (-1,32)) = -1,589$$

и

$$\hat{\sigma}_x(t_2 / t_1) = \hat{\sigma}_x(t_2) \sqrt{1 - \hat{r}^2(t_2, t_1)} = \hat{\sigma}_x(13 / 9) = \hat{\sigma}_x(13) \sqrt{1 - \hat{r}^2(13 / 9)} = 0,241 \sqrt{1 - 0,914^2} = 0,098.$$

При моделировании перемещения марки М2 виде экспоненциальной зависимости М2 для периода упреждения на 13-й цикл наблюдений получаем следующие выражения:

$$\hat{m}_{\&x_2}(13 / 9) = \hat{m}_{\&x}(13) + \hat{r}_x(13 / 9) \frac{\hat{\sigma}_x(13)}{\hat{\sigma}_x(9)} [\&_{x_2}(9) - \hat{m}_x(9)] + \hat{m}_x(13) =$$

$$-0,004 + 0,914 \frac{0,2417}{0,2463} (-1,5 - (-1,317) - (-0,003)) - 1,436 = -1,601$$

и

$$\hat{\sigma}_x(t_2 / t_1) = \hat{\sigma}_x(t_2) \sqrt{1 - \hat{r}^2(t_2, t_1)} = \hat{\sigma}_x(13 / 9) = \hat{\sigma}_x(13) \sqrt{1 - \hat{r}^2(13 / 9)} = 0,241 \sqrt{1 - 0,914^2} = 0,098.$$

Общие данные прогнозного кинематического моделирования для линейного и нелинейного тренда представлены в табл. 2.

Таблица 2

Общие данные прогнозного кинематического моделирования
для линейного и нелинейного тренда

Период упреждения	Прогноз	Факт	Δ	$2\sigma_x$
Линейный тренд				
$\hat{m}_x(10/9)$	-1,51	-1,6	0,09	0,196
$\hat{m}_x(11/9)$	-1,54	-1,6	0,06	0,185
$\hat{m}_x(12/9)$	-1,56	-1,7	0,14	0,173
$\hat{m}_x(13/9)$	-1,59	-1,6	0,01	0,159
Нелинейный тренд				
$\hat{m}_x(10/9)$	-1,51	-1,6	0,09	0,196
$\hat{m}_x(11/9)$	-1,57	-1,6	0,03	0,185
$\hat{m}_x(12/9)$	-1,62	-1,7	0,05	0,173
$\hat{m}_x(13/9)$	-1,60	-1,6	0,00	0,159

По итогам вычислений построен общий график развития осадки во времени деформационной марки М2 на основе данных кинематического моделирования, данных прогнозных расчетов в комплексе Кредо и данных натурных наблюдений (рис. 5).

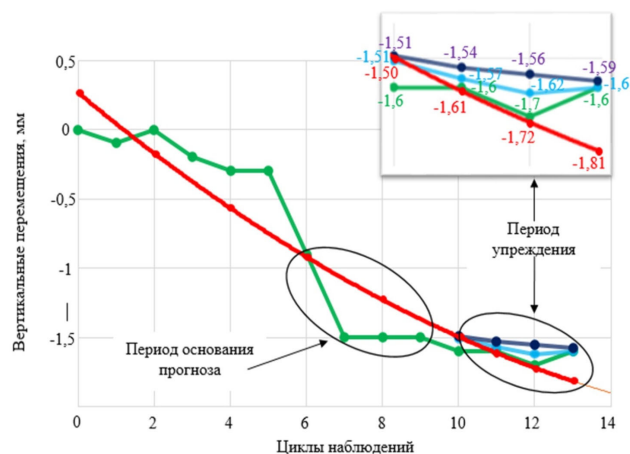


Рис. 5. Сопоставление результатов прогнозирования и данных натурных наблюдений марки М2:

- данные натурных наблюдений;
- прогнозное моделирование в Кредо Расчет деформаций;
- кинематическая модель с линейным трендом;
- кинематическая модель с нелинейным трендом

Заключение

Анализ представленных графиков позволил сделать следующие выводы:

– выполненная инверсная верификация кинематической модели укладывается в пределы вычисленного на каждом прогнозном цикле наблюдений удвоенного стандарта, коридора погрешности прогноза;

– максимальные отклонения линейного тренда от данных натурных наблюдений отмечены на 12-м цикле и составляют 5 %, для нелинейного тренда – 8 %, что говорит о хорошей сходимости с результатами натурных наблюдений. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности использования данного алгоритма кинематического моделирования для прогнозирования деформационных процессов на основе геодезических наблюдений;

– результаты прогнозирования в программном комплексе Кредо Расчет Деформаций так же укладываются в пределы удвоенного стандарта. Максимальные отклонения от данных натурных наблюдений и результатов кинематического прогнозирования отмечены на 13-м цикле наблюдений и составляют 12 %;

– при длительном прогнозировании, без отсутствия основания прогноза, аппроксимация тренда имеет ограниченное использова-

ние, что может значительно сказаться на итоговых результатах;

– отсутствие временного масштабного фактора, по причине которого изначально получаются весьма малые значения коэффициентов линии тренда, затрудняет их использование для решения отдельных задач;

– учитывая интерес к вышеизложенной теме, дальнейшие исследования будут направлены на сбор данных натурных наблюдений в достаточном объеме, для построения динамической прогнозной модели и возможности ее адаптации, исходя из региональных особенностей расположения объектов наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Erkan Kose, Levent Tasci. Geodetic deformation forecasting based on multi-variable grey prediction model and regression model // *Grey Systems: Theory and Application*. Emerald Publishing Limited 2043. – 2019. – 9377. – DOI 10.1108/GS-04-2019-0007.
2. Басаргин А. А. Разработка методики пространственного моделирования деформаций и осадок фундаментов зданий и сооружений по результатам геодезических измерений: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 159 с. – EDN QETVWN.
3. Баширова Д. Р., Брынтьев М. Я., Кривоносов Д. А. Прогнозирование осадок оснований автомобильных дорог на высоких насыпях на основе машинного обучения по данным геодезических измерений // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 19–29. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-19-29. – EDN JPYASR.
4. Карпик А. П. Основные принципы формирования геодезического информационного пространства. // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2013. – № 4/С. – С. 73–78. – EDN UJLBLR.
5. Карпик А. П. Проблемы геодезического обеспечения мониторинга территорий. Традиции и инновации в начале XXI столетия : сб. материалов межрегион. междисциплинарной науч. конф. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 13–20.
6. Харченко Б. А. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе программного комплекса MATHCAD-15 // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 21–27. – EDN TVWWPP.
7. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С., Павловская О. Г. Математическое моделирование. Выявление по геодезическим данным скрытых закономерностей динамики оползневых склонов в условиях взрывных воздействий и вывоза больших масс грунта : учебное пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 131 с.
8. Маринин Е. И., Ткачук В. Н. Вероятностно-статистические методы обработки результатов геодезических наблюдений за деформациями сооружений // *Вопросы инженерной геодезии в строительстве : межвузовский сборник научных трудов*. – Самара : СГАСУ. – 2013. – С. 102.
9. Мизерная А. А., Кобелева Н. Н. Разработка прогнозной математической модели для изучения деформаций зданий и сооружений на языке программирования Python // *Интерэкспо Гео-Сибирь* – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 224–230. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-224-230. – EDN YXZSQZ.
10. Рабочая книга по прогнозированию / под ред. И. В. Бестужев-Лада. – М. : Мысль, 1982. – 430 с.
11. Селютин Е. А., Хорошилов В. С. Особенности построения математических моделей для изучения процессов деформации оползневых явлений // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 138–145. – EDN VAGRWX.
12. Хорошилов В. С., Квашенко И. Ю., Носков М. Ф. Особенности выбора деформационных марок для построения кинематической модели при изучении деформаций сооружений // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2013. – № 4/С. – С. 58–61. – EDN UIYCCD.
13. Хорошун У. В. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования // *Лучшая студенческая статья 2023 : сб. материалов VIII Международного научно-исследовательского конкурса (г. Пенза, 25 декабря 2023 года)*. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 31–33. – EDN OFLWYR.

14. Острем К. Введение в стохастическую теорию управления. – М. : Мир, 1973. – 324 с.
15. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений : монография. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с. – ISBN 978-5-87693-290-7. – EDN SAQQCR.
16. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учебник. – М. : Наука, 1964. – 576 с.
17. Новиков Ю. А., Краев А. Н. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 28–41. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-1-28-41. – EDN ZCHEFF.
18. Ashraf Abd El-Wanis Beshr. Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques // Engineering. – 2015. – № 7. – P. 488–498. – DOI 10.4236/eng.2015.78045.
19. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С. Математическое моделирование. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе кинематической модели : учебное пособие для обучающихся по специальности 120100 «Геодезия», 120101 «Прикладная геодезия». – Новосибирск : СГГА, 2012. – 92 с. – ISBN 978-5-87693-505-2. – EDN QNQDXD.

Об авторах

Юрий Александрович Новиков – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастровой деятельности.

Валерий Степанович Хорошилов – доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии.

Татьяна Владимировна Мальцева – доктор физико-математических наук, профессор кафедры строительной механики.

Получено 30.05.2024

© Ю. А. Новиков, В. С. Хорошилов, Т. В. Мальцева, 2025

Deformation process forecast from geodetic observations based on kinematic model

Y. A. Novikov¹, V. S. Khoroshilov², T. V. Maltseva¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: 969118@mail.ru

Abstract. Taking into account the increase in the average annual air temperature and temperature in soils, taking into account the peculiarities of permafrost and soil conditions, namely the significance of its initial temperature regime, there is a need for systematic geodetic observations of deformations, as well as the possibility of predicting them, both in operation and newly built buildings and structures. The article presents the results of field geodetic observations of the development of sediments of a block-modular building on the territory of Sakha, Yakutia. Based on field observations, a forecast kinematic model was constructed. The forecast results are presented in the Credo Deformation Calculation software package. Field observations and simulation data were compared. An opinion was expressed on the adequacy and possibility of applying one or another method for predicting the observed deformation processes.

Keywords: geodetic observations, monitoring, building settlement, deformations, forecast, mathematical models, kinematic and dynamic models

REFERENCES

1. Erkan Kose, Levent Tasci. (2019). Geodetic deformation forecasting based on multi-variable grey prediction model and regression model *Grey Systems: Theory and Application. Emerald Publishing Limited* 2043. 9377. DOI 10.1108/GS-04-2019-0007.
2. Basargin, A. A. (2010). Development of a methodology for spatial modeling of deformations and sediments of foundations of buildings and structures based on the results of geodetic measurements: dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences. 159 p. EDN QETVWH [in Russian].
3. Bashirova, D. R., Bryn, M. Ya., Krivonosov, D. A. (2022). Forecasting the sediment of the foundations of highways on high embankments based on machine learning based on geodetic measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. Vol. 27, No. 5. pp. 19-29. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-19-29 [in Russian].
4. Karpik, A. P. (2013). Basic principles of geodesic information space formation. *Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka [Izv. universities. Geodesy and aerial photography]* No. 4/S. pp. 73–78. EDN UJLBLR [in Russian].
5. Karpik, A. P. (2012). Problems of geodetic support for monitoring territories. Traditions and innovations at the beginning of the XXI century : collection of materials of the mezhregion. interdisciplinary Scientific Conference. pp. 13–20, [in Russian].
6. Kharchenko, B. A. (2015). Analysis and forecasting of deformations of structures based on geodetic data based on the MATHCAD-15 software package *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. Vol. 1, No. 1. pp. 21-27. EDN TVWWPP [in Russian].
7. Gulyaev, Yu. P., Khoroshilov, V. S., Pavlovskaya, O. G. (2013). Mathematical modeling. Identification of hidden patterns of dynamics of landslide slopes based on geodetic data in conditions of explosive impacts and removal of large masses of soil : a textbook. 131 p. [in Russian].
8. Marinin, E. I., Tkachuk, V. N. (2013). Probabilistic and statistical methods of processing the results of geodetic observations of deformations of structures. *Voprosy inzhenernoy geodezii v stroitel'stve : mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [Issues of engineering geodesy in construction : interuniversity collection of scientific papers]*. p. 102. [in Russian].
9. Misernaya, A. A., Kobeleva, N. N. (2023). Development of a predictive mathematical model for studying deformations of buildings and structures in the Python programming language package *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. Vol. 1, No. 1. pp. 224–230. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-224-230. EDN: YXZSQZ [in Russian].
10. Workbook on forecasting / edited by I.V. Bestuzhev-Lada. M.: Mysl, 1982. – 430 p. [in Russian].
11. Selyutina, E. A., Khoroshilov, V. S. (2018). Features of the construction of mathematical models for the study of deformation processes of landslide phenomena *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*. No. 1. pp. 138–145. EDN VAGRWX [in Russian].
12. Khoroshilov, V. S., Kvashenko, I. Yu., Noskov, M. F. (2013). Features of the choice of deformation marks for constructing a kinematic model in the study of deformations of structures *Izv. vuzov. "Geodeziya i aerofotos"yemka" [Izv. vuzov. Geodesy and Aerial Photography]*. No. 4/S. – p. 58–61. – EDN VAGRWX [in Russian].
13. Khoroshun, U. V. (2023). Geomonitoring of engineering structures and forecasting of their deformations according to laser scanning data *Luchshaya studentcheskaya stat'ya 2023 : sb. materialov VIII Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa (g. Penza, 25 dekabrya 2023 goda). [The best student article 2023 : collection of materials of the VIII International Scientific Research Competition (Penza, December 25, 2023)]*. pp. 31–33. EDN OFLWYR [in Russian].
14. Ostrem, K. (1973). Introduction to stochastic control theory. M.: Mir. 324 p. [in Russian].
15. Gulyaev, Yu. P. (2008). Forecasting deformations of structures based on the results of geodetic observations : monograph. *Novosibirsk: Siberian State Geodetic Academy*, 256 p. ISBN 978-5-87693-290-7. EDN SAQQCR [in Russian].
16. Wentzel, E. S. (1964). Probability theory : textbook. M.: Nauka, 576 p. [in Russian].

17. Novikov, Yu. A., Kraev, A. N. (2019). Geodetic observations of building precipitation within the framework of geotechnical monitoring *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. Vol. 24, No. 1. pp. 28-41. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-1-28-41. EDN ZCHEFF. [in Russian].
18. Ashraf Abd El-Wanis Beshr. (2015). Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques *Engineering* No. 7 Pp. 488–498.
19. Gulyaev, Yu. P., Khoroshilov, V. S. (2012). Mathematical modeling. Analysis and forecasting of deformations of structures based on geodetic data based on a kinematic model. *Textbook for students majoring in 120100 "Geodesy", 120101 "Applied geodesy"*. 92 p. ISBN 978-5-87693-505-2. EDN QNQDXD.

Author details

Yuri A. Novikov – Ph. D., Associate Professor, Department of Geodesy and Cadastral Activities.

Valery S. Khoroshilov – D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Tatyana V. Maltseva – D. Sc., Professor of the Department of Structural Mechanics.

Received 30.05.2024

© *Yu. A. Novikov, V. S. Khoroshilov, T. V. Maltseva*, 2025