

A. A. Mizernaya^{1}, N. N. Kobeleva¹*

Разработка прогнозной математической модели для изучения деформаций зданий и сооружений на языке программирования Python

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: nastya.mizernaya99@gmail.com

Аннотация. Объектом прогнозирования является деформация основания и несущих конструкций зданий и сооружений. Прогнозирование осуществляется на основе результатов геодезических наблюдений за деформациями статистическим методом прогнозной экстраполяции; может также выполняться с помощью кинематических или динамических моделей в зависимости от полноты и количества имеющихся исходных данных. В статье описана математическая модель для прогнозирования деформаций зданий и сооружений, разработанная на языке программирования Python. Модель использует данные с датчиков, измеряющие деформации и перемещения, а также данные от спутниковых систем для обработки информации с использованием математических алгоритмов, таких как линейная регрессия и корреляционный анализ. Представлено описание приемов и материалов, используемых для создания модели, а также результаты ее тестирования на реальных данных. Приводятся результаты работы программы для прогнозирования деформации в вертикальной плоскости на основе данных геометрического нивелирования III класса. Результаты демонстрируют, что модель может точно прогнозировать деформации зданий в различных условиях, включая природные катастрофы, и способна выявлять долгосрочные тенденции в деформациях. Статья представляет собой важный вклад в область обследования и мониторинга зданий и сооружений, и может быть использована инженерами и архитекторами для прогнозирования и мониторинга деформаций зданий и обеспечения безопасности и надежности объектов нового строительства.

Ключевые слова: математическая модель, прогнозирование деформаций, геодезический мониторинг, программное обеспечение, Python

A. A. Mizernaya^{1}, N. N. Kobeleva¹*

Development of a Predictive Mathematical Model for Studying the Deformations of Buildings and Structures in the Python Programming Language

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: nastya.mizernaya99@gmail.com

Abstract. The object of forecasting is the deformation of the base and load-bearing structures of buildings and structures. Forecasting is carried out on the basis of the results of geodetic observations of deformations by the statistical method of predictive extrapolation; can also be performed using kinematic or dynamic models, depending on the completeness and amount of input data available. The article describes a mathematical model for predicting the deformations of buildings and structures, developed in the Python programming language. The model uses data from sensors that measure deformations and displacements, as well as data from satellite systems to process information using mathematical algorithms such as linear regression and correlation analysis. A description

of the techniques and materials used to create the model, as well as the results of its testing on real data, is presented. The results of the program for predicting deformation in the vertical plane on the basis of class III geometric leveling data are presented. The results demonstrate that the model can accurately predict building deformations under various conditions, including natural disasters, and is able to identify long-term trends in deformations. The article is an important contribution to the field of inspection and monitoring of buildings and structures, and can be used by engineers and architects to predict and monitor building deformations and ensure the safety and reliability of new construction projects.

Keywords: mathematical model, deformation prediction, geodetic monitoring, software, Python

Введение

В настоящее время обеспечение безопасности и надежности зданий и сооружений является одной из ключевых задач в области инженерного строительства. Для этого необходимо осуществлять постоянный мониторинг состояния объектов и быстро реагировать на возможные угрозы [1-3].

Развитие современных технологий и стремительное развитие области компьютерного моделирования приводят к возможности более точного изучения и прогнозирования деформаций зданий и сооружений. Важность обеспечения безопасности и надежности таких объектов становится все более актуальной.

В открытом доступе отсутствуют программы с возможностью редактирования модели прогнозирования [4]. Разработанное на языке Python программное обеспечение (ПО) Evitar решает эту проблему [5]. Данная программа полезна как профессиональному сообществу для решения производственных задач, так и обучающимся с целью изучения алгоритмов анализа и прогнозирования деформаций.

В статье рассмотрен один из типов прогнозирования – анализ и прогнозирование временных рядов. Он сводится к применению статистических методов для моделирования и анализа данных с целью извлечения из них значимой информации и прогнозирования будущих событий, что является важным компонентом при мониторинге состояния объектов. Используя Python-библиотеки для анализа временных рядов выполнен расчёт модели, создано программное обеспечения Evitar и описан алгоритм его работы, а также результаты тестирования работоспособности данного ПО.

Методы и материалы

С помощью математического моделирования и кинематического анализа результатов геомониторинга зданий и сооружений можно выявлять количественные закономерности деформации и прогнозировать их дальнейшее развитие [6-11]. Так как данные геодезического мониторинга представляют собой временные ряды, прогнозная модель развития деформаций зданий и сооружений строится на основании аппроксимации тренда, стандарта и автокорреляционной функции [12-15].

Аппроксимация тренда основана на использовании линейной регрессии для вычисления линейного тренда в изменениях деформаций зданий и сооружений

во времени, что позволяет точно вычислить направление изменения деформаций и определить, увеличиваются они или уменьшаются.

Аппроксимация стандарта основана на использовании корреляционного анализа для вычисления стандартного отклонения в изменениях деформаций зданий и сооружений во времени. Таким образом, производится оценка стабильности и предсказуемости деформаций, а также определяется, насколько значимы изменения деформаций, и как сильно они отклоняются от среднего значения.

Аппроксимация автокорреляционной функции является методом оценки связи между последовательными значениями деформаций зданий и сооружений. Этот метод используется для определения наличия и степени автокорреляции, которая может указывать на наличие закономерностей в изменении деформаций. Для этого используются различные методы, включая коэффициент корреляции и функцию автокорреляции.

В основу разработки программного обеспечения Evitar, задачей которого являются прогнозирование деформаций зданий и сооружений, заложен алгоритм прогнозирования деформаций зданий и сооружений (рис. 1).

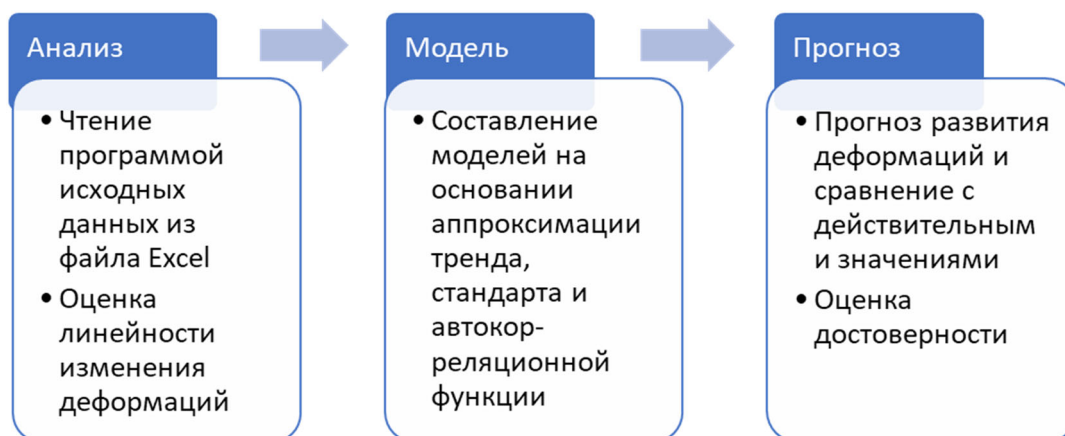


Рис. 1. Алгоритм работы ПО Evitar

Для разработки программного обеспечения Evitar был использован язык программирования Python, который позволяет эффективно работать с численными методами и обработкой данных [16-17]. Исходные данные для работы программного обеспечения представляют собой вычисленные результаты высот пунктов плано-высотного обоснования с указанием дат проведения циклов измерений.

Для создания ПО Evitar были использованы следующие библиотеки:

- библиотеки NumPy, Math и Pandas для работы с матрицами, численными методами и анализом данных [18];
- библиотека OS для работы с операционной системой [19];
- библиотека Tkinter для визуализации интерфейса программного обеспечения [20].

На рисунке 2 представлены высоты реперов в соответствии с циклами измерений, введенные в файл Excel.

	A	B	C	D	E
1	Reps	I	II	III	IV
2	Rp1	122,486	122,486	122,486	122,486
3	Rp2	122,309	122,309	122,309	122,303
4	Rp3	123,741	123,746	123,751	123,758
5	Rp4	124,139	124,138	124,137	124,157
6	Rp5	124,685	124,692	124,7	124,736
7	Rp6	124,797	124,804	124,81	124,843
8	Rp7	124,677	124,684	124,691	124,724
9	Rp8	122,929	122,93	122,931	122,933
10	Rp9	122,934	122,934	122,934	122,938
11	Rp10	122,927	122,928	122,929	122,934
12	Rp11	122,932	122,932	122,933	122,937
13	Rp12	122,931	122,932	122,932	122,927
14	Rp13	122,925	122,923	122,922	122,927
15	Rp14	122,929	122,928	122,928	122,927
16	Rp15	122,93	122,929	122,928	122,927
17	Rp16	122,757	122,758	122,76	122,77
18	Rp17	122,761	122,762	122,763	122,772
19	Rp18	122,761	122,762	122,764	122,774
20	Rp19	122,758	122,76	122,763	122,772
21	Rp20	123,764	123,771	123,778	123,815
22	Rp21	123,77	123,776	123,782	123,817

Рис. 2. Исходные данные

При запуске программы открывается стартовое окно, представляющее собой инструкцию по вводу данных (рис. 3). После нажатия кнопки «Продолжить» производится расчёт, к результатам которого можно перейти, нажав кнопку «Открыть результаты» (рис. 4).

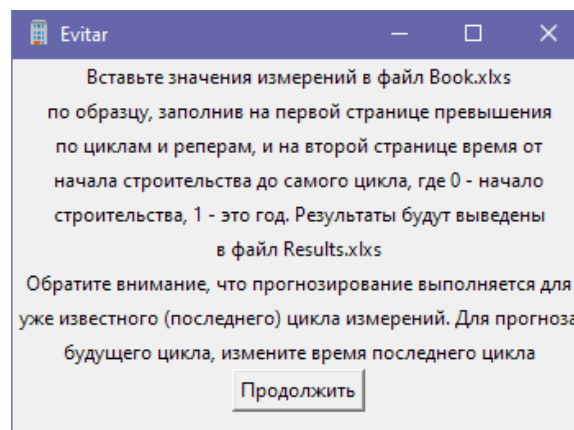


Рис. 3. Стартовое окно

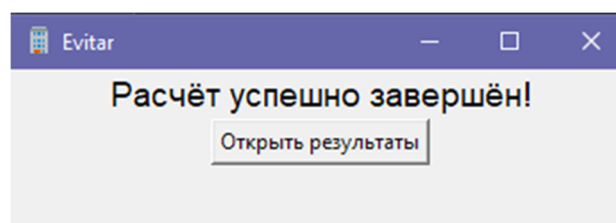


Рис. 4. Окно для перехода к результатам

Результаты

Разработанная прогнозная математическая модель была успешно протестирована на реальных данных. Для проверки адекватности построенной математической модели выполняется контрольное прогнозирование на период упреждения, соответствующий уже выполненным резервным циклом наблюдений, что является инверсной верификацией модели.

Тестовые данные получены по результатам деформационного мониторинга магистрального трубопровода на территории Каргосокского района Томской области, который представляет собой «камеру пуска и приема средств очистки и диагностики (КПП СОД) трубопровода». В ходе выполнения измерений определялось как плановое положение контролируемых точек с использованием электронного тахеометра Nikon Nivo 2M, так и их высотные значения с помощью цифрового нивелира Trimble DiNi 0.3 с инварной рейкой. По всем пунктам планово-высотного обоснования, а также по двум дополнительным высотным точкам КПП СОД был проложен замкнутый ход геометрического нивелирования III класса.

После выполнения расчётов по тестовым данным получена таблица контрольного прогнозирования резервного цикла (рис. 5.). По полученным данным делаем вывод, что все прогнозы верны, однако у точек 4–7, 20, 21 большие ошибки – более 10 мм. Они могли возникнуть из-за того, что объект выполнения работы находится в пограничных областях вечной мерзлоты, в следствии чего массы глины и суглинка нестабильны, это привело к тому, что на этих участках основания сооружения произошли деформации.

	A	B	C	D	E	F	G
1		Прогнозное значение	Разность с известным				
2	Rp1	122,488	2				
3	Rp2	122,311	8				
4	Rp3	123,753	-6				
5	Rp4	124,139	-18				
6	Rp5	124,702	-35				
7	Rp6	124,812	-32				
8	Rp7	124,693	-32				
9	Rp8	122,933	0				
10	Rp9	122,936	-2				
11	Rp10	122,931	-3				
12	Rp11	122,935	-2				
13	Rp12	122,934	7				
14	Rp13	122,924	-3				
15	Rp14	122,93	3				
16	Rp15	122,93	3				
17	Rp16	122,762	-8				
18	Rp17	122,765	-7				
19	Rp18	122,766	-8				
20	Rp19	122,765	-7				
21	Rp20	123,78	-36				
22	Rp21	123,784	-33				

Рис. 5. Результаты контрольного прогнозирования

Заключение

Разработанная на языке программирования Python прогнозная математическая модель для изучения деформаций зданий и сооружений, является основой программного обеспечения Evitar. При разработке были использованы современные приемы анализа данных и математического моделирования, а модель проверена на реальных данных о деформациях.

При тестировании программа Evitar показала высокую производительность и точность прогнозирования количественных величин деформаций зданий и сооружений путём построения кинематической модели. Также модель можно совершенствовать для учета новых факторов и параметров.

ПО Evitar может использоваться как в учебно-методической деятельности, так и на производстве. Геодезический мониторинг деформаций при строительстве является обязательным условием, и автоматизация обработки его результатов даёт возможность безошибочного и быстрого прогнозирования осадок. Программа имеет все возможности для использования ее в фундаментальных исследованиях, как готовый шаблон для проведения различных пробных измерений и усовершенствования технологии прогнозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорогова, И. Е. Деформационный мониторинг многоэтажного жилого здания в период строительства / И. Е. Дорогова, А. А. Ильин, Р. И. Искандаров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24 – 26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный уни-верситет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия, № 2. – С. 17–24.
2. Левчук, Г. П. Прикладная геодезия. Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ : учебник для вузов / Г. П. Левчук. – Москва : Недра, 1981. – 438 с. – Текст : непосредственный.
3. Браславская, К. Е. Возможности применения автоматизированных систем наблюдения за деформациями уникальных сооружений / К. Е. Браславская. – Текст : электронный // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 4 (13). – С. 24–27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35412231> (дата обращения 25.04.2023). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
4. Мизерная, А. А. Анализ современного программного обеспечения для обработки результатов деформационного мониторинга зданий и сооружений / А. А. Мизерная, Н. Н. Кобелева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 1. – С. 146-152. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-145-152.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616478 Российская Федерация. Evitar : № 2023615610 : заявл. 28.03.2023 : опубли. 28.03.2023 / А. А. Мизерная, Н. Н. Кобелева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».
6. Половинкин, А. И. Мониторинг состояния сооружений с использованием технологий компьютерного моделирования. / А. И. Половинкин, Е. А. Овчинникова, А. В. Петрухин. – Текст : электронный // Известия Волгоградского Государственного Технического Университета. – 2011. – № 3 (76). – С. 120–122. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16347944> (дата обращения 25.04.2023). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

7. Горохова, Е. И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования / Е. И. Горохова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2016. – № 2(34). – С. 65-72.
8. Жуков Б. Н., Карпик А. П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов: учеб. пособие. - Новосибирск: СГГА, 2006. - 148 с.
9. Карпик А. П. Перспективы развития науки, техники и технологий в сфере геодезии и картографии Российской Федерации // Геодезия и картография. - 2015. - № 12. - С. 55-59.
10. Карпик А. П., Липатников Л. А. О возможности контроля положения опорных пунктов в системах геодезического контроля // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13-25 апреля 2015 г.). - Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 2. - С. 98-102.
11. Хаметов, Т. И. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений : учебное пособие / Т. И. Хаметов ; Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 286 с. – ISBN 5-93093-064-3. – Текст : непосредственный.
12. Хорошилова Ж. А., Хорошилов В. С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). - Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. - С. 77-81.
13. Гуляев, Ю. П. Математическое моделирование. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе кинематической модели : учебное пособие / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов ; Сибирская Государственная Геодезическая Академия. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 92 с. – ISBN 978-5-87693-505-2.
14. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С., Лисицкий Д. В. О корректном подходе к математическому моделированию деформационных процессов инженерных сооружений по геодезическим данным // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. - № 4/С. - С. 22-30.
15. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным (динамическая модель): учеб. пособие. - Новосибирск: СГГА, 2014. - 81 с.
16. Кирдяев, М. М. Обзор языка программирования Python для решения задач математического моделирования. / М. М. Кирдяев. – Текст : электронный / Труды Международного Симпозиума "Надежность и Качество". – 2016. – Т. 1. – С. 305–307. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=26465172> (дата обращения 25.04.2023). - Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
17. Федоров Д. Ю. Основы программирования на примере языка Python: учебное пособие / Д. Ю. Федоров. – СПб., 2016. – 176 с. – Текст : непосредственный
18. Лутц, М. Программирование на Python. Том 1 / М. Лутц. – М.: Символ, 2016. – 992 с. – ISBN 978-5-93286-210-0. – Текст : непосредственный.
19. Лутц, М. Программирование на Python. Том 2 / М. Лутц. – М.: Символ, 2016. – 992 с. – ISBN 978-5-93286-211-7. – Текст : непосредственный.
20. Самерфилд, М. Программирование на Python 3. Подробное руководство. / М. Самерфилд. – СПб.: СимволПлюс, 2009. – 608 с. – ISBN: 978-5-93286-161-5. – Текст : непосредственный.

© А. А. Мизерная, Н. Н. Кобелева, 2023