

МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

К.С. Перевозников^{1*}

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

* kperevoznikov@mail.ru

Цитирование: Перевозников К.С. Методика геоинформационного мониторинга деформационных процессов зданий и сооружений историко-культурного наследия // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 6. С. 700-711. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-700-711

Ключевые слова. методика, геоинформационный мониторинг, геотехнический мониторинг, деформационные процессы, система геоинформационного мониторинга, надземное, наземное подземное пространства наблюдений, культурное наследие.

Аннотация

Геоинформационный мониторинг за объектами историко-культурного наследия в мегаполисе – система комплексного методического подхода, периодических или непрерывных наблюдений деформационных процессов в природных и антропогенных объектах, наблюдаемых из надземного, наземного, подземного пространств. Отображение полученной информации об изменениях таких объектов формируется в ГИС и имеет картографическую форму представления, а также классификация изменений и создание банка данных об изменениях о объектах, создание на их базе 3D- моделей и передача заинтересованным пользователям. Разработанная методика собирает в себе самые современные методы по мониторингу деформационных процессов, что позволяет реализовать, как глобальный сбор пространственных данных на объекты историко-культурного наследия, так и получить точечные параметры, исследованных процессов, влияющих на несущую способность зданий и сооружений, следовательно, на сохранность объектов в целом.

1 Введение

Для центральной исторической части Москвы остаётся критически важным решение проблемы сохранения объектов культурного наследия, комплексной реконструкции и благоустройства, как это сделано в других мировых столицах; сохранения и восстановления индивидуальных морфо-типических характеристик застройки и городского ландшафта. Здесь сконцентрирована большая часть исторических зданий, памятников архитектуры. Объекты находятся под постоянной природной, временной и техногенной нагрузкой. Ведутся работы по реконструкции, восстановлению объектов культурного наследия. Программа реновации жилого и нежилого фонда в районах старой Москвы будет затрагивать сохранность объектов культурного наследия.

Геоинформационный мониторинг дает возможность информационного исследования деформационных процессов для обеспечения сохранности, безопасности и эффективной эксплуатации зданий и сооружений в условиях большого мегаполиса под воздействием постоянной техногенной нагрузки.

Контроль, анализ ситуации, выявление ее динамики, пространственно-временное моделирование и выявление деформационных процессов, влияющих на сохранность зданий и сооружений с надземного, наземного и подземных пространств [1].

Основа зданий исторической застройки – это фундамент, но нагрузку от влияния техногенной нагрузки, климата, времени несет все сооружение в целом. Поэтому для анализа, выявления деформационных процессов нужна комплексная система мониторинга.

В Таблице 1 показаны предельные деформации на основания фундамента.

Таблица 1. Предельные дополнительные деформации основания фундаментов сооружений окружающей застройки, расположенных в зоне влияния нового строительства или реконструкции¹

Сооружения	Категории технического состояния зданий	Предельные дополнительные деформации основания фундаментов	
		Относительная разность осадок ($\Delta s/L$)и	Максимальная осадка s_{max} ад.см
Многоэтажные и одноэтажные здания исторической застройки или памятники истории, архитектуры и культуры с несущими стенами из кирпичной кладки без армирования	I	–	–
	II	0,0006	1,0
	III	0,0004	0,5

Перечислим основные виды обследования и методы для геоинформационного мониторинга, объектов историко-культурного наследия:

- воздушное лазерное сканирование;
- цифровая космическая и аэрофотосъёмка;
- тепловизионная съёмка в ИК-диапазоне;
- наземное лазерное сканирование;
- СВЧ-радиометрия;
- деформационный геотехнический мониторинг сооружений;
- георадарная съёмка.

¹ СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями № 1, 2)

2 Материалы и методы

Разработанная методика применялась на объектах культурного наследия расположенных между Болотной и Софийской Набережной [2]. На Рисунке 1 показан участок работ с перечисленными объектами культурного наследия.

В основе методики лежит система по сбору геоданных для выявления деформационных процессов с различных пространств.

Система мониторинга – это совокупность средств и методов инструментальных, автоматизированных наблюдений, дистанционного глобального слежения, за отдельными параметрами объектов, так и за объектом в целом, для сбора геоданных, накопления и обработки, вывода результатов с помощью геоинформационных технологий на ведомственном уровне, хранение, передача результатов на государственном уровне, и по результатам- принятие управленческих решений.

Методика геоинформационного мониторинга деформационных процессов для сохранности зданий и сооружений историко-культурного наследия представлена на Рисунке 2.

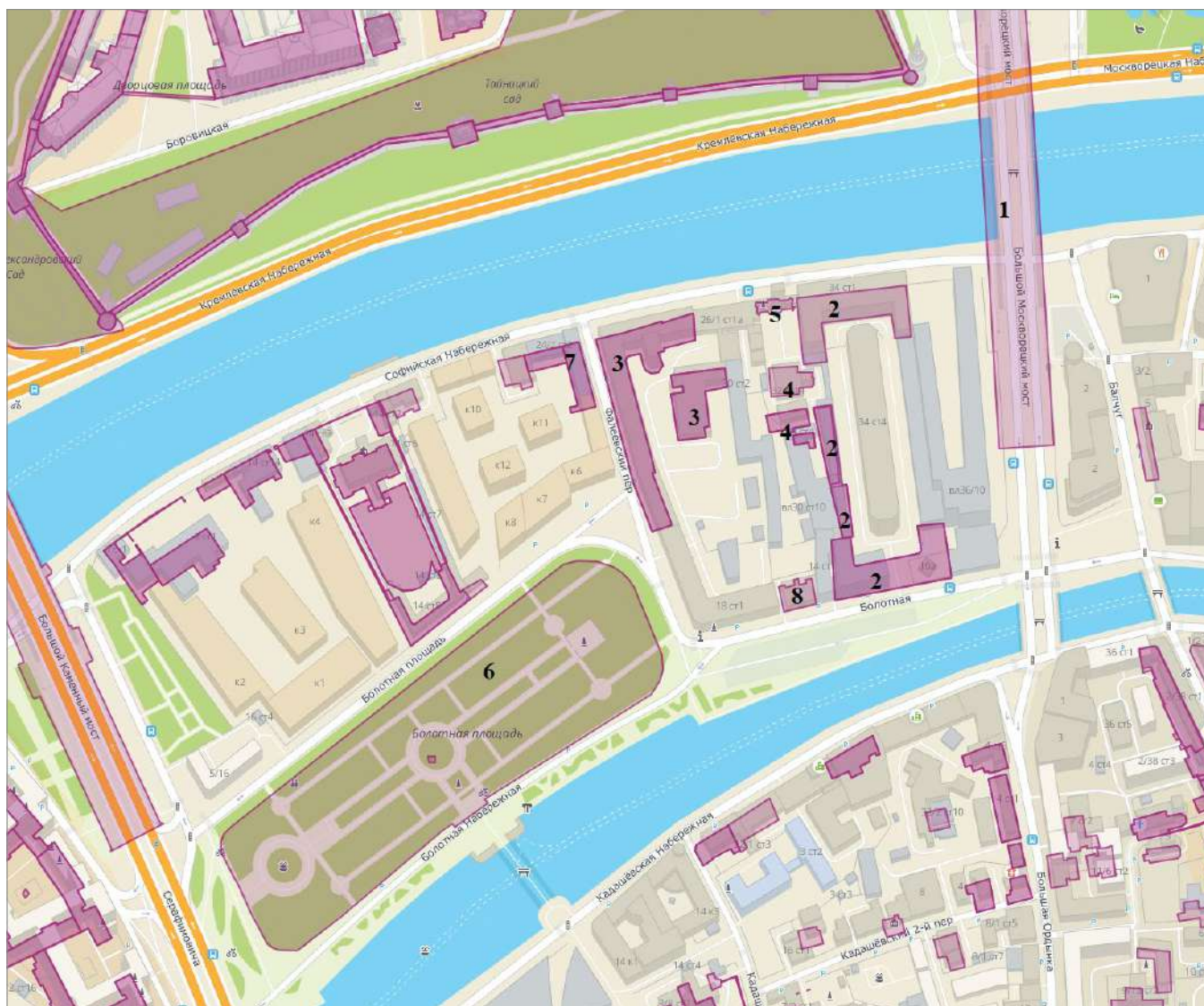


Рис. 1. Участок исследования с объектами культурного наследия (памятников истории культуры города Москвы)

Таблица 2. Объекты культурного наследия на участке исследования²

№№	Объект	Тип	Статус	Категория	Global ID:
1	Большой Москворецкий мост, 1937-1938 гг., архитекторы П. М. Сардарьян, А. В. Щусев, инженер В. С. Кириллов	Сооружение	Объект культурного наследия	Объект регионального значения	13780796
2	Кокоревское подворье, 1860-1867 гг., 1880-е гг., архитектор И. Д. Черник	Комплекс	Выявленный объект культурного наследия	категория не устанавливается	2957697 2950983 2957880 2957615
3	Ансамбль домов дешевых квартир им. бр. Бахрушиных, 1875-1881 гг., арх. Ф. С. Богданов, 1895 г., 1900-1920 гг	Комплекс	Выявленный объект культурного наследия	категория не устанавливается	2959907
4	Церковь Софии, 1682 г. Трапезная 1891-1893 гг.	Здание	Объект культурного наследия	Объект федерального значения	37330967 2953938
5	Колокольня, XIX в., арх. К. М. Быковский	Здание	Объект культурного наследия	Объект федерального значения	2955749
6	Сквер на Болотной площади	Сады, парки, скверы, бульвары	объект культурного наследия	Объект регионального значения	13381165
7	Доходный дом с торговыми лавками, начало XIX в., 1876 г., архитектор В. Н. Карнеев	Здание	выявленный объект культурного наследия	категория не устанавливается	7713947
8	Дом жилой, XVIII в	Здание	объект культурного наследия	Объект федерального значения	2956598

² Сайт: Портал открытых данных. Объекты культурного наследия URL: [ashttps://data.mos.ru/opendata/530/data/map?versionNumber=5&releaseNumber=191](https://data.mos.ru/opendata/530/data/map?versionNumber=5&releaseNumber=191) (дата обращения: 21.09.21).

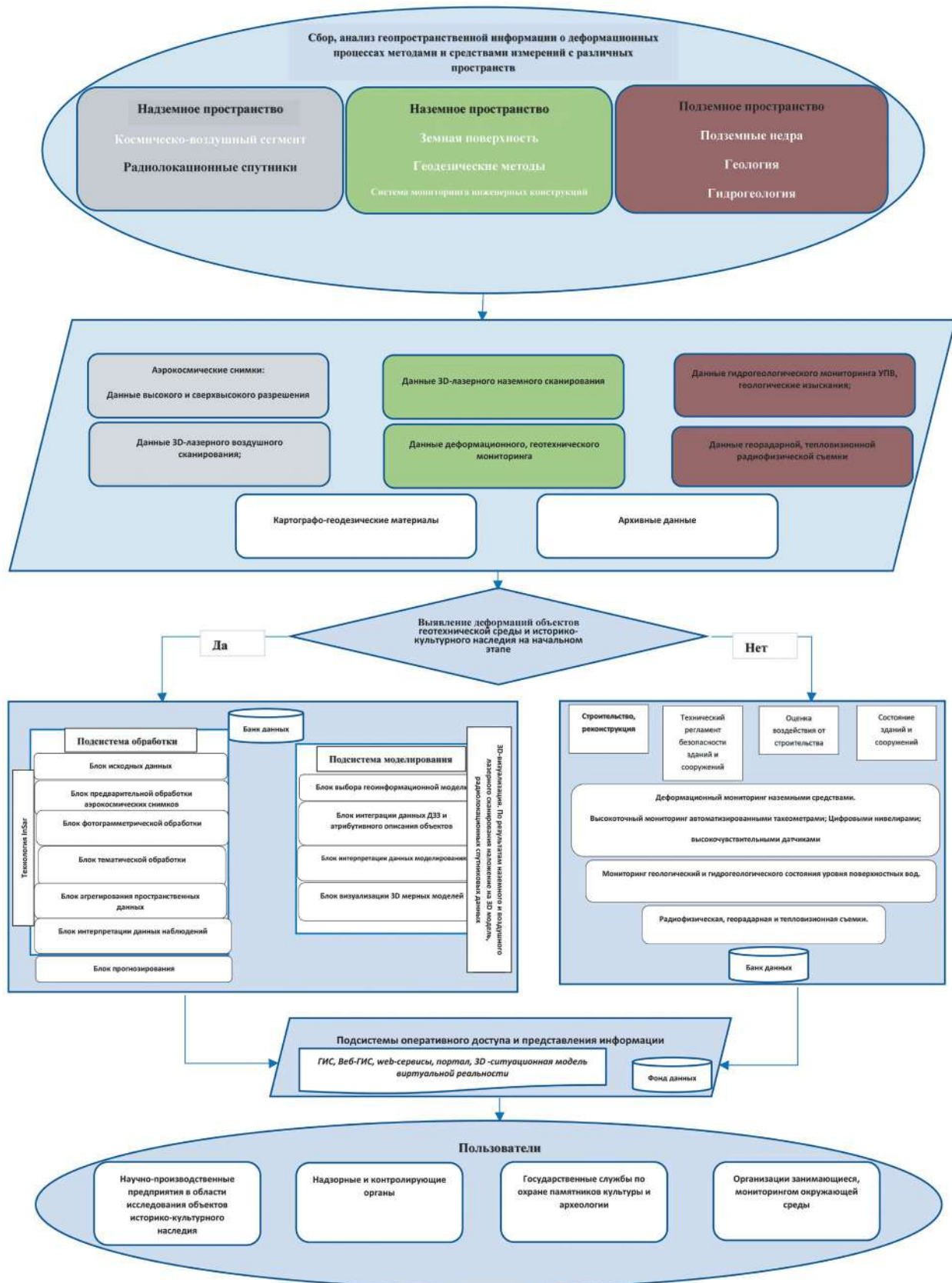


Рис. 2. Методика геоинформационного мониторинга деформационных процессов для сохранности зданий и сооружений историко-культурного наследия

3 Результаты

3.1 Надземное пространство

В основе мониторинга с надземного пространства лежит технология InSAR. Измерения смещений земной поверхности и объектов находящимися на ней, радиолокационными спутниками, методом интерферометрии. На выходе получаем высокочастотный мониторинг с оперативным предоставлением данных наблюдения и результатов их обработки широкому кругу потребителей с использованием различных веб – сервисов.

Технология InSAR представлена на Рисунке 3.

При измерении высот с применением методов радарной интерферометрии абсолютная точность определяется точным положением съемочных точек в пространстве. За относительную (межпиксельную) точность измерений высот в границах участка съемки берется выражение когерентности отраженных сигналов в точках съемки A^1 и A^2 .

$$U_1 U_2^* = u_1 u_2 \exp(j(\phi_1 - \phi_2)) = u_1 u_2 \exp\left\{\frac{j\pi 2k \Delta r}{\lambda}\right\} \quad (3.1)$$

где u_1 и u_2 – амплитуды сигналов, а Δr – разность расстояний от точек съемки до выбранного элемента поверхности, λ - длина волны. Коэффициент k перед Δr , равный 2, учитывает факт двустороннего прохождения сигналов A_1 и A_2 в двухпроходной схеме съемки; а в однопроходной бистатической схеме съемки $k = 1$. Связь вариаций разности фаз или топографической фазы с вариациями высот рельефа поверхности объектов может быть найдена $\Delta\phi_1(\Delta h)$.

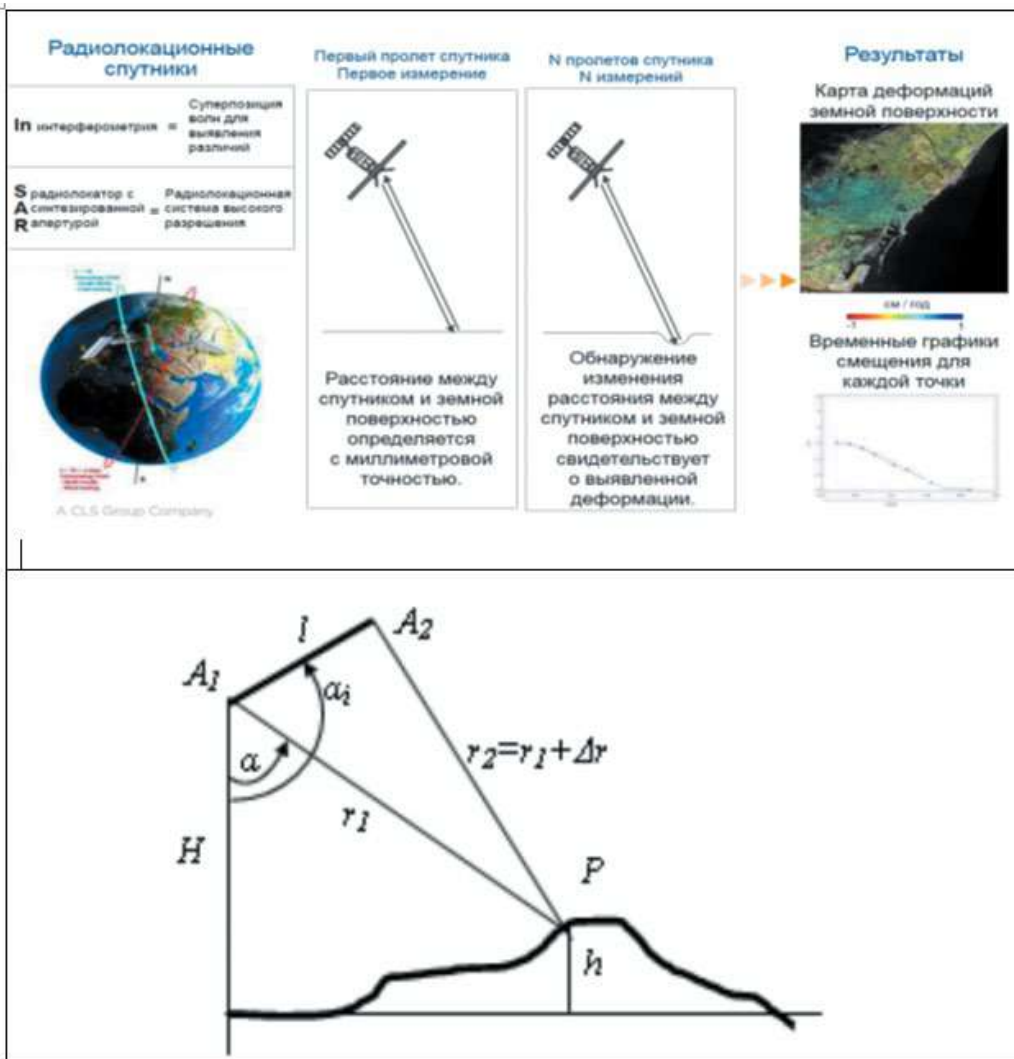


Рис. 3. Наблюдения деформаций из космическо-воздушного сегмента.

По данным радиолокационной съемки определяется степень когерентности эхо-сигналов двух комплексных радарных изображений U_1 и U_2 она находится следующей формулой:

$$\gamma = \frac{E\{U_1 \times U_2\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\} E\{|U_2|^2\}}} \quad (3.2)$$

где $E\{\bullet\}$ – операция взятия математического ожидания по некоторому пространственному набору отсчетов с центром в текущем элементе изображения [3-10].

На рис. 4. представлены результаты проведения мониторинга радиолокационными спутниками методом интерферометрии.

По данным съемки данный участок с объектами не имеет явных смещений, т.е. находится в стабильном положении на период съемки.

Следующий этап – наложение точек съемки на 3D-модель объектов и 3D-визуализация деформационных процессов на самом сооружении по радиолокационным спутниковым данным. На Рисунке 5. представлены визуализация результатов деформационных процессов.

3D-визуализация позволяет объективно оценить геопространственное положение съемочной точки на объекте измерений.

В данной процедуре задействованы материалы воздушного и наземного лазерного сканирования объектов.

По имеющимся актуальным материалам лазерного сканирования формируется 3D-модель и добавляются данные, полученные радиолокационными спутниками, методом интерферометрии. Данный этап показывает, что осадка на конструкциях зданий отсутствует.

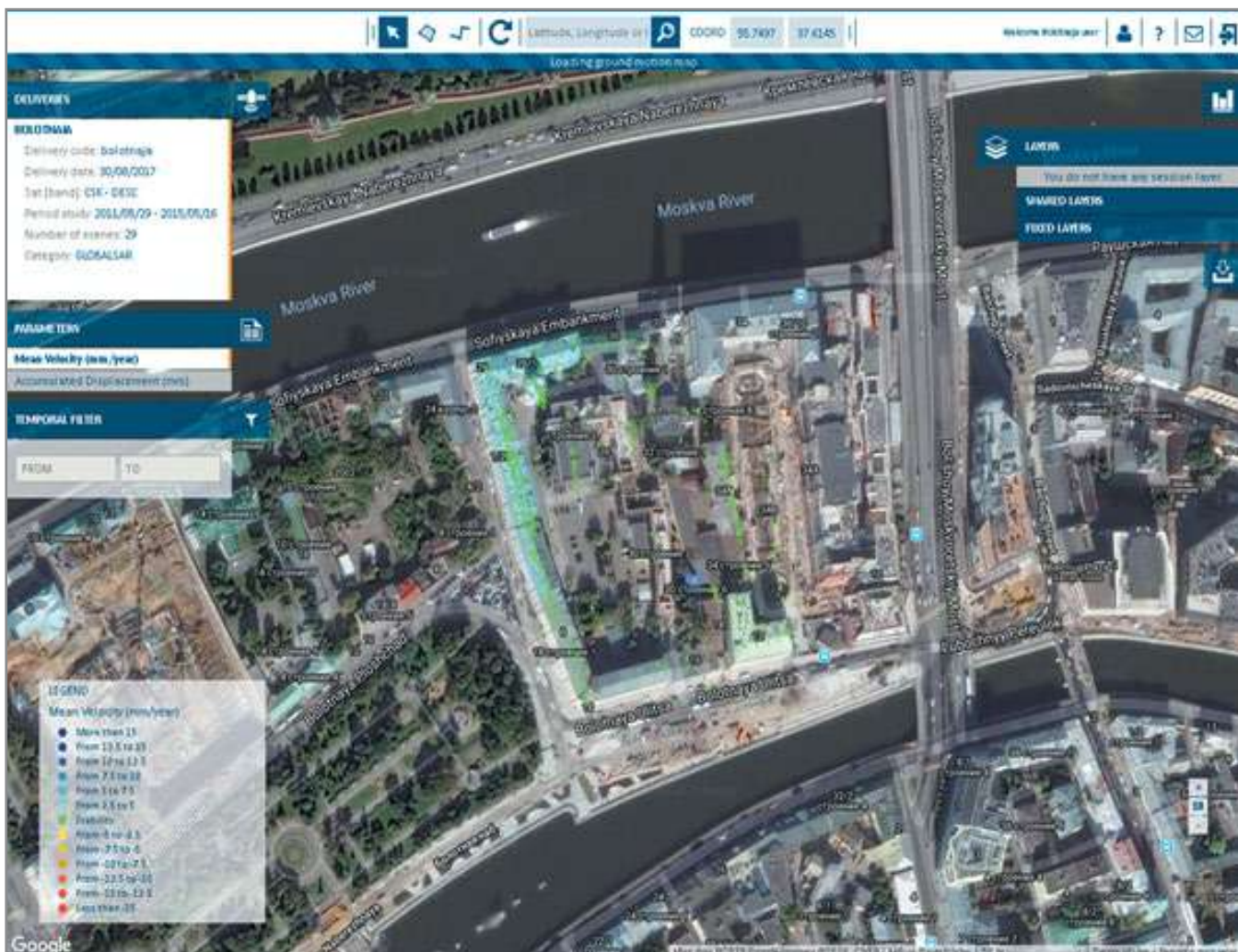


Рис. 4. Результаты проведения геоинформационного мониторинга за объектами историко-культурного наследия на Софийской набережной.



Рис. 5. Наложение на 3D-модель объектов, радиолокационных спутниковых данных

3.2 Наземное пространство

Выполнение первых двух этапов методики могут дать недостаточно объективные данные о деформационных процессах, например об окружающей застройке, если сооружение восстанавливается или рядом происходит масштабное строительство, движение техники и воздвижение элементов строительства не дает полной информации о состоянии некоторых сооружений и конструкций.

Для этого проводится деформационный геотехнический мониторинг сооружений наземными методами.

Деформационный мониторинг – ответственный процесс контроля, с предъявлением строгих требований по точности и технологии измерений. Актуальную информацию обо всех деформациях, изменениях в конструкциях объекта можно получать в онлайн режиме, используя современные высокоточные электронные приборы (цифровые нивелиры, автоматизированные тахеометры и др.), а также высокочувствительные датчики

(грунтовые, инклинометры, датчики вертикали и т.д.). Продуманная система мониторинга за деформациями позволяет оперативно выявить ситуацию, верно спрогнозировать и свести к минимально возможному риску разрушений объектов. На Рисунке 6 показаны примеры мониторинга наземными методами.

Основа получения информации деформационного геотехнического мониторинга- это высокоточные линейно-угловые измерения электронными тахеометрами, определение осадочных процессов цифровыми нивелирами.

Данным методами зафиксированы осадочные процессы на территории окружающей застройки вблизи объектов культурного наследия.

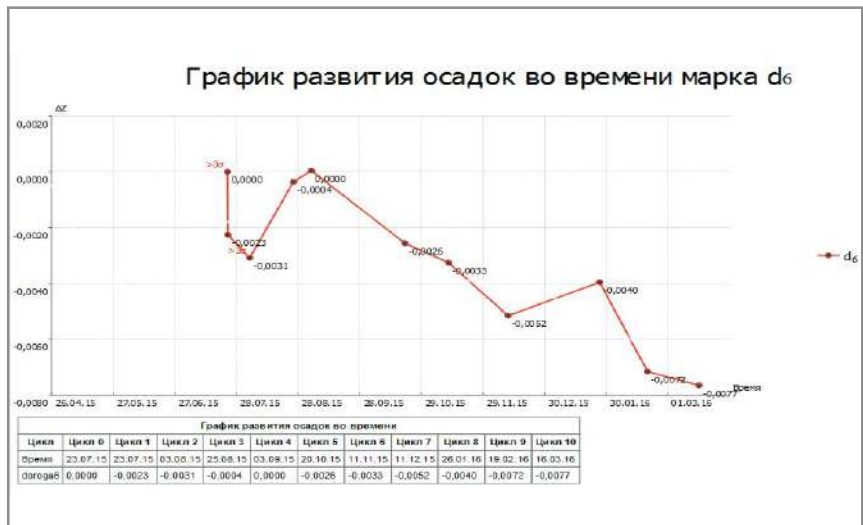
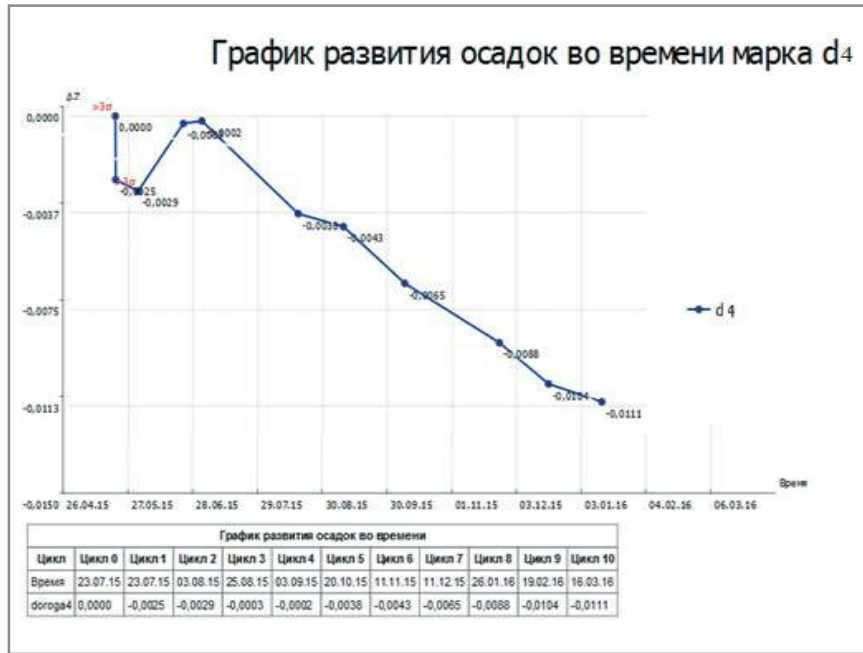
Выборочные результаты представлены на графиках осадок наблюдаемых марок на Рисунке 7.

Данные графики подтверждают, при строительных работах происходят определенные колебания в грунтовом массиве, которые характеризуются появлением деформационных процессов.



▲ Рис. 6. Геоинформационный мониторинг наземными методами.

Рис. 7. Графики развития осадок во времени с наиболее критичными показателями.



3.3 Подземное пространство

Местоположение данного участка исследования располагается между Москвой-рекой и Водоотводным каналом Москвы.

Подземные недра изучены с точки зрения геологического состояния, но некоторые виды работ: - как понижение уровня вод для водоотведения при строительстве могут повлиять на гидрогеологическую картину подземного пространства. Поэтому мониторинг уровня поверхностных вод ведется с помощью датчиков, установленных в скважинах.

На Рисунке 8 показан УПВ (уровень поверхностных вод), замеренных в гидрогеологических скважинах.

По результатам видно яркое изменение уровня поверхностных вод после осуществления строительных работ вблизи исследуемых объектов.

Данное изменение будет носить достаточно непредсказуемый характер для близко находящихся сооружений.

Для полного понимания наличия пустот и изменений геологического строения грунтового основания, производятся радиофизические исследования, георадарная и тепловизионная съемка подземного пространства.

После данных обследований производилось комплексное инъецирование проблемных зон, близко прилегающих к объектам культурного наследия.



a-уровень поверхностных вод скв. №1
a- is the surface water level of well №1



б- уровень поверхностных вод с скв. №3
b- is the surface water level of well №3

Рис. 8. Подземное пространство-падение уровня поверхностных вод

4 Выводы

Системный подход к геоинформационному мониторингу позволяет осуществлять анализ ситуации, ее динамики, выявить особенности процессов, влияющих на сохранность объектов с различных пространств.

Эффективность проведения мониторинговых наблюдений непосредственно связана с возможностью установления пространственно-временных зависимостей параметров исследуемых динамических процессов, влияющих на несущие способности конструкций и сохранность объектов культурного наследия. Полученные данные интегрируются в ведомственные базы данных о объектах культурного наследия, и представляются лицам, принимающим

решение, как в общепринятом в настоящее время двумерном виде средствами геоинформационной системы города Москвы, так и в принципиально новой модели города, основанной на технологиях дополненной к виртуальной реальности [10,12].

Актуальность статьи: в данный момент по программе реновации городом будет осуществляться снос, реконструкция зданий в старой Москве.

Под реконструкцию попадают здания и сооружения историко-культурного наследия, актуальность данных и оперативное принятие решений позволят максимально обеспечить сохранность³

Представлены результаты мониторинга за объектами историко-культурного наследия, выполненные по данной методике.

³ Официальный сайт Мэра Москвы. URL:<https://www.mos.ru/news/item/35658073/> (дата обращения: 21.09.21).

Библиография

1. Перевозников К. С., Шлапак В. В., Лонский И. И. Применение геоинформационного мониторинга для сохранности зданий и сооружений Басманного района Москвы // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 3. С. 121-125.
2. Атлас Объектов культурного наследия (памятников истории культуры города Москвы) Правительство Москвы Комитет по культурному наследию города Москвы // Москва. Издат. дом Руденцовых, 2008г.
3. Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M. Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry // Proceedings of IEEE, 2000, Vol. 3, P. 333–382. DOI:10.1109/5.838084
4. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, 1998, Vol. 14, P. 1–54.
5. Graham, L. C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proceedings of IEEE, 1974, Vol.62, No 6, P. 763-768. DOI:10.1109/PROC.1974.9516
6. Mukul M., Srivastava V., Mukul M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. Journal of Earth System Science, 2015, Vol. 124, No. 6, P. 1343–1357. DOI:10.1007/s12040-015-0597-2
7. Gonzalez J.H., Bachmann M., Krieger G., Fiedler H. Development of the TanDEM-X Calibration Concept: Analysis of Systematic Errors. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, Vol. 48, Issue 2, P. 716-726. DOI:10.1109/TGRS.2009.2034980
8. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, Vol. 30, No. 5. P. 950–959. DOI:10.1109/36.175330
9. Tapete D., Fanti R., Cecchi R., Petrangeli P., Casagli N. Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites // Journal of Geophysics and Engineering, IOPScience, 2012, P. S10–S25. DOI:10.1088/1742-2132/9/4/S10
10. Захаров А. И., Костюк Е. А., Денисов П. В., Бадак Л. А. Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка земли и её перспективы в рамках проекта «КОНДОР-ФКА» Журнал радиоэлектроники, №1, 2019. DOI:10.30898/1684-1719.2019.1.2
11. Лонский И. И., Перевозников К. С., Шлапак В. В. Повышение эффективности картографо-геодезического обеспечения ГИС. Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» 2015. № 4. С. 122-127.
12. Майоров А. А., Цветков В. Я., Андреева О. А. Трехмерное геоинформационное моделирование при массовом сборе информации. Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 2. С. 229-236. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-2-229-236

Поступила 23.09.2021. Рецензия получена 03.11.2021. Принята к публикации 20.12.2021

UDC 004.62

DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-700-711

METHODOLOGY OF GEOGRAPHIC INFORMATION MONITORING OF DEFORMATION PROCESSES FOR THE PRESERVATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE

Konstantin S. Perevoznikov^{1*}

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

*kperevoznikov@mail.ru

Citation: Perevoznikov KS. Methodology of geographic information monitoring of deformation processes for the preservation of buildings and structures of historical and cultural heritage. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotogrammetry*. Moscow, 2021;65(6): 700-711. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-700-711

Keywords. methodic, geoinformation monitoring, geotechnical monitoring, deformation process, geoinformation monitoring system, aboveground measurements, groundmeasurements, underground measurements, cultural heritage.

Abstract. Geoinformation monitoring of objects of historical and cultural heritage in a megalopolis is a system of an integrated methodological approach, periodic or continuous observations of deformation processes in natural and anthropogenic objects observed from aboveground, ground, underground spaces. The display of the received information about changes in such objects is formed in GIS and has a cartographic representation form, as well as the classification of changes and the creation of a database of changes about objects, the creation of 3D models based on them and the transfer to interested users. The developed methodology combines the most modern methods for monitoring deformation processes, which makes it possible to implement both a global collection of spatial data for objects of historical and cultural heritage, and to obtain point parameters of the studied processes affecting the bearing capacity of buildings and structures, therefore, the safety of objects as a whole.

References

1. Perevoznikov KS, Shlapak VV, Lonsky II. Applying geoinformation monitoring to preserve buildings and constructions round Basmanny district of Moscow. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2016;3: 121-125. (In Russian)
2. Atlas of Cultural Heritage Sites (cultural monuments of the city of Moscow) Moscow. 2008 Moscow Government Committee on the Cultural Heritage of Moscow. (In Russian)
3. Rosen PA, Hensley S, Joughin IR, et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of IEEE*. 2000;3: 333–381. DOI:10.1109/5.838084
4. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998;14: 1–54.
5. Graham LC. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of IEEE*. 1974;62(6): 763-768. DOI:10.1109/PROC.1974.9516
6. Mukul M, Srivastava V, Mukul M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*. 2015;124(6): 1343–1357. DOI:10.1007/s12040-015-0597-2
7. Gonzalez JH, Bachmann M, Krieger G, Fiedler H. Development of the TanDEM-X Calibration Concept: Analysis of Systematic Errors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010;48(2): 716-726. DOI:10.1109/TGRS.2009.2034980
8. Zebker HA, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(5): 950–959. DOI: 10.1109/36.175330
9. Tapete D, Fanti R, CecchiR R, et al. Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. *Journal of Geophysics and Engineering, IOPScience*. 2012, p. S10–S25. DOI:10.1088/1742-2132/9/4/S10
10. Space radar interferometric survey of the earth and its prospects within the framework of the "KONDOR-FKA" project *Journal of Radio Electronics*. 2019, No. 1. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.2 (In Russian)
11. Lonsky II, Perevoznikov KS, Shlapak VV. Improving the efficiency of cartographic and geodetic support of GIS. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2015;4: 122-127. (In Russian)
12. Mayorov AA, Tsvetkov VYa, Andreeva OA. Three-dimensional geoinformation modeling in mass data collection. *News of higher educational institutions. Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(2): 229-236. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-2-229-236 (In Russian)

Received 2021.09.23. Revised 2021.11.03. Accepted 2021.12.20