

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

**В.Я. Лобазов** (НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК)

В 1980 г. окончил факультет геодезии МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». После окончания института до 1989 г. служил в 29-м НИИ МО РФ. В 1989–1990 гг. работал научным сотрудником ГИПРОЦВЕТМЕТ. С 1992 г. по настоящее время — руководитель НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК.

**Н.В. Лукина** (НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК)

В 2004 г. окончила факультет геодезии МИИГАиК по специальности «прикладная геодезия». В настоящее время — инженер НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК.

## ▼ Немного истории

Первые работы по наблюдению за деформациями соборов и памятников архитектуры Московского Кремля были начаты в конце 1930-х гг. Для сохранения уникальных сооружений требовалось изучить деформацию оснований памятников, собрать и обобщить полученные материалы, составить прогноз развития деформационных процессов, разработать конкретные мероприятия по сохранению объектов.

Необходимость оперативных действий, направленных на спасение исторических памятников, была вызвана, прежде всего, тем, что в середине XX века изменился гидрологический режим территории Московского Кремля. Процесс гниения дубовых свай, составляющих основу фундаментов объектов, ускорился и стал неравномерным. Это привело к активизации деформационных процессов зданий и сооружений.

Однако регулярные систематические наблюдения за объектами историко-культурного комплекса стали возможными лишь в 1950-е гг., когда для анализа за деформациями зданий и сооружений во внутренние и внешние стены зданий были ус-

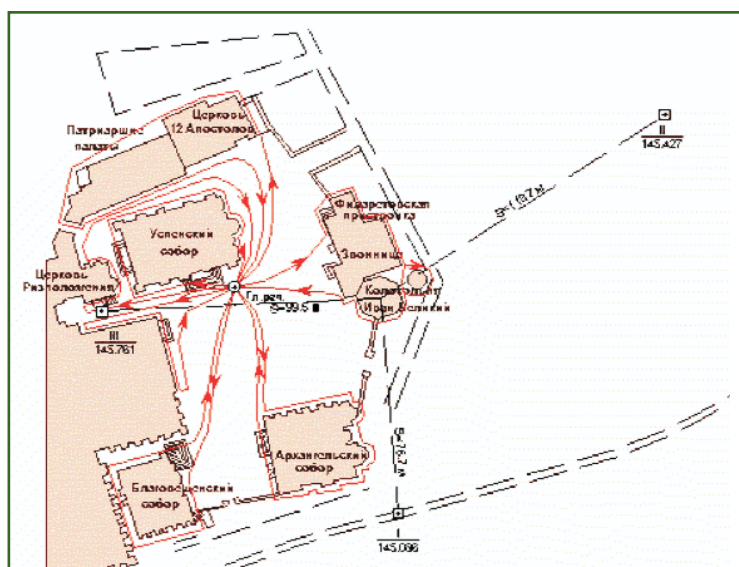
тановлены высотные марки и начаты периодические наблюдения за вертикальными деформациями оснований и наклоном Колокольни Ивана Великого.

Основой для наблюдений являлись фундаментальный репер, заложенный на Соборной площади, и три плановых центра (рис. 1).

В разные годы состояние исторических объектов Московского Кремля контролировали Мосгоргеотрест и НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова.

## ▼ Постановка задачи

В конце 1990-х гг. Московский государственный университет геодезии и картографии заключил договор с дирекцией Государственного историко-культурного музея-заповедника «Московский Кремль», в рамках которого специалисты НИЦ «Геодинамика» начали выполнять наблюдения за осадками фундаментов исторических зданий и сооружений Московского Кремля и обобщили сохранившиеся материалы наблюдений прошлых лет.



**Рис. 1**  
Общая схема нивелирных ходов на Соборной площади Московского Кремля

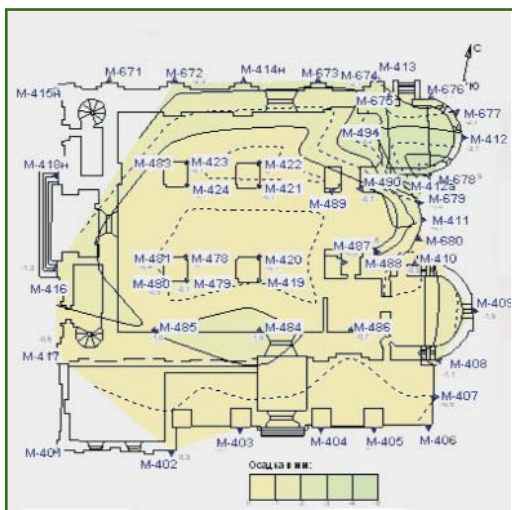


Рис. 2

Осадка Архангельского собора за период 1988–1998 гг.

Доверие, оказанное центру, было не случайным. Построение геодинимических сетей Москвы и Красноярска, успешно выполненное учеными, стало базой для создания локальных геодинимических полигонов в зонах расположения крупных природных и искусственных инженерных объектов. Пригодился уникальный опыт организации и проведения систематических натурных наблюдений на Загорской ГАЭС, включая сбор и обработку данных, их анализ и интерпретацию полученных результатов.

Для построения объективной картины развития деформационных процессов памятников Московского Кремля, ученые нуждались в статистическом материале за весь период наблюдений. Однако сложность заключалась в том, что информация, собиравшаяся последние 70 лет, оказалась неполной, а порой и недостоверной. Начиная с 1930-х гг., неоднократно менялись исполнители, технологии наблюдений и схемы закладки деформационных марок, по отдельным сооружениям проводились реставрационные работы, в том числе и фундаментов, часть марок утрачивалась, рядом закладывались но-

вые. Это внесло определенные трудности в работу специалистов университета.

#### ▼ Алгоритм решения

Технология наблюдений за осадками деформационных марок предусматривала проведение геометрического нивелирования с использованием электронных нивелиров типа NA 3000 (Leica Geosystems, Швейцария) с кодовыми рейками. Ходы прокладывались независимо (без узловых точек) к каждому объекту в прямом и обратном направлении при двух горизонтах инструмента.

Общая схема ходов нивелирования представлена на рис. 1.

На основе данных нивелирования, по значениям высот марок был выполнен статистический анализ результатов высотных наблюдений, позволивший построить динамическую модель развития деформационных процессов для каждого сооружения. При проведении анализа результатов наблюдений и построения динамической модели развития деформационных процессов была предложена следующая стратегия обработки материалов:

— анализ результатов наблюдений на наличие грубых ошибок позволял исключить из общих рядов наблюдений заведомо «грубые» результаты, вызванные чаще всего принудительным изменением положения марки;

— при отсутствии грубых ошибок результаты наблюдений оценивались на нормальность распределения, что подтверждало наличие или отсутствие систематических смещений;

— при наличии систематических смещений оценивалась временная динамика смещения центра распределения;

— после выявления временного динамического процесса изменения высотного положения марок для каждой из них

строились корреляционные зависимости развития деформационных процессов;

— завершением анализа являлось графическое отображение развития деформационных процессов.

При выборе статистических критериев оценки результатов наблюдений из общего многообразия оценочных критериев предпочтение отдавалось тем из них, для которых принятие гипотезы о наличии смещений и присутствии деформационных процессов при их отсутствии было бы менее критичным, чем принятие обратной гипотезы. Так, при проверке результатов на наличие грубых ошибок случайного характера из многообразия критериев был принят критерий оценки максимального члена в ряду наблюдений. Для проверки нормальности закона распределения использовался критерий асимметрии и эксцесса.

Для оценки временного смещения центра группировки высот марок по времени был применен критерий Аббе, позволивший оценить действие на результаты наблюдений переменных систематических ошибок. В данном случае — это оседание оснований сооружений.

Для марок, в значениях высот которых предыдущие критерии выявили временные тенденции изменения положения, были рассчитаны аппроксимирующие функции, описывающие зависимость между измеренными величинами и временным фактором.

Для построения в графическом виде динамических моделей развития деформаций были выбраны временные периоды (1967–1977; 1977–1987; 1988–1998), в течение которых имелись наиболее полные данные. Для графического отображения деформаций использовался программный продукт

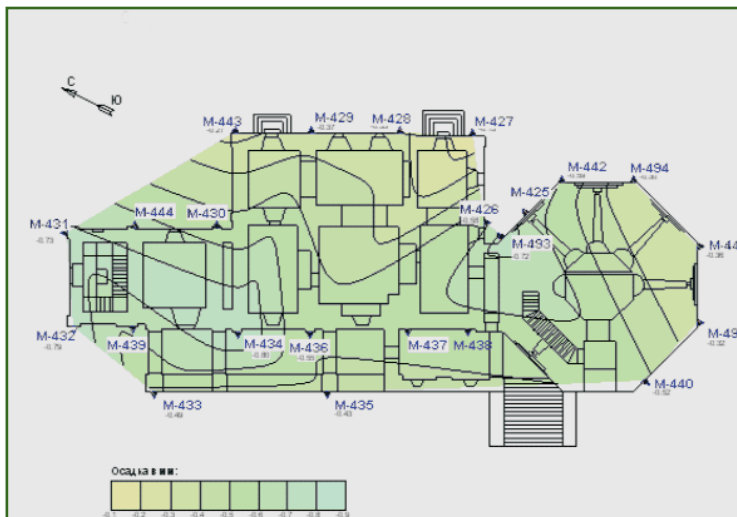
WinGIS (PROGIS, Австрия). На рис. 2 представлен вариант динамической модели развития деформаций для Архангельского собора.

Для всех объектов Московского Кремля по каждой марке, расположенной на объекте, были вынесены изменения ее высоты и изолиниями построены деформации зданий. Для объектов, наличие деформационных процессов у которых прослеживалось отчетливо, были построены графические модели отдельно по годам. На рис. 3 представлен вариант детализации осадок по годам комплекса сооружений Колокольни Ивана Великого.

Статистический анализ был проведен по всем маркам, заложеным в основании объектов, после чего для них были также рассчитаны аппроксимирующие зависимости временного изменения их положения по высоте, и по всем объектам построены графические модели динамического развития деформаций.

▼ **Выводы и прогнозы**

Анализ динамики деформационных процессов памятников архитектуры Московского Кремля, проведенный по данным результатам, показал общую тенденцию к стабилизации осадок деформационных марок для большинства соборов и памятников Московского Кремля, наблюдающуюся в последнее десятилетие. В тоже время, следует отметить, что



**Рис. 3**  
Осадка комплекса сооружений Колокольни Ивана Великого за период 1988–1998 гг.

для отдельных объектов данные процессы еще протекают, в том числе для Колокольни Ивана Великого, Успенской звонницы, Филаретовой пристройки, основания Царь-колокола, северо-восточного угла Архангельского собора.

Результаты проведенных наблюдений, статистического анализа и математического моделирования деформаций являются достаточным основанием для проведения работ по укреплению оснований сооружений и подтверждают актуальность выполненной работы.

Учитывая уровень ответственности, который мы несем перед следующими поколениями, необходимо и впредь продолжать работы по контролю и

обеспечению сохранности нашего исторического достояния. При этом оптимальным решением является расширение зоны наблюдений, охватывающей не только территорию музея, но и всего Московского Кремля и близлежащих территорий.

**RESUME**

The results of the observations of the Moscow Kremlin's construction deformations are presented. This monitoring began in the thirties of the last century and it is still going on.

Analysis of the deformation processes has revealed a general tendency towards stabilization of the draft marks for the majority of the cathedrals and monuments of the Moscow Kremlin within the recent decade.