

На правах рукописи

Царёва Ольга Сергеевна



**МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ
МОНИТОРИНГЕ ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО
НАСЛЕДИЯ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Ямбаев Харьес Каюмович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра геодезии, профессор;

Никитчин Андрей Андреевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Инженерная геодезия», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Защита диссертации состоится «29» декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан «29» октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Памятники культуры – это уникальные здания и сооружения. Зачастую неизвестны особенности их конструкций и свойства материалов, из которых они сделаны, что предполагает индивидуальный подход к оценке распределения и накопления в них деформаций. В этой связи создание системы геодезического контроля деформационных процессов имеет свои особенности, состоящие в том, что на таких объектах необходимо изучение всего их объема и следует выполнять наблюдения с оценкой вида деформаций на основе пространственных смещений. Такая возможность позволит существенно улучшить комплекс мер по их сохранности.

Весьма эффективной технологией оценки устойчивости объектов являются периодические геодезические наблюдения с заранее закреплённых станций, в результате которых определяют пространственные координаты (или только высоты) деформационных марок. Заключение делают на основании анализа изменений координат во времени. Для правильной оценки очень важно, чтобы вычисления выполнялись в единой для всего сооружения системе координат, что по различным причинам не всегда легко обеспечить. Действительно, определение положения всех закреплённых на объекте деформационных марок с одной точки стояния тахеометра, как правило, просто не реально, не всегда возможно создание сети таких станций. При использовании связующих точек важно, чтобы такие точки были в достаточном количестве и располагались вполне определённым образом, что также часто проблематично. Значит, требуется совершенствование технологии, которое позволило бы эту проблему решить.

Возникает идея при наблюдении со свободных станций (заранее не закреплённых) для оценки деформаций зданий и сооружений использовать инвариантные величины. Такими величинами, в частности, являются расстояния между деформационными марками и пространственные углы, которые определяются между каждой тройкой марок. Расстояния можно

вычислить по координатам или непосредственно измерить. Углы можно только вычислить.

Как следует из вышесказанного, преимущество использования инвариантов в том, что процесс измерений не привязан к определенной системе координат. Указанное обстоятельство значительно упрощает полевые работы.

При оценке деформаций, в общем случае вектора смещений включают в себя, как абсолютную составляющую, связанную с изменением положения объекта в пространстве, так и относительную, возникающую вследствие напряжений в его конструктивных элементах. Последняя, как правило, и определяет степень приближения к критическим деформациям, влияя на общую устойчивость объекта. Поэтому выделение относительных деформаций из общего вектора смещений задача весьма актуальная. Её решение существенно сближает позиции геотехники и геодезии.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в разработку геодезических методов изучения деформаций различных объектов, а также методов оценки деформаций внесли такие ученые, как Бикташев М.Д., Ганьшин В.Н., Голубцов А.И., Донских И.Е., Зайцев А.К., Карлсон А.А., Маркузе Ю.И., Михелев Д.Ш., Мустафин М.Г., Николаев С.А., Пискунов М.Е., Рунов И.В., Стороженко А.Ф., Шеховцов Г.А., Шеховцова Р.П. и др. Вместе с тем, исследования направленные на оценку пространственных деформаций по изменениям расстояний между различными элементами зданий памятников культурного наследия, не достаточны. Таким образом, тема диссертации, направленная на разработку метода оценки деформаций с использованием инвариантных параметров представляется весьма актуальной.

Объектами исследования являются здания и сооружения, включая объекты культурного наследия.

Предметом исследования являются деформации, возникающие при проведении реставрационных работ на объектах культурного наследия и их прогнозирование.

Цель работы. Совершенствование контроля состояния памятников культурного наследия за счет разработки метода оценки пространственных деформаций.

Задачи исследований:

1. Анализ нормативно-методической и технической литературы, посвященной методам наблюдений и оценки деформаций зданий и сооружений, включая объекты культурного наследия.

2. Разработка методики геодезических наблюдений за деформациями зданий и сооружений, включая объекты культурного наследия с определением векторов смещений деформационных марок в единой системе координат.

3. Разработка методики оценки абсолютных и относительных деформаций на основе метода наименьших квадратов для уравнивания длин линий с учетом трехмерных координат геодезической сети.

4. Проверка разработанной методики на объектах культурного наследия.

Научная новизна работы:

1. Разработана упрощенная методика геодезических наблюдений за деформациями, которая позволяет получать вектора смещений марок в единой системе координат.

2. Разработан алгоритм определения смещенных и несмещенных марок в деформационной сети, основанный на анализе изменений длин линий между ними.

3. Разработан алгоритм определения абсолютных и относительных деформаций различных объектов, базирующийся на трехмерном анализе векторов смещений деформационных марок.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная методика геодезических наблюдений за деформациями и предложенный алгоритм по выявлению вида деформаций могут быть использованы проектными и строительными организациями при наблюдениях и оценке деформаций различных зданий и сооружений.

Разработаны программные комплексы для оценки точности получения координат марок при построении сети в виде линейной

пространственной засечки (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618923 и №2019618408).

Методология и методы исследований. Методология состоит в использовании инвариантных величин деформационной сети и их применении при мониторинге деформационных процессов. При этом используются методы математической статистики, компьютерное моделирование, натурные измерения с применением электронных роботизированных тахеометров.

Положения, выносимые на защиту:

1. При оценке деформационного процесса зданий, сооружений и, в особенности, памятников культурного наследия эффективно применение сравнительного анализа длин линий деформационной сети в каждом цикле наблюдений.

2. Оценку смещений деформационных марок возможно выполнить с использованием оригинальных технологий измерений, включающих схему наблюдений с закрепленных пунктов с независимым ориентированием и с ориентированием на один удаленный пункт.

3. Абсолютные и относительные деформации объектов наблюдений возможно определять по векторам смещений марок деформационной сети, получаемых из решения трехмерной задачи на основе метода наименьших квадратов.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается согласованностью теоретических исследований с результатами натурных данных геодезических наблюдений за деформациями Кронштадтского Морского Никольского Собора и Westpark г. Бохум.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на факультетской конференции студентов и аспирантов Санкт-Петербургского государственного Горного университета 2012 г.; на международном симпозиуме «День горняка и металлурга» 2012 и 2013 гг. (г. Фрайберг (Германия); на семинарах для стипендиатов программ «М. Ломоносов» и «И. Кант» 28-30 октября 2013 г. (г. Бонн (Германия)) и 25-26 апреля 2014 г. (г. Москва); на секционных заседаниях научно-технической конференции кафедры ВиГС в рамках форума «Политехническая

неделя в Санкт-Петербурге» 14-19 ноября 2016 г., 13-19 ноября 2017 г. и 19-21 ноября 2018 г; на международных конференциях ЕЕСЕ-2018 и ЕЕСЕ-2019: «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» 19-20 ноября 2018 г. и 19-20 ноября 2019 г. В 2012 году по тематике исследования был выигран научный грант DAAD по программе «Михаил Ломоносов» и в соответствии с ним была пройдена стажировка в Германии на базе Высшей горной школы имени Г. Агриколы г. Бохум с 01.10.2013 по 31.03.2014 гг. В 2018 году по теме исследования выигран конкурс на предоставление субсидий молодым ученым среди вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в соответствии с распоряжением Комитета по науке и высшей школе №182 от 26.11.2018.

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке алгоритма выявления абсолютных и относительных деформаций, в выполнении моделирования деформаций и их выявление по предложенным алгоритмам, в постановке основных задач, в формулировке научных положений и основных выводов диссертации. Также автор принимал участие в выполнении геодезических наблюдений за деформациями Морского Никольского Собора (г. Кронштадт) и Westpark (г. Бохум).

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 5 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК) (из них в 1 статье - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus) и в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования (Scopus); получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка

литературы, включающего 181 наименование, и двух приложений. Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 66 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность работы и степень ее разработанности, основные цели, задачи и защищаемые научные положения.

В первой главе выполнен анализ методов наблюдений и обработки за деформациями зданий и сооружений, включая объекты культурного наследия. Предложено выполнять оценку деформаций с использованием инвариантных параметров.

Во второй главе приведена упрощенная методика выполнения полевых наблюдений при использовании от исходных данных, которыми обладает исполнитель. В частности, рассмотрены варианты реализации пространственной полярной засечки с помощью тахеометров при наблюдениях с закрепленных станций. Рассмотрены способы определения векторов смещений деформационных марок: непосредственно по результатам наблюдений, с использованием линейной пространственной засечки и метода наименьших квадратов. Разработан алгоритм определения смещенных и несмещенных (квазиопорных) марок, основанный на анализе изменений длин линий между ними.

В третьей главе разработана методика определения абсолютных и относительных деформаций различных объектов, базирующаяся на трехмерном анализе векторов смещений деформационных марок. Разработана методика выделения относительных деформаций из общего вектора смещений.

В четвертой главе выполнена апробация разработанной методики наблюдений и оценки деформаций на примере реальных объектов.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. При оценке деформационного процесса зданий, сооружений и, в особенности, памятников культурного наследия эффективно применение сравнительного анализа длин линий деформационной сети в каждом цикле наблюдений.

При выполнении наблюдений за деформациями практически всегда горизонтальные смещения точек объекта определяют независимо от смещений вертикальных. Это требует использования приборов разного типа, а значит увеличивает трудовые, временные и финансовые затраты на производство работ. Поэтому наблюдения за деформациями зданий, сооружений и, в особенности, памятников культурного наследия рациональнее выполнять одним прибором.

При изучении достоинств и недостатков методов наблюдений за деформациями выявлено, что наилучшим методом является пространственная полярная засечка, реализация которой возможна путём использования электронных тахеометров (в том числе и роботизированных).

Как правило, для получения координат деформационных марок в единой системе стремятся обеспечить связь между точками стояния тахеометра, выполняя наблюдения на три и более связующие марки. На рисунке 1 представлена традиционная схема наблюдений с закрепленных пунктов. В частности, прибор центрируется над опорной точкой I с помощью принудительного центрирования. Над опорной точкой II устанавливается марка с подставкой на штативе, которая также центрируется принудительно. Далее выполняются ориентирование прибора на точку II и измерения, необходимые для определения координат деформационных марок. Наблюдения по такой методике позволяют получать все координаты деформационных марок в единой системе сразу в поле. Заметим, что если все опорные точки включены в единую сеть, то и связующих марок не требуется.

Но на практике возникают ситуации, когда (например, в условиях реставрационных работ в зданиях памятников культурного наследия) наблюдения выполняют со свободных станций. При наблюдениях с использованием связующих точек возможно оценить только взаимное положение деформационных марок, но нельзя определить направление смещения. А при отсутствии достаточного количества связующих точек возникает проблема вычисления вектора смещения, так как координаты марок в каждом цикле получают в разных системах координат (рисунок 2). Поэтому предложено переходить к инвариантным параметрам, т.е. таким,

которые не зависят от системы координат, в частности, расстояниям. Используя расстояния, полученные, например, в первом и втором циклах наблюдений, можно вычислить координаты деформационных марок уже в заданной опорными точками системе координат, а значит оценить и составляющие векторов смещений. Хорошим средством для этого является линейная пространственная засечка (рисунок 3).

Пусть три точки 1, 2, 3 являются опорными, т.е. длины отрезков между ними постоянны. Изменяет свое положение четвертая точка P тетраэдра. Определить её координаты X, Y, Z можно из решения системы трех квадратных уравнений вида (1):

$$L_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad (1)$$

где L_i - расстояние от опорных пунктов до пункта P , $i = 1, 2, 3$.

Но, если выбрать систему координат, как это представлено на рисунке 3 (начало системы координат совмещено с точкой 1 и плоскость XU совпадает с плоскостью, содержащей опорные пункты 1, 2 и 3), для которой $X_1 = Y_1 = Z_1 = Y_2 = Z_2 = Z_3 = 0$, то система уравнений (1) примет следующий вид (2):

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ L_2 &= \sqrt{(X_2 - X)^2 + Y^2 + Z^2} \\ L_3 &= \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + Z^2} \end{aligned} \quad (2)$$

И легко получить (3):

$$X = (L_1^2 + X_2^2 - L_2^2) \text{ и } Y = (Y_3^2 - B + A) / 2Y_3 \quad (3)$$

В приведенных выше соотношениях (4):

$$A = L_1^2 - X^2, \quad B = L_3^2 - (X_3 - X)^2 \quad (4)$$

Координату Z проще всего вычислить, из системы уравнений (2) для расстояния L_1 (5):

$$Z = \sqrt{L_1^2 - X^2 - Y^2} \quad (5)$$

Вычислив координаты обеих точек P и P' можно оценить и составляющие вектора смещения $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, используя которые, определяют любой вид деформаций. При отсутствии опорных пунктов определяют квазиопорные марки, нормируя элементами матрицы ошибок изменений расстояний $M_{\Delta L^k}$ значения матрицы изменений расстояний ΔL^{k-1} (6). Марки, для которых значения нормированной матрицы деформаций меньше единицы, считают несмещенными или квазиопорными. Таким образом, для оценки деформаций по векторам смещений деформационных марок эффективно применение сравнительного анализа длин линий деформационной сети в каждом цикле наблюдений.

2. Оценку смещений деформационных марок возможно выполнить с использованием оригинальных технологий измерений, включающих схему наблюдений с закрепленных пунктов с независимым ориентированием и с ориентированием на один удаленный пункт.

При наблюдениях за деформациями объекта для анализа его устойчивости важно по результатам измерений получить вектора смещений различных его точек, с указанием координат деформационных марок, которые в этих точках закреплены. Точности, с которыми надо знать указанные параметры, разные. Вектор в пространстве, как известно, характеризуется модулем и направлением. На точность оценки модуля нормативными документами налагаются определенные требования. В частности, для зданий памятников культурного наследия допустимая ошибка определения вертикальных перемещений 2 мм, горизонтальных – 5 мм. На оценку направления вектора допусков нет. Практика показывает, что ошибка даже в несколько градусов при анализе информации значения не имеет. Точность позиционирования точки приложения вектора также никак не нормируется, и указание ее координат с ошибками в сантиметры или даже дециметры для выводов о состоянии объекта не столь значительны. Учёт вышесказанного, а также информации, получаемой в процессе составления проекта (координаты расположения деформационных марок, особенности выбранного для измерений оборудования)

может существенно влиять на технологию выполнения полевых измерений в сторону их упрощения. Один из популярных методов определения деформаций основан на использовании электронных тахеометров, так называемая, пространственная полярная засечка. Пусть, например, при наблюдении за объектом засечка выполняется электронным тахеометром со станций, которые никак не связаны единой сетью. В этом случае возможны две технологии выполнения работ: измерения с заранее закрепленных пунктов и измерения со свободных станций.

Наблюдения с заранее закреплённых пунктов.

Эта технология подразумевает использование постоянных для всех циклов наблюдений станций (закрепление их центрами и установку знаков для ориентирования тахеометра – знаки A и C на рисунке 4). При этом предполагается, что центр и знаки закреплены достаточно надежно и стабильны. В этом случае, процесс приведения прибора в рабочее положение в любом цикле измерений предусматривает три очевидных процедуры (центрирование, горизонтирование и ориентирование). Конечно, следует измерить и высоту прибора. Если это делать с достаточной точностью, то оставляющие $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ векторов смещений можно определять как разности координат, полученных из последующего и предыдущего циклов наблюдений, так как измерения первого и последующих циклов будут выполнены в одной и той же системе координат. Но на разных станциях свои системы координат, а корректный анализ в целом всего объекта выполним, если вектора смещений определены в единой системе координат. Для достижения этого возможно несколько вариантов. *Первый вариант (традиционный способ наблюдений)* предусматривает преобразование координат точек, полученных с разных станций к единой системе координат по связующим точкам или общим ориентирным пунктам (A, B, C на рисунке 4). Направления на них обозначены синим цветом. В основном, как сказано выше, так и поступают. Но важно, чтобы число связующих точек было достаточным, и чтобы располагались они вполне определённым образом, что не всегда возможно обеспечить. При отсутствии связующих точек или достаточного

числа ориентирных пунктов (например, отсутствие пункта B на рисунке 4), (*второй вариант*) предлагается использовать координаты деформационных марок, взятых из проекта наблюдений, составленного по чертежам объекта (или его цифровым моделям, построенным в единой системе координат). Кроме того, в нём учитывается, что, при условии горизонтирования прибора, оси Z на всех станциях изначально взаимно параллельны. Развернуты на некоторый угол оказываются только оси X и Y . В результате получается, что для каждого вектора смещений известны модуль и координаты точки приложения, но на каждой станции направления получены в своих системах координат. А знать их нужно в единой для всего объекта системе координат, что требует пересчёта составляющих Δx и Δy . Пусть Δx и Δy - составляющие вектора смещений деформационной марки, полученные по результатам измерений в системе координат станции II, $\Delta X, \Delta Y$ - их значения в системе координат объекта. Разворот осей x и y на станции II относительно фасада обозначим ω . Тогда (7):

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (7)$$

Оценить углы поворота ω систем координат в горизонтальной плоскости можно, например, путём определения направлений ориентирных линий (их дирекционных углов). Очевидно, что углы поворота осей координат равны разностям указанных направлений. Таким образом, в программу полевых работ следует включить измерение горизонтальных углов ориентирных направлений (β_I и β_{II} на рисунке 4). Сделать эту работу достаточно один раз в любое удобное время, так как можно полагать, что углы разворота от цикла к циклу не меняются. Причём, при вычислении угла разворота за исходное может быть выбрано ориентирное направление любой станции, и, даже, направление со станциями не связанное (например, как сказано выше, направление фасада α_F , что удобнее для решения задачи). Тогда развороты осей x и y на станциях I и II относительно фасада

здания будут равны разностям дирекционных углов: $\omega_I = \alpha_F - \alpha_{I-A}$ и $\omega_{II} = \alpha_F - \alpha_{II-A}$ соответственно. Заметим, что предложенная методика позволяет связать наблюдения наружного и внутреннего объемов здания.

В соответствии с *третьим вариантом* предполагается определение координат точек приложения векторов смещений, как предложено во втором варианте, но с использованием общего для всех станций ориентирного знака (на рисунке 4 обозначен зелёным цветом). Если знак расположен достаточно далеко, то разворотом указанных осей можно пренебречь (II–T и I–T, практически параллельны) и считать, что направления векторов смещений на всех станциях получаются в одинаково ориентированных системах, что и требуется для анализа. Ошибка в 2-3°, а возможно и больше, как сказано выше, роли не играет. Например, если расстояние между крайними станциями равно 100 м, и направление между ними примерно перпендикулярно направлению на ориентирный пункт (худший вариант), то расстояние до него от станций должно быть не менее 2 км. Все вектора смещений будут сразу определены в одинаково ориентированной системе координат, никаких преобразований не требуется. Рассмотренный случай редок, но возможен. В качестве контроля предлагается в начальном цикле наблюдений выбрать несколько удаленных целей, а в последующих циклах проверять неизменность ориентирного направления на одну из выбранных целей. Предложенные способы наблюдений более мобильны, значительно сокращают временные затраты на производство наблюдений, а также на уравнивание результатов наблюдений. Поэтому они эффективны, в том числе и в условиях экстренного или срочного мониторинга зданий, когда необходимо оперативно отслеживать текущее состояние конструкций. Предложенные способы наблюдений успешно прошли апробацию на примере Гидрокорпуса-1, расположенного по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

При наблюдениях за деформациями памятников культурного наследия могут возникать факторы, являющиеся помехами для измерений: строительные леса, уплотненная застройка, наличие

металлических конструкций, воздушных и подземных электросетей и т.д. В таких случаях наблюдения приходится проводить *со свободных станций* и, как правило, только за внутренним изменением объема здания. Так, на рисунке 2 показано, что с одной точки стояния невозможно выполнить измерения всего объема здания, поэтому приходится использовать несколько точек стояния тахеометра. Как сказано выше, для определения векторов смещений марок в единой системе координат, переходят к расстояниям и их изменениям между деформационными марками. Таким образом, предложены оригинальные технологии измерений, позволяющие выполнять оценку векторов смещений деформационных марок.

3. Абсолютные и относительные деформации объектов наблюдений возможно определять по векторам смещений марок деформационной сети, получаемых из решения трехмерной задачи на основе метода наименьших квадратов.

Если известно, как между циклами измерений изменились координаты X, Y, Z деформационных марок, закреплённых на объекте (т.е. используя разности $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) можно оценить любой вид его деформаций (сжатие, растяжение, изгиб, кручение и т.д.).

Изменение расстояния ΔL между циклами наблюдений и изменения координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ деформационных марок между ними в трёхмерном пространстве связаны соотношением (8):

$$\Delta L_{ij} = f(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j), \quad (8)$$

где i, j – номера деформационных марок.

Таким образом, если на объекте закреплено n таких марок, то теоретически можно измерить $n(n-1)/2$ расстояний между ними и составить столько же уравнений, в которых число неизвестных будет равно $3n$. В результате, если марок меньше 7, то число уравнений меньше числа неизвестных. При $n=7$ число неизвестных равно числу уравнений и система имеет единственное решение. Если $n > 7$ – число уравнений окажется больше числа неизвестных, причём их избыточность быстро возрастает с увеличением числа марок, значит, составляющие вектора смещений

находят с использованием, например, параметрического метода наименьших квадратов.

В общем случае вектора смещений включают в себя абсолютную и относительную составляющую. Поскольку именно относительные деформации влияют на общую устойчивость объекта, рассмотрим алгоритм выделения относительных деформаций из общего вектора смещений.

Оценим абсолютные деформации при нулевых относительных деформациях. В этом случае расстояние между любой парой точек объекта в процессе деформации не изменяется, но в общем случае меняются расстояния от точек объекта до опорных точек. Тогда возможны следующие варианты:

1) Объект стабилен, расстояния между циклами измерений не изменились и смещение любой деформационной марки нулевое.

2) Объект сместился между циклами наблюдений в каком-либо направлении, но без вращения. Все вектора смещений равны по модулю и коллинеарные.

3) Объект повернулся. В этом случае целесообразно оценить угол поворота и расположение пространственной оси вращения объекта. Повернем объект, представленный на рисунке 5, на 10° . Вектора смещений марок представлены в таблице 1. Разработан следующий алгоритм решения этой задачи: Находят направление оси вращения объекта. Для этого между точками, например, B и B' (F и F') строят плоскость, каждая точка которой равноудалена от точек поворота. Для получения уравнения плоскости строят сферы с центрами в точках, например, B и B' (F и F') радиусами, равными вектору смещения точки. Приравнивая уравнения сфер, получают уравнения плоскостей. Пересечение двух плоскостей дает ось вращения (9). Определяют координаты точки, расположенной на оси вращения. Для этого проводят плоскость (10), перпендикулярную оси вращения и проходящую через одно из положений вращаемых точек (соответственно второе положение будет автоматически принадлежать этой плоскости). Так как плоскость перпендикулярна оси вращения, то она перпендикулярна двум плоскостям, которые образуют ось вращения. Тогда вектор

нормали искомой плоскости можно найти как векторное произведение векторов нормалей плоскостей, образующих ось вращения (11). Далее составляют третье уравнение плоскости, проходящее через точку (например, B). Решая систему из трех уравнений плоскостей (12) методом Крамера, получают координаты центра окружности. После этого вычисляют радиус окружности (13) и угол поворота (14), используя теорему косинусов (рисунок 6).

4) Для того, чтобы отделить перенос от поворота (*четвертый вариант*) разработан итерационный метод, который включает следующие этапы:

а) Из всех модулей смещений выбирают наименьший по абсолютной величине, (считают, что он находится на оси вращения) а значит, составляющая, вызванная поворотом равна нулю. То есть это первое приближение вектора перемещения. В таблице 2 таким вектором является вектор $\Delta_{EE'}$.

б) Вычитают из всех векторов смещений вектор перемещений. В результате будут получены первые приближения смещений, вызванных поворотом (таблица 3).

в) Если составляющие вектора вращения корректны, векторные произведения любой пары векторов будут коллинеарны между собой (15).

г) Если вектора не коллинеарны, следует менять вектор смещений и возвращаться к пункту в).

Предположим теперь, что смещения деформационных марок – это результат абсолютных и *относительных* деформаций (марки A'', D'', M'', P'' на рисунке 7). На объекте будут марки, которые получили только абсолютную часть деформаций, то есть те марки, расстояния между которыми не изменились (на рисунке 7 это марки B', C', E', F'). Выполняют исследования по приведенным выше алгоритмам пп. 2-4 для векторов смещений этих марок, определяют угол поворота и/или величину смещения. Далее вычисляют координаты остальных марок (в частности, A', D', M', P') только в случае абсолютных деформаций (таблица 2). Исключают абсолютные вектора смещений $\Delta_{AA'}, \Delta_{DD'}, \Delta_{MM'}, \Delta_{PP'}$ из общего

вектора смещений деформационных марок (таблица 4), получают вектора смещений в результате относительных деформаций $\Delta_{A'A''} = -0,002$, $\Delta_{D'D''} = -0,008$, $\Delta_{M'M''} = -0,018$, $\Delta_{P'P''} = -0,001$ (рисунок 8). Таким образом, рассмотрены алгоритмы определения абсолютных и относительных деформаций объектов наблюдений на основе анализа векторов смещений марок деформационной сети, получаемых из решения трехмерной задачи на основе метода наименьших квадратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические итоги работы:

1. Разработан метод оценки пространственных деформаций при геодезическом мониторинге памятников культурного наследия, включающий усовершенствованную технологию наблюдений и методику обработки результатов измерений.
2. Разработана упрощенная методика геодезических наблюдений за деформациями, которая предусматривает выполнение линейно-угловых измерений с двух независимых станций и посредством увязки ориентирных направлений вектора смещений марок сводятся к единой системе координат.
3. Определено минимальное количество марок и измеряемых расстояний между ними для определения векторов их смещений по методу наименьших квадратов (МНК).
4. Разработаны программные средства для оценки точности получения координат марок при построении сети в виде линейной пространственной засечки (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618408) а также с возможностью визуализации (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618923).
5. Разработан алгоритм определения смещенных и не-смещенных марок в деформационной сети, основанный на анализе изменений длин линий деформационной сети.
6. Разработан алгоритм определения абсолютных и относительных деформаций различных объектов, базирующийся на трехмерном анализе векторов смещений пунктов деформационной сети.

7. Выполнено сравнение классических методов оценки деформаций и метода оценки деформаций по изменениям расстояний на реальных объектах, результаты сходимости доказали достоверность разработанного метода.

8. Полученные результаты могут быть использованы геодезическими организациями, которые планируют наблюдения за деформациями различных зданий и сооружений.

9. Перспективы дальнейших исследований состоят в конкретизации разработанной методики при мониторинге различных объектов культурного наследия.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Степанова, О.С.** Методика геодезических наблюдений за деформациями Морского Никольского собора в Кронштадте / **О.С. Степанова, Г.В. Макаров** // Записки Горного Института. – Санкт-Петербург. – 2013. – Т. 204. – С. 52-57. – ISSN 2411-3336.

2. **Степанова, О.С.** Анализ способов геодезических наблюдений за деформациями применительно к объектам культурного наследия / **О.С. Степанова** // Горный информационно-аналитический бюллетень – Москва. – 2014. – №4. – С. 418-422. – ISSN 0236-1493.

3. **Царёва, О.С.** Определение относительных деформаций по изменениям расстояний между деформационными марками / **О.С. Царёва** // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 5. – С.29-37. – ISSN 2618-9283.

4. **Царёва, О.С.** Определение абсолютных деформаций зданий по изменениям расстояний между опорными пунктами и деформационными марками / **О.С. Царёва, А.В. Гуменный** // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2019. – Т. 63. – № 5. – С. 496–502. – DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-496-502.

5. **Корнилов, Ю.Н.** Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений / **Ю.Н. Корнилов, О.С. Царёва** // Геодезия и картография. – 2020. – Т.81. – № 4 – С. 9-18. – DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18. (индексация в Scopus).

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

6. **Tsareva, O.** Estimation of absolute deformations by changes in distances between the reference points and deformation marks / **O. Tsareva, I. Dmitriev, Yu. Kornilov** // MATEC Web Conferences. – 2018. V. 245, 04013. – 13 p. – DOI: 10.1051/matecconf/201824504013.

7. **Tsareva, O.** Improving the methodology for observing deformations of buildings and structures / **O. Tsareva, F. Portnov** // E3S Web of Conferences. – 2019. – №110, 01056. – 8 p. – DOI: 10.1051/e3sconf/201911001056.

8. **Tsareva, O.** Separation of relative deformations of buildings from a general displacement vector of deformation marks / **O. Tsareva, N. Pshchelko, V. Glazunov, A. Yugov** // Proceedings of EECE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering 70. – 2020. – pp. 93-102. – DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_8.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019618408 Российская Федерация. Программа для оценки точности получения координат марок при построении сети в виде линейной пространственной засечки: №2019617389; заявл. 24.06.2019; опубл. 01.07.2019, Бюл. № 7 / **Царёва О.С., Шевченко А.С.** // заявитель ФГАОУ ВО «СПбПУ». – 1 с.;

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019618923 Российская Федерация. Программа для оценки точности получения координат марок при построении сети в виде линейной пространственной засечки с возможностью визуализации: №2019617455; заявл. 24.06.2019; опубл. 08.07.2019, Бюл. № 7 / **Царёва О.С., Шевченко А.С.** // заявитель ФГАОУ ВО «СПбПУ». – 1 с.

Таблица 1 - Исходные данные для решения задачи «Объект повернулся»

Названия марок	Координаты, м			Длина вектора
	X	Y	Z	
B	13,160	16,959	9,012	
B'	13,161	16,977	9,015	
$\bar{\Delta}_1$	0,001	0,018	0,003	0,018
F	7,517	20,342	12,318	
F'	7,507	20,345	12,318	
$\bar{\Delta}_2$	-0,010	0,003	0,000	0,010

$\bar{\Delta}_1$ и $\bar{\Delta}_2$ - вектора смещений марок B и F соответственно

Векторное произведение:

$$n_B \times n_F = \begin{pmatrix} i & j & k \\ u_{B_x} & u_{B_y} & u_{B_z} \\ u_{F_x} & u_{F_y} & u_{F_z} \end{pmatrix}, (11)$$

где $u_{B_x}, u_{B_y}, u_{B_z}$ - координаты вектора $n_B, u_{F_x}, u_{F_y}, u_{F_z}$ - координаты вектора n_F

$$\begin{cases} 0,002x + 0,036y + 0,006z - 0,691 = 0 \\ -0,02x + 0,006y + 0z - 0,028 = 0 \\ -0,00004 \cdot x - 0,00012 \cdot y + 0,0007 \cdot z - 0,004 = 0 \end{cases} (12)$$

Получим: $x = 6,672m; y = 17,397m; z = 8,578m$

Длина радиуса окружности:

$$r_1 = \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 + (z_B - z)^2}, (13)$$

где x_B, y_B, z_B - координаты точки B, x, y, z - координаты центра окружности

Угол поворота β :

$$\cos \beta = 1 - \frac{\Delta^2}{2 \cdot r_1^2}, (14)$$

где Δ - длина вектора смещения, r_1 - радиус

$$\beta = 09'33''$$

Ось вращения:

$$\begin{cases} 0,002x + 0,036y + 0,006z - 0,691 = 0 \\ -0,02x + 0,006y + 0z - 0,028 = 0 \end{cases}, (9)$$

Уравнение плоскости:

$$A(X - X_1) + B(Y - Y_1) + C(Z - Z_1) = 0, (10)$$

где $X_1; Y_1; Z_1$ - координаты точки, $n\{A; B; C\}$ - координаты вектора нормали

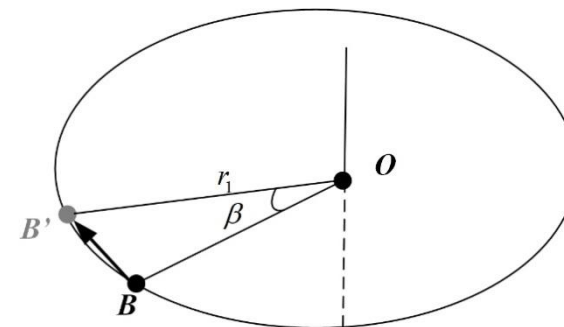


Рисунок 6 – Определение угла поворота объекта

Таблица 2 – Длины и составляющие векторов смещений в результате переноса и поворота модели

Названия векторов смещений	Приращения координат, м			Длина вектора, м
	ΔX	ΔY	ΔZ	
$\Delta_{AA'}$	0,022	0,016	0,007	0,028
$\Delta_{BB'}$	0,003	0,026	0,008	0,027
$\Delta_{CC'}$	0,001	0,017	0,006	0,018
$\Delta_{DD'}$	0,008	-0,010	0,003	0,013
$\Delta_{EE'}$	-0,010	0,001	0,003	0,010
$\Delta_{FF'}$	-0,008	0,011	0,005	0,014
$\Delta_{MM'}$	0,011	0,000	0,004	0,012
$\Delta_{PP'}$	0,019	0,006	0,006	0,021

Таблица 3 – Длины и составляющие векторов смещений без учета поворота модели

Названия векторов смещений	Приращения координат, м			Длина вектора, м
	ΔX	ΔY	ΔZ	
Δ_{AA_1}	0,032	0,015	0,004	0,036
Δ_{BB_1}	0,013	0,025	0,005	0,029
Δ_{CC_1}	0,011	0,016	0,003	0,020
Δ_{DD_1}	0,018	-0,011	0,000	0,021
Δ_{FF_1}	0,002	0,010	0,002	0,010
Δ_{MM_1}	0,021	-0,001	0,001	0,021
Δ_{PP_1}	0,029	0,005	0,003	0,030

Таблица 4 – Длины и составляющие векторов смещений в результате абсолютных и относительных деформаций

Название вектора	Приращения координат, м			Длина вектора, м
	ΔX	ΔY	ΔZ	
$\Delta_{AA''}$	0,022	0,016	0,005	0,028
$\Delta_{DD''}$	0,008	-0,010	-0,005	0,014
$\Delta_{MM''}$	0,011	0,000	-0,014	0,018
$\Delta_{PP''}$	0,019	0,006	-0,004	0,020

Векторные произведения:

$$\bar{\Delta}_{CC_1} \times \bar{\Delta}_{AA_1} = \{19; -52; -347\} \quad (15)$$

$$\bar{\Delta}_{AA_1} \times \bar{\Delta}_{MM_1} = \{19; -52; -347\}$$

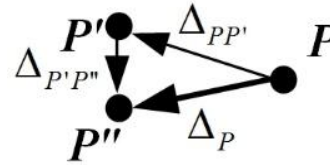


Рисунок 8 – Перемещение точки P в результате абсолютных и относительных деформаций: Δ_P - вектор смещения точки в результате абсолютных и относительных деформаций, $\Delta_{PP'}$ - вектор смещения точки в результате абсолютных деформаций, $\Delta_{P'P''}$ - вектор смещения точки в результате относительных деформаций

$$\Delta L^{k-1} = \begin{vmatrix} 0 & \Delta l_{1,2}^k & \dots & \Delta l_{1,g}^k & \Delta l_{1,n}^k \\ \Delta l_{2,1}^k & 0 & \dots & \Delta l_{2,g}^k & \Delta l_{2,n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta l_{i,1}^k & \Delta l_{i,2}^k & \dots & 0 & \Delta l_{i,n}^k \\ \Delta l_{n,1}^k & \Delta l_{n,2}^k & \dots & \Delta l_{n,g}^k & 0 \end{vmatrix}; M_{\Delta L^k} = \begin{vmatrix} 0 & m_{\Delta l_{1,2}^k} & \dots & m_{\Delta l_{1,g}^k} & m_{\Delta l_{1,n}^k} \\ m_{\Delta l_{2,1}^k} & 0 & \dots & m_{\Delta l_{2,g}^k} & m_{\Delta l_{2,n}^k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{\Delta l_{i,1}^k} & m_{\Delta l_{i,2}^k} & \dots & 0 & m_{\Delta l_{i,n}^k} \\ m_{\Delta l_{n,1}^k} & m_{\Delta l_{n,2}^k} & \dots & m_{\Delta l_{n,g}^k} & 0 \end{vmatrix}, (6)$$

где n - количество деформационных марок, $\Delta l_{i,g}^k$ - изменение пространственного расстояния между i -ой и g -ой маркой в k -м цикле наблюдений, $m_{\Delta l_{i,g}^k}$ - СКО определения изменения расстояния

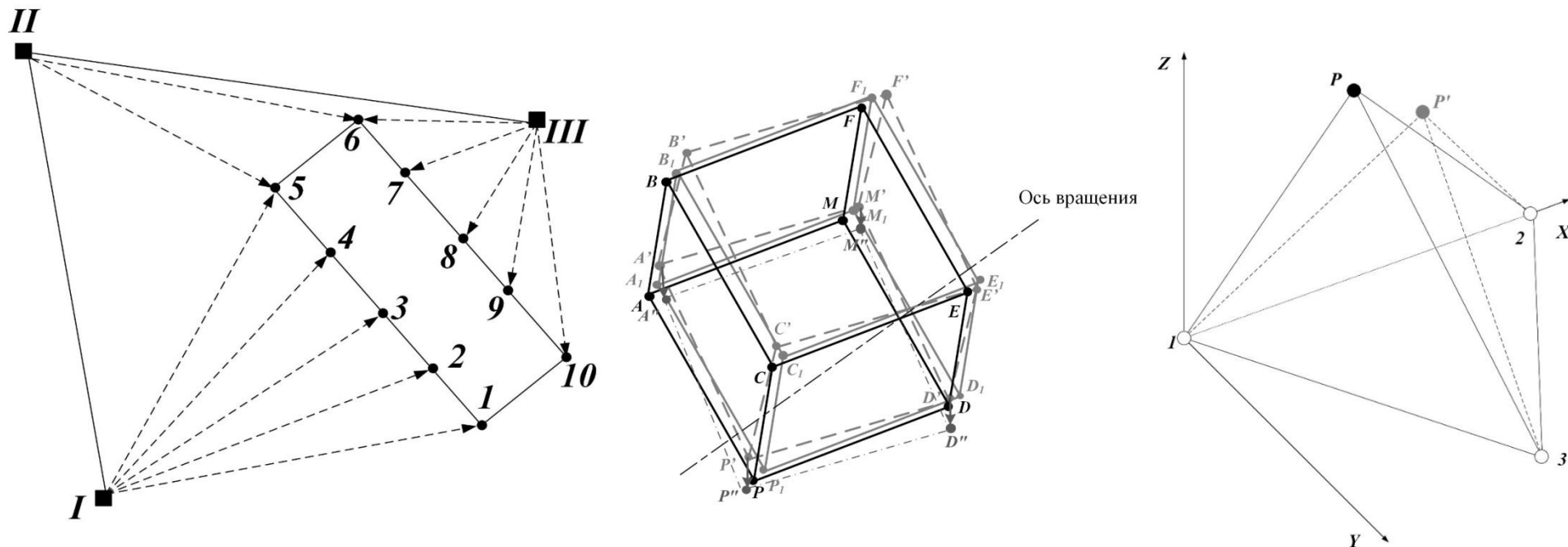


Рисунок 1 – Традиционная схема наблюдений: I, II, III - наблюдательные станции, 1–10 - деформационные марки.

Рисунок 3 – Линейная пространственная засечка

Рисунок 7 – Вектора смещений в результате абсолютных и относительных деформаций: точки $A, B...M, P$ модели до деформации, $A_1, B_1...M_1, P_1$ - после переноса модели, $A', B'...M', P'$ - после переноса и поворота модели; C'', D'', E'', P'' - марки модели в результате абсолютных и относительных деформаций

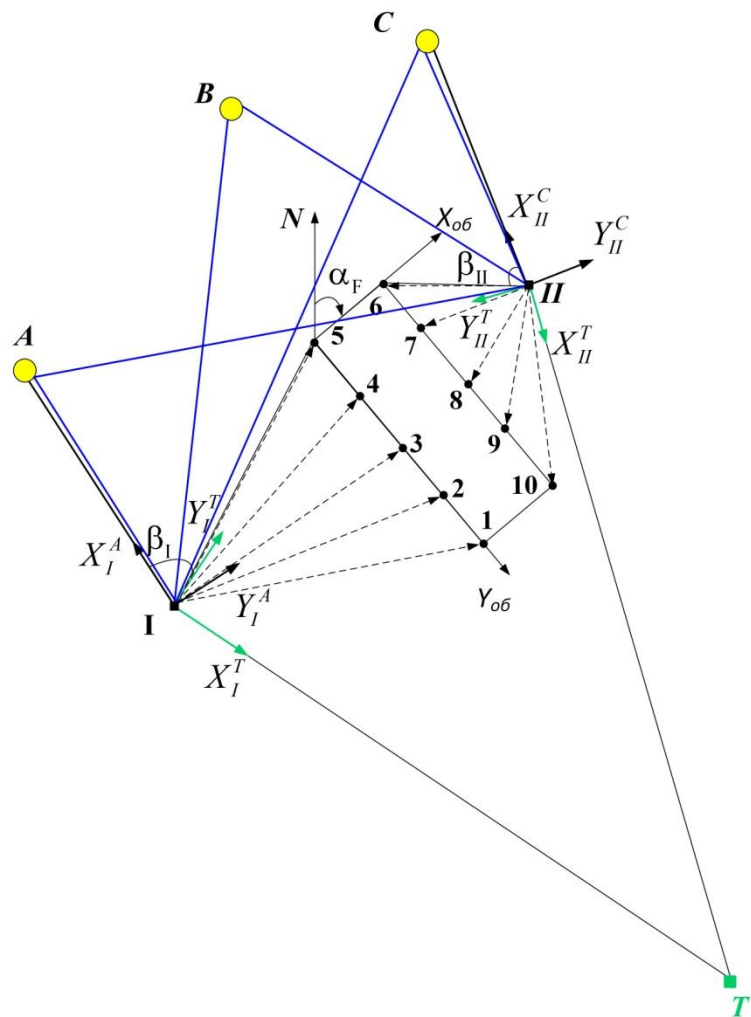


Рисунок 4 – Схема наблюдений с закреплённых пунктов:
 I, II – точки стояния тахеометра; 1–10 – марки,
 расположенные на фасаде здания; A, B, C – ориентирные пункты,
 α_F – дирекционный угол фасада здания, β_I и β_{II} – измеренные горизонтальные углы,
 T – удаленная цель, оси X_I^T, Y_I^T и X_{II}^T, Y_{II}^T при ориентировании прибора на нее,
 оси X_I^A, Y_I^A и X_{II}^C, Y_{II}^C при ориентировании прибора на пункты A и C соответственно.

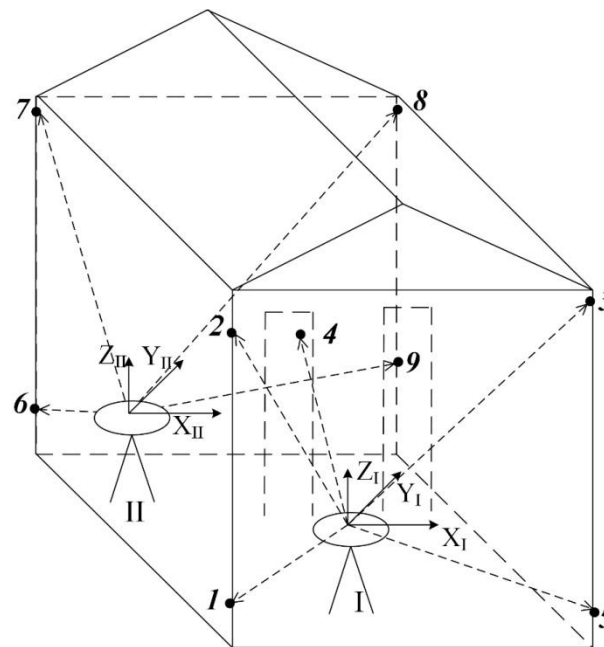


Рисунок 2 – Пространственная полярная засечка со свободных станций:
 I, II – свободные станции,
 1–9 – деформационные марки

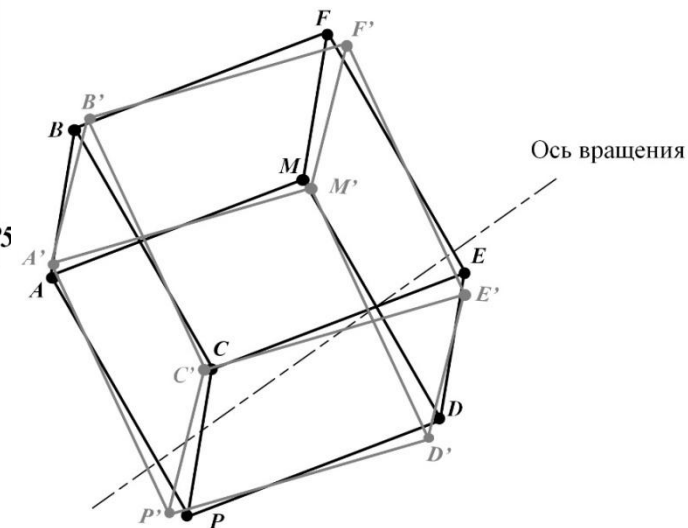


Рисунок 5 – Вектора смещений в результате поворота объекта: точки A, B, \dots, M, P модели до деформации, A', B', \dots, M', P' – после поворота модели