

На правах рукописи

Ахмедов Бахтиёр Назруллоевич



Совершенствование методики геодезического мониторинга перекрытий
большепролетных инженерных сооружений

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Шоломицкий Андрей Аркадьевич.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Сердаков Леонид Евгеньевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера» Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник сектора 1–31.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится 21 декабря 2021 г. в 12-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/akhmedov-bakhtiyer-nazrulloevich/>

Автореферат разослан 8 ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 18.10.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 141.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия растет число крупных общественных и спортивных сооружений, которые относятся к уникальным и большепролетным сооружениям. Перекрытия большинства таких сооружений выполняются в виде металлических балочных или арочных конструкций в виде пространственных оболочек. К сожалению, эти конструкции имеют печальную статистику аварийных ситуаций. Поэтому актуальным направлением в обеспечении безопасного функционирования таких сооружений является проведение геодезического мониторинга в целях определения предельно-напряженного состояния силовых элементов и, в случае необходимости, проведения соответствующих профилактических мероприятий.

В последнее время все большее распространение для геодезического мониторинга получают методы автоматизированных лазерных измерений роботизированными электронными тахеометрами и сканерами. Эти методы дают очень высокую точность измерений, однако их применение для большепролетных сооружений не всегда целесообразно, так как требует присутствия исполнителей внутри помещения после воздействия на него активной тектонической нагрузки. Так, например, Таджикистан располагается в сейсмоопасной зоне, где нередки землетрясения 4–6 баллов, с мая 2018 г. по август 2020 г. произошло 356 землетрясений, из которых 10 % было силой 4 балла и более. Некоторые из них достигали 6 и даже 7,5 баллов. В 1946 г. было землетрясение силой 10 баллов. Поэтому для сейсмоопасных территорий актуально разработать методику геодезического мониторинга, которая позволяет оценить последствия сейсмических событий для большепролетных сооружений, не находясь внутри помещений.

В настоящее время, при выполнении геодезических работ широко используется аэрофотосъемка беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с последующей автоматической обработкой по алгоритму SIFT. Точность определения координат этим методом составляет 5–10 см, высот 15 см, что вполне достаточно

для решения многих задач в области землеустройства, геодезии и маркшейдерии. Однако для целей геодезического мониторинга инженерных сооружений этой точности недостаточно, чтобы надежно определить деформации объекта.

Поэтому совершенствование методов геодезического мониторинга металлических перекрытий большепролетных сооружений является в настоящее время актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы диссертационной работы определяется исследованием научных публикаций и трудов в области прикладной геодезии применительно к задачам геодезического мониторинга и наблюдения за деформациями инженерных сооружений. В процессе работы над диссертацией использовались труды известных ученых в области прикладной геодезии: Асташенкова А. Г., Жукова Б. Н., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Могильного С. Г., Мустафина М. Г., Хорошилова В. С., Сердакова Л. Е., Уставича Г. А., Шоломицкого А. А., Хлебниковой Т. А., Ямбаева Х. К. и многих других.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является совершенствование методики геодезического мониторинга перекрытий большепролетных сооружений, исследование точности методов мониторинга, повышение точности результатов автоматической обработки аэрофотосъемки с БПЛА в зонах повышенной сейсмичности.

Основные задачи исследований:

- выполнить анализ существующих методов геодезического мониторинга большепролетных сооружений и дать оценку точности определения координат деформационных марок;
- исследовать точность построения моделей поверхности перекрытий по алгоритму масштабно-инвариантной трансформации признаков (SIFT) для мониторинга большепролетных сооружений;
- разработать алгоритм фильтрации грубых ошибок распознавания точек модели перекрытия, полученных по алгоритму SIFT при мониторинге с применением БПЛА;

– выполнить апробацию усовершенствованной методики на примере Дворца водных видов спорта г. Душанбе.

Объект и предмет научного исследования

Объектом исследования являются перекрытия большепролетных сооружений (на примере Дворца водных видов спорта г. Душанбе).

Предмет исследования – методы геодезического мониторинга деформаций перекрытий большепролетных сооружений.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1 Предложены технологические решения по созданию эталонной поверхности перекрытия инженерного сооружения, которая в дальнейшем будет использоваться как исходная при анализе тектонического воздействия на силовые элементы контролируемого здания.

2 Определена точность моделирования пространственных оболочек, полученных методами беспилотной аэросъемки и ее автоматической обработки по алгоритму масштабно-инвариантной трансформации признаков с использованием функции сферической интерполяции.

3 Исследованы методы фильтрации геопространственных данных для построения моделей перекрытий, в результате которых определен метод линейной фильтрации с дополнительным условием, позволяющий увеличить точность моделирования в четыре раза.

4 В дополнение к существующей методике геодезического мониторинга предложены методические решения по экспресс-оценке состояния большепролетных инженерных сооружений после тектонических воздействий.

Теоретическая значимость. Предложенная методика экспресс-оценки состояния перекрытий большепролетных сооружений и разработанные методы фильтрации геопространственных данных позволяют повысить точность моделей, полученных из аэросъемки БПЛА, и использовать их для определения деформаций большепролетных сооружений.

Практическая значимость результатов исследования состоит в повышении точности алгоритма масштабно-инвариантной трансформации признаков и по-

строении моделей перекрытий большепролетных объектов, которые по точности достаточны для мониторинга деформаций после сейсмических событий.

Практическое значение полученных научных результатов состоит в том, что можно выполнить экспресс-оценку состояния большепролетных сооружений с достаточной точностью после сейсмических событий без нахождения людей внутри. Таким образом повышается безопасность выполнения мониторинга и снижаются риски для исполнителей.

Методология и методы исследования. Методологической базой исследования являются: теория математической обработки геодезической информации, метод наименьших квадратов, методы статистического моделирования и статистического анализа, методы сравнительного анализа, методы фильтрации геопространственных данных. Большинство из этих методов реализовано в виде алгоритмов в собственном программном обеспечении.

Положения, выносимые на защиту:

1 предложенные методические решения по математической обработке результатов измерений, полученных методами беспилотной аэросъемки, позволяют определять реальную точность построенных моделей поверхностей большепролетных инженерных сооружений;

2 разработанная методика фильтрации геопространственных данных позволяет увеличить точность построения моделей поверхности по алгоритму SIFT;

3 усовершенствована методика геодезического мониторинга, дополненная методическими решениями по экспресс-оценке состояния большепролетных сооружений, что позволяет оперативно оценить состояние инженерного объекта после тектонических воздействий без присутствия исполнителей внутри опасного помещения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодези-

ческий контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов; 7 – Геодезическое обеспечение геодезического мониторинга состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению кризисных ситуаций; 8 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Апробация и одобрение исследований проходили на международных конференциях: Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2017, 2018, 2019 и 2021 гг.), г. Новосибирск; IV Международной конференции «Актуальные проблемы развития науки» (28 апреля 2018 г.), г. Киев.

Результаты использованы при мониторинге Дворца водных видов спорта в г. Душанбе, что отражено в отчетах по мониторингу сооружения. Реализация исследований осуществлена в виде программы Collocation Filtering (регистрационный номер 2020662290), зарегистрированной в Едином государственном реестре программ.

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в 14 научных статьях, пять из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получен патент на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Объем диссертации составляет 145 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 140 наименований. Работа содержит 16 таблиц, 55 рисунков и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертационной работы рассмотрены существующие методы геодезического мониторинга и их недостатки, приведены данные по статистике аварийных событий на большепролетных сооружениях, которые показывают, что совершенствование методики контроля за поведением и состоянием перекрытий большепролетных сооружений является актуальной научной задачей.

В борьбе с такими видами аварий используются различные подходы, одним из них является совершенствование методов расчета и повышение надежности конструкций, ужесточение требований к нормам проектирования.

Вторым направлением совершенствования безаварийной эксплуатации большепролетных сооружений является постоянный мониторинг состояния перекрытий. Если обобщить информацию о геотехническом мониторинге большепролетных сооружений, можно выявить следующие тенденции.

Комплексный подход к мониторингу заключается в периодическом обследовании конструкций, включая методы неразрушающего контроля, периодический геодезический контроль и непрерывный контроль строительных конструкций с помощью системы различных датчиков. Наиболее ценную и объективную информацию о деформации строительных конструкций дает геодезический мониторинг, который основан на использовании высокоточных роботизированных тахеометров и системы призм, которые размещаются на перекрытии в точках наибольших ожидаемых деформаций и сопряжения элементов конструкции.

Сочетание периодического геодезического мониторинга и мониторинга в реальном времени позволяет надежно определять состояние перекрытий большепролетных сооружений и избегать аварийных ситуаций с человеческими жертвами.

Много публикаций в научной литературе посвящены моделированию деформаций строительных конструкций и перекрытий и прогнозированию их по-

ведения при изменении условий внешней среды: температуры, ветровой и снеговой нагрузки.

Все применяемые на сегодняшний день методы мониторинга требуют присутствия исполнителей внутри сооружения. Нерешенной задачей геодезического мониторинга перекрытий большепролетных сооружений является отсутствие методики дистанционного мониторинга, который бы выполнялся без присутствия исполнителей внутри сооружения. Это позволит повысить безопасность выполнения мониторинговых работ, особенно после крупных сейсмических событий.

При проектировании геодезического мониторинга одним из важнейших вопросов является его точность. Мы должны понимать, с какой точностью определяются деформации объекта, и насколько деформации сопоставимы с точностью геодезических измерений. Современные программные средства для уравнивания геодезических сетей и измерений позволяют выполнить строгий предварительный расчет точности, который учитывает не только точность измерительного инструмента, но и влияние формы сети. На рисунке 1 показана геодезическая сеть и места деформационных марок на нижней поверхности перекрытия.

На последнюю дату измерений вертикальные деформации нижней поверхности перекрытия на момент полной нагрузки показаны на рисунке 2. Если выполнить строгий предрасчет точности погрешностей определения координат деформационных марок, мы будем знать, с какой точностью определены деформации перекрытия на рисунке 2. Поверхность ожидаемых погрешностей определения высот точек (координата Z) показана на рисунке 3.

Таким образом, существующая методика определения координат деформационных марок электронным тахеометром обеспечивает точность определения плановых координат 3,5 мм, а высотных отметок 4 мм, что составляет 1,5 % от допустимых высотных деформаций для Дворца водных видов спорта. То есть такая точность обеспечивает достоверное определение деформаций перекрытия. Точность определения координат деформационных марок приведена в технической документации проекта и составляет ± 5 мм.

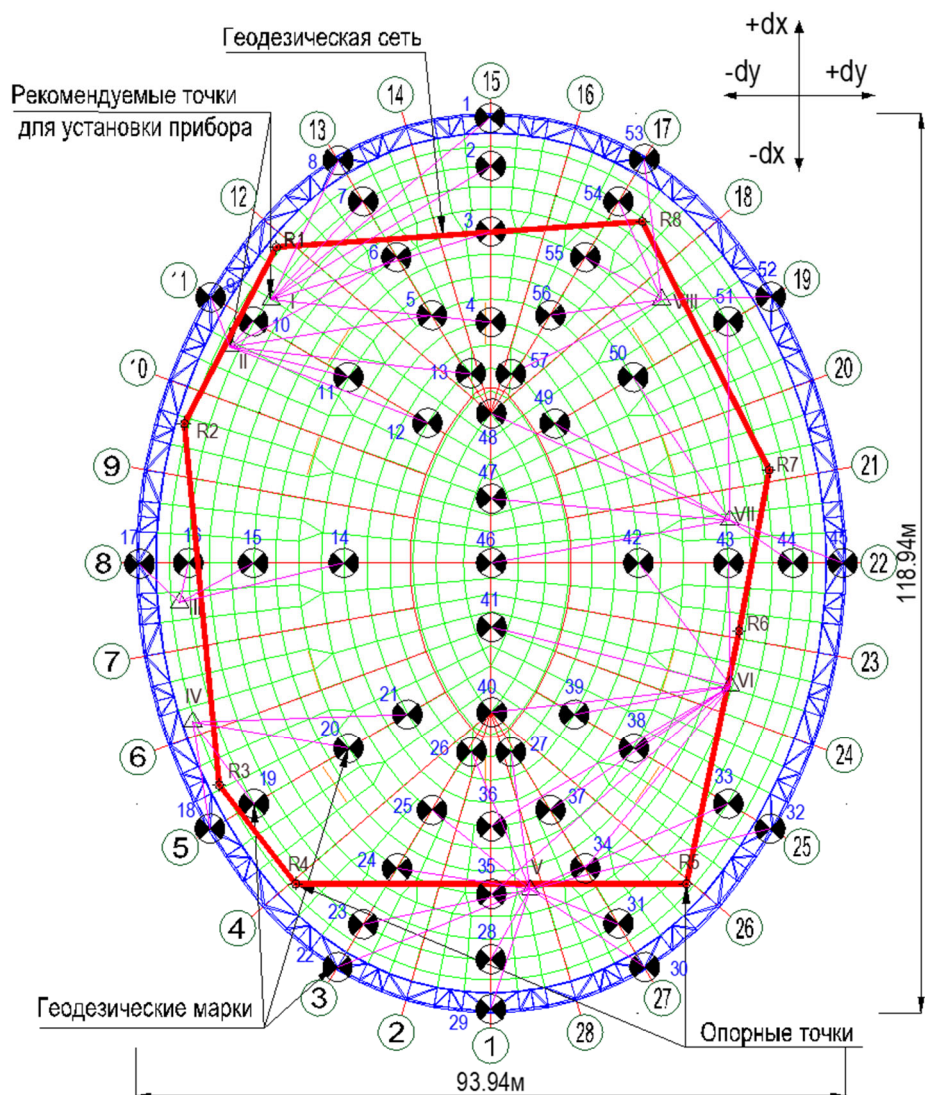


Рисунок 1 – Схема геодезической сети и деформационных марок

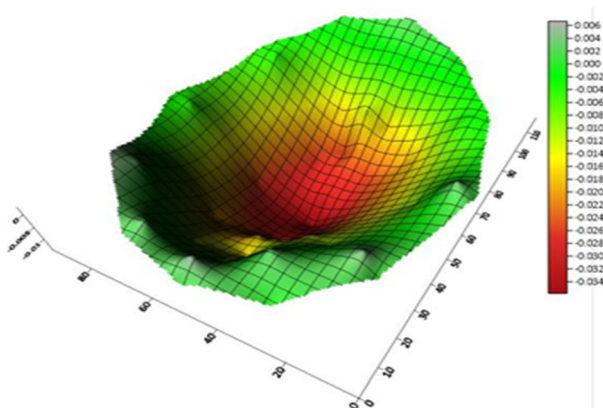


Рисунок 2 – Вертикальные деформации поверхности перекрытия

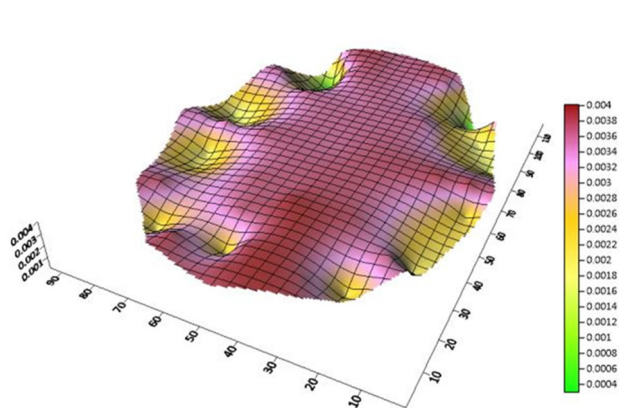


Рисунок 3 – Поверхность средних квадратических погрешностей определения координаты Z

Поверхности деформаций перекрытия объекта, полученные из геодезического мониторинга, могут служить эталоном при анализе и исследовании точности моделирования поверхности перекрытия, полученных из обработки аэро съемки, полученной с БПЛА.

Во втором разделе исследуются вопросы аэро съемки перекрытия с помощью БПЛА и алгоритма масштабно-инвариантного преобразования признаков (алгоритм SIFT) для автоматического моделирования поверхности перекрытия.

Для оценки точности поверхности, построенной по облаку точек модели, необходимо сравнить ее с некоторым эталоном. В данном случае мы имеем уникальную возможность получить теоретическую поверхность перекрытия, поскольку поверхность перекрытия состоит из четырех сопряженных сферических поверхностей (рисунок 4) с радиусами $R_1 = 33,73$ м и $R_2 = 67,7$ м и деформационные марки геодезического мониторинга располагаются в местах с известными радиусами. Поэтому было принято решение аппроксимировать ограниченные окрестности модели сферами соответствующих радиусов. Предварительно было выполнено статистическое моделирование, которое позволило выбрать оптимальный размер окрестности.

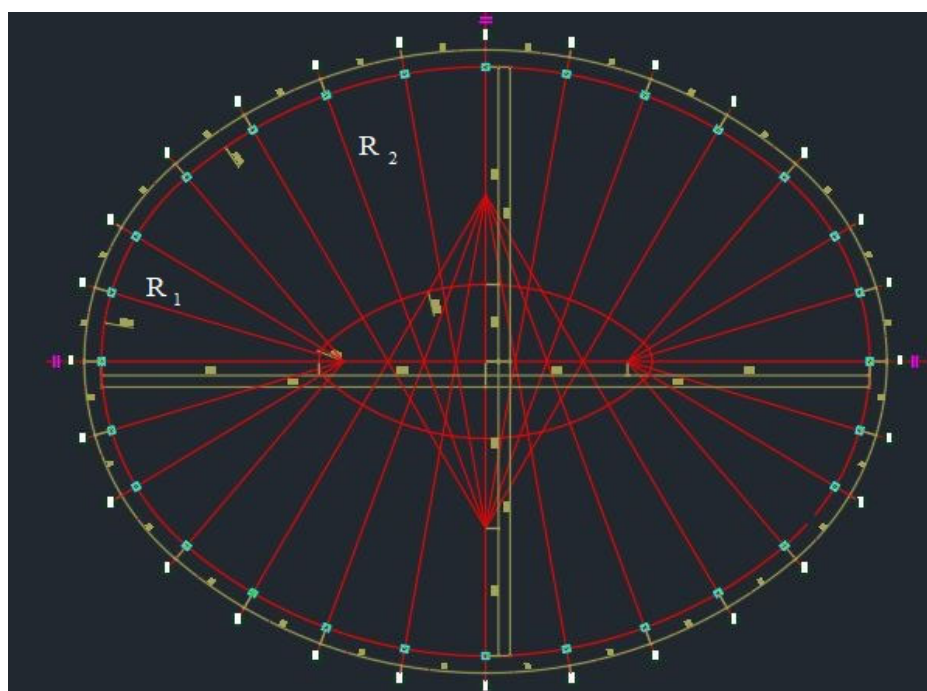


Рисунок 4 – Центры и радиусы сопряженных сферических поверхностей перекрытия

Для анализа точности полученных поверхностей был выполнен предварительный анализ точности полученных из аэрофотосъемок БПЛА поверхностей перекрытия. В местах расположения деформационных марок (57 точек, см. рисунок 1) выбиралась точки поверхности в квадратную область размером s и аппроксимировались сферой с заданным радиусом R . Для этого составлялись уравнения для каждой i точки, попавшей в окрестность размером s

$$(x_i - O_x)^2 + (y_i - O_y)^2 + (z_i - O_z)^2 - R^2 = \varepsilon_i^2, \quad (1)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты точки i , попавшей в окрестность s ; O_x, O_y, O_z – координаты центра сферы; R – заданный радиус окружности; ε_i – отклонение точки от сферы заданного радиуса R .

Затем вычислялось среднее квадратическое отклонение точки i от сферы заданного радиуса по формуле

$$m_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}, \quad (2)$$

где n – число точек, попавших в окрестность s .

На рисунке 5 приведены графики средних квадратических отклонений для 57 точек, при разных размерах области выборки, от 3 до 12 м.

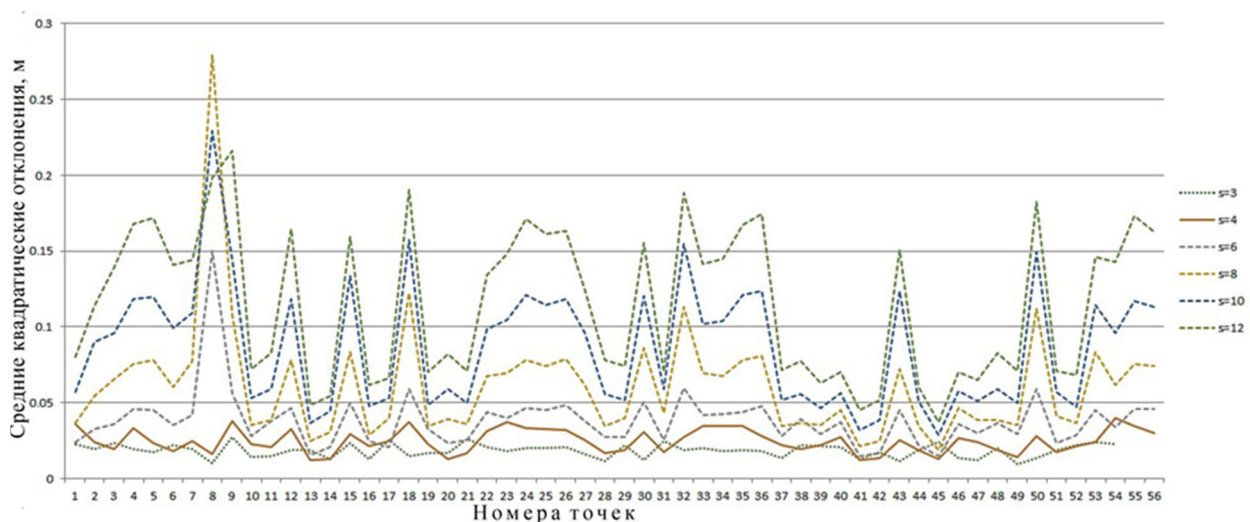


Рисунок 5 – Графики средних квадратических отклонений

На рисунке по оси абсцисс откладываются средние квадратические отклонения в метрах, по оси ординат номера точек, размеры окна выборки изменяются от 3 до 12 м.

Причем, при размерах окна выборки $s \leq 3$ м уравнения (1) становятся сингулярны, так как поверхность в области выборки близка к плоскости. С увеличением размеров окна выборки средние квадратические отклонения точек поверхности от сферы заданного радиуса возрастают. Это можно объяснить только тем, что реальная форма поверхности покрытия отличается от теоретической сферической формы. Поэтому для дальнейшего анализа будут приняты минимальные размеры окна выборки, при которых находится решение системы уравнений (1) для всех точек, $s = 4$ м.

Анализ системы уравнений (1) при условии, что R не заданная, а определяемая величина, показывает, что величина окна выборки даже при $s = 6$ м мала для надежного определения радиуса.

Для оценки аппроксимации сферой заданного (теоретического) радиуса рассмотрим распределение отклонений точек, попавших в окно выборки. Для этого построим гистограммы частоты распределения отклонений по диапазонам. На рисунке 6 приведены гистограммы для соответствующих поверхностей.

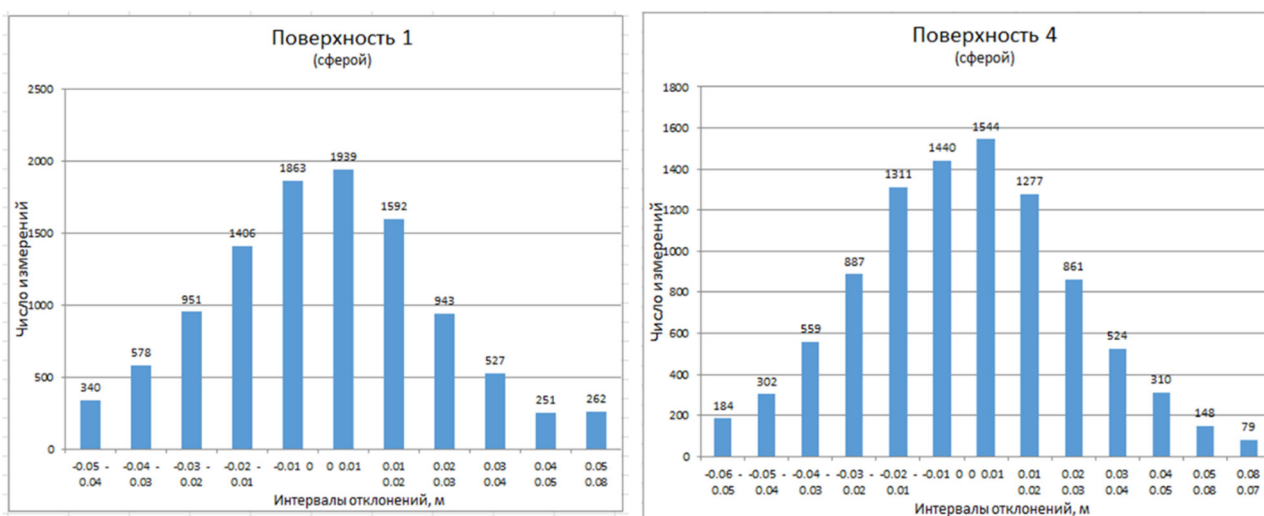


Рисунок 6 – Гистограммы отклонений для поверхностей 1 и 4

Группирование точек по диапазонам отклонений (таблица 1) показывает, что примерно 30 % точек имеют хорошую точность аппроксимации теоретической поверхности ± 10 мм, более 50 % точек имеют точность ± 20 мм, почти 80 % имеют отклонения менее ± 30 мм.

Таблица 1 – Таблица отклонений точек от сферической поверхности

Поверхность	Число точек по диапазонам, в %				Точек
	$-0.01...+0.01$ м	$-0.02...+0.02$ м	$-0.03...+0.03$ м	$> \pm 0.03$	
1	35.6	63.8	80.5	19.5	10652
2	37.6	65.4	83.3	16.5	6068
3	33.8	59.7	78.8	21.2	4912
4	31.7	59.1	77.7	22.3	9426

Однако примерно 20 % точек выходит за пределы приемлемой точности и может достигать величин ± 80 мм, что значительно искажает результаты определения деформаций.

Эти отклонения являются результатом ошибок распознавания соответствий на снимках, возможно, это связано с тем, что перекрытие Дворца водных видов спорта — это однотонная гладкая поверхность. Однако это требует дополнительных исследований. Возникает необходимость фильтрации отклонений данных поверхностей для ее сглаживания, чтобы исключить влияние больших значений отклонений.

В третьем разделе диссертации приводятся результаты исследования алгоритмов фильтрации геопространственных данных на моделях перекрытия, полученных из аэросъемки БПЛА по алгоритму SIFT.

Первым из методов исследовался *алгоритм интерполяции оптимальной плоскостью в ограниченной окрестности с дополнительным условием*. Первым этапом анализа был статистический эксперимент по выбору оптимального размера окрестности и величины допуска Δ . Для этого выполнили интерполяцию оптимальной плоскостью для точек с известными координатами и определили размер области выборки и величину допуска, при которых средние квадратические отклонения отметок этих точек будут минимальны для всех поверхностей,

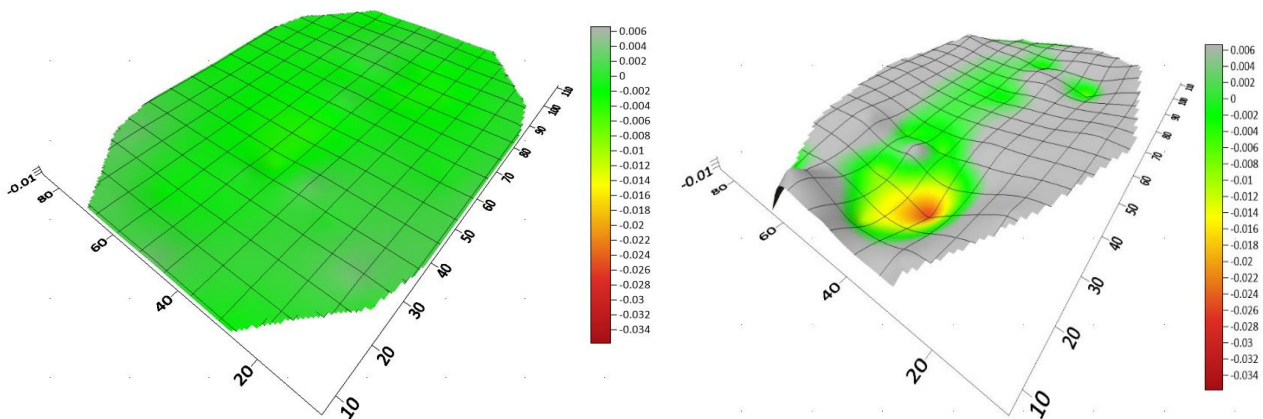
а затем выполнили интерполирование в точках с координатами геодезического мониторинга используя систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} A \cdot x_i + B \cdot y_i + C \cdot z_i + D &= \varepsilon_i \\ |\varepsilon_i| &\leq \Delta \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$[\varepsilon_i \cdot \varepsilon_i] = \min$$

где A, B, C, D – параметры для плоскости $i = 3 \dots n$ – число точек выборки; ε_i – отклонение, т. е. расстояние от точки i до плоскости. Результаты для разностей деформаций на одну из дат показаны на рисунке 7.

Между датами 15.08.2019–15.08.2020 (поверхность 4 – поверхность 1)



а) по данным геодезических определений

б) по данным аэросъемки БПЛА

Рисунок 7 – Сравнение поверхностей деформаций инженерного сооружения

Анализ поверхностей деформаций, полученных из аэросъемки, показывает, что разницы поверхностей гораздо больше, чем у поверхностей, полученных в результате геодезического мониторинга, даже при условии исключения граничных точек, диапазон отклонений 40 мм, от +6 до –34 мм. Видно, что влияние граничных точек не устраняется полностью, хотя в центральных частях поверхности несовпадение не превышает 10–15 мм.

Фильтрация геопространственных данных проводилась методом коллокации, поскольку интерполирование этим методом приводит к устранению больших отклонений и сглаживанию результирующей поверхности.

Для аппроксимации выбирается некоторая окрестность вокруг точки P , в нашем случае квадратная область, со стороной квадрата, подобранной для оптимального интерполирования соответствующей поверхности.

Ковариационная функция $K(\rho)$, будет иметь вид

$$K(\rho_{i,j}) = a + b \cdot \rho_{i,j}, \quad (4)$$

где a и b – постоянные величины, подбираемые для конкретной поверхности;

$\rho_{i,j}$ – расстояние между точками, вычисляется по формуле

$$b = \frac{1}{2S_{sr}}; \quad (5)$$

$$\rho_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (6)$$

В данном случае $2S_{sr}$ – размер окрестности, в которую выбираются точки для аппроксимации.

По выбранным в окрестность точкам формируются следующие матрицы:

$$L = \begin{vmatrix} z_1 - z_0 \\ z_2 - z_0 \\ \dots \\ z_n - z_0 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$$C_p = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,p}) \\ K(\rho_{2,p}) \\ \dots \\ K(\rho_{n,p}) \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$C = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,1}) & K(\rho_{1,2}) & \dots & K(\rho_{1,n}) \\ K(\rho_{1,2}) & K(\rho_{2,2}) & \dots & K(\rho_{2,n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(\rho_{1,n}) & K(\rho_{2,n}) & \dots & K(\rho_{n,n}) \end{vmatrix}, \quad (9)$$

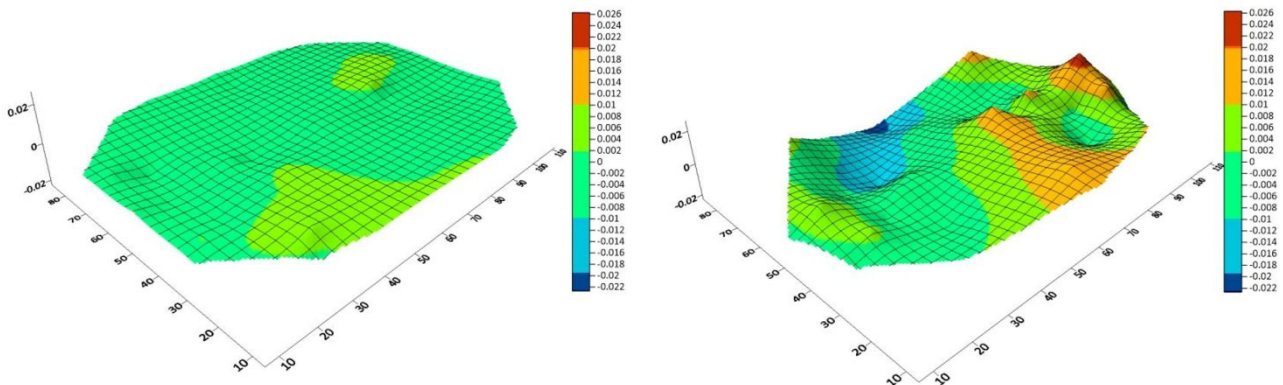
где z_0 – среднее арифметическое из отметок точек, попавших в окрестность.

Отметка Z_p точки интерполирования P вычисляется по формуле

$$Z_p = z_0 + C_p^T C^{-1} L. \quad (10)$$

Подбор параметров уравнения выполнялся статистическим методом. Результаты интерполирования для разницы деформаций на одну из дат показаны на рисунке 8. Сравнение поверхностей деформаций, полученных из геодезического мониторинга и аэросъемки с интерполяцией методом коллокации, свидетельствует о том, что эти поверхности отличаются. Отличие можно охарактеризовать диапазоном 48 мм, от +26 до –22 мм, причем поверхности деформаций, полученные методом коллокации, имеют выраженное поднятие и опускание по краям поверхности, в центральной части перекрытия диапазон отличий составляет от +15 до –15 мм.

Между датами 15.08.2019–03.12.2019 (поверхность 2 – поверхность 1)



а) по данным геодезических определений

б) по данным аэросъемки БПЛА

Рисунок 8 – Поверхность деформаций по данным геодезических определений и интерполированная методом коллокации

Медианная фильтрация. Еще одним методом усреднения нелинейных данных является медианный фильтр, который используется в цифровой обработке сигналов и изображений для уменьшения уровня шума. В случае цифровых трехмерных поверхностей, полученных алгоритмом SIFT шумом, являются отклонения от этой поверхности. Спецификой медианной фильтрации является ее избирательность по отношению к данным, которые сильно отличаются от соседних.

Для создания медианного фильтра для интерполяции по оси Z делаем выборку окном с некоторым размером L , симметричным относительно точки интерполирования k , и получаем множество точек выборки

$$z_k = \text{med}(z_{k-n}, z_{k-n+1}, \dots, z_{k-1}, z_k, z_{k+1}, \dots, z_{k+n-1}, z_{k+n}). \quad (11)$$

Это множество представляет собой упорядоченное по возрастанию множество. Средний элемент множества, при нечетном числе точек выборки, и есть средняя отметка для этой выборки. Поверхность деформаций, построенная по этим данным показаны на рисунке 9, *а*.

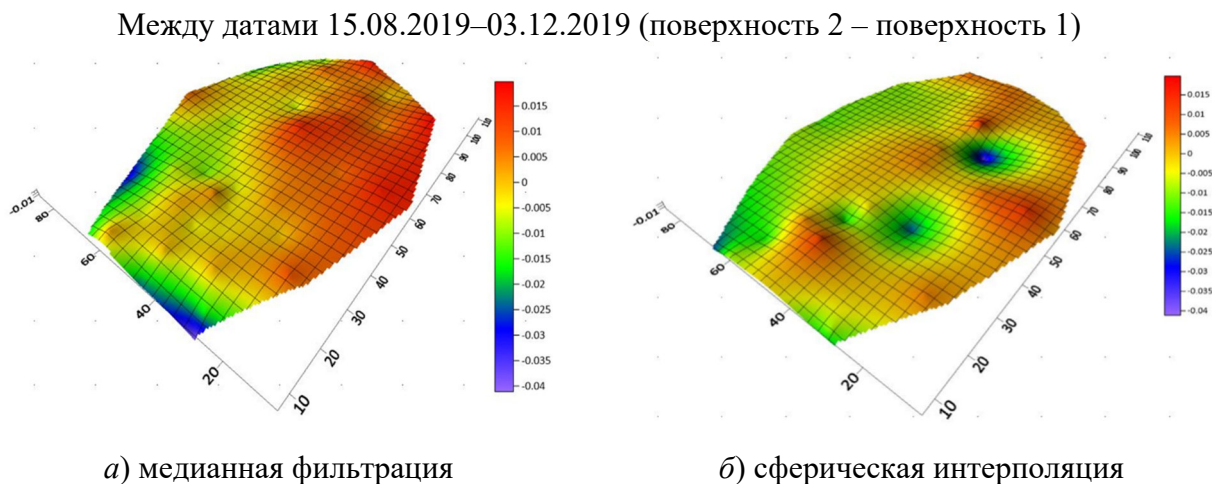


Рисунок 9 – Сравнение поверхности деформаций
(медианная фильтрация и сферическая интерполяция)

Сравнение поверхностей деформаций, построенных по данным медианной фильтрации, и по данным геодезического мониторинга, которые являются эталонными, показывает, что нелинейный метод медианной фильтрации не позволяет убрать большие отклонения в поверхностях, созданных по алгоритму SIFT. Диапазон отклонений достаточно велик, 50 мм, от +15 до –35 мм.

В диссертационной работе также были исследованы различные варианты интерполяции сферой (рисунок 9, *б*), расхождение между поверхностями деформаций, изменение между которыми варьируется от +15 до –40 мм, т. е. диапазон составляет около 55 мм.

Исследование реакции перекрытия. Для анализа совпадений поверхностей деформаций по данным геодезического мониторинга и аэросъемки был выполнен эксперимент, который заключался в геодезических измерениях 16 контрольных точек на поверхности перекрытия. По разностям отметок построены поверхности деформаций, которые можно сравнить с эталонными поверхностями деформаций из геодезического мониторинга (рисунок 10).

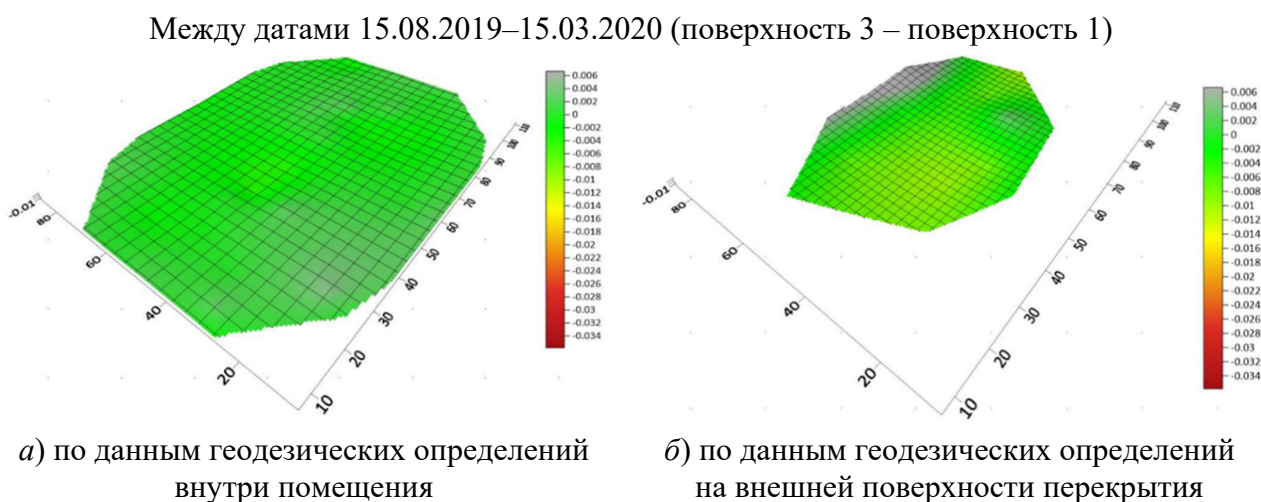


Рисунок 10 – Сравнение деформаций по контрольным точкам

Статистические показатели разностей поверхностей показывают, что диапазон значений отклонений для геодезического мониторинга, который в сравнении принимается за эталон, лежит в пределах $-5...+5$ мм, для точек на внешней поверхности перекрытия $-10...+10$ мм, а средние квадратические отклонения разностей для геодезического мониторинга и контрольных точек поверхности составляют ± 2 мм и $\pm 6,6$ мм соответственно. Поскольку точность определения координат точек внутри помещения и снаружи примерно одинакова, то разница статистических показателей может быть вызвана неодинаковой реакцией на изменения окружающей среды точек, расположенных на нижней стороне пространственной оболочки (геодезический мониторинг), и контрольных точек, расположенных на верхней стороне пространственной оболочки. Разница составляет примерно ± 5 мм.

В целом можно констатировать, что модели поверхности, полученные в результате обработки аэрофотосъемки, достаточно хорошо совпадают в центральной части перекрытия с данными геодезического мониторинга (± 20 мм), и отклонения возрастают к краям поверхности, и отличаются до 30–50 мм на краях перекрытия.

Сравнение изменений нижней поверхности пространственной оболочки, которая исследуется при геодезическом мониторинге, и верхней поверхности перекрытия, которая исследуется при аэрофотосъемке БПЛА, показало, что разность поверхностей не превышает 40 мм для линейной интерполяции оптимальной плоскостью с дополнительным условием, что составляет 15 % от допустимых деформаций для этого объекта.

В четвертом разделе предложена система экспресс-оценки и проект системы мониторинга Дворца водных видов спорта. В общем структурную схему методов мониторинга можно укрупненно представить в виде следующей схемы (рисунок 11).

Блоки верхнего уровня соответствуют измерениям: геодезического мониторинга, аэрофотосъемки и измерениям контрольных точек. По данным геодезического мониторинга получаем эталонные модели фактических деформаций. Данные измерений контрольных точек и эталонные модели при достаточно большом числе измерений могут дать модель реакции перекрытия.

Обработка аэрофотосъемки БПЛА по алгоритму SIFT в совокупности с каким-то видом фильтрации дает фактические модели деформаций. Эти модели с учетом модели реакции перекрытия можно сравнивать с эталоном.

В случае наступления крупного тектонического воздействия (≥ 6 баллов) можно выполнить только аэрофотосъемку БПЛА и сделать экспресс-оценку состояния перекрытия. Если вертикальные деформации превышают допустимые 266 ± 40 мм, необходимо предпринять специальные меры обеспечения безопасности для этого сооружения. Если деформации меньше допуска, то после визуального обследования можно вернуться к стандартной методике мониторинга.

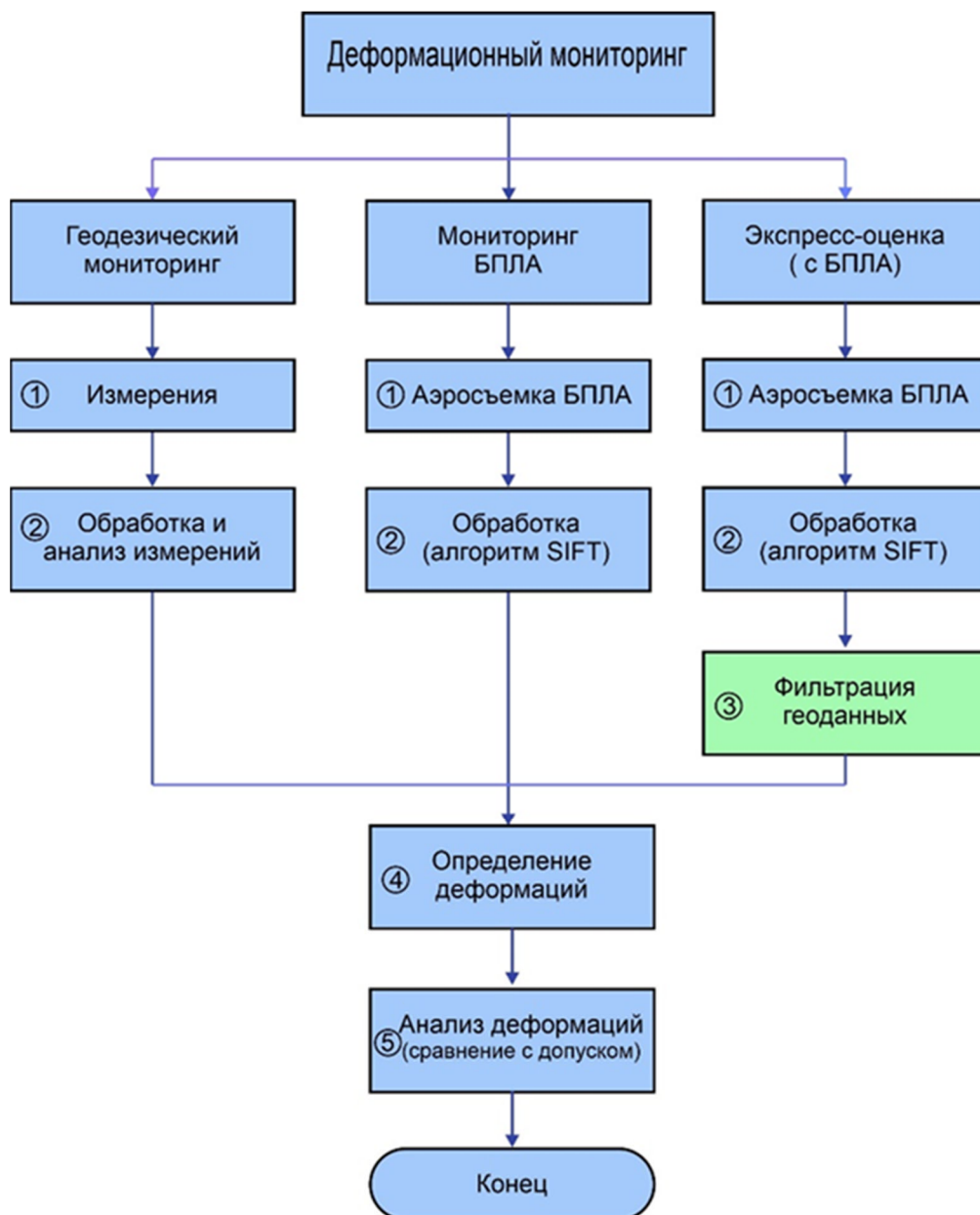


Рисунок 11 – Схема методов мониторинга

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании автором получены следующие результаты:

– выполнен анализ существующих методов геодезического мониторинга большепролетных сооружений и оценки точности определения координат деформационных марок, на основании которого установлено, что все существующие методы геодезического мониторинга, хотя и имеют высокую точность, но требуют присутствия исполнителей внутри сооружения;

– исследована точность построения моделей поверхности перекрытий по алгоритму масштабно-инвариантной трансформации признаков для геодезического мониторинга большепролетных сооружений, которая показала, что предельные отклонения моделей от теоретической формы перекрытия для Дворца водных видов спорта составляют от -80 до $+80$ мм, а основная масса отклонений (80 %) лежит в диапазоне ± 30 мм, что соответствует целям и задачам геодезического мониторинга;

– разработан алгоритм фильтрации грубых ошибок распознавания точек модели перекрытия, полученных по алгоритму SIFT при геодезическом мониторинге с применением БПЛА, который позволил уменьшить диапазон отклонений примерно в 4 раза (применительно к объекту исследования с 160 до 40 мм);

– выполнена апробация усовершенствованной методики при геодезическом мониторинге Дворца водных видов спорта г. Душанбе, которая показала свою высокую эффективность.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при выполнении геодезического мониторинга и оценки пространственного состояния конструкции большепролетных сооружений на сейсмоопасных территориях.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в повышении точности аэросъемки БПЛА и усовершенствовании механизмов отбраковки точек при построении моделей большепролетных перекрытий по алгоритму масштабно-инвариантной трансформации признаков.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Писарев, В. С. Оценка точности при выполнении подсчета объема земляных работ / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – июль-август 2019 г. – № 4 (102). – С. 38–41.

2 Шоломицкий, А. А. Геодезический мониторинг большепролетных сооружений с пространственной металлической конструкцией / А. А. Шоломицкий, Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 117–126. – doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-117-126.

3 О точности определения координат пространственного фотограмметрического стенда / А. А. Шоломицкий, Б. Н. Ахмедов, А. В. Иванов, Т. М. Медведская. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – март-апрель 2021 г. – № 2 (112). – С. 38–42.

4 Шоломицкий, А. А. Исследование точности построения моделей по алгоритму SIFT для большепролетных сооружений / А. А. Шоломицкий, Б. Н. Ахмедов, Т. М. Медведская. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 44–57.

5 Ахмедов, Б. Н. Точность определения координат при геодезическом мониторинге / Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2021. – № 4. – С. 40–44.

6 Патент на полезную модель № 198055 Российская Федерация. Универсальный геодезический пункт / Сальников В. Г., Ахмедов Б. Н. ; патентообладатель СГУГиТ, дата гос. регистрации 16.06.2020. – Текст : непосредственный.

7 Свидетельство о государственной регистрации № 2020662290 программы для ЭВМ. Collocation Filtering / Шоломицкий А. А., Ахмедов Б. Н. ; правообладатель СГУГиТ, дата гос. регистрации 12.10.2020. – Текст : непосредственный.

8 Ахмедов, Б. Н. Построение цифровых трехмерных моделей геопространства / Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Инженерная графика и трехмерное моделирование. Молодежная научно-практическая конференция: сб. научных докладов (16 декабря 2016 г., Новосибирск). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 9–13.

9 Писарев, В. С. Автоматизированное обновление цифровых моделей геопространства / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия,

геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 46–50.

10 Писарев, В. С. Опыт создания цифровой модели на примере оздоровительного лагеря в Республике Таджикистан / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов национальной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 2. – Новосибирск, 14–15 декабря 2017 г. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 121–126.

11 Ахмедов, Б. Н. Исследование методов обновления цифровых моделей геопространства / Б. Н. Ахмедов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы развития науки : сб. материалов IV международной конференции. В 2 т. Т. 2. – Киев, 28 апреля 2018 г. – Киев, 2018. – С. 42–54.

12 Писарев, В. С. Использование беспилотных летательных аппаратов в горном деле / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов, С. В. Середович. – Текст : непосредственный // Материалы Первой национальной науч.-практич. конф. в рамках 22-й Междунар. конф. и выставки «Нефть и газ Сахалина 2018», Южно-Сахалинск, 25–27 сентября 2018 г. – Южно-Сахалинск, 2018. – С. 78–79.

13 Писарев, В. С. Анализ способов сбора геоданных при геодезическом сопровождении горных работ / В. С. Писарев, Б. Н. Ахмедов, А. А. Басаргин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 197–202. – doi: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-197-202.

14 Akhmedov, B. Using of UAV in collecting geospatial data for the purpose of solving engineering problems in urban construction / B. Akhmedov, G. Akhmedova. – Текст : непосредственный // Danish Scientific Journal. – 2021. – № 46. – P. 41–45. – ISSN 3375-2389.