

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Ахмедов Бахтиёр Назруллоевич



Совершенствование методики геодезического мониторинга перекрытий  
большепролетных инженерных сооружений

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Шоломицкий Андрей Аркадьевич

Новосибирск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 МЕТОДЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....	10
1.1 Существующие методы геодезического мониторинга .....	10
1.2 Общая информация об объекте исследования.....	13
1.3 Технологическая схема проведения мониторинга деформаций больше- пролетных сооружений .....	17
1.4 Теория вопроса.....	23
1.5 Анализ точности геодезических измерений.....	26
1.6 Выводы по разделу 1 .....	31
2 АЭРОФОТОСЪЕМКА ОБЪЕКТА С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА И ИССЛЕ- ДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА SIFT .....	32
2.1 Геодезическое обеспечение аэрофотосъемки БПЛА .....	34
2.2 Аэрофотосъемка объекта с применением БПЛА.....	37
2.3 Анализ точности моделей поверхностей перекрытий .....	41
2.4 Выводы по разделу 2 .....	48
3 МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ.....	50
3.1 Линейные методы фильтрации.....	51
3.2 Фильтрация методом коллокации .....	66
3.3 Статистическое моделирование оптимальных параметров коллокации .....	68
3.4 Фильтрация модели поверхности перекрытия методом коллокации.....	70
3.5 Анализ деформаций поверхности методом медианной фильтрации .....	72
3.6 Интерполяция сферической функцией .....	76
3.7 Исследование реакции перекрытия.....	82
3.8 Анализ результатов и выводы по разделу 3 .....	85
4 СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПЕРЕКРЫТИЯ.....	88
4.1 Структура системы мониторинга Дворца водных видов спорта .....	88
4.2 Схема базы данных системы мониторинга .....	91

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	93
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Поиск оптимального размера окна выборки для поверхности 1 (аэросъемка БПЛА 15.08.2019).....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Поиск оптимального размера окна выборки для поверхностей 1-4 (после исключения больших отклонений).....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Поиск оптимального значения допуска для поверхностей 1-4 (после исключения больших отклонений).....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Поиск оптимального допуска $\Delta$ для поверхностей 1-4.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Интерполирование поверхностей методом оптимальной плоскости с дополнительным условием .....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) Таблица координат деформационных марок.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) Таблица координат контрольных точек на поверхности перекрытия.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ И (обязательное) Таблица координат поверхности перекрытия определенных методом медианной фильтрации .....	144

## ВВЕДЕНИЕ

*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 нередко 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 построении 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:*

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

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

– 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. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов; 7 – Геодезическое обеспечение геодинамического 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.

## 1 МЕТОДЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 1.1 Существующие методы геодезического мониторинга

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 последнее время все большее распространение получают металлические конструкции в виде пространственной оболочки, которые хорошо выдерживают различные нагрузки, в том числе и сейсмические. Наибольшими известными объектами с перекрытиями типа «пространственная оболочка» являются Пекинский оперный театр (Национальный центр исполнительских искусств 2007) [44], спортивная арена Nagoya Dome с диаметром перекрытия 187,2 м [61, 65]. В настоящее время в мире строится множество зданий с перекрытиями типа «пространственная оболочка» [65, 104, 105, 112, 115, 129, 130, 135, 137], большинство из которых являются общественными и большая часть – большепролетными. Большинство перекрытий типа «пространственная оболочка» большепролетных сооружений имеют сферическую форму или сопряженные сферические или эллиптические поверхности.

В российском климате безаварийно эксплуатируются стальные сетчатые и стальные висячие мембранные оболочки перекрытий зданий и сооружений [31, 61]. Доверие к железобетонным оболочкам в России было сильно подорвано в 2000-е гг. из-за ряда аварий, наиболее известные из которых произошли в Трансвааль-парке [82] и на Басманном рынке [46] из-за недостатков проектирования и эксплуатации зданий. Аварий зданий различных конструкций в РФ происходит довольно много, статистика за 1999–2003 гг. приведена в [1]. Особенно аварийным выдался период 2005–2006 гг.: в феврале 2005 г. обрушилась оболочка Трансвааль-парка (Москва), в декабре этого же года в городе Чусовой Пермского края обрушилась кровля бассейна, в Москве – крыша следственного изолятора УВД Юго-Восточного административного округа, в январе 2006 г. в Баварии упала кровля катка, на следующий

день в Чешской Республике под тяжестью снега обрушилась крыша супермаркета, 28 января 2006 г. в польском городе Катовице обрушилась крыша выставочного центра, 7 февраля 2006 г. в супермаркете города Тегинг-ам-Инн на юге Германии рухнула крыша, 23 февраля 2006 г. произошло обрушение покрытия Басманного рынка (Москва).

Статистика показывает, что примерно 80 % случаев строительных аварий с обрушением несущих конструкций объекта происходит в результате человеческих ошибок, допущенных при проектировании, возведении и эксплуатации зданий и сооружений [8, 17, 31, 32]. Изучая статистику аварий большепролетных покрытий, приведших к серьезным последствиям, можно заключить, что эти аварии происходили за последние три десятилетия со средней периодичностью раз в два-три года.

В борьбе с такими видами аварий используются различные подходы, одним из них является совершенствование методов расчета и повышение надежности конструкций [8, 17, 32, 105, 130]. По мере накопления статистики об авариях ужесточались требования к нормам проектирования. В РФ можно проследить совершенствование нормативной документации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений [15, 36, 74–77].

Вторым направлением совершенствования безаварийной эксплуатации большепролетных сооружений является постоянный мониторинг состояния перекрытий. Этой теме посвящено огромное число публикаций, только некоторые из них [2, 6, 9, 11, 12, 14, 18, 26–28, 33–35, 43, 59, 64, 70, 86, 88, 99, 102, 122–124, 134, 136]. 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. В случае, если требуется получать информацию по всей поверхности перекрытия, то наиболее подходящим методом будет лазерное сканирование [88, 123, 136].

Мониторинг деформаций перекрытий в реальном времени обеспечивается системой датчиков: тензометрических, инклинометров, датчиков деформаций растяжений-сжатий и ГНСС-приемников [12, 33, 34, 127].

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 связано с моделированием деформаций строительных конструкций и перекрытий и прогнозированием их поведения при изменении условий внешней среды: температуры, ветровой и снеговой нагрузки [26–28, 42, 71, 97, 124, 126, 140].

Методы традиционного геодезического мониторинга хорошо описаны в научной и технической литературе и использовались в данной работе. Литература по мониторингу с применением БПЛА описывает мониторинг видимого состояния объектов и не может служить прототипом или предшественником данной работы.

В процессе работы над диссертацией использовались труды целого ряда известных ученых в области прикладной геодезии, в частности: 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.

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

В последнее время появилась технология микроволнового интерферометрического радарного сканирования, предназначенная для статического и динамического мониторинга мостов, дамб, открытых трубопроводов, зданий и сооружений. Он позволяет определять структурные изменения объектов, с частотой до 200 измерений в секунду, что дает возможность осуществлять мониторинг деформаций в реальном времени и определять амплитуду и частоту колебаний объекта [63]. Однако технология новая и только начинается ее промышленное применение, по большей части при открытой разработке месторождений, где она дает наибольший экономический эффект. Поэтому методы традиционного геодезического мониторинга перекрытий большепролетных сооружений остаются абсолютно преобладающими и наиболее надежными.

При проектировании геодезического мониторинга одним из важнейших вопросов является точность геодезического мониторинга. Мы должны понимать, с какой точностью определяются деформации объекта, и насколько деформации сопоставимы с точностью геодезических измерений. Чаще всего точность оценивалась достаточно приближенно по формулам полярного способа или различных засечек [24, 25]. Однако современные программные средства для уравнивания геодезических сетей и измерений позволяют выполнить строгий предварительный расчет точности, который учитывает не только точность измерительного инструмента, но влияние формы сети [40, 89].

## 1.2 Общая информация об объекте исследования

Расчет конструкции пространственной оболочки выполнен ТОО «Дуовой» (КНР) [81] и проверен ООО «СтальПроект» [48]. Расчет производился на следующие типы нагрузок и воздействий во время эксплуатации:

– статические нагрузки от веса несущих конструкций покрытия и конструкций кровли;

- технологические нагрузки от веса инженерного оборудования, закрепляемого на несущих конструкциях покрытия;
- статические нагрузки от веса снегового покрова;
- нагрузки от ветрового воздействия;
- сейсмические нагрузки;
- температурные воздействия.

Строительство металлической конструкции Дворца водных видов спорта на 2 000 посадочных мест на улице Карамова в городе Душанбе [22, 49] началось в марте 2017 г., монтаж модульной конструкции оболочки завершился в декабре 2017 г. Еще в течение года продолжались работы по монтажу витражей, устройству кровли, инженерных коммуникаций и других работ. В конце 2018 г. завершились все работы, повышающие нагрузки на несущие конструкции оболочки. С мая 2019 г. сооружение сдано в эксплуатацию, официальное открытие было 21 июля 2020 г. [49].

Пример конструкции во время строительства приведен на рисунке 1.1, *а*, вид готовой смонтированной модульной конструкции – на рисунке 1.1, *б*.

*а)**б)*

Рисунок 1.1 – Общий вид металлической модульной конструкции:

*а)* в процессе монтажа; *б)* готовая смонтированная конструкция оболочки

Сооружение имеет форму эллипса в плане размером  $118,94 \times 93,94$  м. Основная конструкция, поддерживающая кровельную систему, состоит из пространственной металлической конструкции – оболочки, стоящей на металлических колоннах высотой 28,30 м. Арки в поперечном и продольном направлениях усилены продольными и боковыми связями, и весь каркас создает пространственную несущую систему – пространственную оболочку.

С целью проведения мониторинга для определения фактического поведения той или иной пространственной конструкции используются геодезические методы измерения [2, 6, 9, 11, 12, 18, 26–28, 33–35, 42, 43, 59, 64, 70, 86, 88, 99, 102, 122–124, 127, 134, 136], зачастую в совокупности с различными датчиками. Технические регламенты для строительства и эксплуатации зданий и сооружений требуют систематического измерения перемещений и деформаций [35, 43] при строительстве и при эксплуатации объектов. Целесообразно выполнять регулярное проведение измерений деформационных явлений в соответствующих интервалах – циклах измерений или эпохах измерений. Контролируемые элементы и допуски на деформации приведены в [74], допускается использование расчетных допусков [81].

Деформационные марки для мониторинга устанавливались при тесном взаимодействии с конструкторами-проектировщиками в местах ожидаемых максимальных сосредоточенных деформаций.

Согласно расчетной модели [81] деформации происходят в основном в центральной части покрытия (рисунок 1.2, *а*, зона окрашена красным цветом), а при сейсмическом воздействии и перемещении узлов – в боковых частях (рисунок 1.2, *б*). Максимальная величина деформации по расчету 266 мм (см. легенду на рисунке 1.2). Точность геодезического мониторинга для перекрытий, определенная в технической документации проекта, составляет  $\pm 5$  мм.

После завершения строительства геометрические параметры конструкции постепенно изменяются из-за резьбовых соединений узлов (шарнирных узлов). Другими важными факторами, влияющими на деформацию, являются погодные усло-

вия, особенно влияние температуры и влажности, сейсмические, а также сезонные воздействия. Из-за инсоляции алюминиевая конструкция крыши нагревается, и это приводит к удлинению стрешней и откручиванию в узлах соединений металлической конструкции. Сооружение находится в зоне с жарким летним климатом и большим перепадом температур зимой, подвергается атмосферным воздействиям, снеговой и ветровой нагрузкам. Температура воздуха внутри поддерживается системой кондиционирования  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , летом снаружи поднимется до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зимой падает до  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

С момента полного завершения монтажа металлической конструкции периодически проводятся наблюдения за смещениями и деформациями. С 2018 г. выполнено шесть циклов измерений, первые три из них были проведены во время строительства, при возрастании нагрузки на металлический каркас пространственной оболочки.

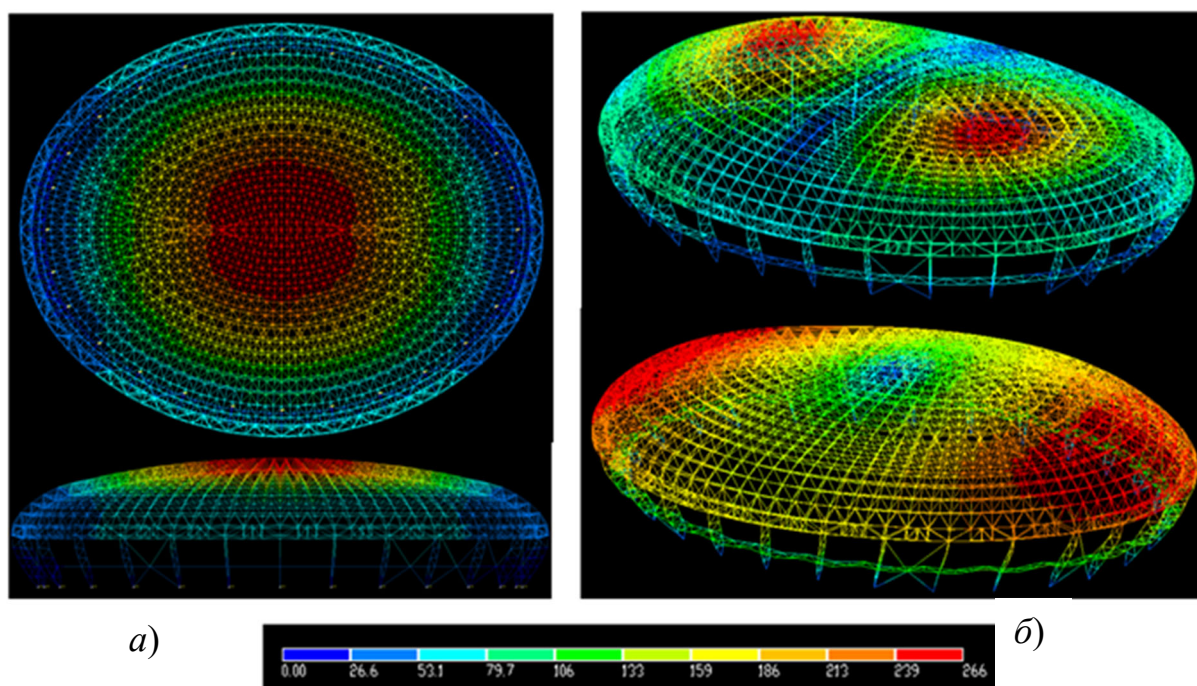
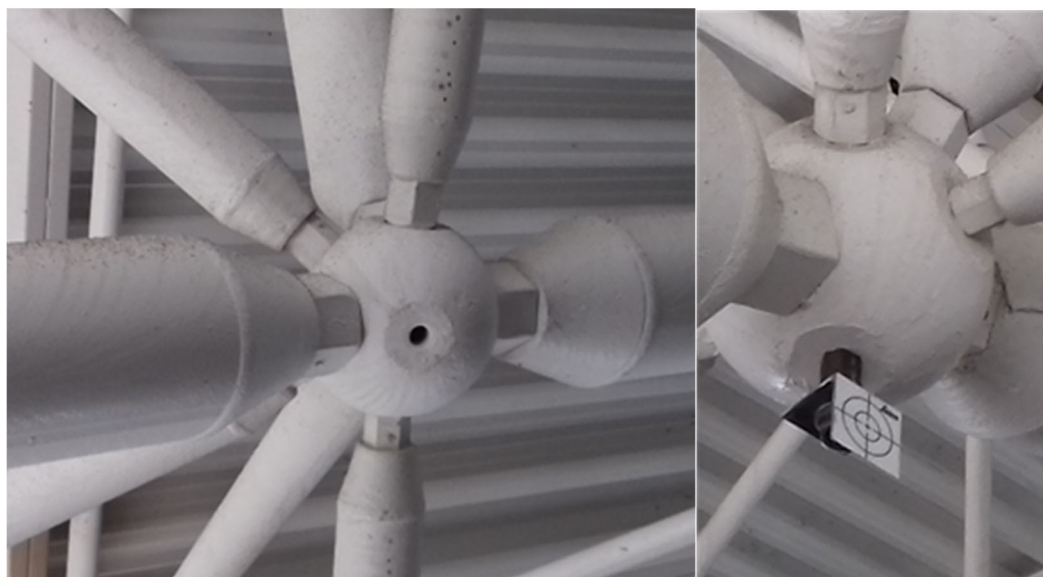


Рисунок 1.2 – Расчетная модель деформации конструкции:  
а) в статических условиях; б) при сейсмических воздействиях

### 1.3 Технологическая схема проведения мониторинга деформаций большепролетных сооружений

Поведение наблюдаемой конструкции оболочки оценивается на основе результатов геодезических измерений на марки, установленные на нижних поясах конструкции крыши. С целью проведения мониторинга за перемещениями и деформациями во время изготовления металлоконструкции на заводе были сделаны отверстия для закрепления деформационных марок на нижних шарах оболочки (рисунок 1.3). Эти марки помогли провести измерения и создать исполнительные схемы, определить отклонения от проектного положения и дать оценку качеству монтажных работ.



*a)*

*б)*

Рисунок 1.3 – Конструкция деформационной марки:

*a)* металлический шар с отверстием для установки марки;

*б)* установленная деформационная марка

Вся конструкция состоит из 1 250 шаров на нижнем поясе, на 57 из них симметрично установлены измерительные марки. Сеть геодезических пунктов по внутреннему контуру и деформационных марок для наблюдения за перекрытием,

их расположение в плане показаны на рисунке 1.4. Геодезическая сеть состоит из восьми пунктов, расположенных на бетонном основании помещений внутри спортивного зала.

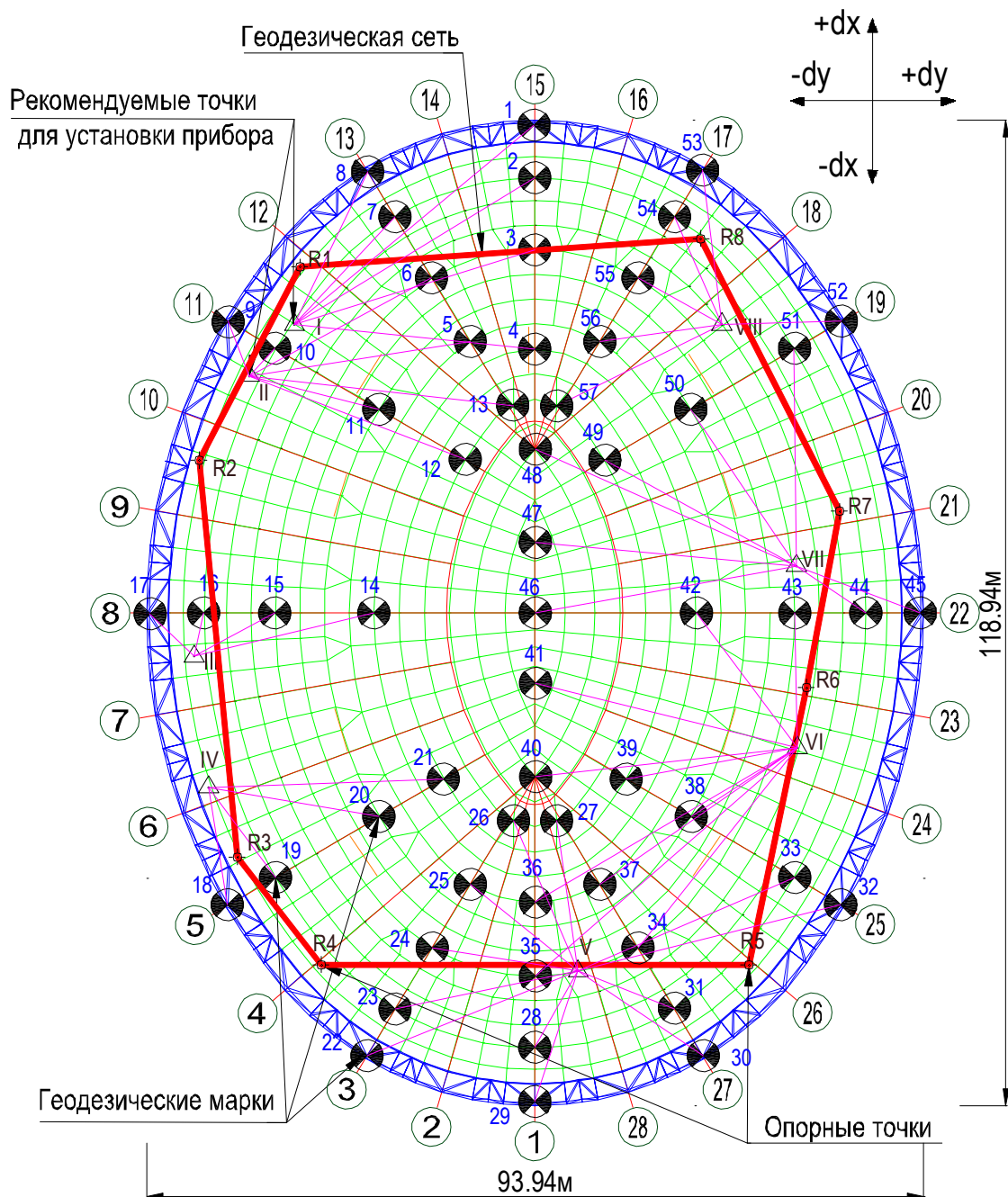


Рисунок 1.4 – Схема расположения деформационных марок

Технология мониторинга основана на методе измерений электронным тахеометром линейно-угловой сети с трех и более свободных станций.

Деформационные марки обозначены порядковыми номерами от 1 до 57, а опорные геодезические пункты – буквой R. Точки, откуда обеспечивается видимость на деформационные марки перекрытия, обозначены знаками геодезических станций и нумерацией I, II, III.

Для выполнения измерений используется условная система координат, в которой ось  $X$  параллельна продольной оси сооружения, ось  $Y$  перпендикулярна ей. Путем сравнения координат, полученных в разные циклы, можно оценить деформации в продольном, поперечном и вертикальном направлениях.

На рисунках 1.5 и 1.6 показаны профили по главным сечениям сооружения: продольный профиль по линии марок 29 – 1 (см. рисунок 1.5) и поперечный, по линии марок 45 – 17 (см. рисунок 1.6).

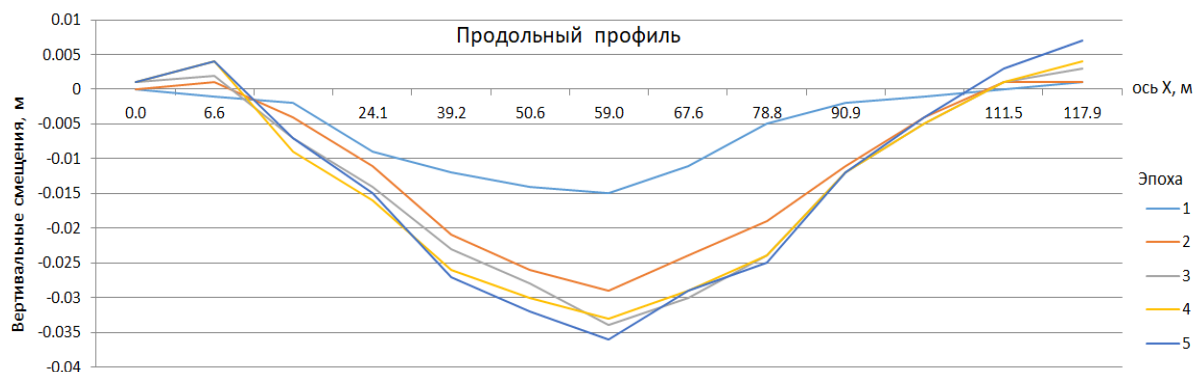


Рисунок 1.5 – Продольный профиль (29 – 1)

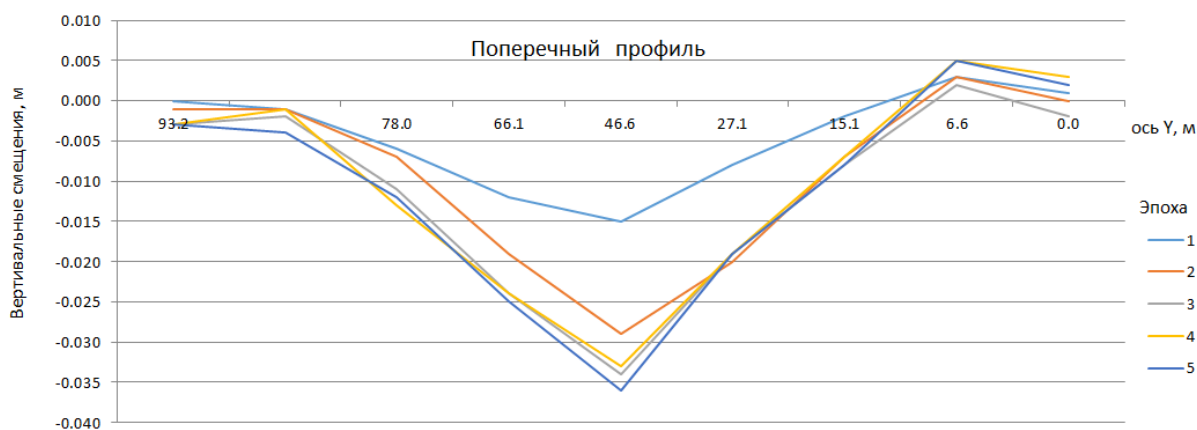
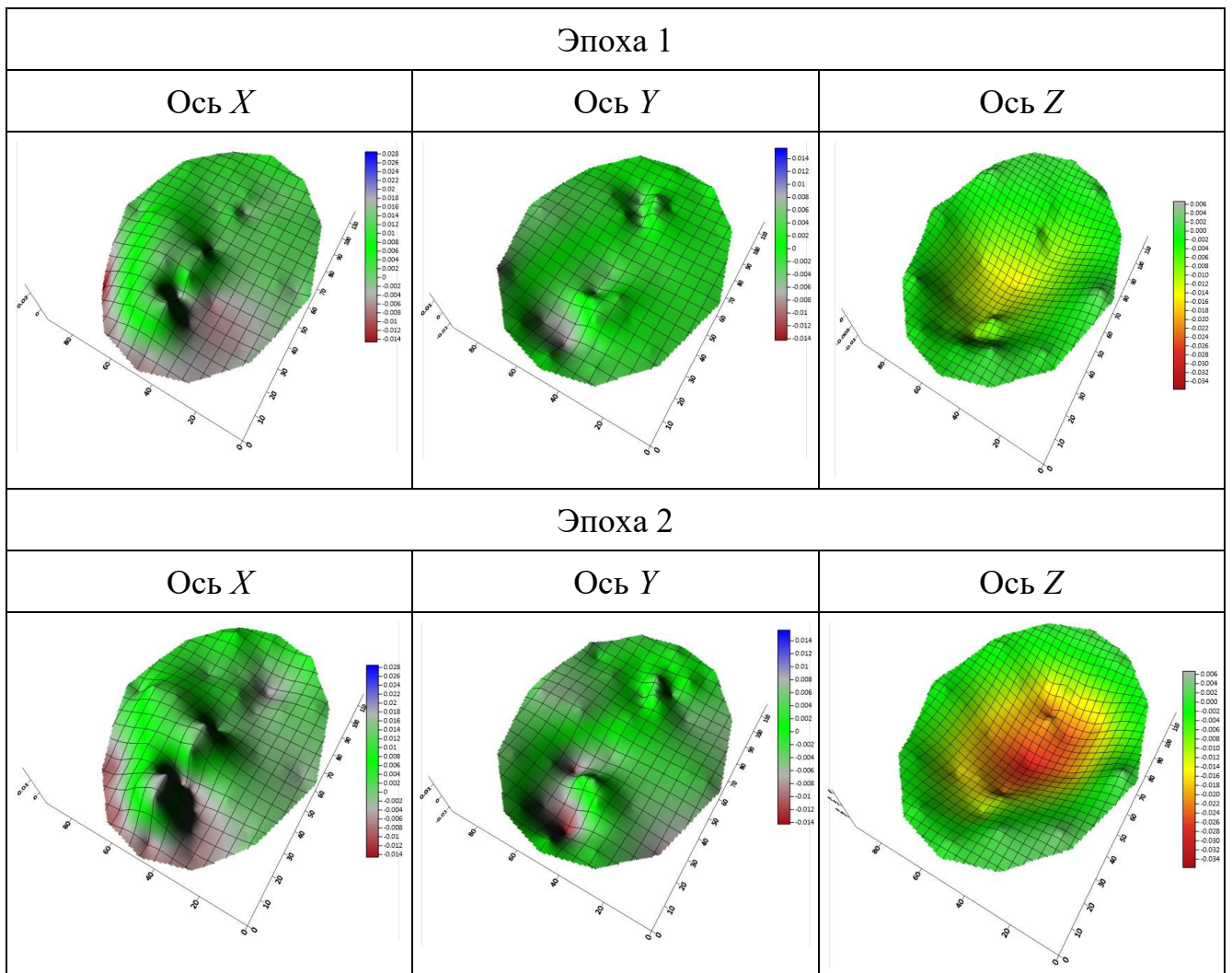


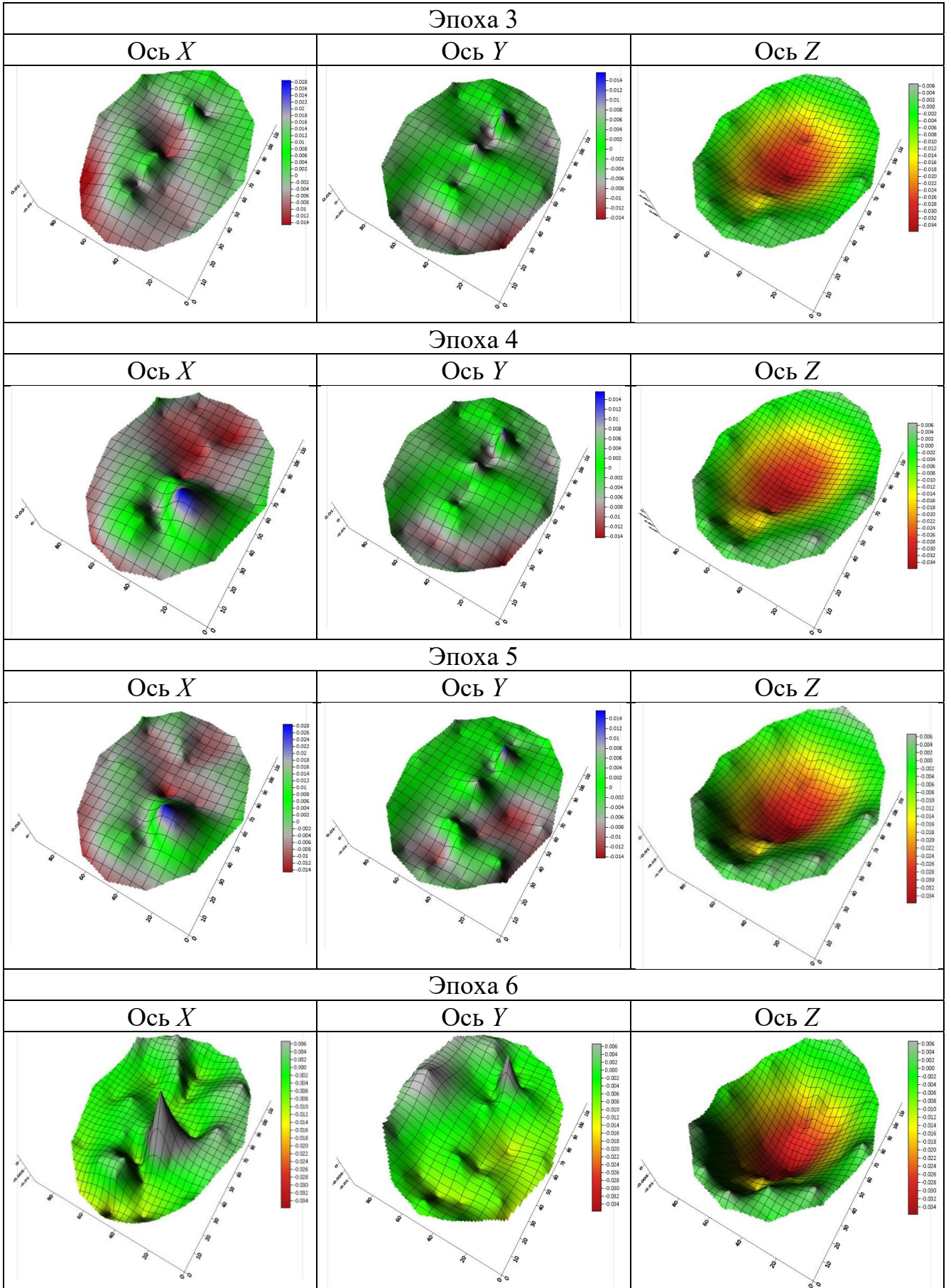
Рисунок 1.6 – Поперечный профиль (45 – 17)

На графиках рисунков 1.5 и 1.6 цифрами подписаны эпохи измерений на разные даты, начальный цикл измерений был проведен 15.05.2018 г., 1-й – 25.08.2018 г., 2-й – 15.05.2019 г., 3-й – 15.08.2019 г., 4-й – 03.12.2019 г., 5-й – 15.03.2020 г. Эти графики показывают, что по мере возрастания нагрузки, связанной с монтажом кровли и технологического оборудования на эпоху 1 и 2 вертикальные деформации возрастают, и в последующие эпохи – стабилизируются и изменяются в незначительных пределах. Фактические максимальные деформации по высоте, для точки 46 были – 36 мм, что составляет 13,5 % от предельно допустимой, максимальное поднятие +7 мм на точке 19. В таблице 1.1 приведены поверхности деформаций по соответствующим осям относительно начального цикла измерений.

Таблица 1.1 – Деформации по координатным осям на эпохи измерений



Окончание таблицы 1.1



Деформации в вертикальной плоскости (по оси  $Z$ ) имеют вполне объяснимые причины и закономерности и увеличиваются от начального цикла в соответствии с возрастанием нагрузки, уменьшаются в последних циклах, после стабилизации нагрузки. В трех последних циклах деформации перекрытия зависят только от внешних факторов изменения окружающей среды.

Деформации в горизонтальной плоскости тоже имеют некоторую закономерность, хотя и не такую выраженную, как по оси  $Z$ . Поверхности отклонений по осям  $X$  и  $Y$  показывают, что деформационные марки имеют смещения по оси  $X$  от  $-18$  мм до  $+30$  мм, и по оси  $Y$  от  $-15$  мм до  $+16$  мм, причем эти деформации имеют не равномерный, а сосредоточенный характер.

Значения деформации сильно зависят от воздействия температуры окружающей среды и динамических воздействий. В жаркий период происходят вертикальные движения средней части оболочки вниз – прогиб крыши, а боковые части по контуру имеют вертикальное смещение вверх. В частности, вертикальная деформация сильно зависит от температуры окружающей среды с сезонными изменениями до  $20$  мм.

Общий вес нагрузки от элементов кровли на конструкцию в эпоху 1 (см. рисунки 1.5 и 1.6) составлял  $71$  т. В промежуток наблюдения 1 – 2 были закончены работы по монтажу подвесных мостков в полном объеме. Общий вес подвесной нагрузки от веса мостков составлял  $110$  т. Также в этот период были закончены работы по монтажу витража со стеклами. Общий вес конструкции витража составляет  $125$  т. Вес стеклянной конструкции  $156$  т. Общий вес нагрузки на металлические конструкции на эпоху 2 составил  $391$  т.

Поверхности на эпохи 2 и 3 (см. рисунки 1.5 и 1.6) показывают, что после завершения основных монтажных работ процесс деформации замедлился, и поведение перекрытия стабилизировалось. Хотя в этот период еще велись работы по монтажу инженерных коммуникации внутри помещения. После этого на структуру в основном влияет воздействие температуры окружающей среды.

## 1.4 Теория вопроса

В соответствии с теорией уравнивания методом наименьших квадратов [39, 51] для предварительного расчета точности сети также составляются параметрические уравнения поправок трех видов.

*Параметрическое уравнение направления  $k-i$  между пунктами  $k$  и  $i$  имеет вид*

$$v_{ki} = -\delta z_k + a_{ki}\delta x_k + b_{ki}\delta y_k - a_{ki}\delta x_i - b_{ki}\delta y_i + l_{ki}, \quad (1.1)$$

где  $v_{ki}$  – поправка в направление  $N_{ki}$ ;

$\delta x_i, \delta y_i, \delta x_k, \delta y_k$  – поправки в координаты пунктов;

$\delta z_k$  – поправка в ориентирный угол;

$a_{ki}, b_{ki}$  – коэффициенты при поправках в координаты вычисляются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} a_{ki} &= \frac{\rho'' \sin \alpha_{ki}^{(0)}}{s_{ki}^{(0)}}; \\ b_{ki} &= \frac{\rho'' \cos \alpha_{ki}^{(0)}}{s_{ki}^{(0)}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

причем  $\alpha_{ki}^{(0)}, s_{ki}^{(0)}$  – приближенные значения дирекционного угла и длины стороны  $k-i$ , вычисленные по координатам  $x_i^{(0)}, y_i^{(0)}, x_k^{(0)}, y_k^{(0)}$  пунктов, измеренным по растру плана;  $\rho'' = 206265''$ .

*Параметрическое уравнение длины линии будет иметь вид*

$$v_{ki}^s = -\cos \alpha_{ki}^{(0)}\delta x_k - \sin \alpha_{ki}^{(0)}\delta y_k + \cos \alpha_{ki}^{(0)}\delta x_i + \sin \alpha_{ki}^{(0)}\delta y_i + l_{ki}^s, \quad (1.3)$$

где  $v_{ki}^s$  – поправка в длину  $s_{ki}$ .

Параметрическое уравнение поправок дирекционных углов будет иметь вид

$$v_{ki}^{\alpha} = a_{ki}\delta x_k + b_{ki}\delta y_k - a_{ki}\delta x_i - b_{ki}\delta y_i + l_{ki}^{\alpha}, \quad (1.4)$$

где  $v_{ki}^{\alpha}$  – поправка в  $\alpha_{ki}$  – измеренный дирекционный угол.

Уравнения (1.1), (1.3), (1.4) решают совместно методом наименьших квадратов при выполнении условия

$$\left[ p_{\beta}vv + p_s v^s v^s + p_{\alpha} v^{\alpha} v^{\alpha} \right] = \min, \quad (1.5)$$

где  $p_{\beta}, p_s, p_{\alpha}$  – веса измерений, соответственно направлений, длин и дирекционных углов.

В качестве единицы веса принимается средняя квадратическая ошибка измерения направления горизонтальных углов, а точность измерения длин в миллиметрах оценивается по формуле  $m_s = \pm 2 + 2 \times l_{\text{км}}$ .

Общую систему параметрических уравнений поправок можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{A}\Delta + \mathbf{L} = \mathbf{V}, \quad (1.6)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок в измерении;

$\mathbf{L}, \mathbf{V}$  – векторы свободных членов и поправок.

Поскольку выполняется предварительный расчет точности сети по предполагаемым величинам измеряемых величин, то свободные члены в параметрических уравнениях не вычисляются.

В соответствии с теорией способа наименьших квадратов для выполнения условия

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min, \quad (1.7)$$

где  $\mathbf{P}$  – диагональная матрица весов, значения вектора  $\Delta$  поправок параметров вычисляются по формуле:

$$\Delta = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}, \quad (1.8)$$

т. е. из решения нормальных уравнений

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \Delta + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = \mathbf{0}. \quad (1.9)$$

Для оценки точности элементов сети в соответствии с теорией [17] вычисляется  $\mathbf{Q}$  матрица весовых коэффициентов по формуле

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (1.10)$$

Тогда  $m_{x_i}$  и  $m_{y_i}$  точность координат  $i$ -го пункта определится из выражений

$$\left. \begin{aligned} m_{x_i} &= m_{\beta} \sqrt{Q_{x_i, x_i}} \\ m_{y_i} &= m_{\beta} \sqrt{Q_{y_i, y_i}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.11)$$

где  $Q_{x_i, x_i}, Q_{y_i, y_i}$  – диагональные элементы матрицы  $\mathbf{Q}$ , соответствующие координатам пункта  $i$ .

Имея матрицу  $\mathbf{Q}$  весовых коэффициентов, можно вычислить точность определения положения любого пункта сети, например пункта  $i$ , при этом будет учтена форма геодезической сети, которая оказывает большое влияние на точность определения координат.

### 1.5 Анализ точности геодезических измерений

Для анализа точности геодезических измерений выполним моделирование геодезических измерений в программном комплексе «МГСети». Для этого выполним моделирование сети и геодезических измерений различной точности.

Первый вариант соответствует реальной съемке геодезического мониторинга, горизонтальные и вертикальные углы измеряются одним полуприемом с точностью 5", а расстояния с точностью  $\pm 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$  (рисунок 1.7).

▲ Маркшейдерско-геодезические сети и съемки - [D:\Проекты\MGSetiNet  
 ▲ Проект Данные Результаты Проектирование Окна Скважины

Измерения Опора Проект Спутниковые измерения Схема сети Документ

Объект  Дата съемки

Исполнитель  Инструмент

$m_\alpha = 5$  С.К.О. измерения горизонтального угла ( " )

$m_\beta = 5$  С.К.О. измерения вертикального угла ( " )

$m_d = 2$  С.К.О. измерения длины ( мм )  ppm (мм/км)

$m_i = 3$  С.К.О. измерения высоты инструмента ( мм )

$m_v = 0$  С.К.О. измерения высоты визирования ( мм )

$\mu_h = 3.8570$  ошибка единицы веса превышения, мм

Рисунок 1.7 – Параметры точности съемки, 1-й вариант

Для предрасчета загружаем исходные данные в программу «МГСети» и моделируем измерения (рисунок 1.8).

В результате предварительного расчета точности сети получаем диаграммы распределения погрешностей определения плановых (рисунок 1.9) и высотной координаты (рисунок 1.10).

▲ Маркшейдерско-геодезические сети и съемки - [D:\Проекты\MGSetiNew\DATA\Ахметов\Проект мониторинга2.mg:

▲ Проект Данные Результаты Проектирование Окна Помощь

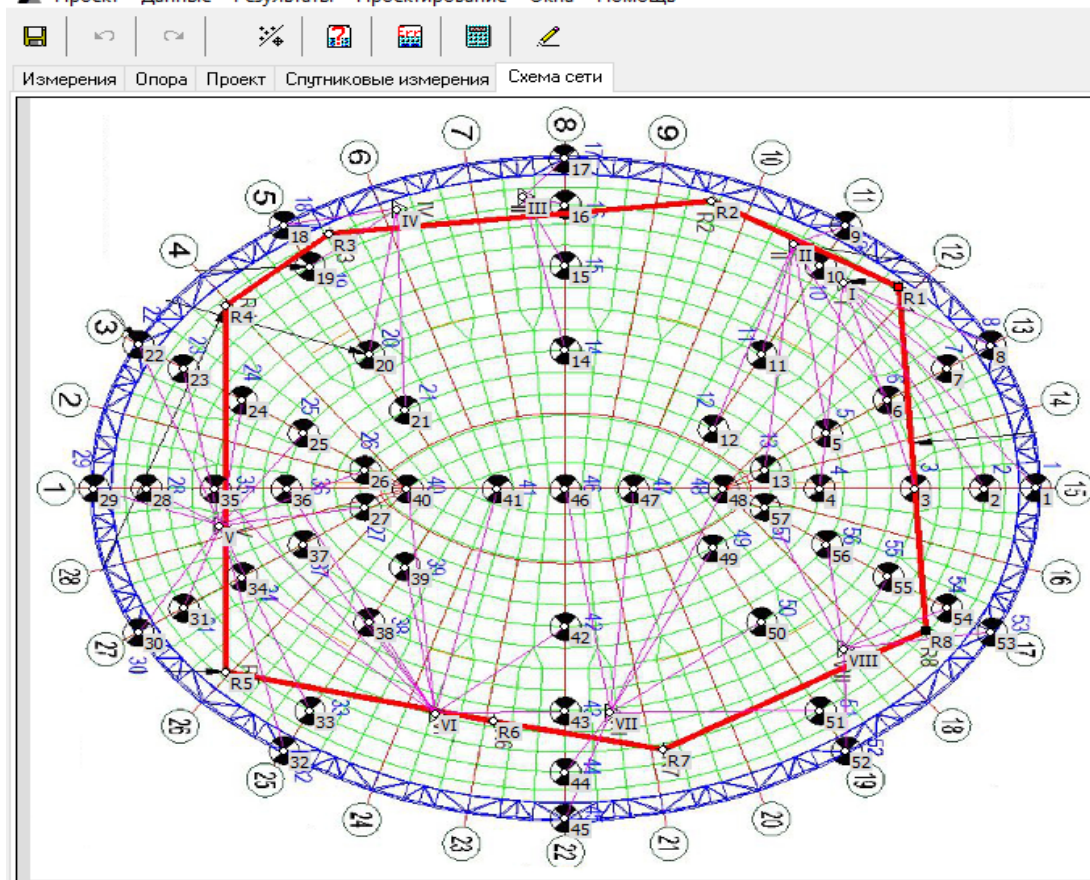


Рисунок 1.8 – Моделирование измерений

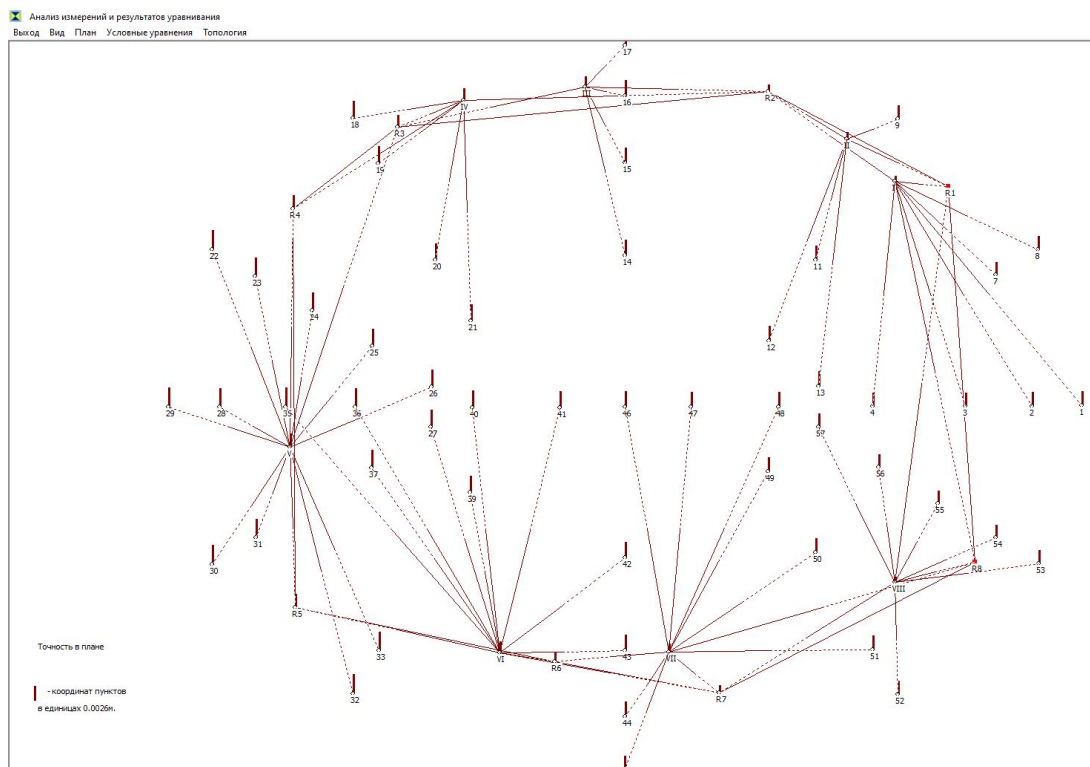


Рисунок 1.9 – Средние квадратические погрешности плановых координат

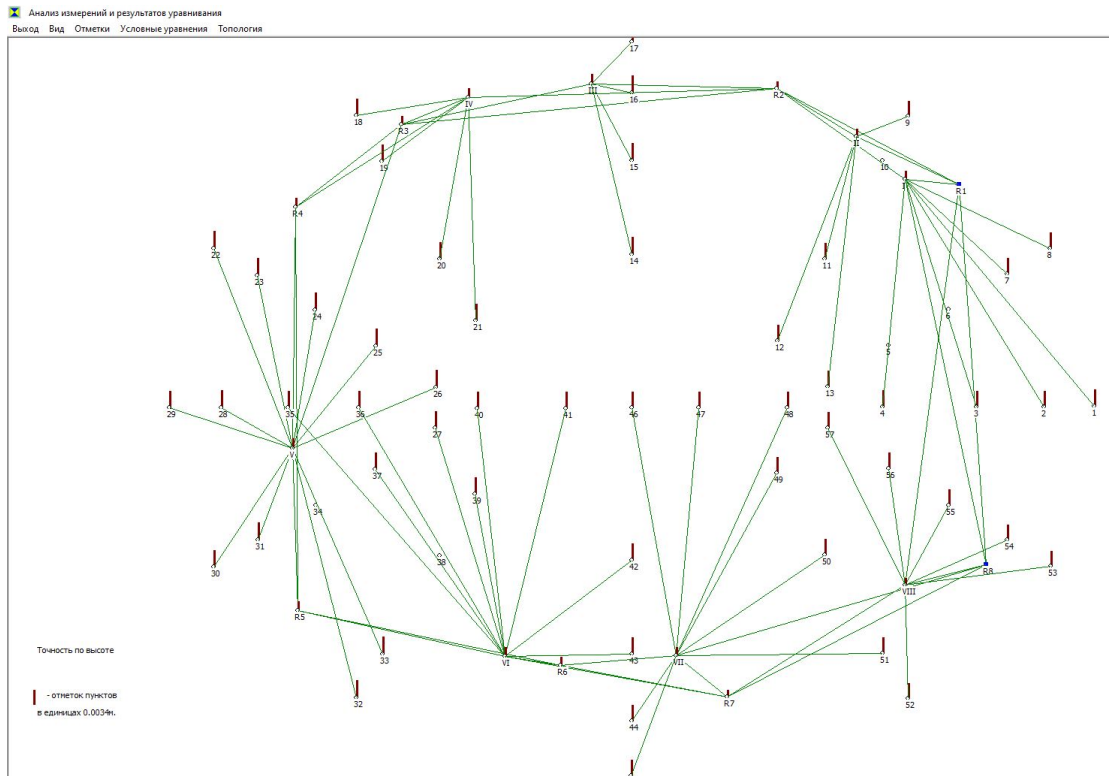


Рисунок 1.10 – Средние квадратические погрешности определения отметок  
(координаты  $Z$ )

Столбиковые диаграммы не очень показательны и понятны для визуального анализа, поэтому есть смысл перейти к изображению в виде поверхности средних квадратических отклонений. Нас в большей степени интересует точность определения вертикальных деформаций, которые приведены на рисунке 1.11.

Анализ поверхности средних квадратических погрешностей определения координаты  $Z$  (рисунок 1.12) показывает, что при заданных погрешностях измерения углов и длин имеем достаточно гладкую поверхность с погрешностями определения координаты  $Z$  до 4 мм в центре перекрытия и около 2 мм на краях, в местах установки прибора.

Второй вариант моделирования предполагает выполнение измерений тем же электронным тахеометром, но полным приемом, параметры моделирования показаны на рисунке 1.13, а поверхность средних квадратических погрешностей определения координаты  $Z$  показана на рисунке 1.14.

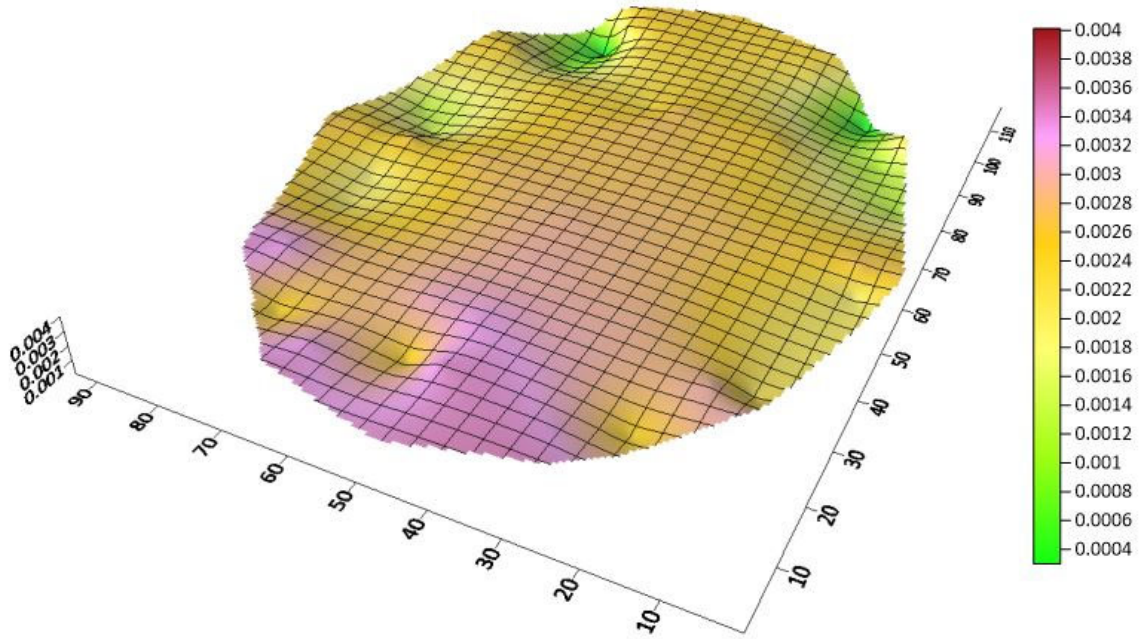


Рисунок 1.11 – Поверхность средних квадратических погрешностей определения плановых координат, 1-й вариант

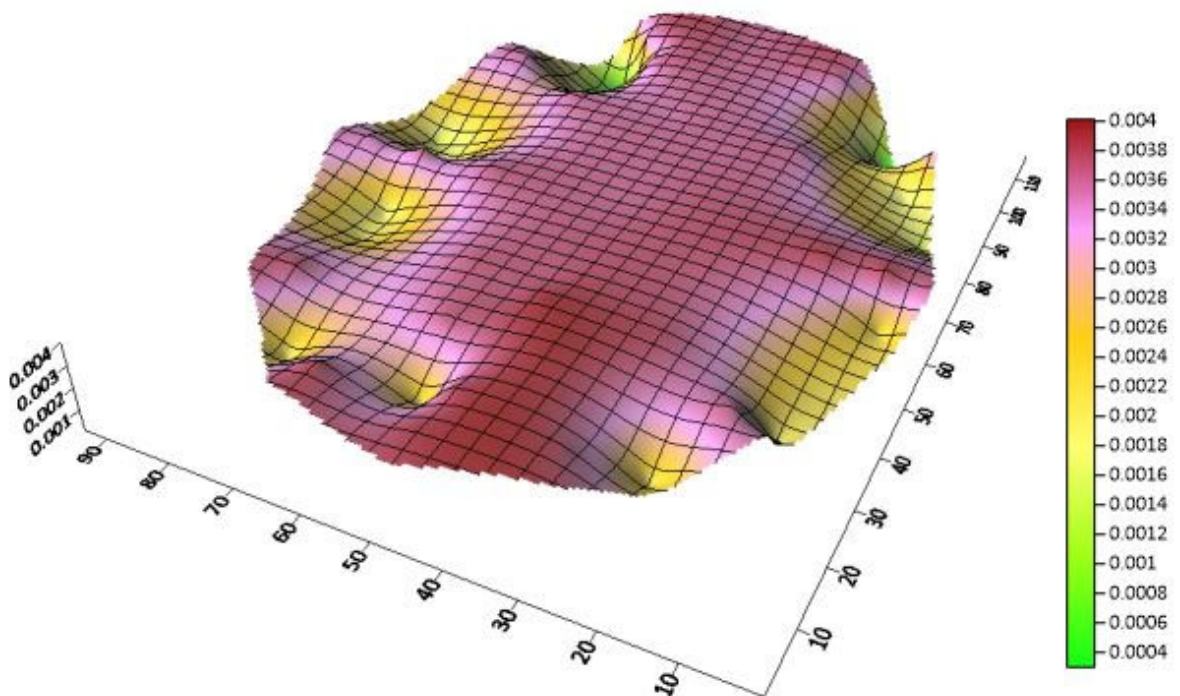


Рисунок 1.12 – Поверхность средних квадратических погрешностей определения координаты Z, 1-й вариант

▲ Маркшейдерско-геодезические сети и съемки - [D:\Проекты\MGSetiNe

▲ Проект Данные Результаты Проектирование Окна Скважины

Измерения Опора Проект Спутниковые измерения Схема сети Документ

**Объект**  Дата съемки

Исполнитель  Инструмент

$m_\alpha = 3.53$  С.К.О. измерения горизонтального угла ( " )

$m_\beta = 3.53$  С.К.О. измерения вертикального угла ( " )

$m_d = 1.41$  С.К.О. измерения длины ( мм )  ppm (мм/км)

$m_i = 4$  С.К.О. измерения высоты инструмента ( мм )

$m_v = 0$  С.К.О. измерения высоты визирования ( мм )

$\mu_h = 2.6323$  ошибка единицы веса превышения, мм

Рисунок 1.13 – Параметры точности съемки, 2-й вариант

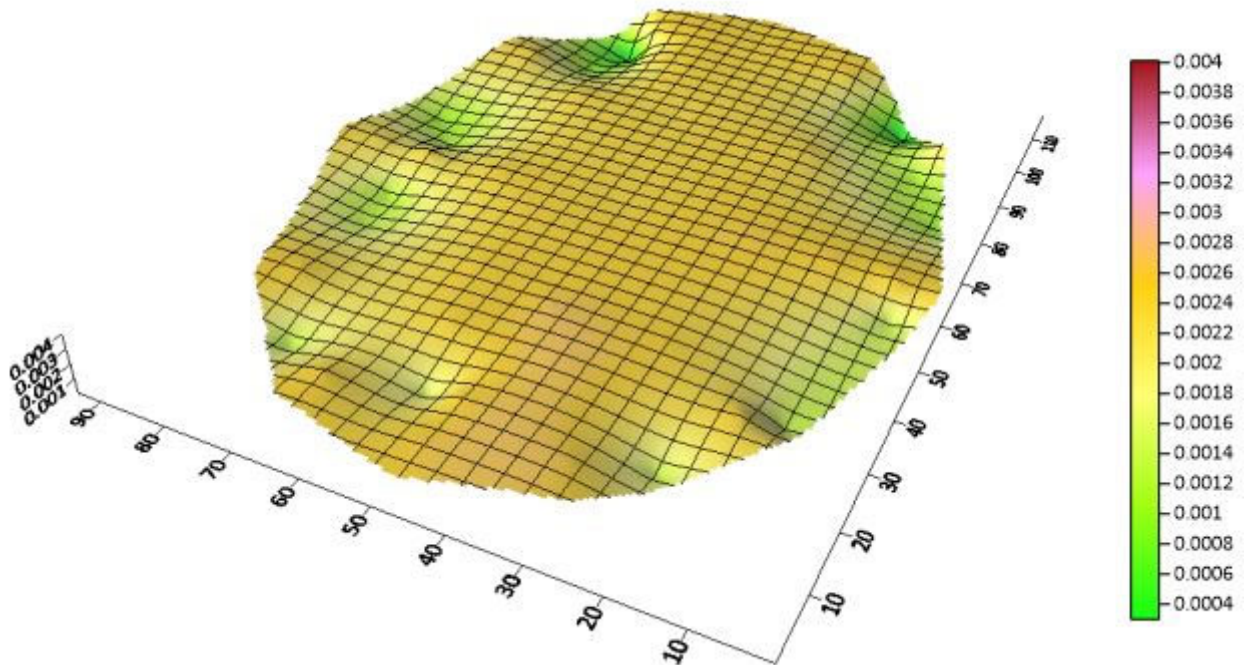


Рисунок 1.14 – Поверхность средних квадратических погрешностей определения координаты Z, 2-й вариант

## 1.6 Выводы по разделу 1

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 можно существенно повысить, применив высокоточное измерительное оборудование. Точность определения координат деформационных марок, приведена в технической документации проекта и составляет  $\pm 5$  мм.

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

## 2 АЭРОФОТОСЪЕМКА ОБЪЕКТА С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА SIFT

В последнее десятилетие происходит второе качественное изменение в фотограмметрии, связанное с переходом на автоматизированную обработку цифровых съемок. Первое качественное изменение произошло примерно 30 лет назад с переходом от аналоговой фотограмметрии и универсальных механических фотограмметрических приборов к цифровым снимкам и цифровым фотограмметрическим станциям [21, 79]. Современный этап развития цифровой фотограмметрии связан с широким использованием алгоритма SIFT (масштабно-инвариантное преобразование признаков) [20, 96], который позволяет в автоматическом режиме составлять детализированные трехмерные модели на основе цифровых фотографий. Размеры моделей могут очень сильно отличаться, от моделей предметов искусства в несколько сантиметров до моделей городов [60]. Причем плотность точек сопоставима с лазерным сканированием, при этом модель имеет высокую точность [16, 19, 29, 41, 50, 80, 84, 85]. Точность моделей достаточно высока для многих отраслей: землеустройства, лесного и водного кадастров и даже топографической съемки в крупных масштабах. Однако для мониторинга деформаций большепролетных сооружений беспилотная аэросъемка пока не применялась.

На данный момент имеется целый сегмент программ, которые реализуют алгоритм SIFT: Agisoft PhotoScan Pro [106], Bentley ContextCapture [60], Autodesk Memento (ReMake) [121], Pix4D [119], Reality Capture [107], 3dFlow: 3DF Zephyr [91] – и специализируются в различных областях. В области геодезии и топографии наиболее часто используются программы Agisoft PhotoScan Pro (Metashape), Bentley ContextCapture и Pix4D. Исследования точности и операционной эффективности программ [23, 128] показали, что эти программы дают примерно одинаковые результаты, которые отличаются возможностью настройки обработки, наличием шумов в модели и возможностями ручных операций и сетевой обра-

ботки. Наличие методов «оптимизации» камер [106] позволяет, в некоторых случаях, улучшить параметры точности уравнивания фототриангуляции, хотя эффективная самокалибровка камер и надежное определение фокусного расстояния невозможны при съемке местности, на которой перепад высот менее 30 % от высоты фотографирования [38, 125]. Больше всего вопросов возникает по точности построения моделей [16, 19, 29, 47, 50, 78, 80, 84, 85, 87], которая сильно зависит от камеры, высоты и конфигурации съемки и множества других параметров.

На самом деле имеет смысл говорить не просто об алгоритме SIFT, который используется в программах автоматической обработки съемок [20, 41, 60, 91, 96, 106, 107, 119, 121], этот алгоритм является базовым для программных продуктов. Масштабно-инвариантное преобразование признаков дает огромное количество точек на стереопаре, более 40 000 на одной стереопаре, однако многие из них имеют большие погрешности определения координат. После фильтрации и отбраковки точек на стереопаре остается менее 2 000 точек. Собственно, все программы, использующие алгоритм SIFT, отличаются методами фильтрации точек. К сожалению, эти методы являются коммерческой тайной разработчиков программного обеспечения и не освещаются в литературе, следствием этого является то, что конечному пользователю этих продуктов неизвестно, с какой погрешностью определяются координаты точек модели объекта, полученные после обработки и фильтрации. В лучшем случае в протоколе вычислений указываются остаточные отклонения на опорных точках и нет информации о точности определения координат модели в любой точке.

Автор работы выполняет геодезический мониторинг за большепролетным сооружением с перекрытием типа «пространственная оболочка» – Дворцом водных видов спорта, расположенном в Душанбе (Таджикистан) [22, 48, 49], который располагается в сейсмоопасной зоне. Поэтому автор поставил перед собой следующие задачи: возможно ли организовать мониторинг без доступа геодезистов внутрь сооружения с помощью аэросъемки с БПЛА, если произо-

шло землетрясение с большой магнитудой, оценить точность построения модели перекрытия и возможность использования таких моделей для оценки деформаций перекрытия.

## 2.1 Геодезическое обеспечение аэрофотосъемки БПЛА

Для обеспечения аэрофотосъемки БПЛА опорой на земле заложены семь постоянных геодезических пунктов вокруг наблюдаемого объекта, координаты которых определены в условной системе координат (рисунок 2.1).

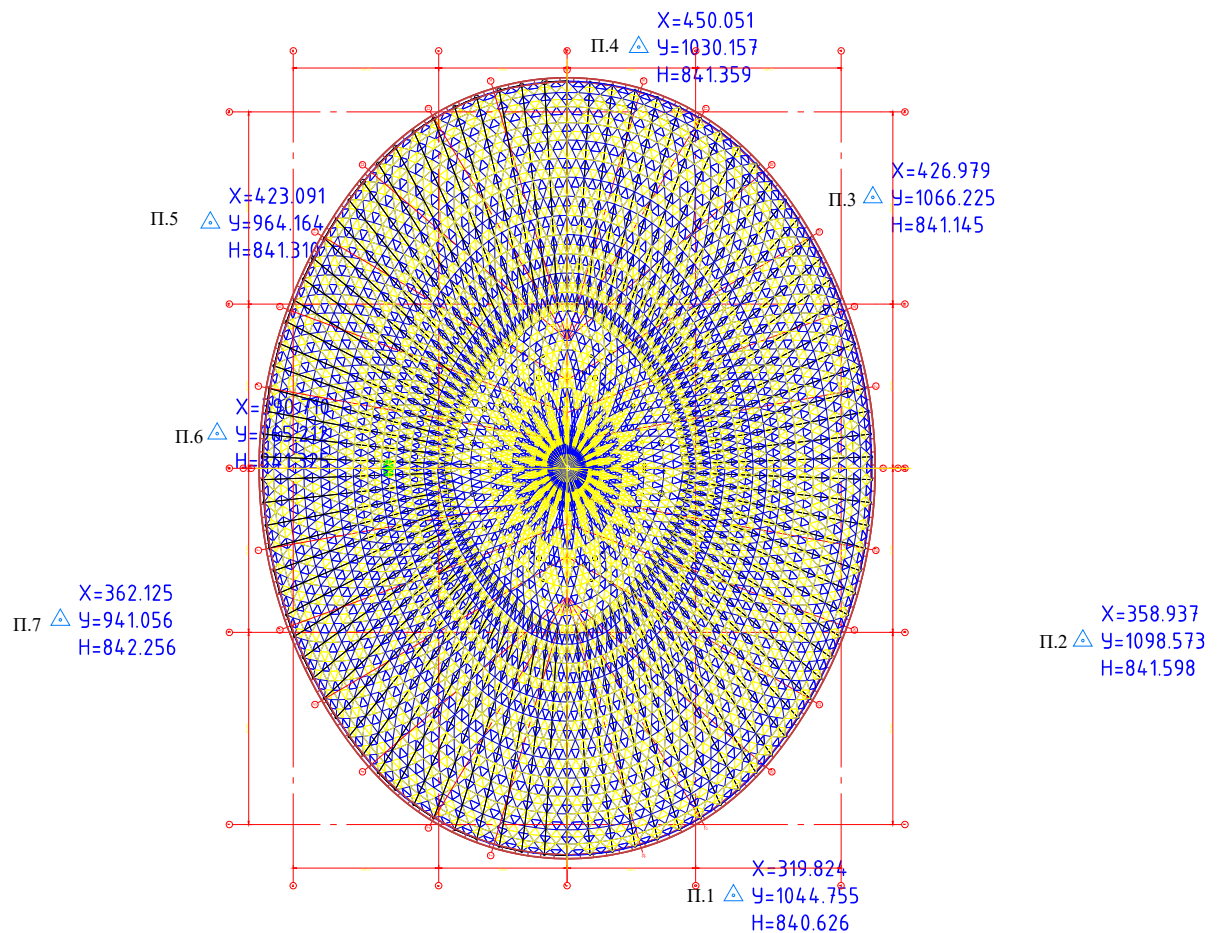


Рисунок 2.1 – Схема расположения опорных пунктов

В качестве исходных для привязки съемки служили заложенные геодезические пункты по контуру сооружения: П.1, П.2, П.3, П.4, П.5, П.6 и П.7. – и 16 кон-

трольных точек на поверхности оболочки сооружения. Постоянные геодезические пункты маркировались специальными знаками (рисунки 2.2, *а* и 2.2, *б*).

*а)**б)*

Рисунок 2.2 – Маркировка опорных точек на земле

Координаты контрольных точек (рисунок 2.3) определялись методом свободной станции, с двух точек опорной сети, согласно схеме на рисунке 2.4. Точки установки электронного тахеометра обозначены на схеме (ПРИБОР 1, ПРИБОР 2). Максимальное расстояние (плечо) от точки ПРИБОР 1 до самой дальней точки (Точка 4) составлял 135 м. А из точки ПРИБОР 2 максимальное плечо до точки 10 составляет 120 м. Такая конфигурация привязки и точность измерений электронным тахеометром позволяют определить координаты контрольных точек с точностью  $\pm 5$  мм. Координаты контрольных точек определялись каждый раз в момент съемок БПЛА. Это связано с тем, что верхнее покрытие изготовлено из алюминиевых листов (см. рисунок 2.3 *а, б, в, г*) с чередованием светлых и темных, которые неравномерно нагреваются солнечным излучением и вызывают деформации перекрытия. На рисунке 2.3, *г* видна деформированная поверхность и надорванная отражательная марка. Швы между треугольными гранями перекрытия при нагреве могут расширяться на 10 мм. Ширина этих швов в некоторых местах достигает 25 мм.

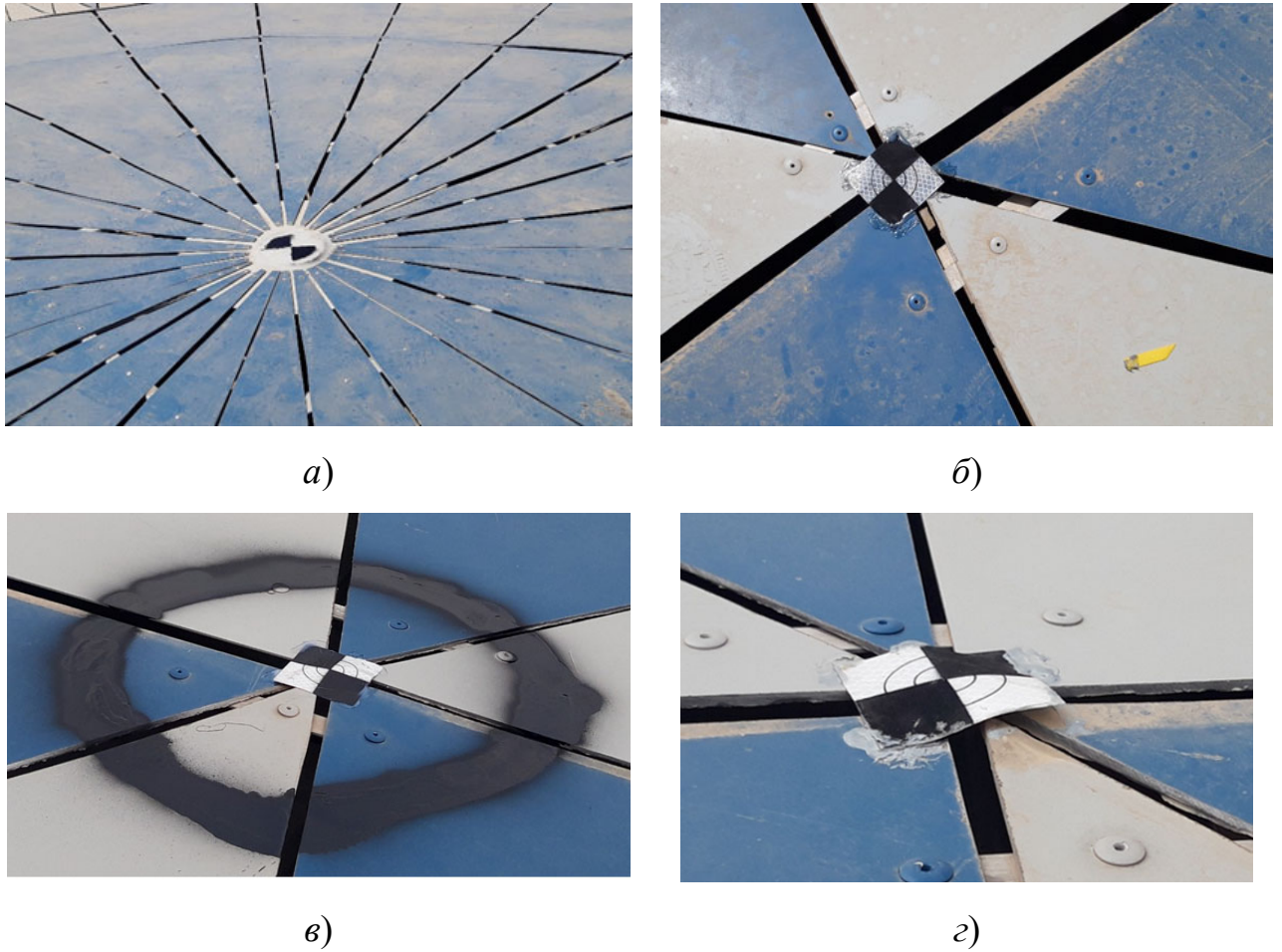


Рисунок 2.3 – Маркировка контрольных точек на перекрытии

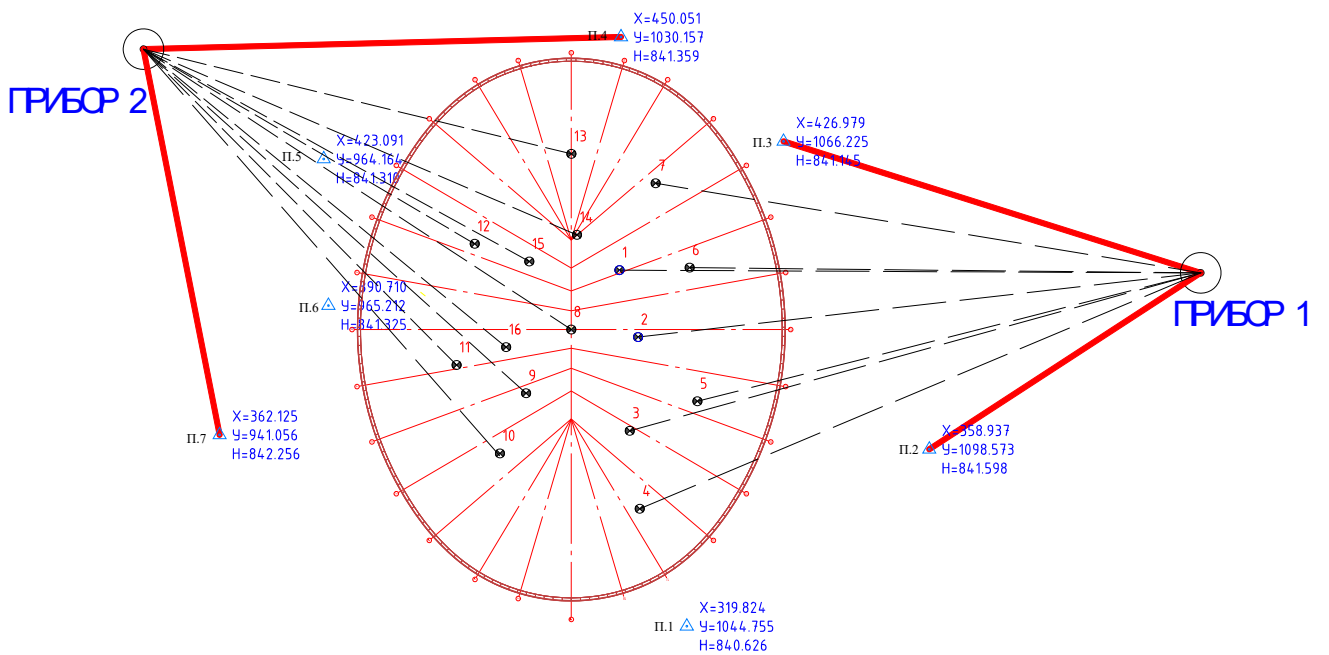


Рисунок 2.4 – Схема привязки контрольных точек

## 2.2 Аэрофотосъемка объекта с применением БПЛА

Первая аэрофотосъемка с применением БПЛА была выполнена 15.08.2019 с высоты 50 м согласно заданному маршруту полета (рисунок 2.5).

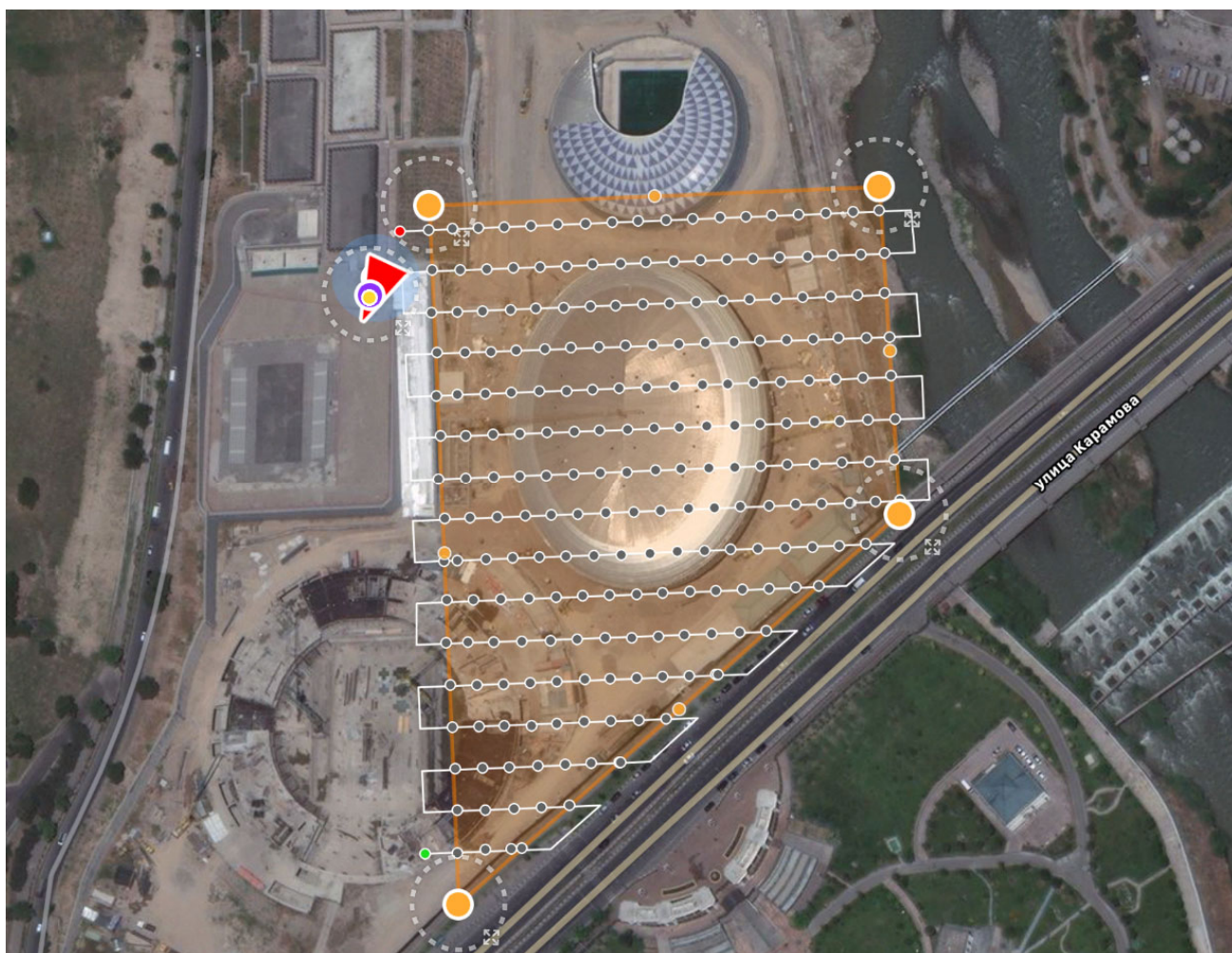


Рисунок 2.5 – Маршрут полета и центры фотографирования

Каждый раз схема фотографирования объекта усложнялась, маршруты прокладывались на разных высотах, последние съемки содержали кольцевые маршруты вокруг объекта съемки на разных высотах (рисунок 2.6). Ввиду того, что точки на поверхности Земли и на перекрытии имеют превышение более 20 м по высоте, маршруты на разной высоте должны были уменьшить разномасштабность снимков и улучшить автоматическое распознавание.

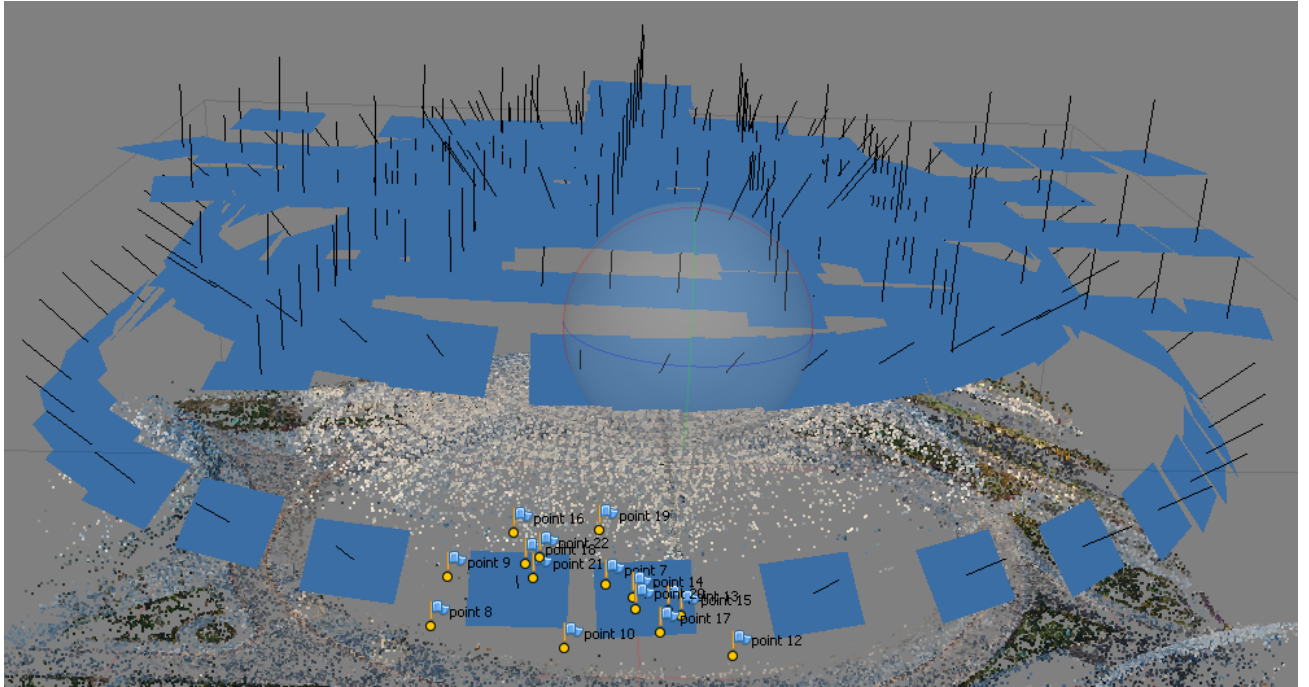


Рисунок 2.6 – Кольцевые маршруты съемки 15.08.2020

Обработка проводилась в программном комплексе Agisoft Photoscan [44] по схеме обработки с самокалибровкой. На рисунке 2.7 показана модель объекта с маркерами опорных и контрольных точек.

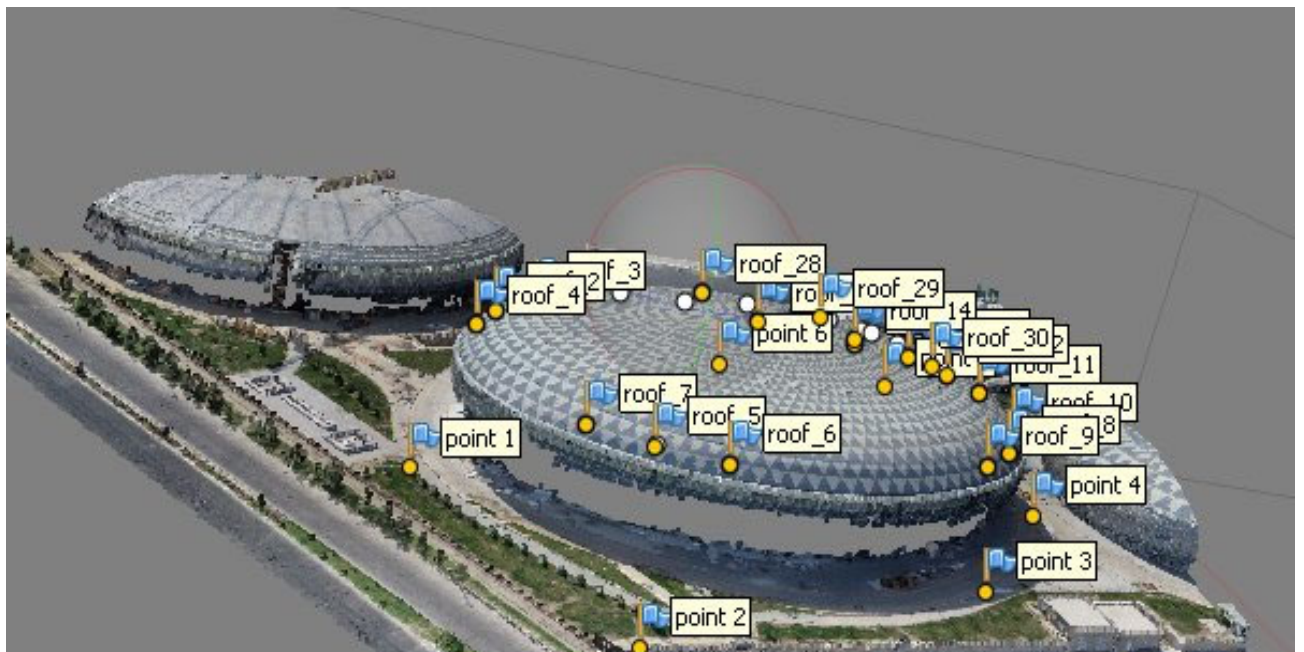


Рисунок 2.7 – Модель объекта

На данный момент выполнены четыре съемки, краткие сведения о съемках приведены в таблице 2.1, подробные параметры съемок и их обработки – в таблице 2.2, характеристики метеоусловий съемки – в таблице 2.3.

Таблица 2.1 – Краткая характеристика съемок

Номер	Дата	Снимков	Граней	Точек	Среднее расстояние между точками, м
1	15.08.2019	159	308135	622346	0,085
2	03.12.2019	168	173051	349656	0,112
3	15.03.2020	203	141146	285165	0,125
4	15.08.2020	225	281099	567626	0,090

Таблица 2.2 – Параметры съемок и обработки

№	Дата съемки	Характеристика съемки	Обработка
1	15.08.2019	<p>Всего изображений: 159  Высота полета: 74,1 м  Разрешение съемки: 1,74 см/пикс  Площадь покрытия: 0,0367 км<sup>2</sup>  Позиций съемки: 159  Связующих точек: 69,320  Проекций: 393,065  Ошибка репр-я: 1,04 пикс</p>	<p>Параметры выравнивания:  Точность высокая  Общая переселекция Да  Переселекция по привязке Да  Макс. количество точек 40,000  Макс. количество проекций 4,000  Версия 1.4.0 build 5076</p>
2	03.12.2019	<p>Всего изображений: 168  Высота полета: 51,2 м  Разрешение съемки: 1,16 см/пикс  Площадь покрытия: 0,0246 км<sup>2</sup>  Позиций съемки: 168  Связующих точек: 97,577  Проекций: 440,177  Ошибка репр-я: 1,2 пикс</p>	<p>Параметры выравнивания:  Точность высокая  Общая переселекция Да  Переселекция по привязке Да  Макс. количество точек 40,000  Макс. количество проекций 4,000  Версия 1.4.0 build 5076</p>
3	15.03.20	<p>Всего снимков: 140  Высота полета: 70,2 м  Разрешение съемки: 1,53 см/пикс  Площадь покрытия: 0,0335 км<sup>2</sup>  Позиций съемки: 140  Связующих точек: 83,004  Проекций: 442,148  Ошибка репр-я: 1,47 пикс</p>	<p>Параметры выравнивания:  Точность высокая  Общая переселекция Да  Переселекция по привязке  Исходные значения:  Характерных точек на кадр 40,000  Связующих точек на кадр 4,000  Версия программы 1.6.3 build 10723</p>

## Окончание таблицы 2.2

№	Дата съемки	Характеристика съемки	Обработка
4	15.08.2020	Всего снимков: 225 Высота полета: 67,3 м Разрешение съемки: 1,61 см/пикс Площадь покрытия: 0,0348 км <sup>2</sup> Позиций съемки: 225 Связующих точек: 163,688 Проекций: 560,737 Ошибка репр-я: 1,42 пикс	Параметры выравнивания: Точность высокая Общая переселекция Да Переселекция по привязке Исходные значения: Характерных точек на кадр 40,000 Связующих точек на кадр 4,000 Версия программы 1.6.3 build 10723

Таблица 2.3 – Характеристика метеоусловий съемки

Параметры	Даты съемок			
	15.08.19	03.12.19	15.03.20	15.08.20
	1	2	3	4
Т <sub>внутри</sub> , °С	33,4	16	26	24
Т <sub>снаружи</sub> , °С	36,5	18	18	37
Давление, мм рт. ст.	675	678	677	683
Влажность внутри, %	38	60	44,5	
Скорость ветра, м/с, и направление	1,5 ↖	3,6 ↙	2,5 ←	3 ↗
Облачность	солнечно	переменная	переменная	солнечно

Средние квадратические отклонения на опорных и контрольных точках приведены в таблице 2.4. На рисунке 2.8 показано расположение опорных и контрольных точек для съемки

Таблица 2.4 – Точность обработки аэрофотосъемки с применением БПЛА

Съемка	СКО X, мм	СКО Y, мм	СКО Z, мм	Общая, мм	Фото, пикс
1	5,5	6,1	8,5	11,8	0,393
2	10,3	7,2	8,8	15,4	0,427
3	22,3	14,2	14,8	30,3	1,002
4	21,5	15,9	14,9	30,6	1,326

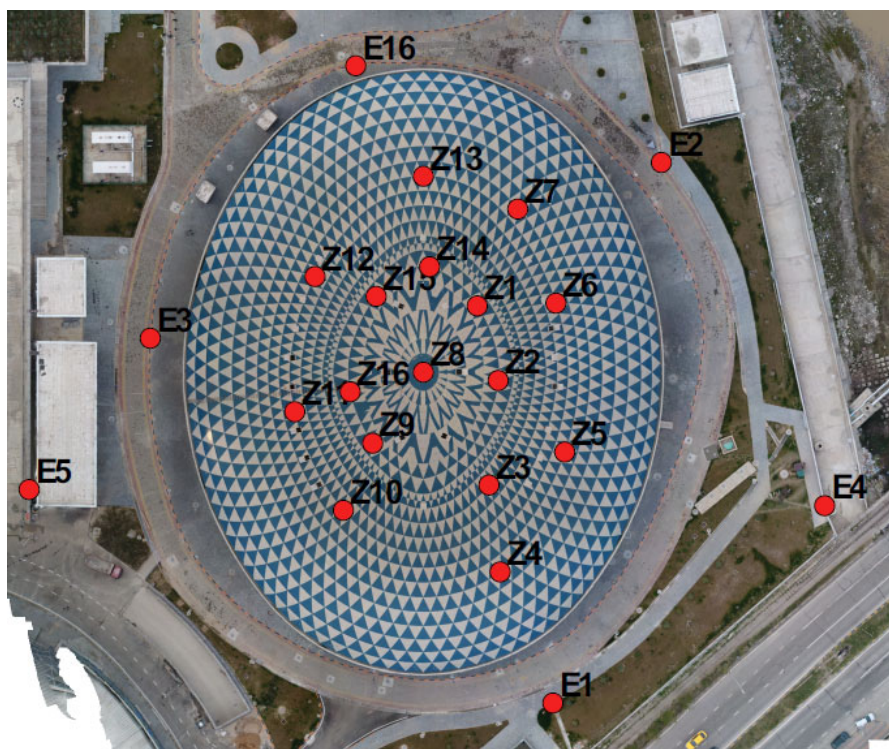


Рисунок 2.8 – Расположение опорных и связующих точек (съемка 15.08.2020)

Облако точек, полученное в результате использования алгоритма масштабно-инвариантного преобразования признаков, в программе Photoscan [60], не имеет параметров точности определения координат каждой точки облака, поэтому дальнейший анализ проводился в авторском программном обеспечении Collocation Filtering [66].

Для анализа деформаций перекрытия использовалось облако точек модели объекта, которое экспортировалось в виде триангуляционной поверхности в формате dxf.

### 2.3 Анализ точности моделей поверхностей перекрытий

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 2.9) 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 со-

ответствующих радиусов. Предварительно было выполнено статистическое моделирование, которое позволило выбрать оптимальный размер окрестности.

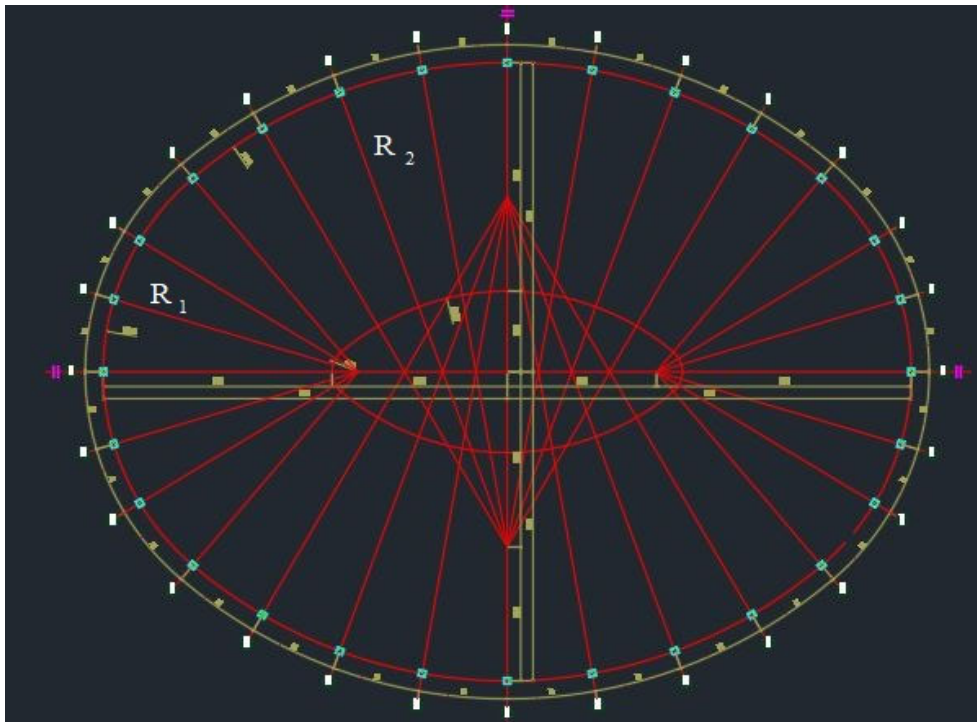


Рисунок 2.9 – Центры и радиусы сопряженных сферических поверхностей перекрытия

Для анализа точности полученных поверхностей был выполнен предварительный анализ точности полученных из аэрофотосъемок БПЛА поверхностей перекрытия.

В местах точек геодезического мониторинга (57 точек, см. рисунок 1.4) выбирались точки поверхности в область размером  $s$  и аппроксимировались сферой с заданным радиусом  $R$ . Для этого составлялись уравнения для каждой  $i$  точки, попавшей в окрестность размером  $s$

$$(x_i - O_x)^2 + (y_i - O_y)^2 + (z_i - O_z)^2 - R^2 = \varepsilon_i^2, \quad (2.1)$$

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;

$\varepsilon_i$  – отклонение точки от сферы заданного радиуса  $R$ .

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

$$m_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – число точек, попавших в окрестность  $s$ .

На рисунке 2.10 приведены графики средних квадратических отклонений для 57 точек, при разных размерах области выборки, от 3 до 12 м. 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.

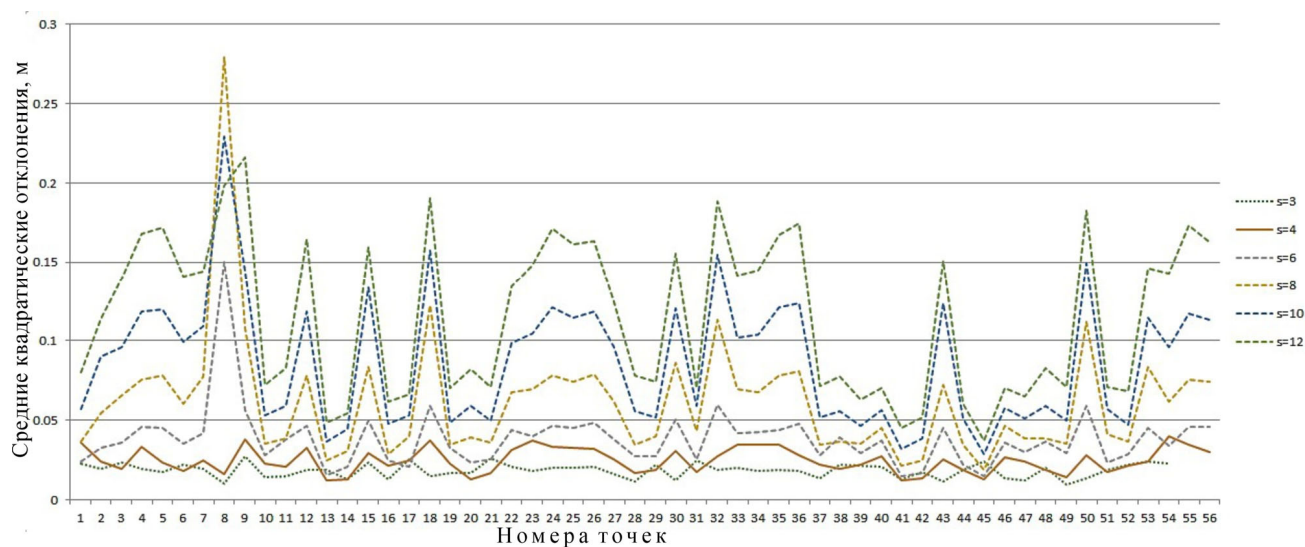


Рисунок 2.10 – Графики средних квадратических отклонений

Причем, при размерах окна выборки  $s \leq 3$  м уравнения (2.1) 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 (2.1) для всех точек,  $s = 4$  м.

Анализ системы уравнений (2.1) при условии, что  $R$  не заданная, а определяемая величина, показывает, что величина окна выборки даже при  $s = 6$  м мала для надежного определения радиуса (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Сравнение теоретического и вычисленного радиуса

Номер точки	$R_T$ , м	$R'$ , м	СКО $R'$ , м	Число точек
1	33.73	50.127	0.02837	517
2	33.73	31.101	0.05337	1124
3	33.73	84.698	0.01614	821
4	33.73	122.399	0.01763	853
5	33.73	139.275	0.01685	864
6	33.73	79.376	0.01752	837
7	33.73	29.090	0.07479	1056
8	67.7	37.006	0.03984	469
9	67.7	32.065	0.08446	955
10	67.7	150.196	0.02110	839
11	67.7	240.672	0.01423	875
12	33.73	122.742	0.02425	823
13	67.7	105.523	0.01659	834
14	67.7	138.222	0.01498	852
15	67.7	35.264	0.06151	1131
16	67.7	106.995	0.02619	474
17	67.7	57.162	0.03971	438
18	67.7	28.866	0.08745	1066
19	67.7	126.603	0.02562	819
20	67.7	225.269	0.01624	822
21	33.73	36.983	0.03526	450
22	33.73	30.282	0.06596	1044
23	33.73	91.792	0.01850	808
24	33.73	140.915	0.01649	793
25	33.73	107.965	0.02820	809
26	33.73	127.355	0.02642	861
27	33.73	29.720	0.05972	1159
28	33.73	52.105	0.02463	528

## Окончание таблицы 2.2

Номер точки	$R_T$ , м	$R'$ , м	СКО $R'$ , м	Число точек
29	33.73	40.728	0.03862	482
30	33.73	27.221	0.08087	1098
31	67.7	65.007	0.04312	494
32	67.7	30.174	0.08438	1051
33	33.73	97.241	0.01832	826
34	33.73	97.072	0.01784	841
35	33.73	129.210	0.01568	801
36	33.73	151.490	0.01683	803
37	67.7	156.299	0.01909	852
38	67.7	204.349	0.01427	828
39	67.7	62.915	0.03492	879
40	67.7	59.074	0.045	856
41	67.7	99.096	0.01417	826
42	67.7	107.623	0.01471	833
43	67.7	38.090	0.05602	1200
44	67.7	93.674	0.03322	478
45	67.7	75.854	0.0181	837
46	67.7	62.034	0.04612	838
47	67.7	64.015	0.03865	829
48	67.7	260.810	0.01232	848
49	67.7	151.010	0.02123	864
50	67.7	30.1266	0.08403	1128
51	67.7	51.433	0.03996	450
52	33.73	39.930	0.03556	439
53	33.73	28.523	0.08025	1050
54	33.73	79.739	0.01907	824
55	33.73	126.226	0.01454	838
56	33.73	116.477	0.02421	820

В таблице 2.5  $R_T$  – теоретический радиус поверхности в заданной точке,  $R'$  – вычисленный радиус, СКО  $R'$  – средняя квадратическая погрешность определения  $R'$ .

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 рисунках 2.11–2.14 приведены гистограммы для соответствующих поверхностей.

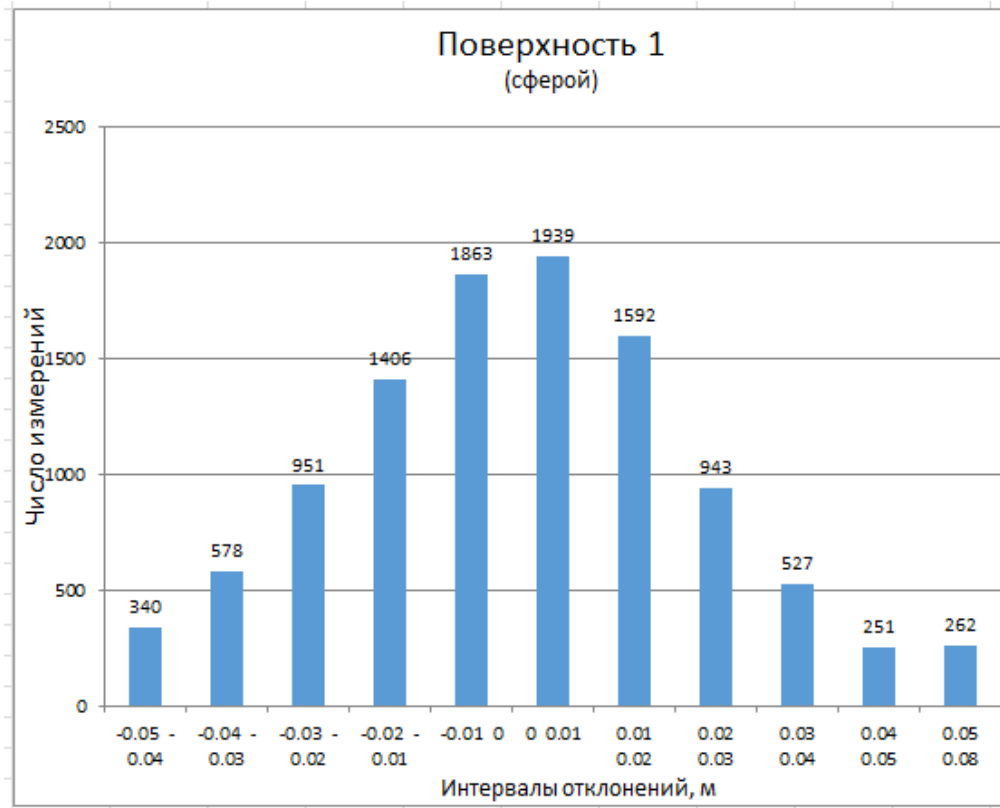


Рисунок 2.11 – Гистограмма отклонений для поверхности 1



Рисунок 2.12 – Гистограмма отклонений для поверхности 2



Рисунок 2.13 – Гистограмма отклонений для поверхности 3

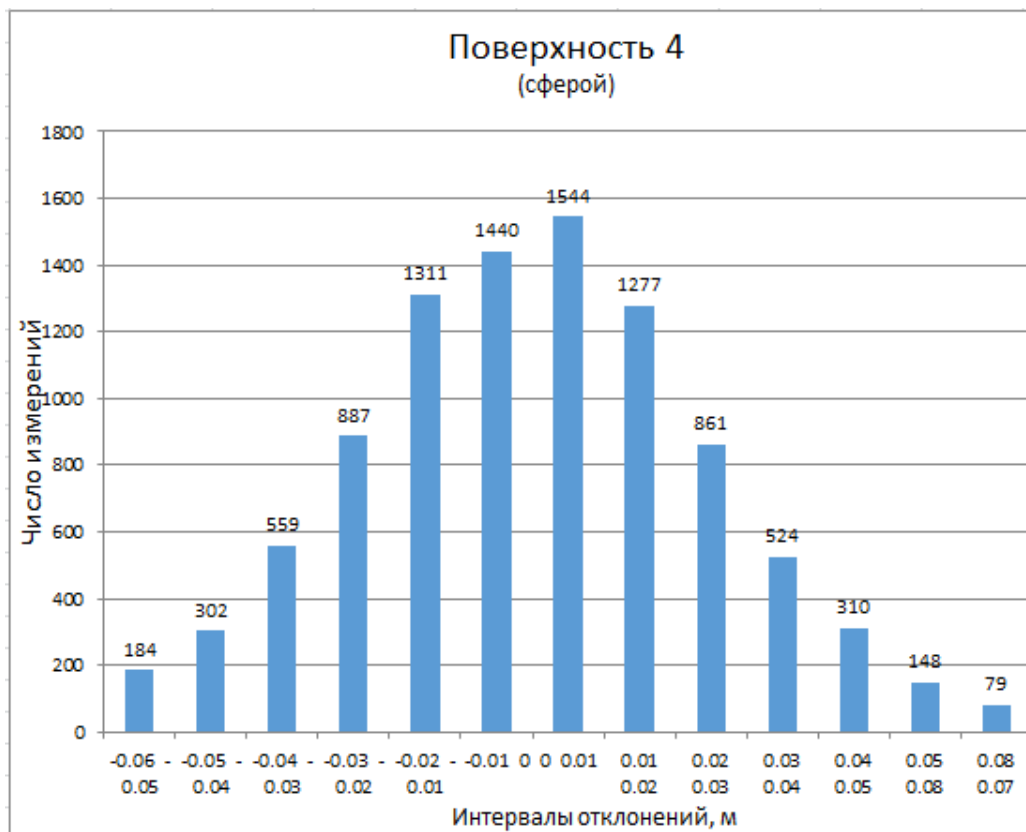


Рисунок 2.14 – Гистограмма отклонений для поверхности 4

## 2.4 Выводы по разделу 2

Анализ отклонений на опорных точках (см. таблицу 2.4) показывает, что поверхности перекрытия объекта, полученные по данным аэрофотосъемки БПЛА в программе Agisoft Photoscan, имеют небольшие отклонения на опорных точках для съемок 1 и 2 (даты съемок 15.08.2019 и 03.12.2019) и почти в два раза большие для съемок 3 и 4 (даты 15.03.2020 и 15.08.2020) при том, что снимков в первых двух съемках было около 160, а в третьей и четвертой – более 200. Версии программы обработки первых двух съемок – 1.4.0, последних двух – 1.6.3, обработка выполнялась при одинаковых параметрах. В двух последних съемках были наклонные снимки кольцевых маршрутов (см. рисунок 2.6). Как видно из результатов, включение наклонных кольцевых маршрутов не повышает точность полученных моделей, и отклонения на контрольных точках только возрастают.

Кроме того, отмечено, что в обработке участвуют не все снимки съемки – около 5 % снимков не участвуют в обработке, предположительно это стереопары с вертикальным базисом. Однако это требует дополнительных исследований.

Как видно из гистограмм большинство отклонений имеют небольшую величину и подчиняются нормальному закону распределения. Группирование точек по диапазонам отклонений (таблица 2.6) показывает, что примерно 30 % точек имеют хорошую точность аппроксимации теоретической поверхности  $\pm 10$  мм, более 50 % точек имеют точность  $\pm 20$  мм, почти 80 % имеют отклонения менее  $\pm 30$  мм. При мониторинге зданий и сооружений приемлемой считается точность в 10 % от величины максимальных деформаций, в нашем случае это будет 10 % от 266 мм – 26,6 мм.

Таблица 2.6 – 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  $\pm 80$  мм, что значительно искажает результаты определения деформаций.

Эти отклонения являются результатом ошибок распознавания соответствий на снимках [20, 41, 60], 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 большие значения отклонений.

### 3 МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Точность моделей, полученных в результате обработки БАС, достаточна для решения многих задач [16, 19, 29, 50, 80, 84, 85], правда, в некоторых случаях, например, в маркшейдерии, требуется дополнительное маркирование опорных и контрольных точек для более точного определения отметок точек.

Такие дополнительные работы снижают эффективность использования программ, использующих алгоритм SIFT. В нашем случае этот подход нельзя применить, так как нахождение исполнителей на перекрытии для измерения координат опорных и контрольных точек после сейсмических событий недопустимо. Однако для контроля на каждую дату аэросъемки БПЛА определялись координаты 16 контрольных точек на перекрытии (см. рисунок 2.4) для определения совпадения реакции перекрытия по нижней стороне оболочки и по верхней поверхности перекрытия.

При обработке аэросъемки БПЛА Дворца водных видов спорта по алгоритму SIFT имеется примерно 20 % отметок точек модели перекрытия, которые имеют отклонения более 30 мм от теоретической поверхности.

Исследованиям точности определения координат точек по алгоритму SIFT и методов фильтрации точек модели и их совершенствованию посвящено множество публикаций [110, 114, 118, 138], авторы которых пытаются повысить точность определения координат точек различными способами. В основном исследования ведутся в поиске эффективной фильтрации точек, которые имеют большие ошибки. Пока программы, использующие алгоритм SIFT, не имеют средств для обнаружения и отбраковки таких ошибок. В случае монотонных поверхностей с регулярными структурами ошибок распознавания соответствий на снимках на становится больше, и они могут быть большими по величине, так как алгоритм распознает идентичными точки, которые располагаются далеко друг от друга, но имеют похожие изображения. К сожалению, вмешаться в процесс фильтрации для стандартных программ с обработкой аэросъемки по алгоритму SIFT не представляется возмож-

ным [41, 60, 106, 119, 121], а тем более исследовать и применить какие-то собственные методы фильтрации и критерии отбраковки. На данном этапе исследований для повышения точности моделирования поверхности возможно только применение фильтрации модели, полученной по алгоритму SIFT, которой можно выполнить фильтрацию, чтобы исключить большие («ураганные») значения отклонений и таким образом выполнить сглаживание поверхности и уменьшить влияние ошибок алгоритма SIFT.

### 3.1 Линейные методы фильтрации

Результаты обработки аэросъемки БПЛА в программе PhotoScan (Metashape) [106] выдавались в виде триангуляционной поверхности (TIN) в формате dxf (рисунки 3.1 и 3.2) и использовались для дальнейших исследований в собственном программном обеспечении.

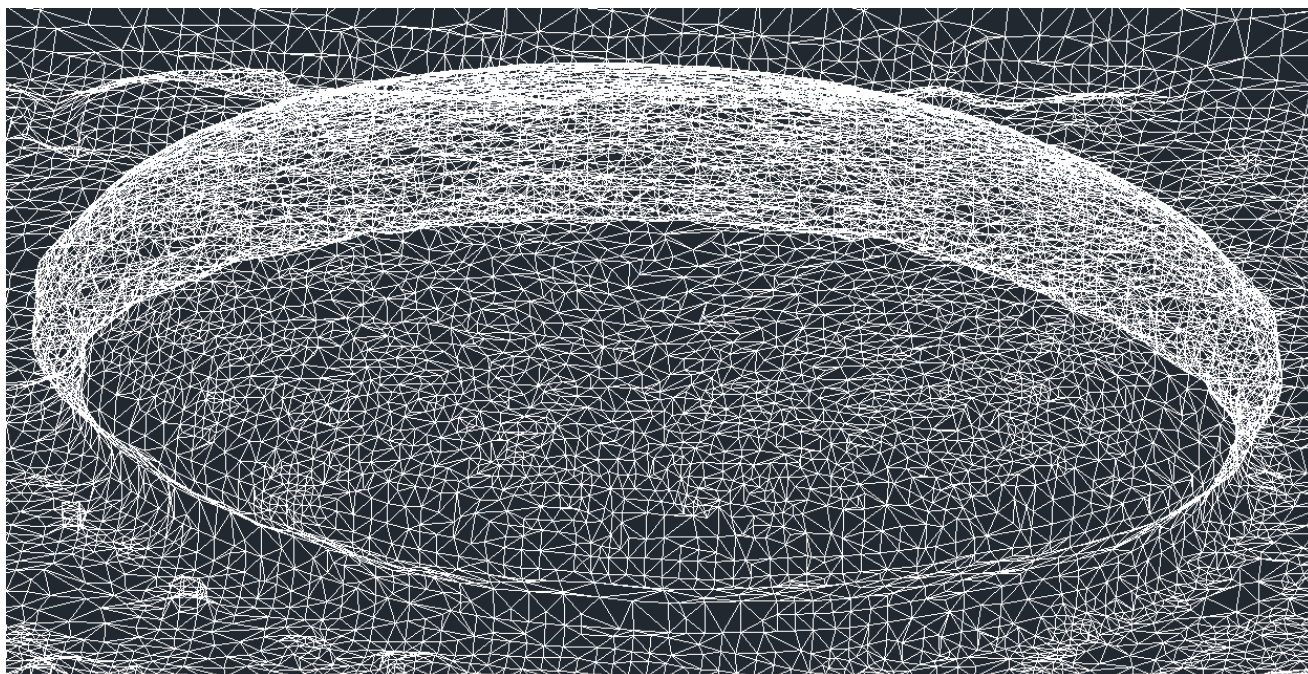


Рисунок 3.1 – Триангуляционная поверхность модели перекрытия

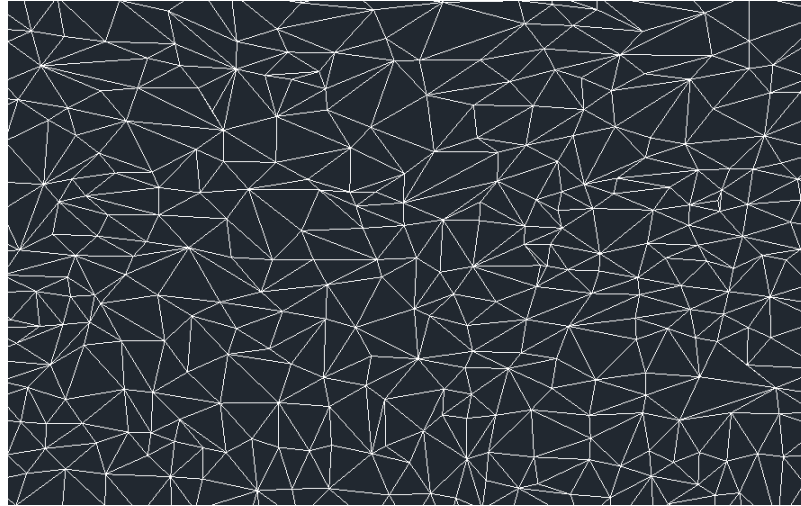


Рисунок 3.2 – Фрагмент поверхности

Визуальный анализ триангуляционной поверхности перекрытия показывает, что точки поверхности образуют треугольные грани без каких-либо структур, форма треугольников близка к оптимальной, количественные характеристики поверхностей: число точек, число треугольных граней и среднее расстояние между точками приведены в таблице 2.1.

Для сравнения деформаций модели перекрытия, полученной по алгоритму SIFT, с деформациями, которые получены из наблюдений при геодезическом мониторинге и которые используются в качестве эталона, необходимо выполнить аппроксимацию поверхности и определить отметки в точках, где выполнялся геодезический мониторинг. Линейные методы аппроксимации треугольной гранью не подходят, так как не устраняют влияние «ураганных» отклонений.

Поэтому из всех методов линейной фильтрации имеет смысл рассмотреть линейную фильтрацию плоскостью, в ограниченной области, в которой плоскость отличается от сферической поверхности на некоторый допуск  $\Delta$ . Рассмотреть, каким образом можно аппроксимировать сферическую поверхность участка перекрытия плоскостью с заданным допуском, можно рассмотреть на схеме (рисунок 3.3).

Чтобы регулировать величину отклонения  $\Delta$ , необходимо управлять размерами выборки  $L$ . В таблице 3.1 приведены размеры окна выборки для сфер с радиусами 33,73 и 67,7 м.

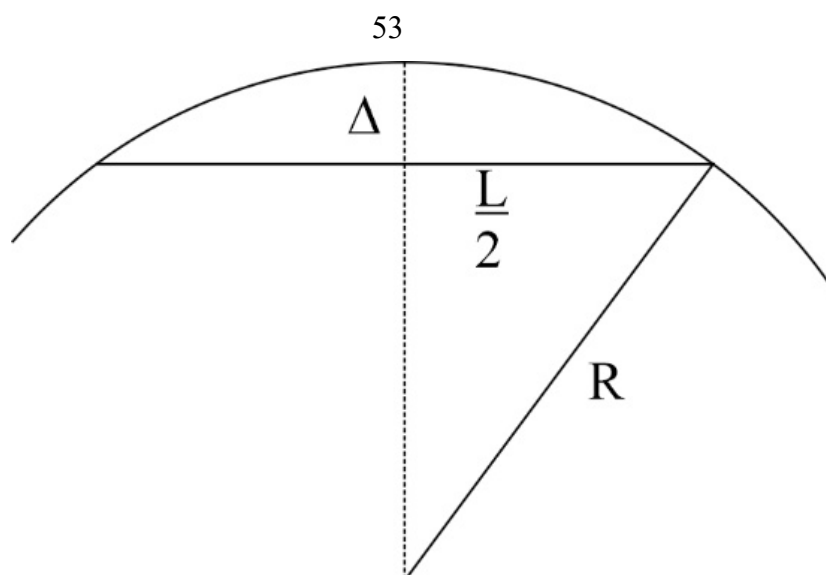


Рисунок 3.3 – Допустимое отклонение при аппроксимации сферой

Таблица 3.1 – Размеры окна выборки для аппроксимации сферической поверхности плоскостью

$\frac{L}{2}$ , м	$R$ , м	$\Delta$ , м	$L$ , м
0,825	33,73	0,010	1,65
1,2	67,7	0,010	2,4

То есть, чтобы плоскость была на расстоянии не более 10 мм от сферической поверхности, размер окна для области выборки не должен быть более 1,65 м для поверхности с радиусом 33,73 м и не больше 2,4 м для поверхности с радиусом 67,7 м. Однако, поскольку отклонения от поверхности перекрытия имеют нормальный закон распределения (п. 2.3), можно предположить, что и отклонения от плоскости, определенной на множестве точек, попавших в выборку, также будут подчиняться нормальному закону и аппроксимирующая плоскость будет располагаться примерно на середине отрезка  $\Delta$ , что соответствует середине слоя точек выборки, и точность аппроксимации ограниченной области будет  $\Delta/2$ , т. е. в нашем случае 5 мм (рисунок 3.4).



Находим положение оптимальной плоскости, проходящей через совокупность точек, попавших в выборку.

При интерполировании оптимальной плоскостью происходит некоторое сглаживание поверхности, однако влияние больших отклонений полностью не устраняется. Необходимо отметить, что сглаживание по Гауссу (методом наименьших квадратов) чрезвычайно широко применяется во многих областях: в геодезии [39, 40, 42, 51], в механике [101], и при обработке цифровых изображений и выделении полезных сигналов [62] и во многих других областях.

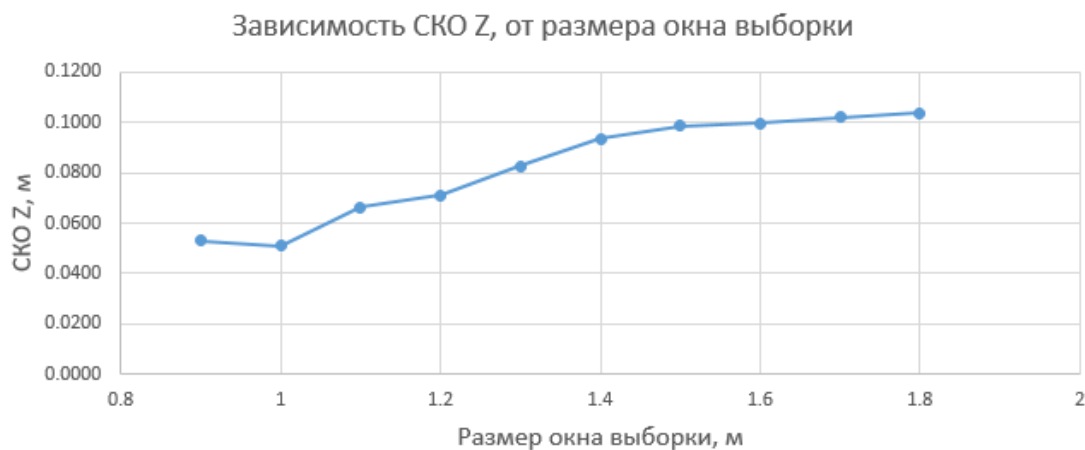
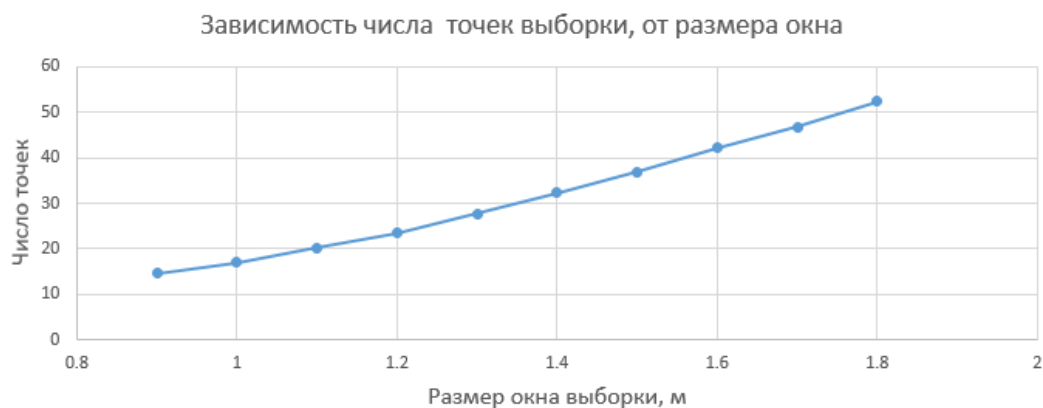
Для аппроксимации сферической поверхности оптимальной плоскостью необходимо определить оптимальные размеры окна выборки, при которых отклонение плоскости от сферы будет в пределах некоторого допуска  $\Delta/2$ . Нахождение размера оптимальной окрестности будем выполнять на моделях перекрытия методом статистического исследования. Для этого выберем области разного размера с центрами в точках геодезического мониторинга и выполним интерполяцию оптимальной плоскостью в ближайшей точке с известными координатами. Интерполированную отметку точки можно сравнить с исходной и получить среднее квадратическое отклонение для заданного размера окна.

Данные для анализа интерполяции поверхности 1 приведены в приложении А. Анализ интерполяции при различных размерах выборки приведен в приложении А, таблицы А.1–А.4 частично, так как результаты очень близкие. Сводные результаты для всех вариантов выборки приведены в таблице 3.2, размер выборки  $L$  изменялся с шагом в 10 см, при  $L < 0,9$  м число точек в выборке становится меньше 10 и выборка становится не представительной. При расстоянии  $L > 1,65$  м отклонение плоскости от сферы становится больше установленного допуска.

Зависимости данных таблицы 3.2 в виде графиков показаны на рисунках 3.5–3.7.

Таблица 3.2 – Зависимость точности интерполяции от размера окна выборки

№	$L$ , м	СКО $Z$ , м	Среднее расстояние, м	Среднее число точек в выборке
1	0,9	0,0529	0,0057	15
2	1	0,0511	0,0059	17
3	1,1	0,0664	0,0062	20
4	1,2	0,0711	0,0065	24
5	1,3	0,0827	0,0069	28
6	1,4	0,0936	0,0072	32
7	1,5	0,0986	0,0075	37
8	1,6	0,0995	0,0079	42
9	1,7	0,1021	0,0081	47
10	1,8	0,1037	0,0083	52

Рисунок 3.5 – Зависимость точности интерполирования от размера выборки  
(поверхность 1)Рисунок 3.6 – Зависимость числа точек выборки от размера окна  
(поверхность 1)

Зависимость среднего расстояния от плоскости, в зависимости от размера окна выборки

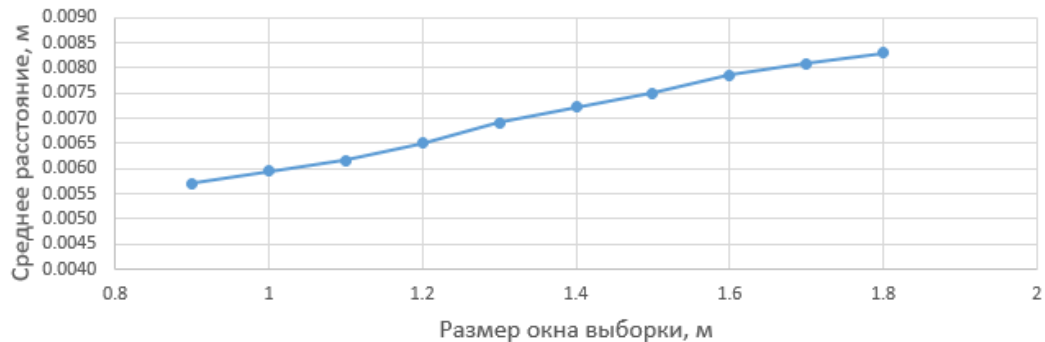


Рисунок 3.7 – Зависимость среднего расстояния до плоскости от размера окна (поверхность 1)

Следует обратить внимание на тот факт, что СКО интерполирования отметки велико, от 51 до 104 мм, при том, что среднее расстояние от точек до плоскости интерполирования лежит в диапазоне от 5,7 до 8,3 мм. Если проанализировать данные таблиц приложения А, можно заметить, что большие отклонения имеются только на отдельных точках: 1, 9, 17, 32. Эти точки лежат на самом краю перекрытия (см. рисунок 1.4), и в выборку могли попасть точки боковой поверхности. На некоторых поверхностях большие отклонения имеют точки 22 и 53, которые также находятся на краю перекрытия.

Если исключить точки с большими отклонениями, получим зависимость, показанную в таблице 3.3 и на рисунке 3.8, остальные зависимости практически не изменились.

Таблица 3.3 – Зависимость точности интерполяции от размера окна выборки

№	$L$ ,	СКО $Z$ ,	Среднее расстояние,	Число точек
1	0,9	0,0077	0,0057	15
2	1	0,0103	0,0059	17
3	1,1	0,0147	0,0062	20
4	1,2	0,0105	0,0065	24
5	1,3	0,0153	0,0069	28
6	1,4	0,0174	0,0072	32
7	1,5	0,0120	0,0075	37
8	1,6	0,0132	0,0079	42
9	1,7	0,0094	0,0081	47
10	1,8	0,0218	0,0083	52

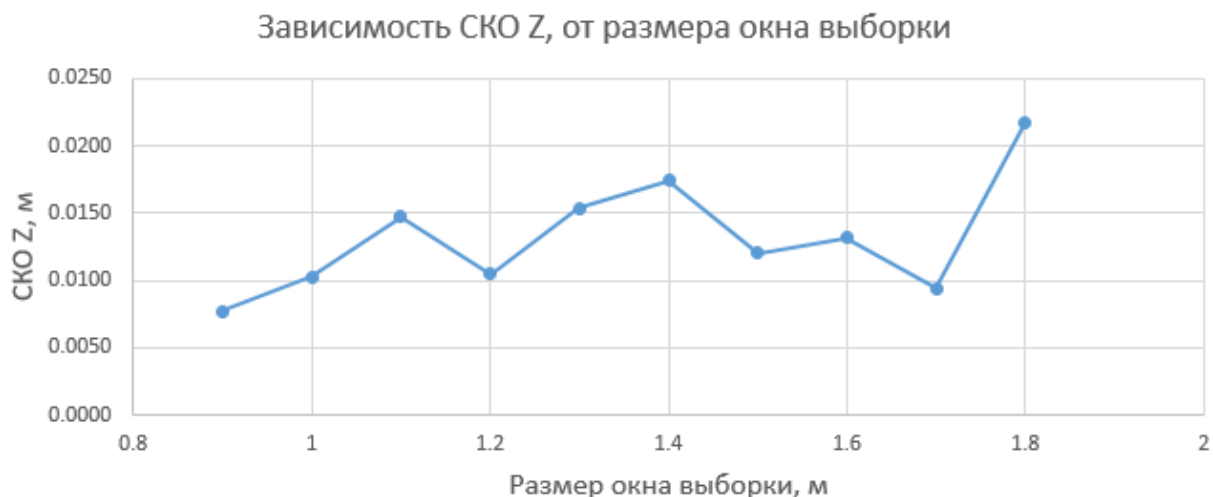


Рисунок 3.8 – Зависимость точности интерполирования от размера выборки (поверхность 1)

Для поверхности 2 картина практически аналогичная, большие отклонения только на точках: 1, 43, 50, 55. Если их исключить, график зависимости получится, как на рисунке 3.9. Однако, из-за того, что на поверхности 2 точки располагаются более редко, в окно выборки попадало меньше точек, поэтому СКО Z для размера окна 0,9 и 1,0 м не вычислялись.



Рисунок 3.9 – Зависимость точности интерполирования от размера выборки (поверхность 2)

Если обобщить данные по всем четырем поверхностям (рисунки 3.9–3.11, приложение Б) с выбором интервала с наименьшим СКО от оптимальной плоскости, получим данные, приведенные в таблице 3.4.

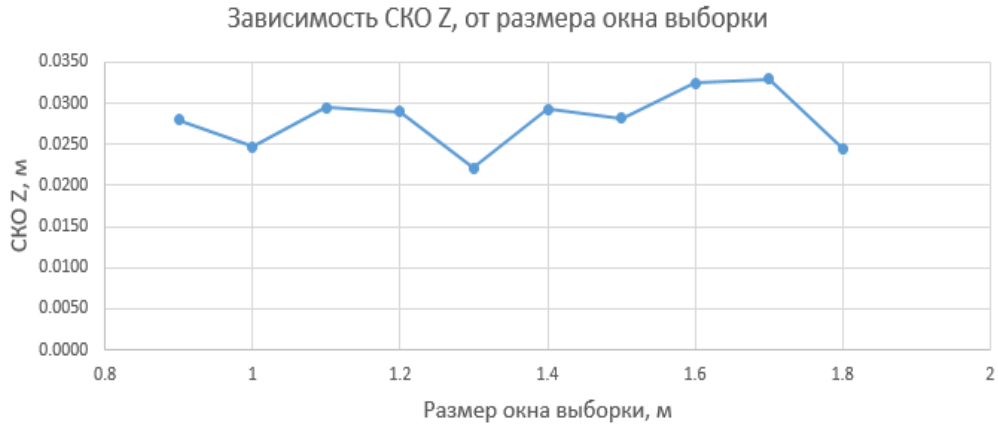


Рисунок 3.10 – Зависимость точности интерполирования от размера выборки (поверхность 3)



Рисунок 3.11 – Зависимость точности интерполирования от размера выборки (поверхность 4)

Таблица 3.4 – Оптимальный размер окна выборки

Поверхность	$L$ , м	СКО, мм	Число точек в выборке
1	1,7	9,4	47
2	1,3	10,9	28
3	1,3	22,1	34
4	1,5	33	31
Среднее:	1,45	18,85	35

Можно отметить, что аппроксимация сферической поверхности оптимальной плоскостью, хотя и несколько устраняет влияние больших отклонений, однако не дает точности, необходимой для решения задач мониторинга большепролетных сооружений.

Чтобы устранить влияние больших отклонений был проведен статистический эксперимент по аппроксимации точек сферической поверхности перекрытия Дворца водных видов спорта оптимальной плоскостью с дополнительным условием, которое можно представить следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A \cdot x_i + B \cdot y_i + C \cdot z_i + D &= \varepsilon_i \\ |\varepsilon_i| &\leq \Delta \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

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

Геометрически это интерпретируется, как показано на рисунке 3.12, после построения оптимальной плоскости анализируются отклонения  $\varepsilon_i$  каждой точки, попавшей в первоначальную выборку, и если они превышают некоторый допуск  $|\varepsilon_i| > \Delta$ , то эта точка удаляется из выборки.

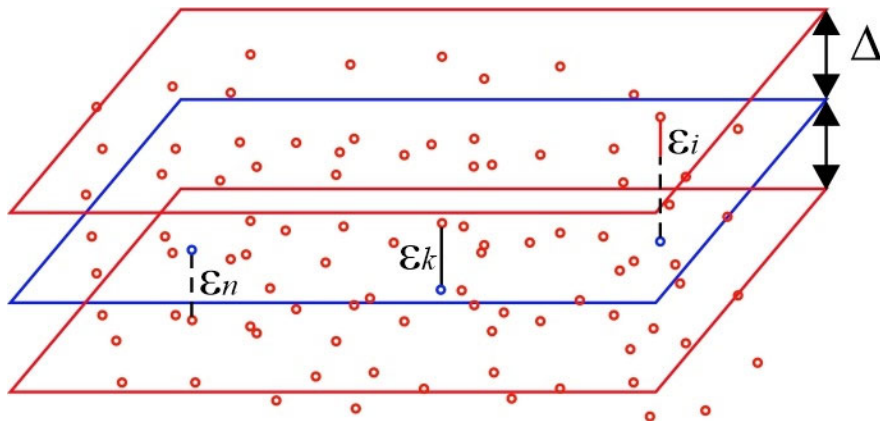


Рисунок 3.12 – Геометрический смысл анализа выборки

Обработка в этом случае происходит по следующему алгоритму, приведенному на рисунке 3.13.

Входные данные

массив точек интерполирования,  $n=56$   
 массив точек модели  
 $L$  - размер окна выборки  
 $\Delta$  - допуск на отклонения  
 $N_{\min}$  - допуск на число точек в выборке

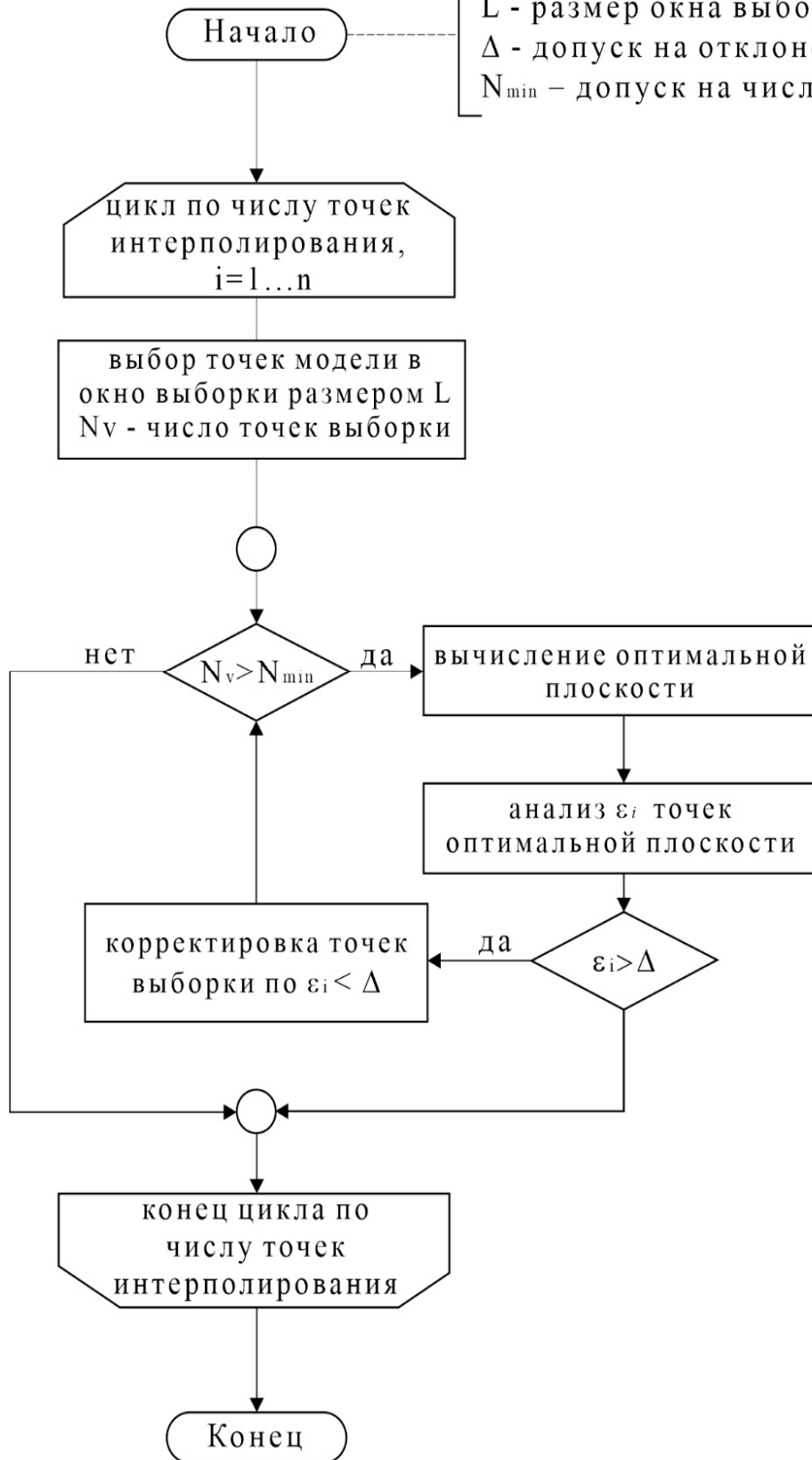


Рисунок 3.13 – Алгоритм интерполяции с коррекцией выборки

Для проверки работоспособности алгоритма используем статистическое моделирование, как и для интерполяции оптимальной плоскостью, но проводить его будем с параметром, уже определенным в предыдущем эксперименте  $L = 1,45$  м, а изменять будем величину  $\Delta$ , подбирая ее величину, чтобы минимизировать СКО отметок точек интерполирования. В приложении В приведены некоторые результаты этого статистического эксперимента.

Если выполнить статистическое моделирование для поверхности 1 при различных значениях  $\Delta$ , можно заметить, что при значениях допуска более 10 мм отбраковывается очень мало точек и показатели соответствуют строке 7 таблицы 3.2. При уменьшении допуска с шагом 1 мм получаются данные, приведенные в таблице 3.5, закономерности данных показаны на графиках (рисунки 3.14 и 3.15).

Таблица 3.5 – Результаты статистического моделирования для поверхности 1

№	$\Delta$ , мм	СКО $Z$ , м	$M_{vz}$ , м	$N_{cp}$
1	10	0,0104	0,0042	27
2	9	0,0132	0,0039	25
3	8	0,0121	0,0035	24
4	7	0,0126	0,0029	21
5	6	0,0131	0,0026	19
6	5	0,0113	0,0019	14
7	4	0,0120	0,0016	12
8	3	0,0124	0,0011	10

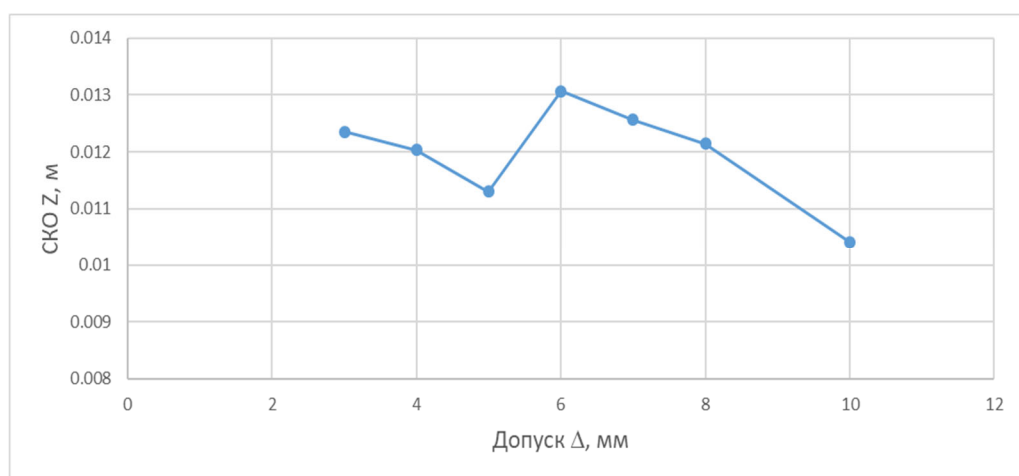


Рисунок 3.14 – Зависимость СКО  $Z$  от величины допуска (поверхность 1)

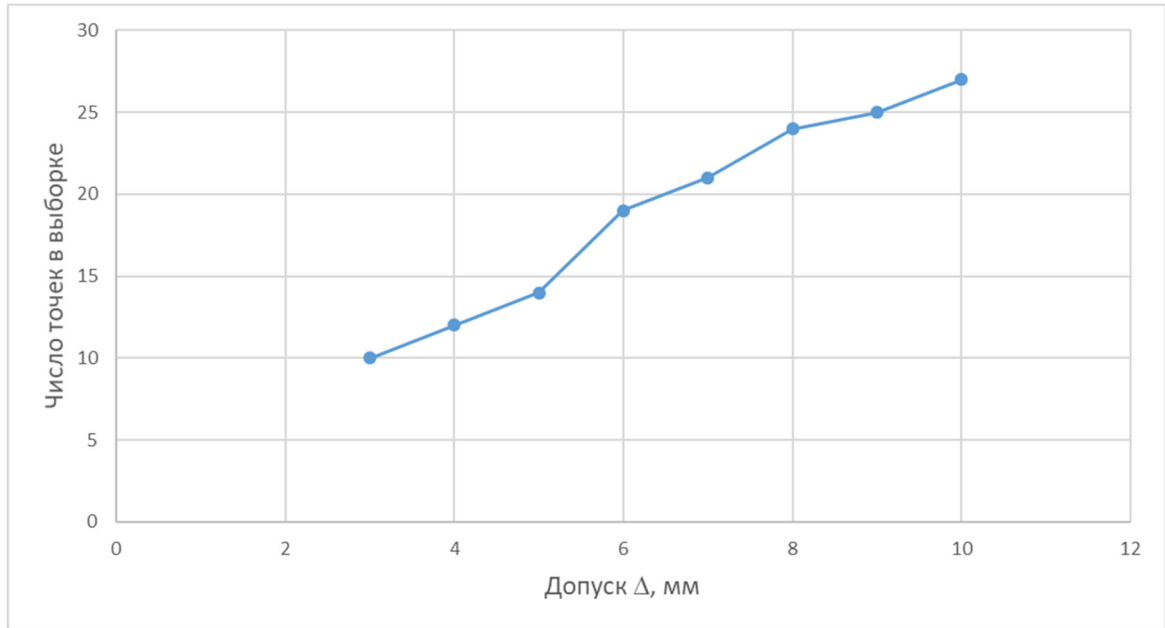


Рисунок 3.15 – Зависимость числа точек выборки от величины допуска (поверхность 1)

Число точек выборки увеличивается с увеличением допуска (см. рисунок 3.15), но на среднюю квадратическую ошибку интерполирования точек это не оказывает существенного влияния. Сводные данные по поверхностям приведены в приложении Г.

В результате анализа данных приложения Г выбраны наименьшие СКО определения  $Z$  для поверхностей и величины допусков  $\Delta$  (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Сводные результаты статистического моделирования

Поверхность	$\Delta$ , мм	СКО $Z$ , м	$N_{cp}$
1	10	0,010	27
2	10	0,011	16
3	7	0,016	14
4	10	0,010	17

Анализ работы алгоритма аппроксимации сферической поверхности оптимальной плоскостью с допуском показал значительное уменьшение СКО определения  $Z$ , чем просто аппроксимация оптимальной плоскостью, особенно для проблемных поверхностей 3 и 4.

Для интерполяции отметок точек с координатами деформационных марок геодезического мониторинга используем следующие параметры:

- размер окна выборки  $l = 1,45$  м;
- допуск на отклонение точки от оптимальной плоскости  $\Delta = 10$  мм, так как только при такой величине обеспечивается достаточная выборка.

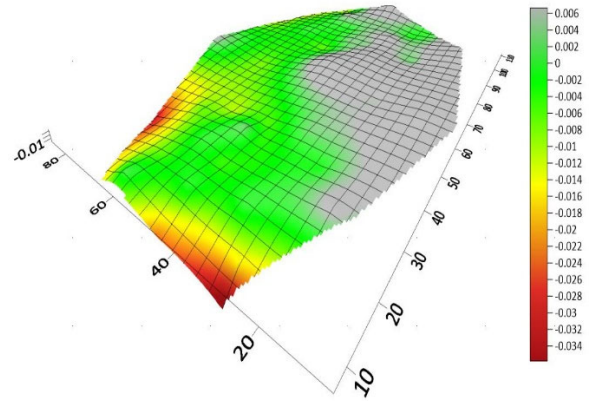
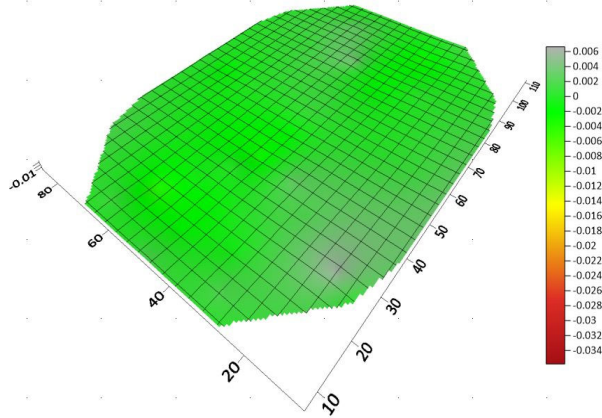
Если выполнить интерполяцию сферической поверхности перекрытия оптимальной плоскостью с дополнительным условием на допустимость отклонений от плоскости для всех четырех поверхностей перекрытия, полученных при обработке аэросъемки БПЛА, получим данные, приведенные в приложении Д.

Анализируя эти данные, можно отметить, что на некоторых точках поверхностей интерполирование не выполнено, так как число точек, попавших в область выборки, меньше допуска. Кроме того, были исключены пять точек, которые имели критически большие погрешности интерполирования на этапе исследований параметров интерполяции. Эти точки располагались по контуру поверхности перекрытия (см. приложение В, таблицы В.1–В.3).

Поскольку напрямую нельзя сравнивать деформации верхней поверхности перекрытия (аэросъемка БПЛА) и нижней поверхности перекрытия (геодезический мониторинг), в исследовании выполнено сравнение деформаций между начальным циклом деформаций из аэросъемки БПЛА и последующими циклами. Сравнение выполнялось с деформациями геодезического мониторинга, начиная с 3-го цикла измерений, которые совпадали с аэросъемкой БПЛА. Так как деформации между смежными съемками в последних четырех циклах незначительные и лежат в пределах  $\pm 3$  мм, то для построения поверхностей деформаций брались не смежные даты съемки, деформации которых соизмеримы с точностью определения отметок при геодезическом мониторинге, а между первой и каждой последующей датой съемки (приложение Е). Поверхности разниц деформаций приведены на рисунке 3.16, *a–e*.

Анализ поверхностей разностей отметок геодезического мониторинга на рисунке 3.16 *a, в, д* показывает, что эти разности изменяются незначительно.

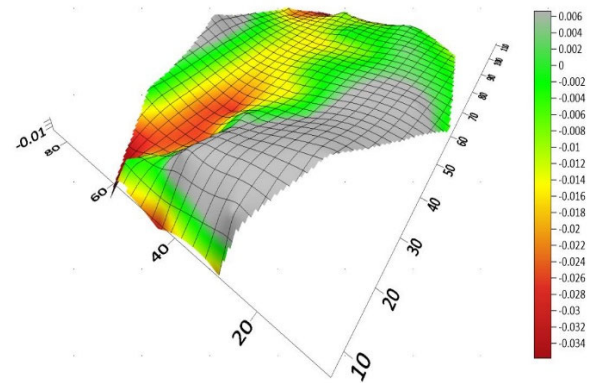
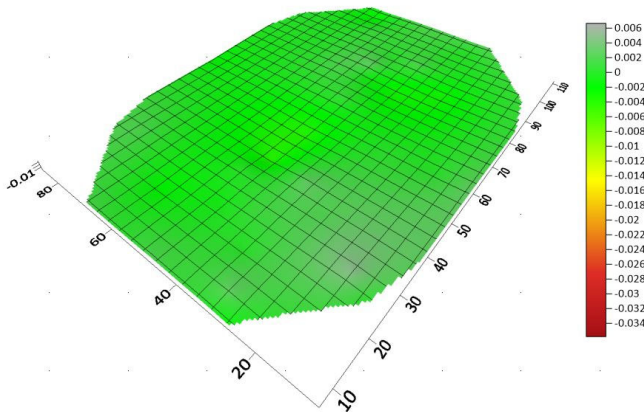
Между датами 15.08.2019–03.12.2019 (поверхность 2 – поверхность 1)



а) по данным геодезических определений

б) по данным аэросъемки БПЛА

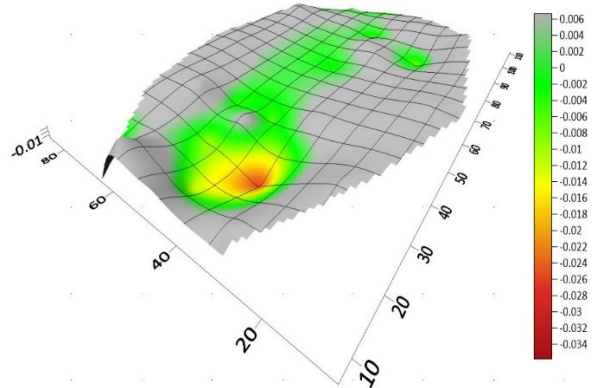
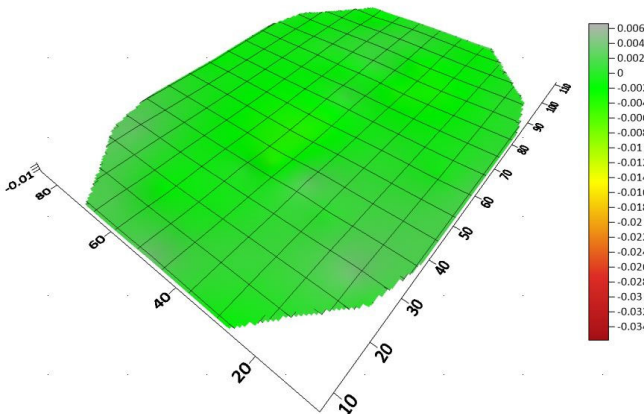
Между датами 15.08.2019–15.03.2020 (поверхность 3 – поверхность 1)



в) по данным геодезических определений

г) по данным аэросъемки БПЛА

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



д) по данным геодезических определений

е) по данным аэросъемки БПЛА

Рисунок 3.16 – Сравнение поверхностей деформаций инженерного сооружения

Изменения высот точек составляют от +6 мм, редко и только на краях поверхности, до –6 мм по поверхности перекрытия. Большую часть этих изменений составляют тепловые расширения, так, при изменении температуры в 10 °С изменение высоты точек сооружения на краю перекрытия составит 3,5 мм (высота 28,3 м), а в центре 4,9 мм (высота 39,8 м).

Анализ поверхностей деформаций, полученных из аэросъемки БПЛА, 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.

### 3.2 Фильтрация методом коллокации

Во многих прикладных задачах с успехом применяется метод коллокации [58, 67, 93, 95, 98, 109, 111, 115, 131, 133]. Очень часто метод применяется в гидродинамике и для решения уравнений Навье – Стокса, однако может быть использован для решения очень многих задач. Суть метода коллокации заключается в следующем. Приближенное решение ищется в конечномерном линейном пространстве функций. Уравнения коллокации – требования того, чтобы приближенное решение удовлетворяло дифференциальным уравнениям задачи в конечном множестве точек области постановки задачи (точках коллокации).

Поэтому в работе исследовалась возможность выполнить сглаживающую фильтрацию методом коллокации [78], который хорошо зарекомендовал себя при обработке геодезических и маркшейдерских измерений и геопространственных данных.

Сущность способа заключается в аппроксимации поверхности с помощью участков плоскости, оптимально близких реальной поверхности. При этом можно

подобрать коэффициенты, которые позволяют сглаживать поверхность, уменьшая влияние больших отклонений.

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

$$K(\rho_{i,j}) = a + b \cdot \rho_{i,j}, \quad (3.4)$$

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

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

$$b = \frac{1}{2S_{sr}}, \quad (3.5)$$

$$\rho_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (3.6)$$

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

По выбранным в окрестность точкам формируются следующие матрицы:

$$L = \begin{vmatrix} z_1 - z_0 \\ z_2 - z_0 \\ \dots \\ z_n - z_0 \end{vmatrix}, \quad (3.7)$$

$$C_p = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,p}) \\ K(\rho_{2,p}) \\ \dots \\ K(\rho_{n,p}) \end{vmatrix}, \quad (3.8)$$

$$C = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,1}) & K(\rho_{1,2}) & \dots & K(\rho_{1,n}) \\ K(\rho_{1,2}) & K(\rho_{2,2}) & \dots & K(\rho_{2,n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(\rho_{1,n}) & K(\rho_{2,n}) & \dots & K(\rho_{n,n}) \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

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

Отметка  $Z_p$  точки интерполирования  $P$  вычисляется по формуле

$$Z_p = z_0 + C_p^T C^{-1} L. \quad (3.10)$$

Подбор параметров уравнения выполнялся статистическим методом. Для этого в 57 областях, где будет выполняться интерполирование, выбиралась точка  $T_i$ , ближайшая к интерполируемой точке  $P_i$ . И для нее выполнялось интерполирование, при разных значениях параметров  $a$  и  $S_{sr}$  (4). Полученное значение сравнивалось с отметкой точки  $T_i$ , и по отклонениям вычислялось среднее квадратическое отклонение для каждой поверхности.

### 3.3 Статистическое моделирование оптимальных параметров коллокации

Статистическое моделирование показало, что точность аппроксимации практически не зависит от параметра  $a$  и сильно зависит от параметра  $b$  (см. формулы (3.4) и (3.5)), и соответственно,  $S_{sr}$ , т. е. размеры окрестности и число попавших в нее точек оказывают значительное влияние на точность аппроксимации, на рисунке 3.17 показан график зависимости среднего квадратического отклонения от размера области выборки. Число попавших в область выборки точек зависит от плотности точек для данной поверхности (рисунок 3.18).

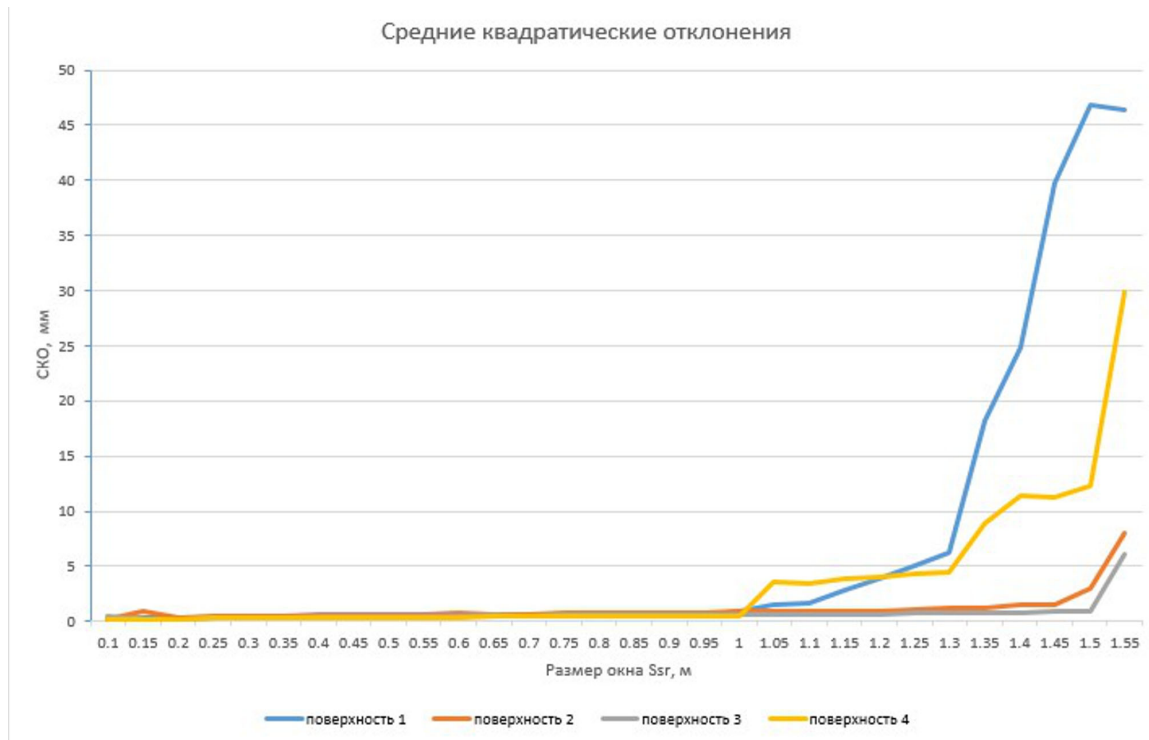


Рисунок 3.17 – Зависимость СКП интерполирования отметки от размера окна

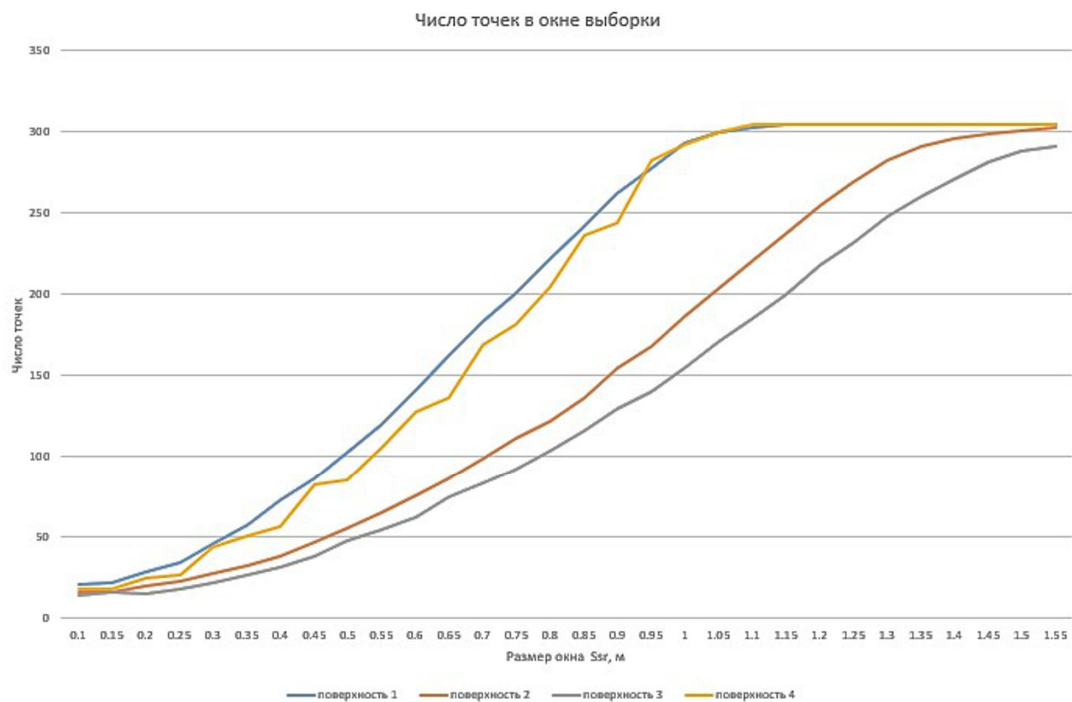


Рисунок 3.18 – Зависимость числа точек выборки от размера окна

Как видно из графиков на рисунке 3.17, наблюдается небольшое увеличение СКП интерполирования на отрезке 0,1–0,2 м, связанное с небольшим числом точек,

попавших в окно выборки (см. рисунок 3.18). Возможно, в небольшую выборку попали точки с большими отклонениями.

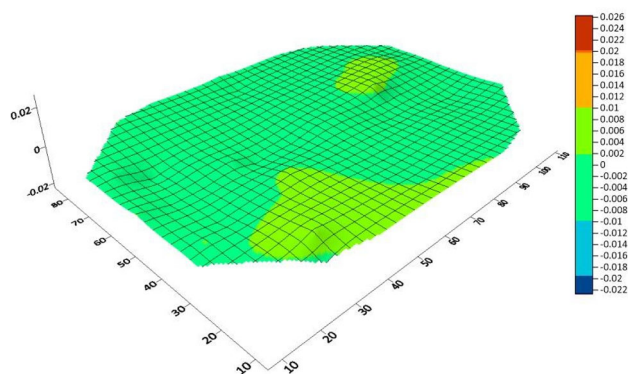
При размерах окна выборки от 0,2 до 1 м идет участок, на котором СКП интерполирования не превышает 1 мм, а затем идет возрастание СКП интерполирования, связанное с тем, что такая выборка точек криволинейной поверхности не может аппроксимироваться линейно-кусочной поверхностью интерполяционной функции коллокации. Поэтому для дальнейшей обработки был выбран размер  $S_{sr} = 0,50$  м, при котором СКП определения интерполированных отметок для всех поверхностей составляет менее 1 мм, а число точек, попавших в выборку, составляет от 50 до 100, что обеспечивает усреднение больших отклонений.

#### 3.4 Фильтрация модели поверхности перекрытия методом коллокации

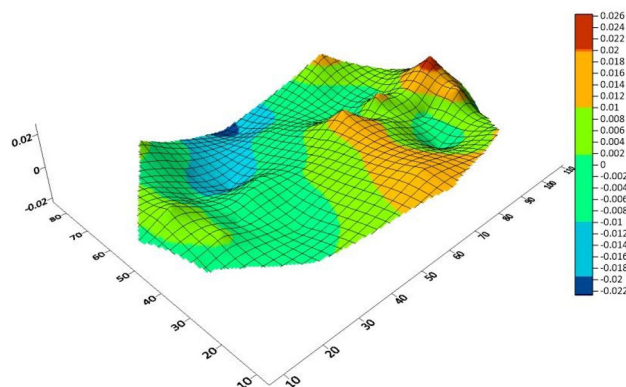
После подбора оптимальных параметров аппроксимации было выполнено интерполирование отметок по поверхности кровли для 57 точек, координаты которых определены при геодезическом мониторинге, и построены поверхности разниц между соответствующими съемками из геодезического мониторинга и аэрофотосъемки БПЛА. Если реакция нижнего ряда оболочки (геодезический мониторинг) и внешней поверхности кровли (аэросъемки БПЛА) одинакова, то мы должны получить примерно одинаковые поверхности деформаций. Однако из-за разницы реакции верхней оболочки перекрытия и нижней части пространственной оболочки, а также температурных, ветровых деформаций они могут достаточно сильно отличаться. А главным фактором, определяющим отличие, является более низкая точность аэрофотосъемки БПЛА и ее обработки (точность работы алгоритма SIFT).

Так как деформации между смежными съемками, по данным геодезического мониторинга, незначительные и лежат в пределах  $\pm 3$  мм, то для построения поверхностей деформаций брались не смежные даты съемки, деформации которых соизмеримы с точностью определения отметок при геодезическом мониторинге, а между первой и каждой последующей датой съемки (рисунок 3.19).

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

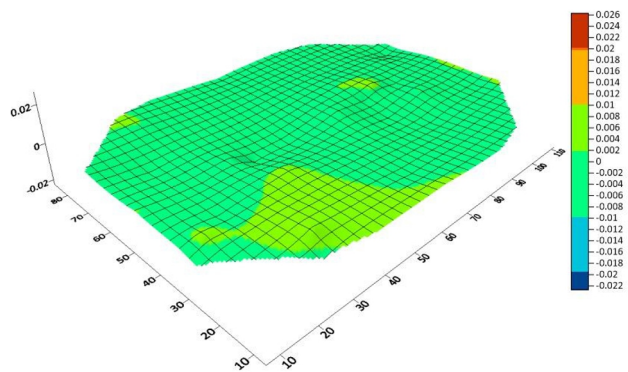


а) по данным геодезических определений

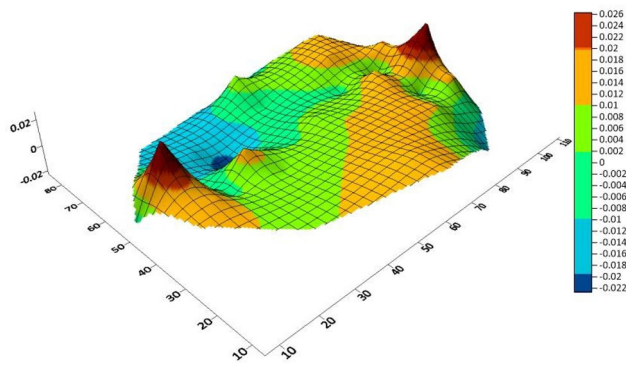


б) по данным аэросъемки БПЛА

Между датами 15.08.2019–15.03.2020 (поверхность 3 – поверхность 1)

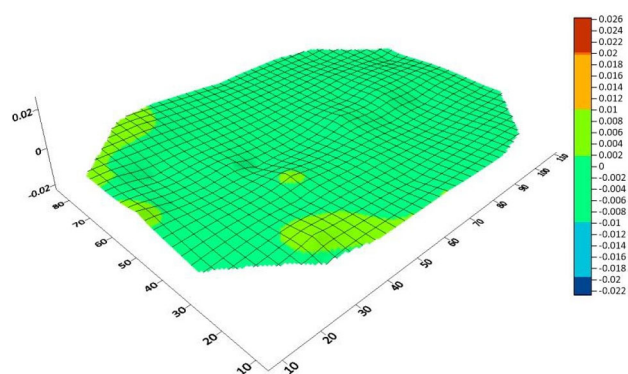


в) по данным геодезических определений

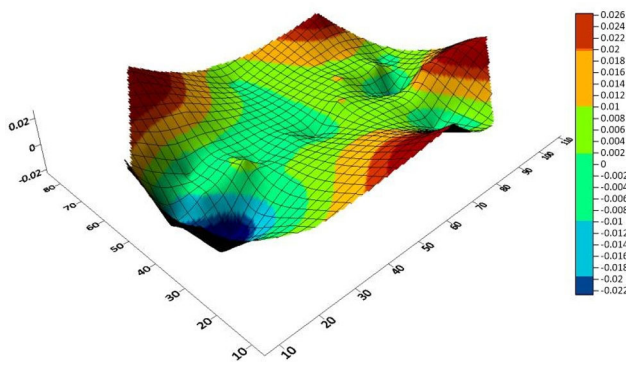


г) по данным аэросъемки БПЛА

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



д) по данным геодезических определений



е) по данным аэросъемки БПЛА

Рисунок 3.19 – Поверхности деформаций, интерполированные методом коллокации

Сравнение поверхностей деформаций, полученных из геодезического мониторинга и аэросъемки БПЛА 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.

### 3.5 Анализ деформаций поверхности методом медианной фильтрации

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 большие отклонения от этой поверхности [7, 72]. Спецификой медианной фильтрации является ее избирательность по отношению к данным, которые сильно отличаются от соседних.

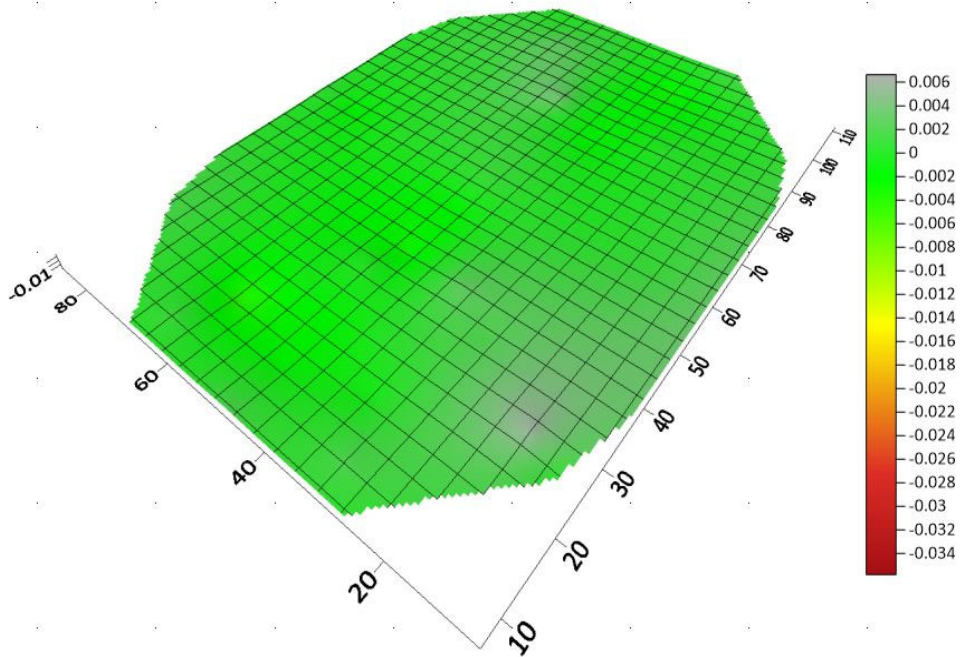
Для создания медианного фильтра для интерполяции по оси  $Z$  делаем выборку окном с некоторым размером  $L$ , симметричным относительно точки интерполирования  $k$ , и получаем множество точек выборки

$$z_k = \text{med}(z_{k-n}, z_{k-n+1}, \dots, z_{k-1}, z_k, z_{k+1}, \dots, z_{k+n-1}, z_{k+n}), \quad (3.10)$$

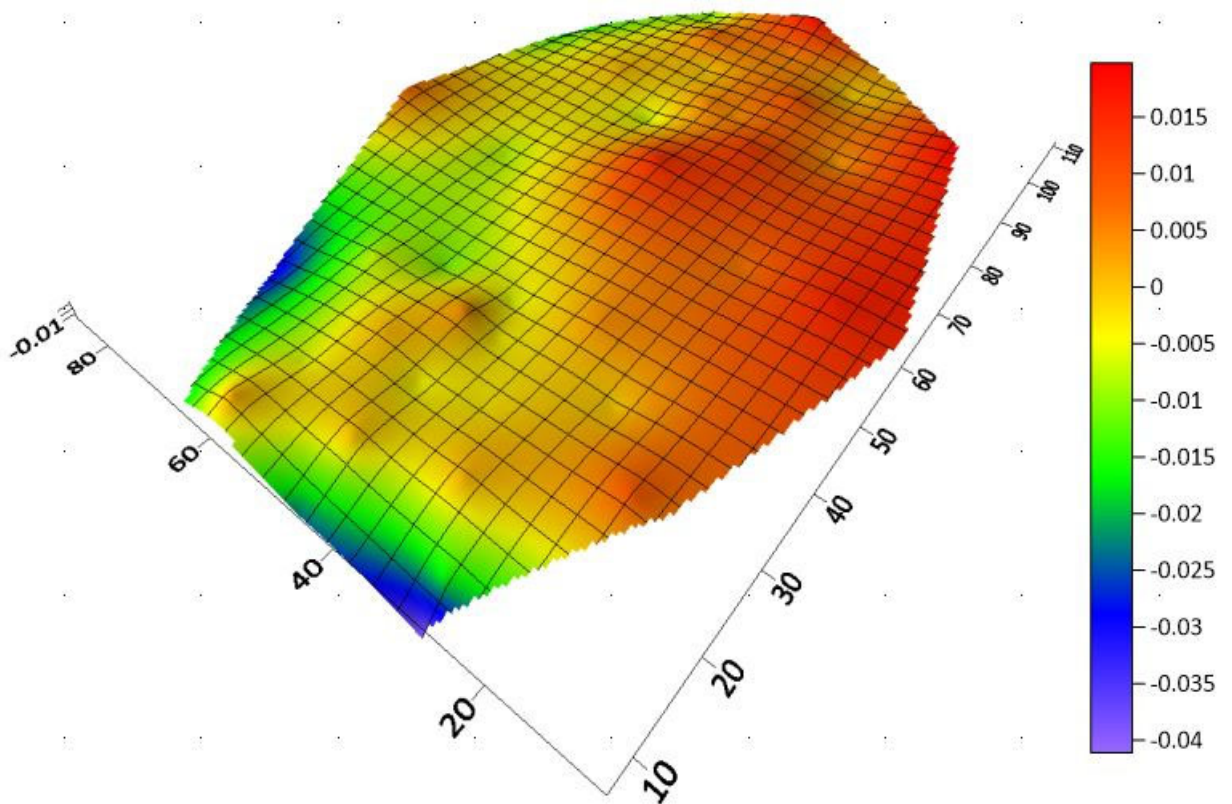
Это множество представляет собой решетку [13], т. е. упорядоченное по возрастанию множество. Средний элемент множества, при нечетном числе точек выборки, и есть средняя отметка для этой выборки. Данные интерполяции с помощью медианного фильтра приведены в приложении И, поверхности деформаций, построенные по этим данным, показаны на рисунке 3.20.

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

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

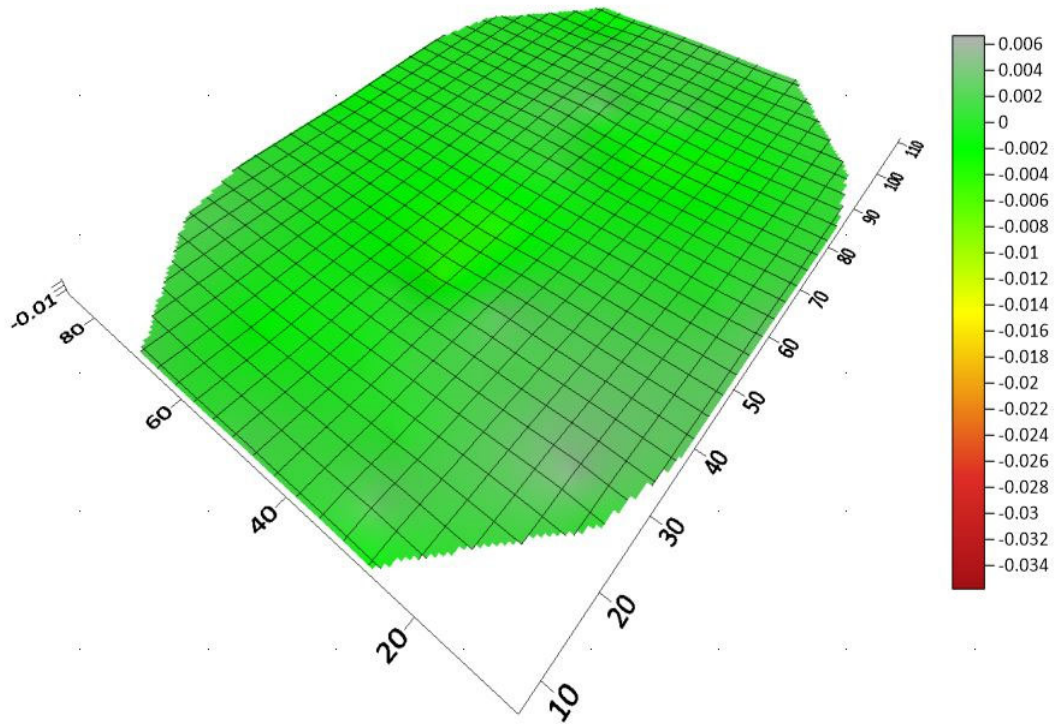


а) по данным геодезических определений

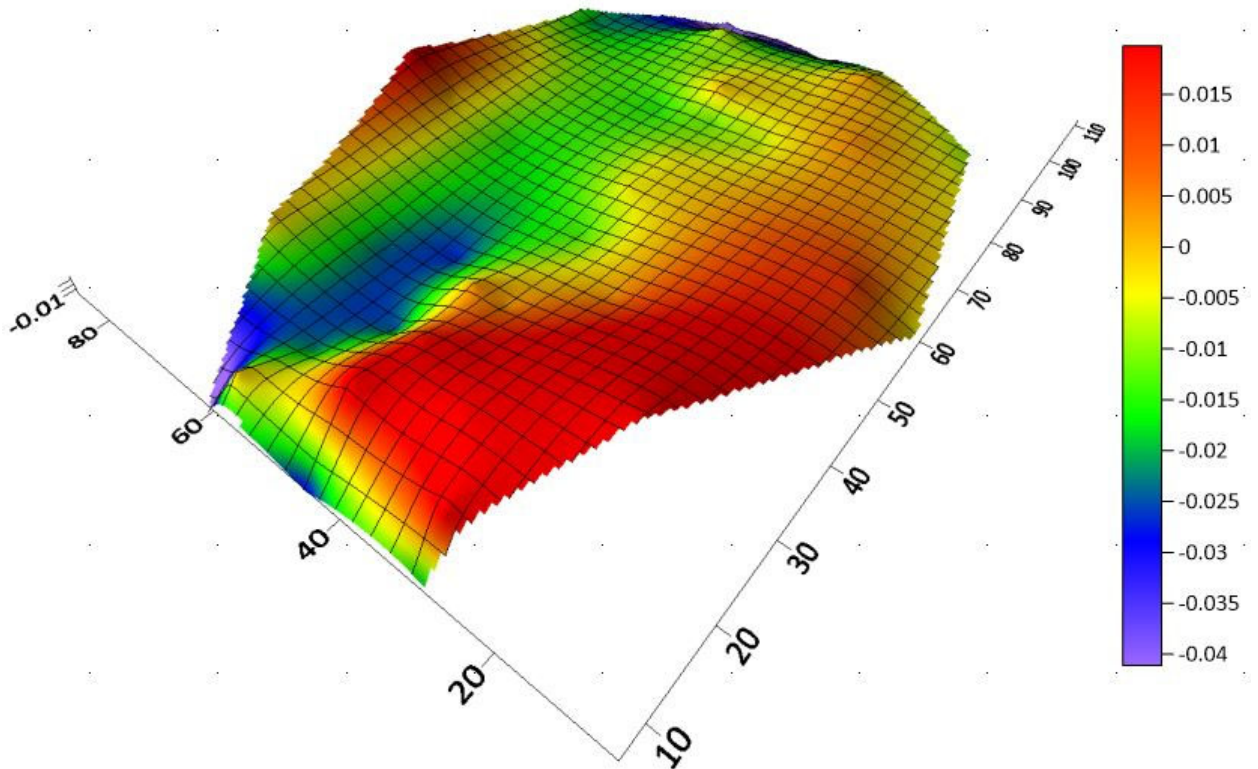


б) медианная фильтрация

Между датами 15.08.2019–15.03.2020 (поверхность 3 – поверхность 1)

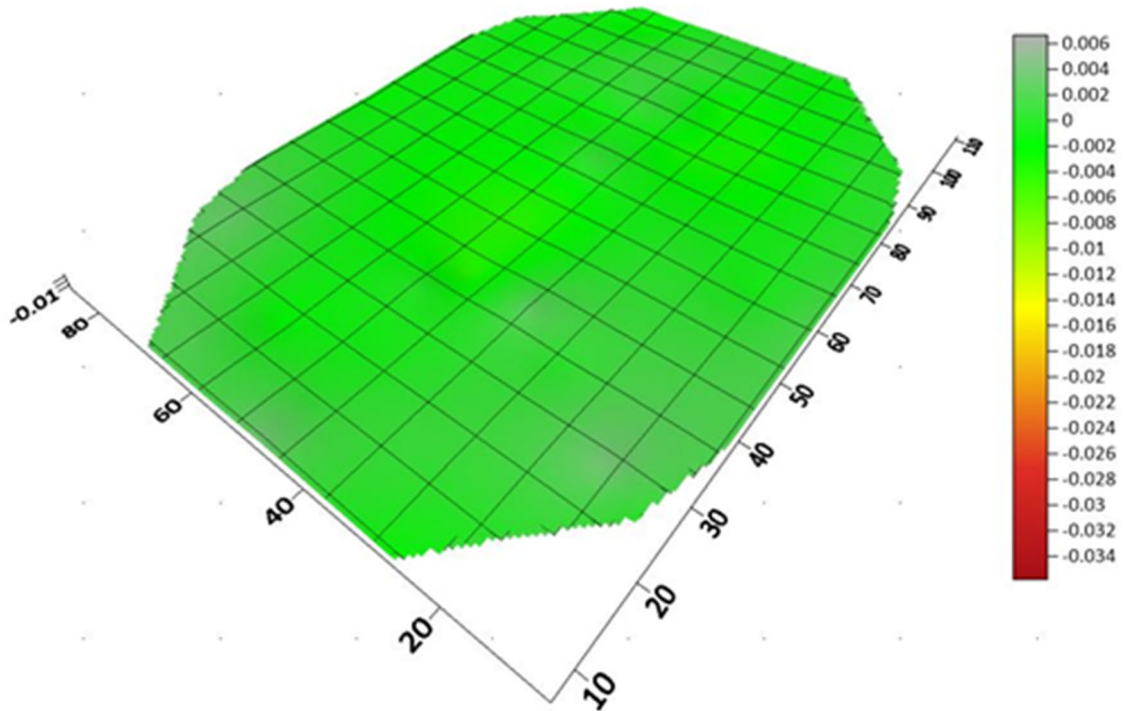


в) по данным геодезических определений

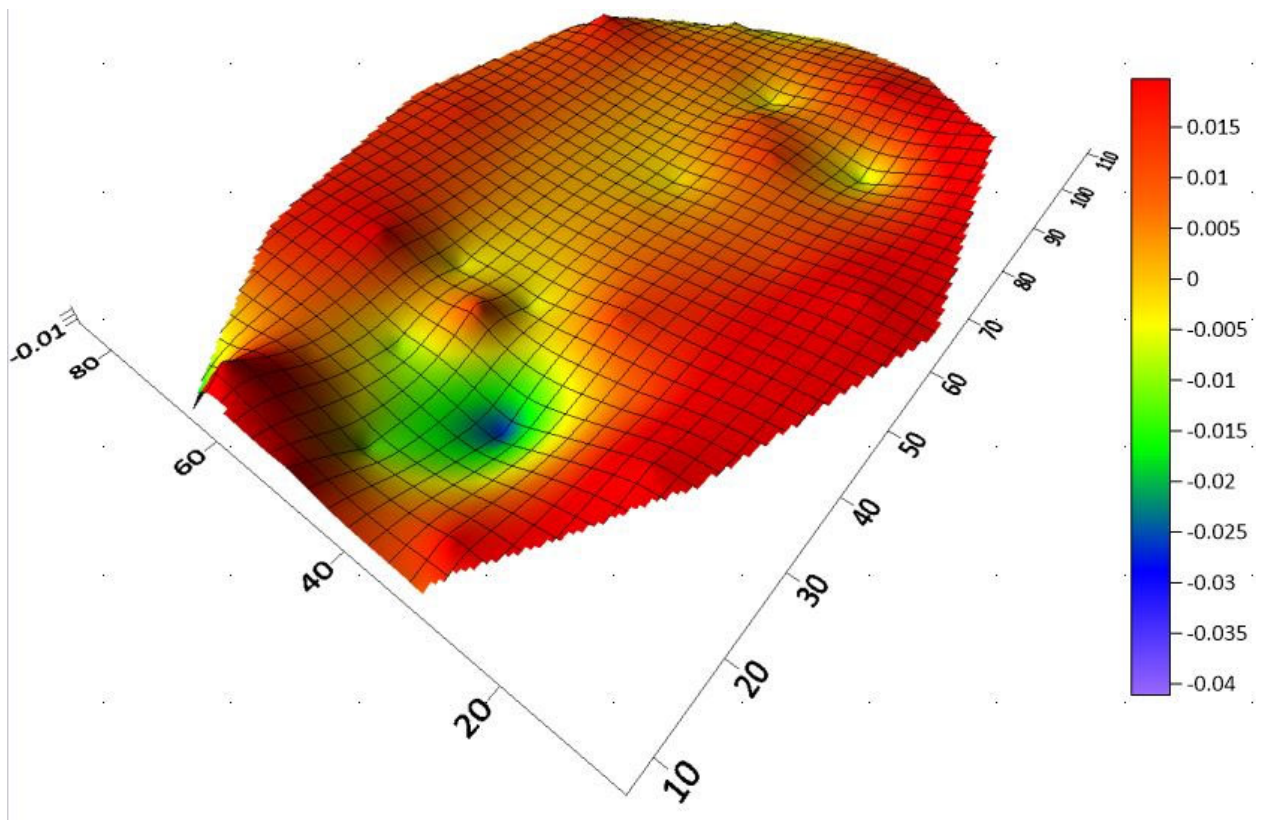


г) медианная фильтрация

Между датами 15.03.2020–15.08.2020 (поверхность 4 – поверхность 1)



д) по данным геодезических определений



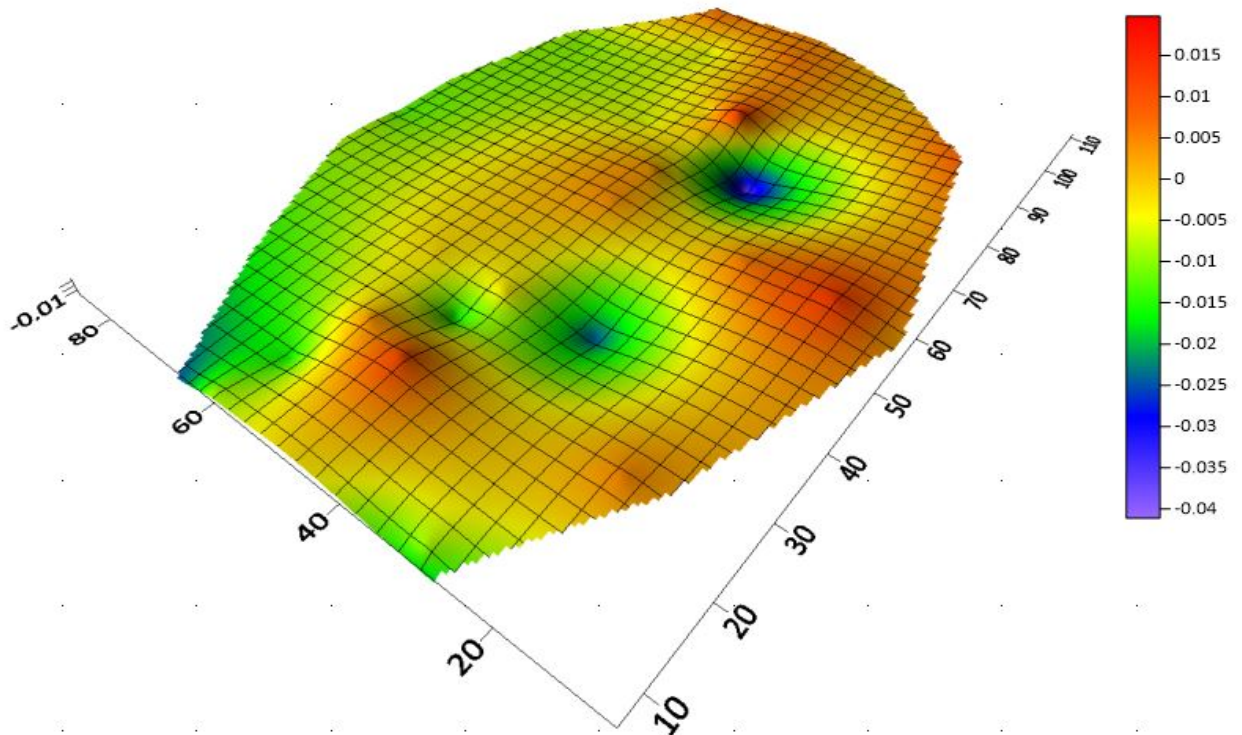
е) медианная фильтрация

Рисунок 3.20 – Сравнение разностей поверхностей

### 3.6 Интерполяция сферической функцией

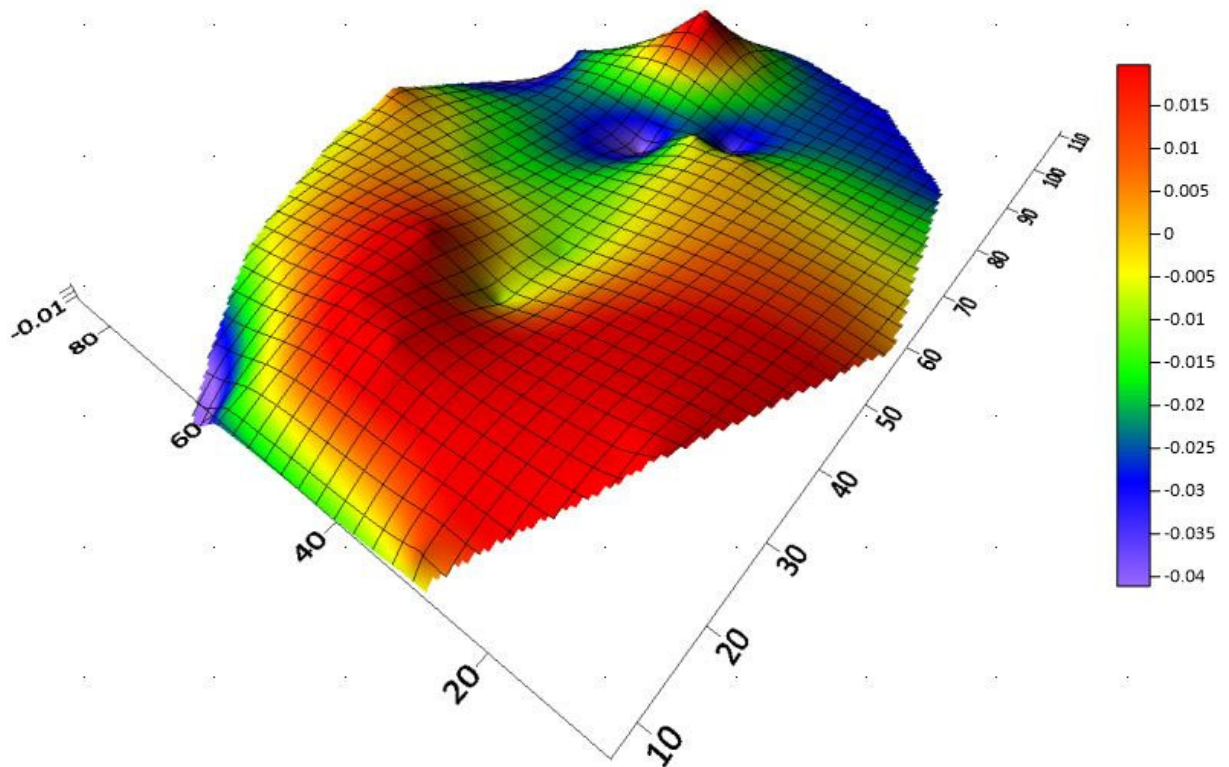
Если для интерполяции отметок на перекрытии в точках геодезического мониторинга использовать функцию сферы с известным радиусом, как это описано в п. 2.3 (2.1) и теми же параметрами окна выборки, получим поверхности деформаций, показанные на рисунке 3.21. Анализ вычислительного процесса показал, что точность определения параметров сферы невысокая из-за больших отклонений. Особенно сильно это проявляется, если в области выборки попадают точки из мест сопряжения сферических поверхностей с разными радиусами, кроме того, минимальный размер окна выборки в совокупности с большими отклонениями модели поверхности от сферы приводит к неоднозначности определения центра сферы. Для борьбы с этим был выполнен эксперимент с увеличенным размером окна выборки.

Между датами 15.08.2019–03.12.2019 (поверхность 2 – поверхность 1)  
Интерполирование сферой,  $L = 4$  м



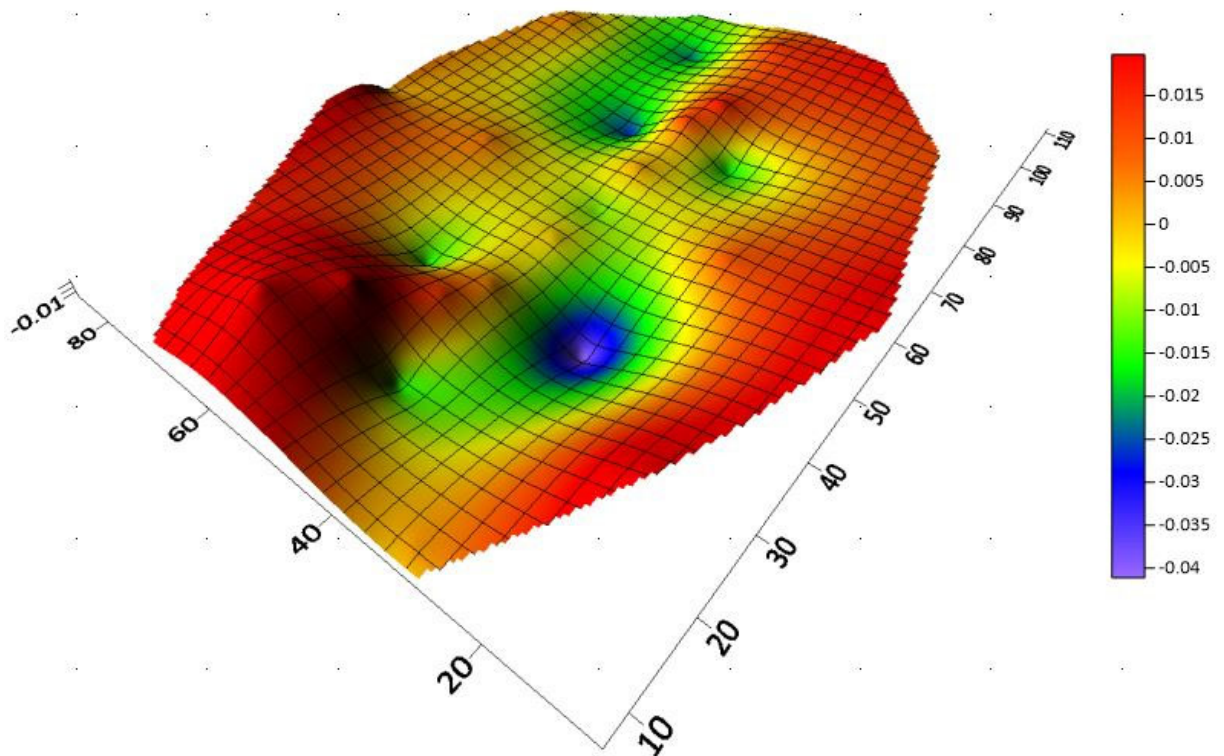
а) поверхность 2–1

Между датами 15.08.2019–15.03.2020 (поверхность 3 – поверхность 1)



б) поверхность 3–1

Между датами 15.03.2020–15.08.2020 (поверхность 4 – поверхность 1)



в) поверхность 4–1

Рисунок 3.21 – Поверхности деформаций при интерполяции сферой

Так как точность определения параметров сферы зависит от размеров дуги, которая попадает в область выборки, были выполнены исследования по интерполированию с различными размерами области выборки.

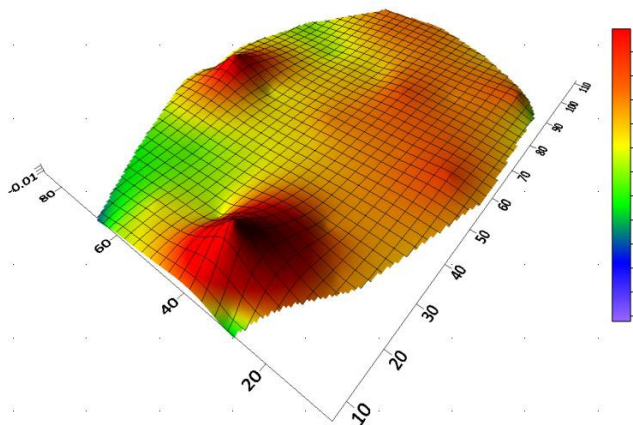
Первое моделирование было выполнено для интерполирования сферой с заданным фиксированным радиусом и различными размерами окна выборки, результаты исследований в виде поверхностей деформаций представлены на рисунке 3.22.

Второе исследование было выполнено при ширине выборки  $L = 8$  м, но с поиском радиуса, т. е. в системе уравнений (2.1) радиус является неизвестной величиной. Результаты показаны на рисунке 3.23. СКО определения радиуса лежит в диапазоне от 14 до 84 мм (см. таблицу 2.5), что превышает расхождение между поверхностями деформаций, изменение между которыми варьируется от +15 до -40 мм, т. е. диапазон составляет около 55 мм.

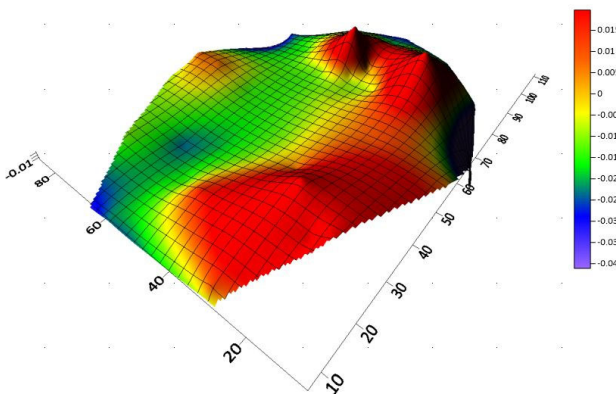
Анализ результатов исследований показывает, что поверхности деформаций, созданные с использованием сферической интерполяции, значительно отличаются от эталонных поверхностей деформаций, полученных из геодезического мониторинга.

Невысокая точность сферической интерполяции связана с тем, что даже при размерах выборки в 8 м в угловом выражении для радиуса 33,73 м это составляет всего  $13,6^\circ$ . Исследования, проведенные для определения точности параметров цилиндра [37] методом имитационного моделирования, показывают, что для надежного определения параметров окружности или цилиндра с точностью  $\sim 2$  мм необходимо (точность измерения расстояния лазерным дальномером), чтобы дуга, по которой располагаются измерения, была не менее  $60^\circ$ . А в нашем случае и точность определения координат точек, попавших в выборку, гораздо ниже (п. 2.3). Поэтому при небольших размерах выборки точность интерполирования сферой будет недостаточной, а при больших размерах в область выборки будут попадать точки с поверхностями с другими радиусами кривизны.

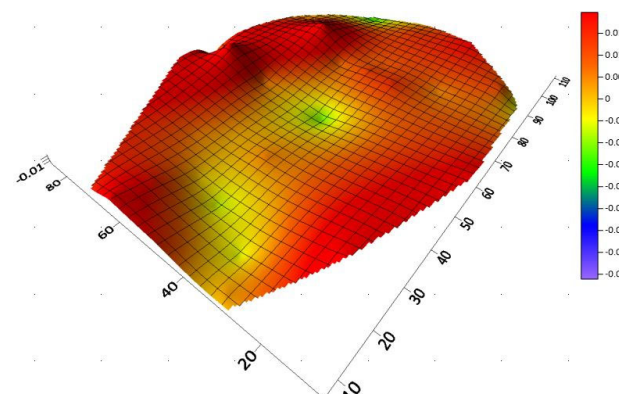
Между датами 15.08.2019–03.12.2019  
(поверхность 2 – поверхность 1)



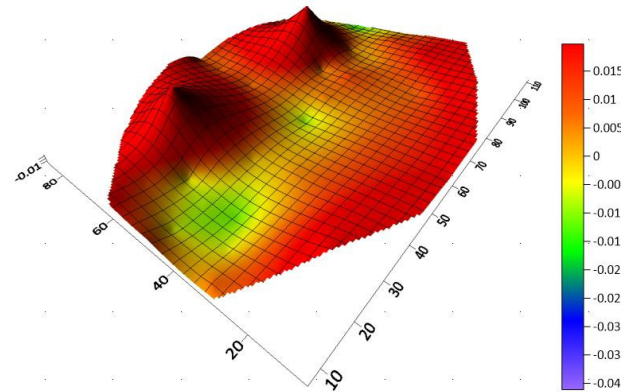
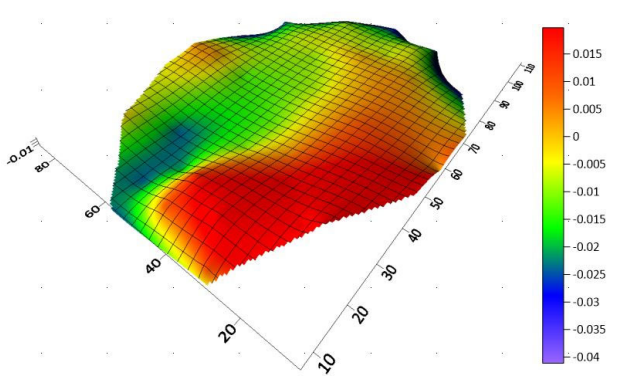
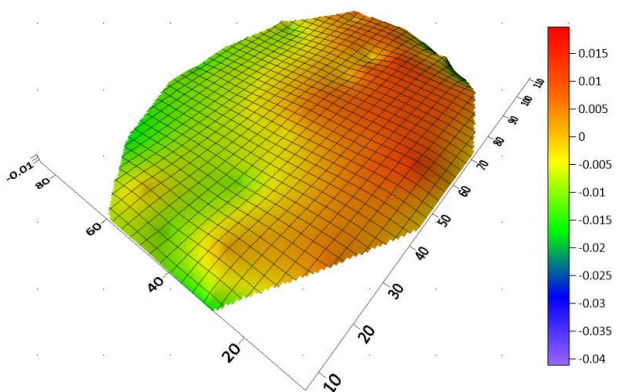
Между датами 15.08.2019–15.03.2020  
(поверхность 3 – поверхность 1)



Между датами 15.03.2020–15.08.2020  
(поверхность 4 – поверхность 1)



Ширина выборки  $L = 4$  м

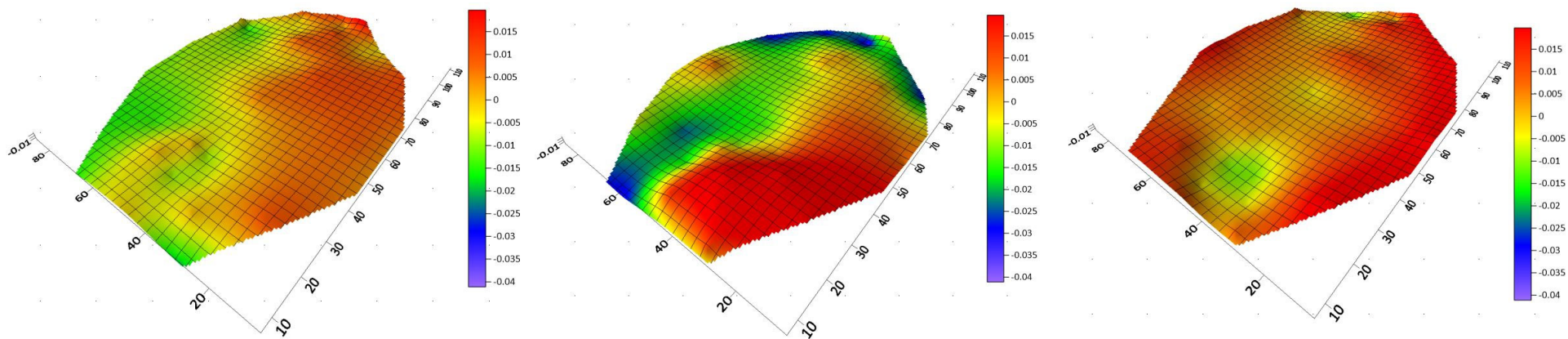


Ширина выборки  $L = 6$  м

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

Между датами 15.08.2019–15.03.2020  
(поверхность 3 – поверхность 1)

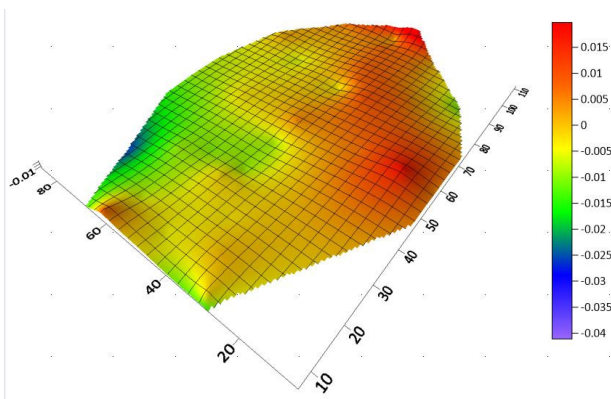
Между датами 15.03.2020–15.08.2020  
(поверхность 4 – поверхность 1)



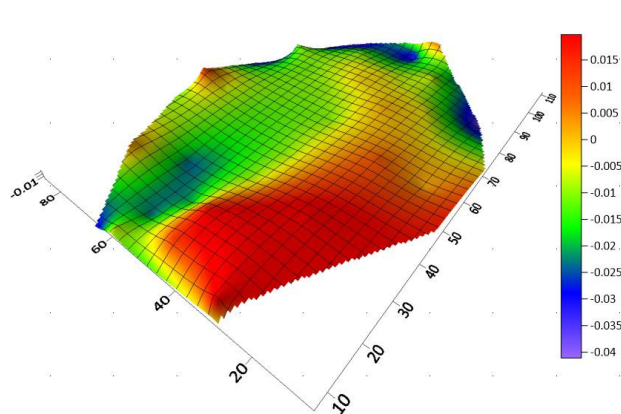
Ширина выборки  $L = 8$  м

Рисунок 3.22 – Поверхности деформаций сферической интерполяции при различных размерах выборки

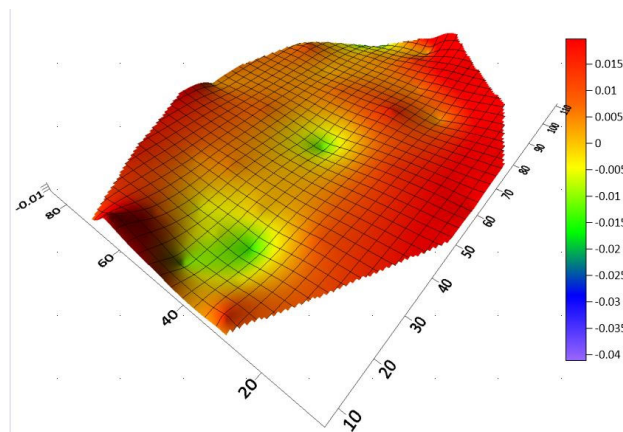
Между датами 15.08.2019–03.12.2019  
(поверхность 2 – поверхность 1)



Между датами 15.08.2019–15.03.2020  
(поверхность 3 – поверхность 1)



Между датами 15.03.2020–15.08.2020  
(поверхность 4 – поверхность 1)



Ширина выборки  $L = 8$  м

Рисунок 3.23 – Поверхности деформаций сферической интерполяции при поиске радиуса

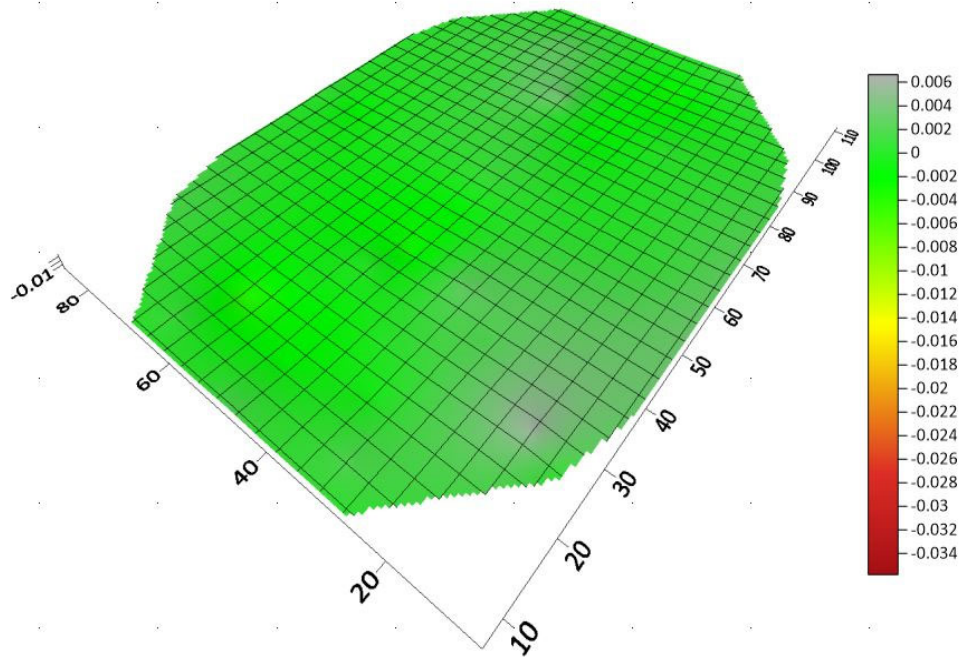
### 3.7 Исследование реакции перекрытия

Для анализа совпадений поверхностей деформаций по данным геодезического мониторинга и аэросъемки БПЛА был выполнен эксперимент. В день производства аэросъемки БПЛА выполнялись геодезические измерения 16 контрольных точек на поверхности перекрытия (см. п. 2.1 и рисунок 2.4). По данным измерений контрольных точек (приложение Ж) определены разности отметок этих точек на разные даты и построены поверхности деформаций по этим данным (рисунок 3.24). Область поверхности перекрытия, охваченная контрольными точками, меньше поверхности, которая исследуется геодезическим мониторингом, и охватывает только центральную часть поверхности кровли. Это связано с условиями безопасных измерений контрольных точек. Кроме того, из-за пандемии были выполнены только три измерения контрольных точек.

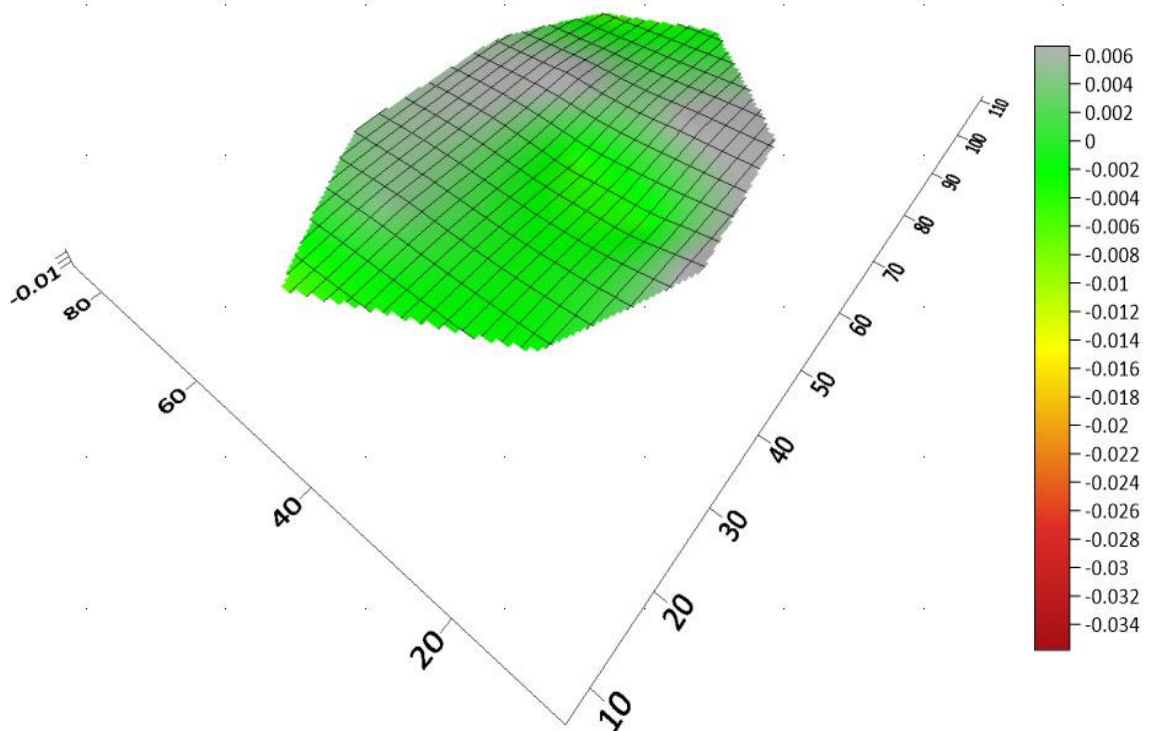
Визуальный анализ поверхностей показывает, что разность отклонений по данным геодезического мониторинга и по данным контрольных измерений довольно хорошо совпадают. Статистические показатели разностей поверхностей (таблица 3.7) показывают, что диапазон значений отклонений для геодезического мониторинга, который в сравнении принимается за эталон, лежит в пределах  $-5...+5$  мм, а для контрольных измерений  $-10...+10$  мм; средние квадратические отклонения разностей для геодезического мониторинга и контрольных точек поверхности составляют  $\pm 2$  мм и  $\pm 6,6$  мм соответственно.

Поскольку точность определения координат точек внутри помещения и снаружи примерно одинакова, 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  $\pm 5$  мм.

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

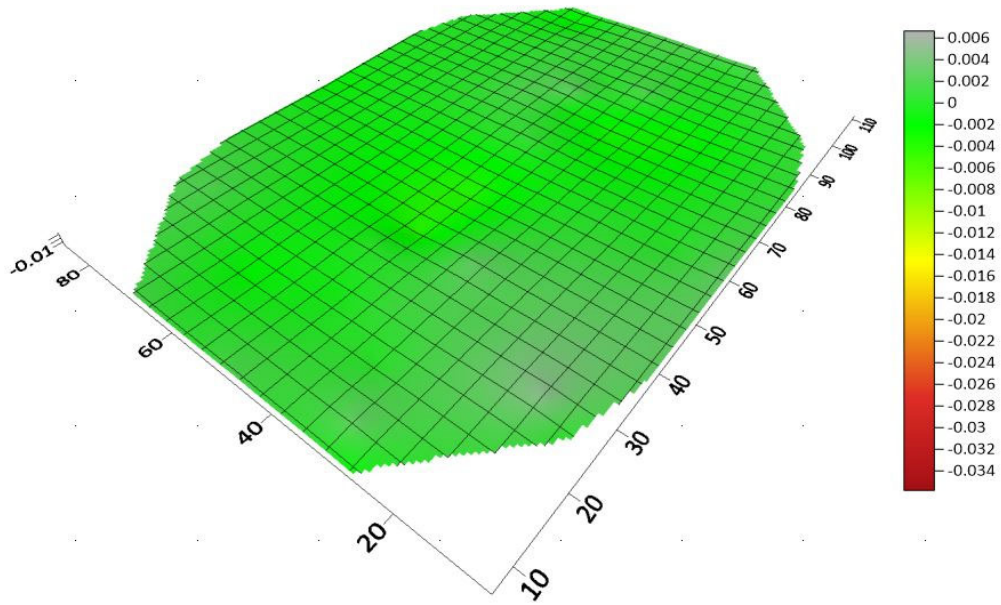


а) по данным геодезических определений внутри помещения

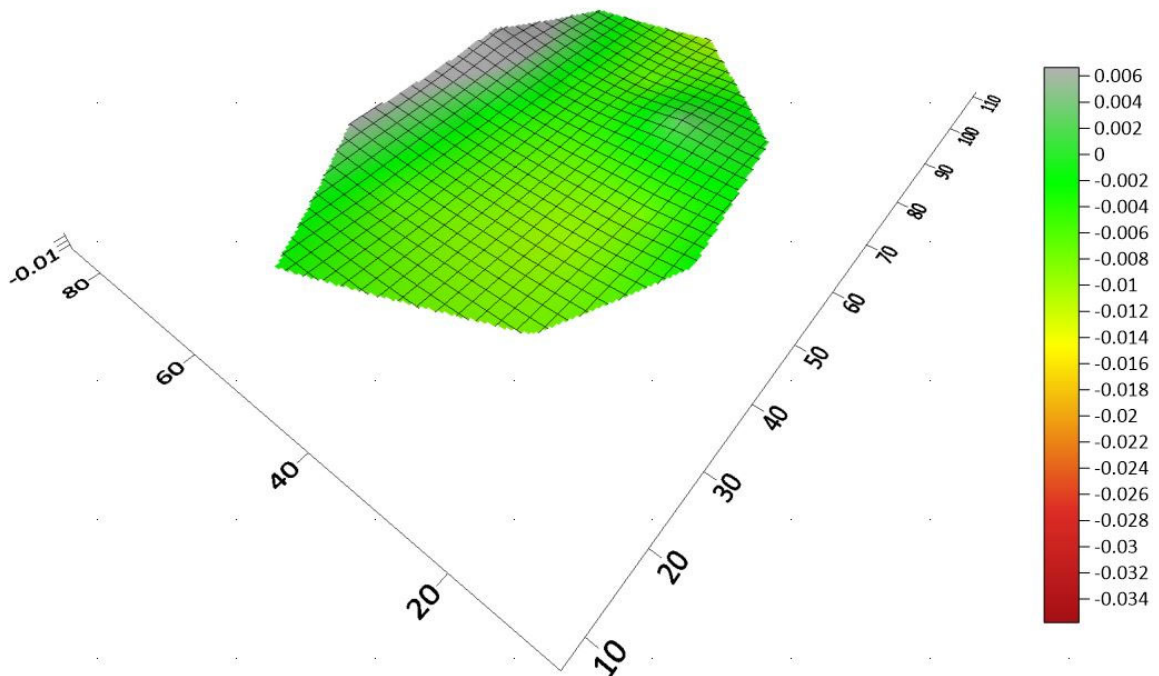


б) по данным геодезических определений на внешней поверхности перекрытия

Между датами 15.08.2019–15.03.2020 (поверхность 3 – поверхность 1)



в) по данным геодезических определений внутри помещения



г) по данным геодезических определений на внешней поверхности перекрытия

Рисунок 3.24 – Сравнение поверхностей деформаций

Таблица 3.7 – Статистические показатели поверхностей деформаций

Отклонения	Геодезический мониторинг		Контрольные точки	
	Поверхность 2-1	Поверхность 3-1	Поверхность 2-1	Поверхность 3-1
Min, м	-0.004	-0.004	-0.007	-0.011
Max, м	0.006	0.005	0.01	0.017
СКО, м	0.0019	0.0020	0.0059	0.0074

### 3.8 Анализ результатов и выводы по разделу 3

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

Снижение точности моделей подтверждается геодезическими измерениями на 16 контрольных точках перекрытия. Если выполнить интерполяцию поверхностей перекрытия методом коллокации в местах с координатами контрольных точек и теми же параметрами интерполирования и сравнить с геодезическими измерениями, то получим результаты, подтверждающие, что первые две поверхности лучше описывают реальную поверхность перекрытия, чем третья поверхность (таблица 3.8). В таблице 3.8 приведено только среднее квадратическое отклонение по высоте.

Таблица 3.8 – Средние квадратические отклонения на контрольных точках

Номер	Дата	Среднее квадратическое отклонение, мм
1	15.08.2019	6,2
2	03.12.2019	8,9
3	15.03.2020	16,4

Сравнение изменений нижней поверхности пространственной оболочки, которая исследуется при геодезическом мониторинге, и верхней поверхности перекрытия

тия, которая исследуется при аэрофотосъемке БПЛА, показало, что разность поверхностей не превышает 40 мм для линейной интерполяции оптимальной плоскостью с дополнительным условием (таблица 3.9), что составляет 15 % от допустимых деформаций для Дворца водных видов спорта.

Таблица 3.9 – Сравнение диапазонов отклонений от эталонной поверхности

№	Метод интерполяции	Диапазон, мм	Максимальное значение, мм	Минимальное значение, мм
1	Эталон (геодезический мониторинг)	10	+4	-6
2	Реакция перекрытия	10	+5	-5
3	Поверхность полученная по алгоритму SIFT	160	+80	-80
4	Линейная (оптимальной плоскостью с условием)	40	+6	-34
5	Коллокация	48	+26	-22
6	Медианная	50	+15	-35
7	Сферой	55	+15	-40

Разные методы фильтрации геопространственной информации, полученной по алгоритму SIFT, дают различную точность интерполяции, так, линейная фильтрация оптимальной плоскостью с дополнительным условием лучше описывает деформации поднятия, оседания лучше описываются интерполяцией коллокации. Если учесть, что в разнице поверхностей между эталонной и интерполированной содержится еще и реакция перекрытия, то собственно разница поверхностей уменьшится еще на 10 мм.

Конечно, для учета реакции перекрытия и сравнения деформаций нижней поверхности пространственной оболочки и поверхности перекрытия необходимо создать модель, которая учитывала бы температурные деформации, ветровую нагрузку и особенности конструкции. Однако, если за начальное измерение взять наружную поверхность и отслеживать ее изменения во времени с оптимально подобранными параметрами аэрофотосъемки БПЛА и обработки, то возможно добиться требуемой точности измерений для экспресс-оценки состояния зданий и сооружений.

В целом можно отметить, что автоматические методы обработки аэрофото-съемки по алгоритму SIFT требуют дополнительных исследований и могут давать необходимую точность для оценки состояния зданий и сооружений после крупных сейсмических событий, когда есть опасность для нахождения людей внутри. Требуются дополнительные исследования алгоритма и фильтрации для повышения точности определения деформаций.

## 4 СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПЕРЕКРЫТИЯ

### 4.1 Структура системы мониторинга Дворца водных видов спорта

Несмотря на недостаточную пока точность моделей, созданных по алгоритму SIFT, использовать эти модели для экспресс-оценки состояния перекрытий можно, так как при ошибке определения отметок в 40 мм мы можем достоверно определять величины критических деформаций в 266 мм с ошибкой не более 15 %. Поэтому для перекрытия Дворца водных видов спорта в городе Душанбе необходимо продолжить выполнение геодезического мониторинга, который в системе мониторинга будет выполнять роль эталонных измерений, так как этот метод является наиболее точным. Одновременно с измерениями геодезического мониторинга необходимо продолжить выполнение аэросъемки БПЛА, варьируя различные варианты съемки и обработки. Очень интересно было бы провести съемку БПЛА с установленным на борту приемником ГНСС с режимом RTK, что позволило бы получать координаты центров фотографирования с точностью 5–10 мм. А это бы позволило уточнить фотограмметрическую обработку снимков, и соответственно масштабнo-инвариантная трансформация признаков тоже выполнялась бы точнее.

В общем структурную схему методов системы мониторинга можно укрупненно представить в виде следующей схемы (рисунок 4.1). На этой схеме видно, что усовершенствование методики заключается в добавлении блока фильтрации, позволяющего уменьшить влияние больших отклонений, которые имеются после работы алгоритма SIFT.

Обработка аэросъемки 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. При большом числе измерений (съемок) точность моделирования будет улучшаться.

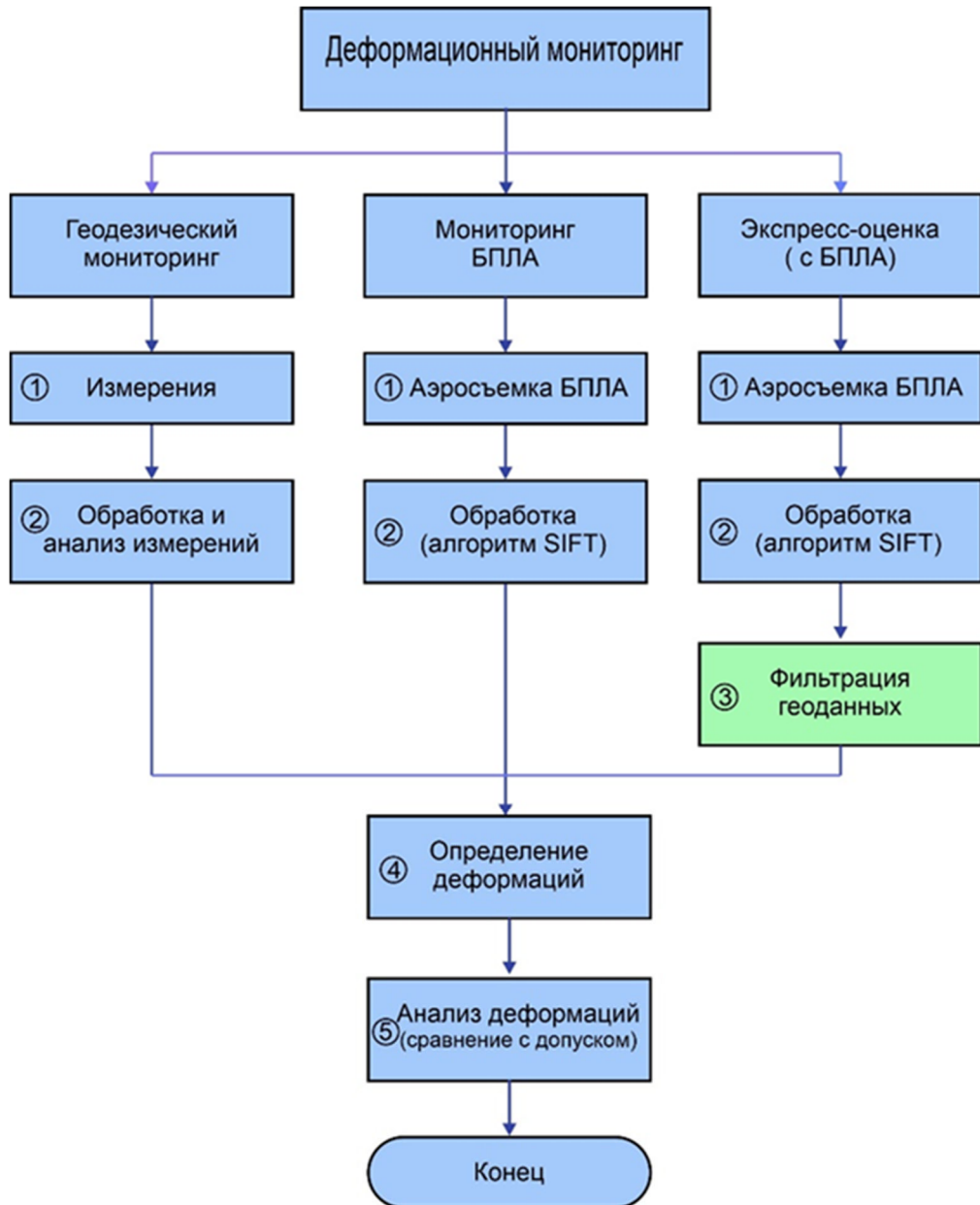


Рисунок 4.1 – Схема методов мониторинга

Подготовленные модели, после анализа их корректности, записываются в базу данных (БД). Информация, накапливаемая в БД, может использоваться для уточнения создаваемых моделей.

На рисунке 4.2 показана структурная схема предлагаемой системы мониторинга. Блоки верхнего уровня соответствуют измерениям: геодезического мониторинга, аэросъемки БПЛА 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.

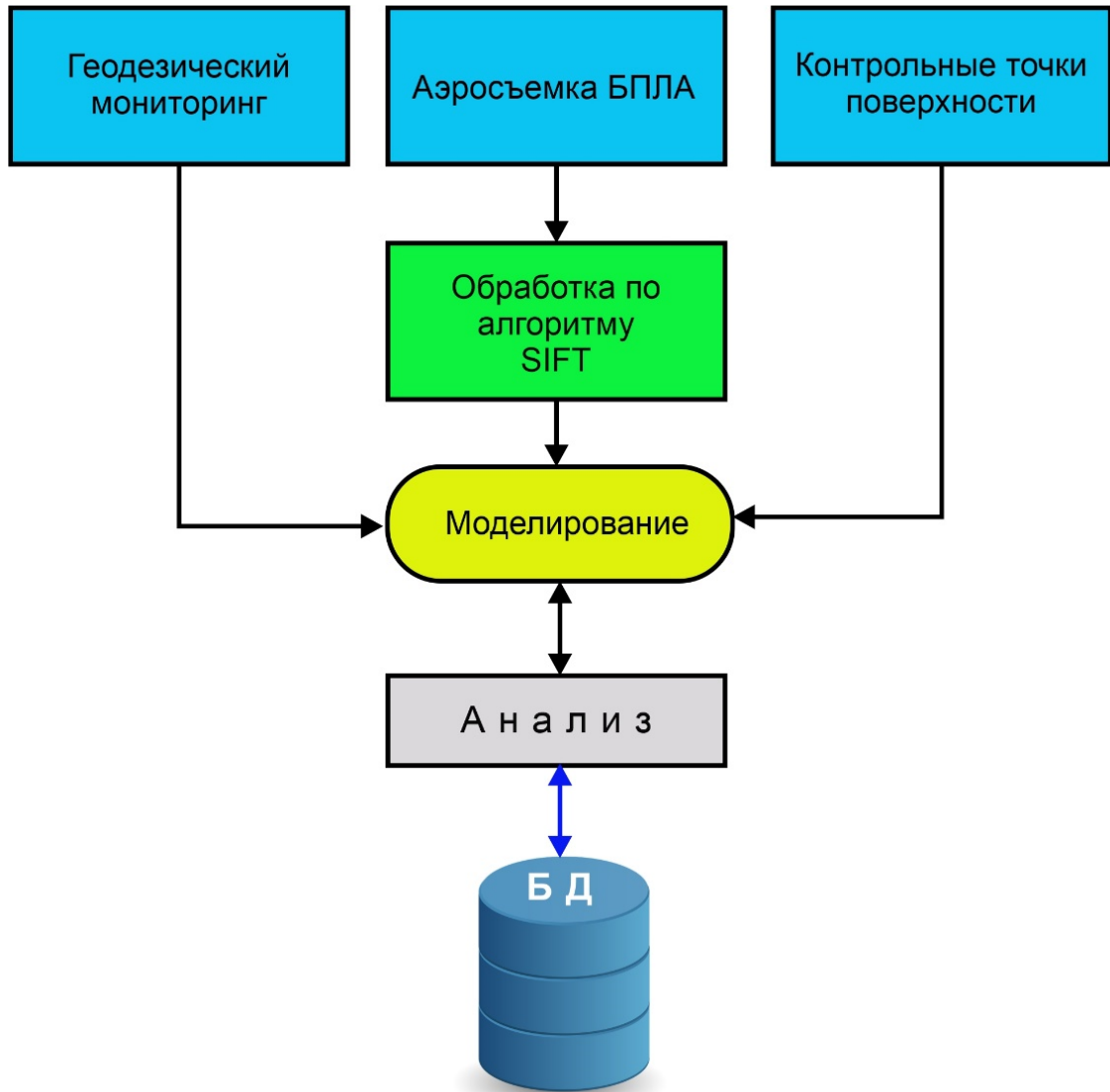


Рисунок 4.2 – Структурная схема системы мониторинга

В случае наступления крупного сейсмического события ( $> 6$  баллов) можно выполнить только аэросъемку БПЛА и сделать экспресс-оценку состояния перекрытия. Если вертикальные деформации превышают допустимые  $266 \pm 40$  мм, необходимо предпринять специальные меры обеспечения безопасности для этого сооружения. Если деформации меньше допуска, то после визуального обследования можно вернуться к стандартной модели мониторинга.

## 4.2 Схема базы данных системы мониторинга

Для хранения информации в системе мониторинга планируется использовать реляционную базу данных со стандартным интерфейсом на языке SQL (SQLite) (рисунок 4.3). Главная таблица – таблица дат съемки, которая связана соотношением «один ко многим» к подчиненным таблицам.

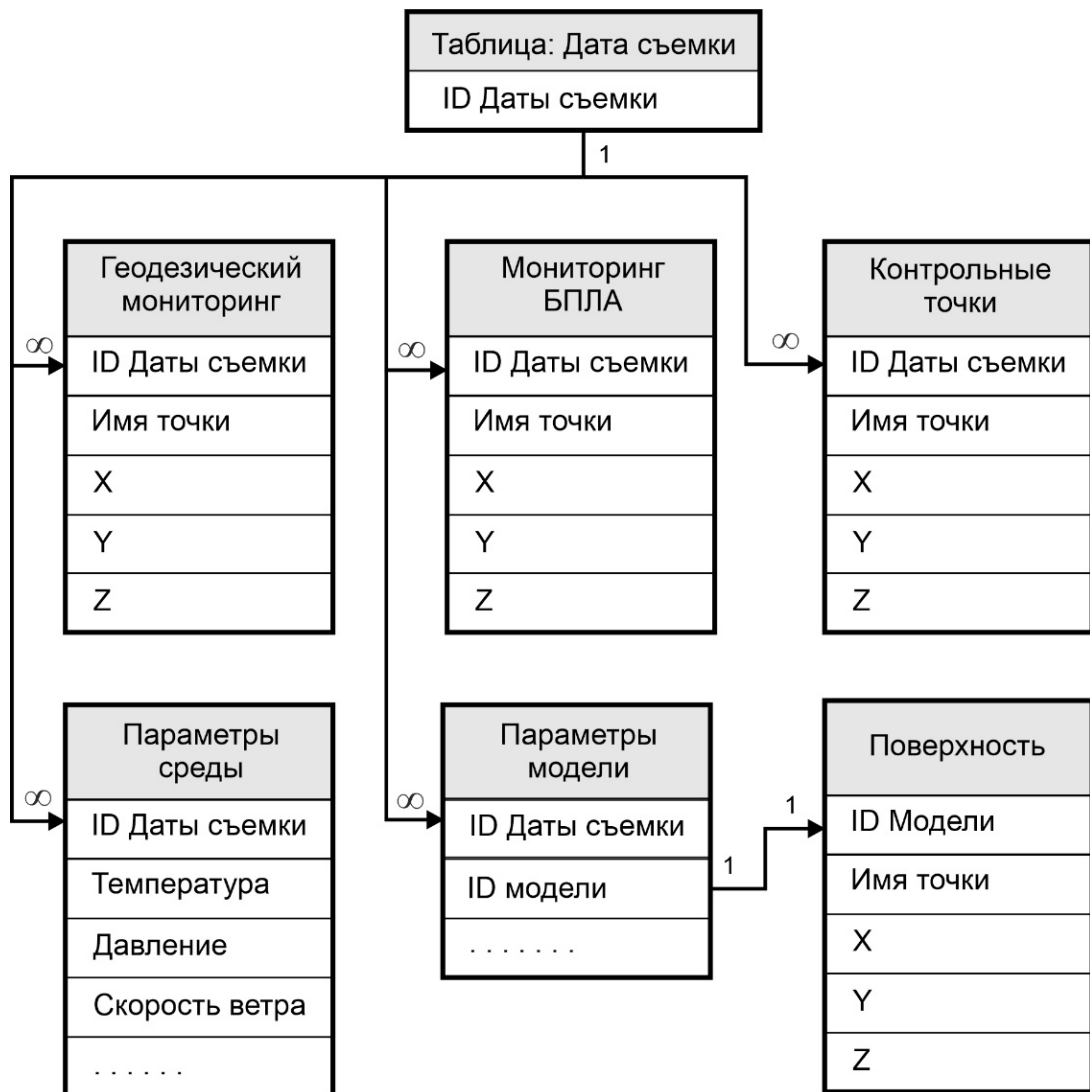


Рисунок 4.3 – Схема реляционной БД системы мониторинга

Измерения геодезического мониторинга, мониторинга с применением БПЛА и измерения контрольных точек имеют разную внутреннюю структуру и плотность, поэтому хранятся в отдельных таблицах как исходные данные. Производные

от этих данных, после фильтрации и моделирования, записываются в БД в виде регулярных сеток (поверхностей). Эти поверхности пригодны для дальнейшего анализа горизонтальных и вертикальных деформаций, к ним применимы все операции алгебры карт, по этим поверхностям можно легко построить графики деформаций и извлечь другую полезную информацию.

## 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  $\pm 30$  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 СОКРАЩЕНИЙ

- БД – база данных.
- БПЛА – беспилотный летательный аппарат.
- БАС – беспилотная авиационная съемка.
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система.
- ДВВС – Дворец водных видов спорта в г. Душанбе.
- СКО – среднее квадратическое отклонение.
- RTK – Real Time Kinematic (кинематика в реальном времени).
- SIFT – масштабно инвариантная трансформация признаков (англ. scale-invariant feature transform, алгоритм SIFT).
- SQL – англ. Structured Query Language – «язык структурированных запросов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 2003 году. – URL: <https://meganorm.ru/Data1/45/45817/index.htm>. – Текст : электронный.

2 Автоматизированный контроль конструктивной безопасности уникальных объектов, включая высотные и широкопролетные / В. В. Гурьев, В. М. Дорофеев, Д. А. Лысов, Н. В. Назьмов. – Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 2. – С. 55–61.

3 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.

4 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.

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

6 Бедов, А. И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Ч. 1 / А. И. Бедов, В. В. Знаменский, А. И. Габитов. – Москва : Изд-во АСВ, 2014. – 704 с. – Текст : непосредственный.

7 Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т. С. Хуанг и др. – Москва : Радио и связь, 1984. – 224 с. – Текст : непосредственный.

8 Вентцели, А. В. Надежность конструкций большепролетных сооружений / А. В. Вентцели. – Текст : непосредственный // Строительные материалы и конструкции. – 2009. – № 5. – С. 579–583.

9 Геодезический мониторинг состояния и деформации сооружений и зданий, фундаментов, конструкций, оснований. – URL: <http://syn-exp.ru/stati/geodezicheskiy-monitoring-sostoyaniya/>. – Текст : электронный.

10 Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов / Ф. К. Низаметдинов, М. Г. Мустафин, С. Г. Ожигин, А. С. Туякбай. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 176–185.

11 Главинский, Д. В. Методика непрерывного автоматизированного мониторинга строительных конструкций покрытия в ледовом дворце «Уральская молния» / Д. В. Главинский. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2011. – № 3. – С. 64–68.

12 Годзиковский, В. А. Лекарство от строительных аварий – датчики Тензо-М / В. А. Годзиковский, А. С. Деревянко, Ю. А. Ханов. – URL: <https://m.tensom.ru/publications/181/>. – Текст : электронный.

13 Горбатов, В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика / В. А. Горбатов. – Москва, 2000. – 544 с. – Текст : непосредственный.

14 Горохова, Е. И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования / Е. И. Горохова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 65–72.

15 ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – URL: <http://www.vashdom.ru/gost/27751-2014/>. – Текст : электронный.

16 Долгополов, Д. В. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 85–95. – doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95.

17 Драган, В. И. Большепролетная металлическая структурная конструкция системы «БрГТУ» для покрытия спортивного комплекса в г. Гродно, особенности расчета ее живучести / В. И. Драган, Н. Л. Морилова. – URL: file:///D:/TEMP/BoZPE-2010\_9-Dragan%20V\_Morilova.pdf. – Текст : электронный.

18 Еремеев, П. Г. Мониторинг и эксплуатация металлических конструкций уникальных большепролетных сооружений / П. Г. Еремеев, И. И. Ведяков. – Текст : электронный // AIAA Journal, 26(12). – P. 1119–1126. – URL: <http://anyflip.com/wjyxv/gbpl/basic>.

19 Ессин, А. С. Особенности фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки с БПЛА / А. С. Ессин, С. С. Ессин. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 1. – С. 1–4.

20 Иноземцев, Д. П. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 2. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN / Д. П. Иноземцев. – Текст : непосредственный // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3 (50). – С. 48–51.

21 Иноземцев, Д. П. Цифровая фотограмметрия – оперативный способ развития геодезического обоснования в городах / Д. П. Иноземцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2001. – № 8. – С. 35–38.

22 Институт спортивных сооружений. – URL: <https://www.issport.ru/sportivnye-kompleksy/sportivnyj-kompleks-g-dushanbe/>. – Текст : электронный.

23 Исследование возможностей фотограмметрической обработки изображений в Agisoft Metashape, Pix4D и Bentley ContextCapture / А. С. Молоко, К. В. Колюк, Е. С. Шабалина, Ю. В. Ширшова. – Текст : непосредственный // III Всерос-

сийской науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование» : сб. материалов (Санкт Петербург, 6–8 ноября 2019 г.) / Науч. ред. О. А. Лазебник. – Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. – С. 42–48.

24 Канашин, Н. В. Геодезический мониторинг при эксплуатации футбольных стадионов Чемпионата Мира 2018 / Н. В. Канашин, Д. А. Афонин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 42–52. – doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-42-52.

25 Канашин, Н. В. Геодезический мониторинг строительства стадиона ФК «Спартак» в г. Москве / Н. В. Канашин, А. А. Никитчин. – Текст : непосредственный / Геопрофи. – 2014. – № 3. – С. 8–11.

26 Кобелева, Н. Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин / Н. Н. Кобелева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ, – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 55–66.

27 Кобелева, Н. Н. Построение математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуатации 2007–2009 гг. / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 73–86.

28 Кобелева, Н. Н. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007–2009 годов) / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 5–12.

29 Костюк, А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА / А. С. Костюк. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 83–87.

30 Леденев, В. В. Аварии в строительстве. Т. 1. Причины аварий зданий и сооружений / В. В. Леденев. – Тамбов, 2014. – URL: [https://www.tstu.ru/book/elib2/pdf/2014/ledenev\\_2.pdf](https://www.tstu.ru/book/elib2/pdf/2014/ledenev_2.pdf). – Текст : электронный.

31 Леденев, В. В. Оболочечные конструкции в строительстве. Теория, проектирование, конструкции, примеры расчета : учеб. пособие для проектировщиков, бакалавров, магистров и аспирантов строительных специальностей / В. В. Леденев, А. В. Худяков. – Тамбов : ТГТУ, 2016. – 272 с. – URL: <https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2016/ledenev.pdf>. – Текст : электронный.

32 Малышкин, А. П. Опыт проектирования большепролетного покрытия с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. П. Малышкин, А. В. Есиков. – Текст : непосредственный // Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Arhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Seriya: Stroitelstvo i Arhitektura. – 2014. – Vol. 38. – Issue 57. – P. 40–48.

33 Матвеев, В. Е. Проектирование стационарной системы мониторинга несущих конструкций покрытий большепролетных сооружений на примере центра по хоккею с мячом и конькобежным видам спорта в г. Иркутске / В. Е. Матвеев, И. П. Пинайкин. – Текст : электронный // Universum: технические науки: электрон. научный журнал. – 2021. – 4(85). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11500>. – doi: 10.32743/UniTech.2021.85.4-1.81-90 (дата обращения: 09.08.2021).

34 Математические модели и техническая реализация GOCA – онлайн системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS) / Р. Ягер, П. Шпон, Т. Шайхутдинов, Т. Горохова, А. Янкуш. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 5. – С. 9–32.

35 МДС 13-22.2009. ООО «Тектоплан». Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных зданий и уникальных зданий и сооружений. – Москва : ОАО «ЦПП», 2010. – 76 с. – Текст : непосредственный.

36 МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обруше-

ния при аварийных воздействиях. – URL: <https://gosthelp.ru/text/MDS2022008Vremennye-rekome.html>. – Текст : электронный.

37 Могильный, С. Г. Кинематические локационные измерения вращающихся печей / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – май-июнь 2016. – № 3 (83). – С. 47–53.

38 Могильный, С. Г. Конструктивная калибровка цифровой камеры / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. А. Лунев. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 62–66.

39 Могильный, С. Г. Программный комплекс для подземных маркшейдерских сетей / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий. – Текст : непосредственный // Уголь Украины. – 2011. – № 5. – С. 17–22.

40 Могильный, С. Г. Проект автоматизированной системы геодезического мониторинга стадиона / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. И. Шморгун. – Текст : непосредственный // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. – 2010. – Випуск 12 (173). – С. 3–14.

41 Моделирование реальности // Reality Modelling, ContextCapture and the Pore. – 2020. – URL: <https://aecomag.com/59-features/1029-reality-modelling-contextcapture-and-the-pore>. – Текст : электронный.

42 Мониторинг, моделирование и анализ поведения конструкций / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 25–37. – doi: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-25-37.

43 МРДС 02-08. Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293834/4293834435.htm>. – Текст : электронный.

44 Национальный центр исполнительских искусств. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Национальный\\_центр\\_исполнительских\\_искусств](https://ru.wikipedia.org/wiki/Национальный_центр_исполнительских_искусств). – Текст : электронный.

45 О точности определения координат пространственного фотограмметрического станда / 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.

46 Обрушение Басманного рынка. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Обрушение\\_Басманного\\_рынка](https://ru.wikipedia.org/wiki/Обрушение_Басманного_рынка). – Текст : электронный.

47 Оньков, И. В. Оценка точности ЦМР по материалам аэрофотосъемки с БЛА «ГЕОСКАН 101» / И. В. Оньков. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – 2015. – № 5. – С. 49–51.

48 ООО «СтальПроект» Отчет. Спортивный комплекс в г. Душанбе. Проверочный расчет. Конструкции металлические. – Москва, 2016. – 69 с. – URL: <http://steel-project.ru/project/sportivnyj-kompleks-v-g-dushanbe>. – Текст : электронный.

49 Открытие Дворца спорта. – URL: <https://asiaplustj.info/ru/node/285035>. – Текст : электронный.

50 Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем / Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, О. А. Оприцова, А. В. Чернов, Д. В. Гоголев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 211–228.

51 Папазов, М. Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов / М. Г. Папазов, С. Г. Могильный. – Москва : Недра, 1968. – 302 с. – Текст : непосредственный.

52 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.

53 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.

54 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.

55 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.

56 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.

57 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.

58 Плясунова, А. В. Коллокационно-сеточный метод решения нелинейных параболических уравнений / А. В. Плясунова, А. Г. Слепцов. – Текст : непосредственный // Моделирование в механике. – 1987. – Т. 1(18), № 4. – С. 116–137.

59 Практический опыт устройства стационарных автоматизированных систем мониторинга строительных конструкций на олимпийских объектах в городе Сочи / И. Е. Штунцайгер, Д. А. Лысов, А. С. Денисов, А. О. Слободенюк, А. И. Кугачев. –

Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 4 (60). – С. 67–71.

60 Программное обеспечение для автоматического создания детализированных трехмерных моделей на основе фотографий // ContextCapture. – 2020. – URL: [https://prod-bentleycdn.azureedge.net/-/media/files/documents/product-data-sheet/pds\\_contextcapture\\_ltr\\_ru\\_lr.pdf?la=ru-ru&modified=20170711095732](https://prod-bentleycdn.azureedge.net/-/media/files/documents/product-data-sheet/pds_contextcapture_ltr_ru_lr.pdf?la=ru-ru&modified=20170711095732). – Текст : электронный.

61 Пространственные покрытия комбинированными оболочками. – URL: <http://www.firma-stroitel.ru/kombinir.html>. – Текст : электронный.

62 Путинцев, Д. Н. Локально анизотропное гауссовское сглаживание цветных изображений снежно-ледовой поверхности Арктики / Д. Н. Путинцев, Н. В. Арлазаров, Д. Г. Слугин. – Текст : электронный // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 4-2. – С. 291–296. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41476> (дата обращения: 22.05.2021).

63 Радар IBIS FS. – URL: <https://geosystems.ru/shop/Sistemymonitoringastabilnostiustupov/GeoradaryIDSdlyamonitringainzhenerykhsooruzheniy/radar-ibis-fs/>. – Текст : электронный.

64 Рязанцев, Г. Е. Современные автоматизированные системы контроля деформации большепролетных конструкций / Г. Е. Рязанцев, И. А. Седельникова, И. А. Назаров. – URL: <https://nsk.gsi.ru/art.php?id=73>. – Текст : электронный.

65 Сахаши, Н. Длиннопролетная решетчатая крыша купола Нагоя / Н. Сахаши. – Текст : непосредственный // Structural Engineering International. – август 1998. – Т. 8, № 3. – С. 183–184. – doi: 10.2749/101686698780489090.

66 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.

67 Семин, Л. Г. Метод коллокаций – наименьших квадратов для уравнений Стокса / Л. Г. Семин, А. Г. Слепцов, В. П. Шапеев. – Текст : непосредственный // Вычислительные технологии. – 1996. – Т. 1, № 2. – С. 90–98.

68 Сердаков, Л. Е. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF / Л. Е. Сердаков, Д. Мартин, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8.

69 Сердаков, Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 2–6.

70 Симонян, В. В. Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. 2-е изд. / В. В. Симонян, Н. А. Шмелин, А. К. Зайцев. – Москва : НИУ МГСУ, 2016. – 144 с. – Текст : непосредственный.

71 Снегирев, А. И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях / А. И. Снегирев, А. И. Альхименко. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 8–16.

72 Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы / В. А. Сойфер. – Текст : непосредственный // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3.

73 СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. – URL: <http://gipromash-penza.ru/wp-content/uploads/2017/11/SP-296.pdf>. – Текст : электронный.

74 СП 304.1325800.2017. Конструкции большепролетных зданий и сооружений. Правила эксплуатации. – URL: <http://nopriz.ru/upload/iblock/ecd/sp9489.pdf>. – Текст : электронный.

75 СП Проект. Здания и сооружения. Аварийные воздействия. – Москва, 2016. – URL: [https://www.faufcc.ru/upload/doc\\_library/5418/sp9316.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/doc_library/5418/sp9316.pdf). – Текст : электронный.

76 СТО 36554501-024–2010. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воз-

действиях. – URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/norma/393186/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/393186/). – Текст : электронный.

77 СТО СРО-Г 60542954 00007–2020. Геодезический мониторинг. Наблюдения за осадками и кренами зданий и сооружений. – Москва, 2020. – URL: [http://sro-atomgeo.ru/wp-content/uploads/file/3GEO/Documents/Standarts/2021/STO\\_SRO\\_G\\_60542954\\_00007\\_2020new.pdf](http://sro-atomgeo.ru/wp-content/uploads/file/3GEO/Documents/Standarts/2021/STO_SRO_G_60542954_00007_2020new.pdf). – Текст : электронный.

78 Стрельцов, В. И. Маркшейдерское обеспечение природопользования недр / В. И. Стрельцов, С. Г. Могильный. – Москва : Недра, 1989. – 205 с. – Текст : непосредственный.

79 Тетеря, А. Н. Опыт использования цифровой камеры 3-DAS-1 / А. Н. Тетеря. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 26–30.

80 Тихонов, А. А. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки / А. А. Тихонов, Д. Ж. Акматов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 192–198.

81 ТОО «Дуовей» (КНР). Отчет по расчету конструкций Дворца водных видов спорта г. Душанбе. 27.07.2016. – 424 с. – Текст : непосредственный.

82 Трансвааль-парк. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Трансвааль-парк#Обрушение>. – Текст : электронный.

83 Хатум, Х. М. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений / Х. М. Хатум, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – № 9, Т. 81. – С. 2–13.

84 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования построения и использования плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 2. – С. 213–220.

85 Хлебникова, Т. А. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА / Т. А. Хлебникова, О. А. Опритова, С. М. Аубакирова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 32–37.

86 Шоломицкий, А. А. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.

87 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.

88 Шоломицкий, А. А. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.

89 Шоломицкий, А. А. Проект геодезических работ при мониторинге зданий и сооружений аквапарка «КВАРСИС» / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 31–36.

90 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.

91 3DF ZEPHYR // 3DFLOW. – 2020. – URL: <https://www.3dflow.net>. – Текст : электронный.

92 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.

93 Ascher, U. A collocation solver for mixed order systems of boundary value problems / U. Ascher, J. Christiansen, R. D. Russel. – Текст : непосредственный // Math. Comp. – 1979. – Vol. 33. – P. 659–679

94 Batik Image Classification Using SIFT Feature Extraction, Bag of Features and Support Vector Machine / Ryfial Azhar, Desmin Tuwohingidea, Dasrit Kamudia, Sarimuddina, Nanik Suciata. – Текст : непосредственный // Peer-review under responsibility of organizing committee of Information Systems International Conference (ISICO2015). – 2015. – Vol. 72. – P. 24–30. – doi: 10.1016/j.procs.2015.12.101.

95 Bentley, L. R. Solution of the advective-dispersive transport equation using a least squares collocation, Eulerian-Lagrangian method / L. R. Bentley, G. F. Pinder, I. Herrera. – Текст : непосредственный // Numer. Methods Partial Differ. Equations. – 1989. – Vol. 5, No. 3. – P. 227–240.

96 Bentley: ПО для моделирования реальности // Bentley. – 2020. – URL: <https://www.bentley.com/ru/products/product-line/reality-modeling-software/contextcapture-center> (дата обращения: 20.12.2020). – Текст : электронный.

97 Bliuger, F. Temperature Effects in Buildings with Panel Walls / F. Bliuger. – Текст : непосредственный // Building and Environment. – 1982. – Vol. 17, No. I. – P. 17–21. – 0360-1323/82/010017-05\$03.00/0 Printed in Great Britain. Pergamon Press Ltd.

98 Boor, C. Collocation at Gaussian points / C. Boor, B. Swartz. – Текст : непосредственный // SIAM J. Numer. Anal. – 1973. – Vol. 10, No. 4. – P. 582–606.

99 Bureš, J. Long-term Deformation Measurements of atypical Roof Timber Structures TS 7 – Monitoring of structures / J. Bureš, O. Švábenský and M. Kalina. – Текст :

непосредственный // INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying Prague, Czech republic, April 3–4, 2014. – P. 249–254.

100 Chen, Yong. Image Matching Algorithm Using SIFT on Multiple Layered Strategies / Yong Chen, Lei Shang, and Eric Hu Robust. – Текст : непосредственный // Article ID 452604. Vol. 2013. – doi: 10.1155/2013/452604.

101 Choporov, S. Optimized Smoothing of Discrete Models of the Implicitly Defined Geometrical Objects' Surfaces / S. Choporov, S. Homeniuk. – Текст : непосредственный // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 3/4 (93). – P. 52–60. – doi: 10.15587/1729-4061.2018.130787.

102 Chrzanowski, Adam. Reliability and Efficiency of Dam Deformation Monitoring Schemes CDA 2011 / Adam Chrzanowski, Anna Szostak-Chrzanowski. – Текст : непосредственный // Annual Conference, Congres annuel 2011 de l'ACB, Fredericton, NB, Canada, October 12–20. – P. 1–15.

103 Cordes, Kai. Localization Accuracy of Interest Point Detectors with Different Scale Space Representations / Kai Cordes, Bodo Rosenhahn, Jörn Ostermann. – Текст : непосредственный // 2014 11th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS) Conference: 26–29 Aug. 2014. – doi: 10.1109/AVSS.2014.6918676.

104 Dale, Nigel. Waterloo International Terminal / Nigel Dale. – Текст : электронный // Engineering timelines. – URL: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=243>.

105 Daniel, R. Response of large span steel frames subjected to horizontal and vertical seismic motions / R. Daniel, S. Alberto. – Текст : электронный // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 1404. – URL: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_1404.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1404.pdf).

106 Discover intelligent photogrammetry with Metashape // Agisoft. – 2020. – URL: <https://www.agisoft.com>. – Текст : электронный.

107 Explore the possibilities of RealityCapture // CapturingReality. – 2020. – URL: <https://www.capturingreality.com>. – Текст : электронный.

108 Fast SIFT Design for Real-Time Visual Feature Extraction / Liang-Chi Chiu, Tian-Sheuan Chang, Jiun-Yen Chen, and Nelson Yen-Chung Chang. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Image Processing. – Aug. 2013. – Vol. 22. – Issue 8. – P. 3158–3167. – doi: 10.1109/TIP.2013.2259841.

109 Heinrichs, W. Least-Squares Spectral Collocation with the Overlapping Schwarz Method for the Incompressible Navier-Stokes Equations / W. Heinrichs. – Текст : непосредственный // Numer. Alg. 2006. – № 43. – P. 61–73.

110 Image matching algorithm based on SIFT using color and exposure information / Yan Zhao, Yuwei Zhai, Eric Dubois, Shigang Wang. – Текст : непосредственный // Journal of Systems Engineering and Electronics. – June 2016. – Vol. 27, No. 3. – P. 691–699.

111 Isaev, V. I. High-Accuracy Versions of the Collocations and Least Squares Method for the Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations / V. I. Isaev, V. P. Shapeev. – Текст : непосредственный // Computational Mathematics and Mathematical Phys. – 2010. – Vol. 50, No. 10. – P. 1670–1681.

112 Jewel, Nicole. China Flower Expo Pavilions Resemble Giant Floating Flower Petals inhabitat / Nicole Jewel. – URL: <https://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>. – Текст : электронный.

113 Joglekar, Jyoti. Image Matching with Sift Features / Jyoti Joglekar, Shirish S. Gedam. – Текст : электронный // A Probabilistic Approach Iaprs. – 2010. – Vol. XXXVIII, Part 3B. – Saint-Mandé, France. – September 1-3, 2010. – URL: [https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part3/b/pdf/7\\_XXXVIII-part3B.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part3/b/pdf/7_XXXVIII-part3B.pdf).

114 Karami, E. Image Identification Using SIFT Algorithm: Performance Analysis against Different Image Deformations / E. Karami, M. Shehata, A. Smith. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1710/1710.02728.pdf>. – Текст : электронный.

115 Knowles, Eleanor. Stansted Airport, Main Terminal / Eleanor Knowles. – Текст : электронный // Engineering timelines. – URL: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>.

116 Lee, Hyoseong. Deformation Measurement of a Railroad Bridge Using a Photogrammetric Board without Control Point Survey / Hyoseong Lee, Dongyeob Han. – Текст : электронный. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2018/6851252/>.

117 Lingua, Andrea. Nex Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications / Andrea Lingua, Davide Marenchino, and Francesco. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3297131/> 2009; 9(5): 3745–3766. – doi: 10.3390/s90503745. – Текст : электронный.

118 Maier, J. Ground Truth Accuracy and Performance of the Matching Pipeline / J. Maier, M. Humenberger, O. Zendel. – URL: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017\\_workshops/w10/papers/Maier\\_Ground\\_Truth\\_Accuracy\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017_workshops/w10/papers/Maier_Ground_Truth_Accuracy_CVPR_2017_paper.pdf). – Текст : электронный.

119 Make better decisions with accurate 3D maps and models // Pix4D. – 2020. – URL: <https://www.pix4d.com>. – Текст : электронный.

120 Marčiš, Marián. Measurement of flat slab deformations by the multi-image photogrammetry method / Marián Marčiš, Marek Fraštia, Tomáš Augustín. – Текст : электронный // Slovak Journal of Civil Engineering 25(4). December 2017. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/322478298\\_Measurement\\_of\\_Flat\\_Slab\\_Deformations\\_by\\_the\\_Multi-Image\\_Photogrammetry\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/322478298_Measurement_of_Flat_Slab_Deformations_by_the_Multi-Image_Photogrammetry_Method). – doi: 10.1515/sjce-2017-0019.

121 Memento–High-Definition 3D Models from Reality // Autodesk. – 2020. – URL: [https://www.autodesk.com/autodesk-university/ru/forge-content/au\\_class-urn%3Aadsk.content%3Acontent%3A588cc8bf-bd59-4049-86ff-318f585b14e9](https://www.autodesk.com/autodesk-university/ru/forge-content/au_class-urn%3Aadsk.content%3Acontent%3A588cc8bf-bd59-4049-86ff-318f585b14e9). – Текст : электронный.

122 Miima, J. B. Adapting neural networks for modelling structural behavior in geodetic deformation monitoring / J. B. Miima, W. Niemeier. – Текст : непосредственный // zfv 3/2004 129. Jg. – P. 160–167.

123 Mill, T. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring of a Large Suspension Roof Structure / T. Mill, A. Ellmann. – Текст : непосредственный

ный // INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying. Prague, Czech Republic, April 3–4, TS 5 – Deformation measurement, 2014. – P. 179–186.

124 Mogilny, S. BIM and Forecasting Deformations in Monitoring Structures / S. Mogilny, A. Sholomitskii and E. Lagutina. – Текст : непосредственный // GeoScience Engineering. – 2019. – Vol. LXV, No. 3. – P. 50–57. – ISSN 1802-5420. – doi: 10.35180/gse-2019-0018.

125 Mogilny, S. G. The effectiveness of self-calibration of non-metric digital camera that used on unmanned aerial vehicles / S. G. Mogilny, A. A. Sholomitskij, O. V. Martynov. – Текст : непосредственный // Proceedings of 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2018 (29 June–5 July). Section Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 18. – Issue 2.3. – P. 199–210. – doi: 10.5593/sgem2018/2.3/S10.026.

126 Monitoring and analysis of ground temperature and deformation within Qinghai-Tibet Highway subgrade in permafrost region / Tian YH, Shen YP, Yu WB, et al. – Текст : непосредственный // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2015. – 7(4): 0370–0375. – doi: 10.3724/SP.J.1226.2015.00370.

127 Monitoring of technical condition of the St. Petersburg Arena Stadium Sliding / G. V. Osadchy, A. A. Belyi, D. V. Efanov, D. A. Shestovitskiy. – Текст : непосредственный // Roof. Construction of Unique Buildings and Structures. – 2018. – 69 (6). – P. 10–24. – doi: 10.18720/CUBS.69.2.

128 Nikolov, I. A. Benchmarking Close-range Structure from Motion 3D Reconstruction Software under Varying Capturing Conditions / I. A. Nikolov, C. B. Madsen. – Текст : электронный // 6th International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed 2016). – Springer, 2016. – Vol. 10058. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9\\_2/](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_2/).

129 Popp, Peter. London 2012 – Velodrome / Peter Popp, Olga Lopez Sans. – Текст : электронный // Detail-online. – URL: <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>.

130 Research on Construction Monitoring of Large-Span Steel Pipe Truss Structure / K. L. Chen, G. Q. Yuan, L. K. Wang, W. Z. Zhang and X. K. Wang. – Текст :

электронный // Open Journal of Civil Engineering. – 2019. – 9. – P. 255–267. – doi: 10.4236/ojce.2019.94018. – URL: [https://www.scirp.org/pdf/OJCE\\_2019101614595413.pdf](https://www.scirp.org/pdf/OJCE_2019101614595413.pdf).

131 Russell, R. D. A collocation method for boundary value problems / R. D. Russell, L. F. Shampine. – Текст : непосредственный // Numer. Math. – 1972. – Vol. 10. – P. 582–606.

132 Schild, K. H. Gaussian collocation via defect correction / K. H. Schild. – Текст : непосредственный // Numerische Mathematik. – 1990. – 58. – P. 369–386.

133 Semin, L. G. Collocation-grid method for solving boundary problems for Navier Stokes equations / L. G. Semin, V. P. Shapreev. – Текст : непосредственный // International Conference on the Methods of Aerophysical Research, 29 June – 3 July, 1998, Novosibirsk, Russia. Proceedings. Part II. Novosibirsk, 1998. – P. 186–191.

134 Shan, A. C. Analytical Research on Deformation Monitoring of Large Span Continuous Rigid Frame Bridge during Operation / A. C. Shan. – Текст : электронный // Engineering. – 2015. – 7. – P. 477–487. – URL: <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2015.78044>.

135 Spampinato, Angelo. Stadio Olimpico di Roma / Angelo Spampinato. – Текст : электронный // The world Stadiums. – URL: <https://is.gd/48Hknu>.

136 Terrestrial Laser Scanner for Monitoring the Deformations and the Damages of Buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi. – Текст : непосредственный // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – Vol. XLI-B5. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. – P. 453–460. – doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-453-2016.

137 Vinnitskaya, Irina. MyZeil Shopping Mall / Studio Fuksas / Irina Vinnitskaya. – Текст : электронный // ArchDaily. – URL: <http://www.archdaily.com/243128/myzeil-shopping-mall-studio-fuksas>.

138 Yan Li SUN, Jie WANG Performance Analysis of SIFT Feature Extraction Algorithm in Application to Registration of SAR Image. – URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20164401063>. – Текст : электронный.

139 Yang, Chunde. The algorithm of fast image stitching based on multi-feature extraction / Chunde Yang, Ge Wu, and Jing Shi. – Текст : непосредственный // AIP Conference Proceedings. – 1967, 040037 (2018). – doi: 10.1063/1.5039111.

140 Zhang, P. Prediction of Temperature Induced Deformation of a Supertall Structure Using Structural Health Monitoring Data / P. Zhang, Y. Xia and Y. Q. Ni. – Текст : непосредственный // 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. – Tu. 3. D. 2. – P. 1–7.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Поиск оптимального размера окна выборки для поверхности 1

(аэросъемка БПЛА 15.08.2019)

Таблица А.1 – Размер окна выборки  $L = 1,8$  м

№	Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	Число точек	Zi, м	dZ, м	Mvz, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	442.898	1015.962	857.799	28	857.94	0.141	0.011
2	2	437.861	1019.002	861.764	74	861.764	0	0.007
3	3	429.302	1019.208	864.789	44	864.791	0.002	0.008
4	4	417.272	1018.92	867.114	38	867.109	-0.005	0.005
5	5	418.25	1011.183	866.616	49	866.616	0	0.004
6	6	425.687	1006.424	864.789	49	864.8	0.011	0.006
7	7	433.243	1002.168	861.707	68	861.691	-0.016	0.01
8	22	333.032	1001.79	858.889	71	858.903	0.014	0.015
9	23	337.532	1002.148	861.71	84	861.697	-0.013	0.009
10	24	344.793	1006.504	864.727	47	864.742	0.015	0.007
11	25	352.658	1011.155	866.639	44	866.626	-0.013	0.007
12	26	360.413	1016.553	868.022	40	868.028	0.006	0.006
13	27	360.477	1021.572	868.019	53	868.027	0.008	0.006
14	28	332.905	1019.071	861.746	61	861.745	-0.001	0.008
15	29	329.366	1019.175	859.383	70	859.361	-0.022	0.022
16	30	334.112	1039.3	858.294	46	858.336	0.042	0.016
17	31	336.544	1032.923	862.008	60	862.01	0.002	0.008
18	34	345.167	1031.437	864.841	46	864.851	0.01	0.006
19	35	341.643	1019.111	864.814	52	864.813	-0.001	0.007
20	36	350.476	1019.167	866.594	40	866.595	0.001	0.005
21	37	352.703	1026.776	866.665	38	866.659	-0.006	0.007
22	53	435.746	1037.382	859.863	84	859.85	-0.013	0.017
23	54	433.086	1035.932	861.826	73	861.82	-0.006	0.011
24	55	425.791	1031.72	864.802	54	864.801	-0.001	0.005
25	56	418.186	1026.897	866.643	48	866.638	-0.005	0.006
26	57	410.267	1021.678	868.031	39	868.042	0.011	0.007
27	13	410.603	1016.44	867.99	43	867.994	0.004	0.006
28	38	360.819	1038.125	866.268	47	866.257	-0.011	0.006

29	39	365.308	1030.204	867.853	43	867.845	-0.008	0.005
30	40	365.647	1019.284	868.701	38	868.693	-0.008	0.006
31	41	376.905	1019.276	869.562	49	869.55	-0.012	0.014
32	42	385.326	1038.705	867.883	41	867.885	0.002	0.004
33	43	385.199	1050.756	865.018	48	865.019	0.001	0.005
34	44	385.467	1059.151	861.764	81	861.758	-0.006	0.008
35	45	382.24	1062.852	859.21	60	859.138	-0.072	0.016
36	46	385.661	1019.197	869.772	23	869.752	-0.02	0.007
37	47	393.82	1019.154	869.534	48	869.532	-0.002	0.008
38	48	405.068	1019.114	868.697	52	868.694	-0.003	0.009
39	49	403.919	1027.52	868.247	43	868.246	-0.001	0.006
40	50	409.951	1038.114	866.266	56	866.265	-0.001	0.006
41	51	417.194	1050.26	861.88	67	861.885	0.005	0.009
42	52	418.699	1054.266	858.969	71	858.995	0.026	0.012
43	9	420.121	983.139	857.608	46	857.73	0.122	0.01
44	10	420.273	987.604	860.67	62	860.674	0.004	0.009
45	11	409.84	1000.201	866.294	52	866.287	-0.007	0.005
46	12	404.103	1010.859	868.248	46	868.238	-0.01	0.005
47	14	385.516	999.584	867.876	46	867.873	-0.003	0.004
48	15	385.543	987.729	865.083	44	865.061	-0.022	0.007
49	16	385.152	979.138	861.75	82	861.745	-0.005	0.01
50	17	385.358	973.844	857.717	39	858.454	0.737	0.012
51	18	353.181	991.884	863.316	57	863.307	-0.009	0.006
52	19	353.405	987.62	861.687	67	861.68	-0.007	0.008
53	20	360.915	1000.142	866.279	49	866.274	-0.005	0.007
54	21	368.438	1008.054	868.095	37	868.103	0.008	0.005
55	32	351.022	1054.984	857.841	46	857.952	0.111	0.013
56	33	353.504	1050.422	861.804	47	861.799	-0.005	0.011

2930  
0.465  
Срн. 0.008304  
 $Mz =$  0.103677

В таблице  $X, Y, Z$  – заданные координаты точки;  $Z_i$  – интерполированная отметка точки;  $dZ$  – отклонение, вычисляется  $dZ = Z - Z_i$ ;  $M_{vz}$  – среднее расстояние от точек до плоскости интерполирования. В колонке б приведено среднее число точек в выборке.

Таблица А.2 – Размер окна выборки  $L = 1,7$  м

№	Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	Число точек	Zi, м	dZ, м	Mvz, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	442.898	1015.962	857.799	24	857.926	0.127	0.01
2	2	437.861	1019.002	861.764	69	861.764	0	0.007
3	3	429.302	1019.208	864.789	37	864.793	0.004	0.008
4	4	417.272	1018.92	867.114	30	867.11	-0.004	0.004
5	5	418.25	1011.183	866.616	46	866.617	0.001	0.004
6	6	425.687	1006.424	864.789	42	864.799	0.01	0.006
7	7	433.243	1002.168	861.707	60	861.69	-0.017	0.009
8	22	333.032	1001.79	858.889	64	858.89	0.001	0.015
9	23	337.532	1002.148	861.71	81	861.697	-0.013	0.009
10	24	344.793	1006.504	864.727	43	864.743	0.016	0.007
11	25	352.658	1011.155	866.639	36	866.627	-0.012	0.006
12	26	360.413	1016.553	868.022	39	868.028	0.006	0.006
13	27	360.477	1021.572	868.019	48	868.027	0.008	0.006
14	28	332.905	1019.071	861.746	58	861.746	0	0.008
15	29	329.366	1019.175	859.383	66	859.355	-0.028	0.02
16	30	334.112	1039.3	858.294	43	858.34	0.046	0.015
17	31	336.544	1032.923	862.008	55	862.009	0.001	0.008
18	34	345.167	1031.437	864.841	39	864.851	0.01	0.006
19	35	341.643	1019.111	864.814	48	864.814	0	0.007
20	36	350.476	1019.167	866.594	36	866.595	0.001	0.005
21	37	352.703	1026.776	866.665	35	866.659	-0.006	0.007
22	53	435.746	1037.382	859.863	78	859.852	-0.011	0.017
23	54	433.086	1035.932	861.826	67	861.821	-0.005	0.011
24	55	425.791	1031.72	864.802	49	864.801	-0.001	0.005
25	56	418.186	1026.897	866.643	47	866.639	-0.004	0.006
26	57	410.267	1021.678	868.031	31	868.041	0.01	0.007
27	13	410.603	1016.44	867.99	39	867.995	0.005	0.006
28	38	360.819	1038.125	866.268	42	866.256	-0.012	0.005
29	39	365.308	1030.204	867.853	39	867.846	-0.007	0.005

30	40	365.647	1019.284	868.701	32	868.694	-0.007	0.006
31	41	376.905	1019.276	869.562	47	869.55	-0.012	0.014
32	42	385.326	1038.705	867.883	36	867.885	0.002	0.004
33	43	385.199	1050.756	865.018	44	865.019	0.001	0.006
34	44	385.467	1059.151	861.764	69	861.758	-0.006	0.008
35	45	382.24	1062.852	859.21	54	859.152	-0.058	0.017
36	46	385.661	1019.197	869.772	22	869.752	-0.02	0.007
37	47	393.82	1019.154	869.534	40	869.534	0	0.007
38	48	405.068	1019.114	868.697	45	868.695	-0.002	0.009
39	49	403.919	1027.52	868.247	36	868.247	0	0.006
40	50	409.951	1038.114	866.266	47	866.266	0	0.006
41	51	417.194	1050.26	861.88	59	861.884	0.004	0.008
42	52	418.699	1054.266	858.969	63	858.997	0.028	0.01
43	9	420.121	983.139	857.608	39	857.719	0.111	0.011
44	10	420.273	987.604	860.67	55	860.683	0.013	0.009
45	11	409.84	1000.201	866.294	49	866.286	-0.008	0.005
46	12	404.103	1010.859	868.248	39	868.238	-0.01	0.005
47	14	385.516	999.584	867.876	40	867.873	-0.003	0.004
48	15	385.543	987.729	865.083	41	865.061	-0.022	0.007
49	16	385.152	979.138	861.75	73	861.747	-0.003	0.01
50	17	385.358	973.844	857.717	33	858.449	0.732	0.012
51	18	353.181	991.884	863.316	48	863.311	-0.005	0.005
52	19	353.405	987.62	861.687	60	861.68	-0.007	0.008
53	20	360.915	1000.142	866.279	44	866.275	-0.004	0.007
54	21	368.438	1008.054	868.095	32	868.104	0.009	0.005
55	32	351.022	1054.984	857.841	38	857.937	0.096	0.012
56	33	353.504	1050.422	861.804	42	861.799	-0.005	0.01
					2618			0.453
				Ср	46.75		Средн.	0.008089
							$Mz =$	0.102115

Таблица А.3 – Размер окна выборки  $L = 1,2$  м

№	Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	Число точек	Zi, м	dZ, м	Mvz, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	442.898	1015.962	857.799	17	857.91	0.111	0.008
2	2	437.861	1019.002	861.764	29	861.77	0.006	0.006
3	3	429.302	1019.208	864.789	17	864.797	0.008	0.006
4	4	417.272	1018.92	867.114	15	867.113	-0.001	0.003
5	5	418.25	1011.183	866.616	18	866.616	0	0.002
6	6	425.687	1006.424	864.789	20	864.801	0.012	0.006
7	7	433.243	1002.168	861.707	34	861.697	-0.01	0.007
8	22	333.032	1001.79	858.889	40	858.879	-0.01	0.011
9	23	337.532	1002.148	861.71	30	861.699	-0.011	0.005
10	24	344.793	1006.504	864.727	21	864.743	0.016	0.006
11	25	352.658	1011.155	866.639	21	866.63	-0.009	0.004
12	26	360.413	1016.553	868.022	21	868.03	0.008	0.004
13	27	360.477	1021.572	868.019	23	868.024	0.005	0.005
14	28	332.905	1019.071	861.746	32	861.75	0.004	0.006
15	29	329.366	1019.175	859.383	34	859.374	-0.009	0.011
16	30	334.112	1039.3	858.294	26	858.319	0.025	0.009
17	31	336.544	1032.923	862.008	23	862.004	-0.004	0.008
18	34	345.167	1031.437	864.841	17	864.85	0.009	0.005
19	35	341.643	1019.111	864.814	28	864.813	-0.001	0.006
20	36	350.476	1019.167	866.594	18	866.595	0.001	0.004
21	37	352.703	1026.776	866.665	17	866.66	-0.005	0.005
22	53	435.746	1037.382	859.863	40	859.873	0.01	0.014
23	54	433.086	1035.932	861.826	30	861.827	0.001	0.009
24	55	425.791	1031.72	864.802	25	864.802	0	0.004
25	56	418.186	1026.897	866.643	25	866.641	-0.002	0.005
26	57	410.267	1021.678	868.031	15	868.041	0.01	0.004
27	13	410.603	1016.44	867.99	21	867.997	0.007	0.005
28	38	360.819	1038.125	866.268	17	866.258	-0.01	0.004
29	39	365.308	1030.204	867.853	23	867.847	-0.006	0.004

30	40	365.647	1019.284	868.701	21	868.696	-0.005	0.004
31	41	376.905	1019.276	869.562	29	869.555	-0.007	0.014
32	42	385.326	1038.705	867.883	22	867.887	0.004	0.004
33	43	385.199	1050.756	865.018	22	865.022	0.004	0.005
34	44	385.467	1059.151	861.764	38	861.764	0	0.006
35	45	382.24	1062.852	859.21	28	859.176	-0.034	0.014
36	46	385.661	1019.197	869.772	14	869.755	-0.017	0.007
37	47	393.82	1019.154	869.534	21	869.536	0.002	0.005
38	48	405.068	1019.114	868.697	20	868.698	0.001	0.006
39	49	403.919	1027.52	868.247	22	868.249	0.002	0.005
40	50	409.951	1038.114	866.266	20	866.268	0.002	0.005
41	51	417.194	1050.26	861.88	25	861.888	0.008	0.007
42	52	418.699	1054.266	858.969	27	859.005	0.036	0.011
43	9	420.121	983.139	857.608	19	857.687	0.079	0.015
44	10	420.273	987.604	860.67	29	860.689	0.019	0.007
45	11	409.84	1000.201	866.294	25	866.287	-0.007	0.005
46	12	404.103	1010.859	868.248	14	868.24	-0.008	0.005
47	14	385.516	999.584	867.876	19	867.875	-0.001	0.004
48	15	385.543	987.729	865.083	21	865.064	-0.019	0.007
49	16	385.152	979.138	861.75	33	861.76	0.01	0.006
50	17	385.358	973.844	857.717	15	858.223	0.506	0.01
51	18	353.181	991.884	863.316	28	863.312	-0.004	0.004
52	19	353.405	987.62	861.687	23	861.686	-0.001	0.005
53	20	360.915	1000.142	866.279	26	866.279	0	0.007
54	21	368.438	1008.054	868.095	17	868.101	0.006	0.004
55	32	351.022	1054.984	857.841	16	857.887	0.046	0.01
56	33	353.504	1050.422	861.804	26	861.807	0.003	0.006
					1317			0.364
				<i>Ncp</i>	23.51786		<i>Средн.</i>	0.0065
							<i>Mz</i>	0.071071

Таблица А.4 – Размер окна выборки  $L = 1,0$  м

№	Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	Число точек	Zi, м	dZ, м	Mvz, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	442.898	1015.962	857.799	12	857.895	0.096	0.008
2	2	437.861	1019.002	861.764	23	861.768	0.004	0.006
3	3	429.302	1019.208	864.789	11	864.798	0.009	0.007
4	4	417.272	1018.92	867.114	10	867.114	0	0.002
5	5	418.25	1011.183	866.616	14	866.616	0	0.002
6	6	425.687	1006.424	864.789	15	864.8	0.011	0.006
7	7	433.243	1002.168	861.707	23	861.692	-0.015	0.006
8	22	333.032	1001.79	858.889	29	858.884	-0.005	0.009
9	23	337.532	1002.148	861.71	20	861.701	-0.009	0.005
10	24	344.793	1006.504	864.727	13	864.743	0.016	0.008
11	25	352.658	1011.155	866.639	13	866.63	-0.009	0.004
12	26	360.413	1016.553	868.022	17	868.028	0.006	0.004
13	27	360.477	1021.572	868.019	19	868.023	0.004	0.004
14	28	332.905	1019.071	861.746	22	861.762	0.016	0.005
15	29	329.366	1019.175	859.383	28	859.37	-0.013	0.01
16	30	334.112	1039.3	858.294	19	858.315	0.021	0.009
17	31	336.544	1032.923	862.008	14	862	-0.008	0.006
18	34	345.167	1031.437	864.841	13	864.85	0.009	0.005
19	35	341.643	1019.111	864.814	23	864.814	0	0.007
20	36	350.476	1019.167	866.594	14	866.595	0.001	0.004
21	37	352.703	1026.776	866.665	13	866.662	-0.003	0.005
22	53	435.746	1037.382	859.863	25	859.883	0.02	0.011
23	54	433.086	1035.932	861.826	21	861.829	0.003	0.007
24	55	425.791	1031.72	864.802	15	864.801	-0.001	0.003
25	56	418.186	1026.897	866.643	17	866.644	0.001	0.003
26	57	410.267	1021.678	868.031	10	868.041	0.01	0.004
27	13	410.603	1016.44	867.99	15	867.996	0.006	0.003
28	38	360.819	1038.125	866.268	13	866.258	-0.01	0.004
29	39	365.308	1030.204	867.853	15	867.849	-0.004	0.005

30	40	365.647	1019.284	868.701	15	868.698	-0.003	0.003
31	41	376.905	1019.276	869.562	16	869.56	-0.002	0.013
32	42	385.326	1038.705	867.883	15	867.885	0.002	0.002
33	43	385.199	1050.756	865.018	16	865.023	0.005	0.004
34	44	385.467	1059.151	861.764	26	861.771	0.007	0.005
35	45	382.24	1062.852	859.21	17	859.18	-0.03	0.015
37	47	393.82	1019.154	869.534	13	869.537	0.003	0.005
38	48	405.068	1019.114	868.697	14	868.698	0.001	0.006
39	49	403.919	1027.52	868.247	16	868.251	0.004	0.003
40	50	409.951	1038.114	866.266	16	866.267	0.001	0.004
41	51	417.194	1050.26	861.88	17	861.898	0.018	0.006
42	52	418.699	1054.266	858.969	16	859.003	0.034	0.01
43	9	420.121	983.139	857.608	12	857.667	0.059	0.013
44	10	420.273	987.604	860.67	20	860.684	0.014	0.007
45	11	409.84	1000.201	866.294	21	866.288	-0.006	0.005
47	14	385.516	999.584	867.876	13	867.875	-0.001	0.003
48	15	385.543	987.729	865.083	17	865.065	-0.018	0.006
49	16	385.152	979.138	861.75	26	861.76	0.01	0.006
50	17	385.358	973.844	857.717	11	858.069	0.352	0.006
51	18	353.181	991.884	863.316	25	863.313	-0.003	0.004
52	19	353.405	987.62	861.687	19	861.682	-0.005	0.004
53	20	360.915	1000.142	866.279	16	866.28	0.001	0.007
54	21	368.438	1008.054	868.095	10	868.101	0.006	0.004
55	32	351.022	1054.984	857.841	11	857.901	0.06	0.012
56	33	353.504	1050.422	861.804	19	861.813	0.009	0.006
					913			0.321
				<i>Ncp</i>	16.90741		<i>Средн.</i>	0.005944
							<i>Mz</i>	0.051083

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Поиск оптимального размера окна выборки для поверхностей 1-4  
(после исключения больших отклонений)

Таблица Б.1 – Параметры интерполяции поверхности 1

№	$L$ , м	СКО $Z$ , м	Среднее расстояние, м	Число точек в выборке
1	0.9	0.0077	0.0057	15
2	1	0.0103	0.0059	17
3	1.1	0.0147	0.0062	20
4	1.2	0.0105	0.0065	24
5	1.3	0.0153	0.0069	28
6	1.4	0.0174	0.0072	32
7	1.5	0.0120	0.0075	37
8	1.6	0.0132	0.0079	42
9	1.7	0.0094	0.0081	47
10	1.8	0.0218	0.0083	52

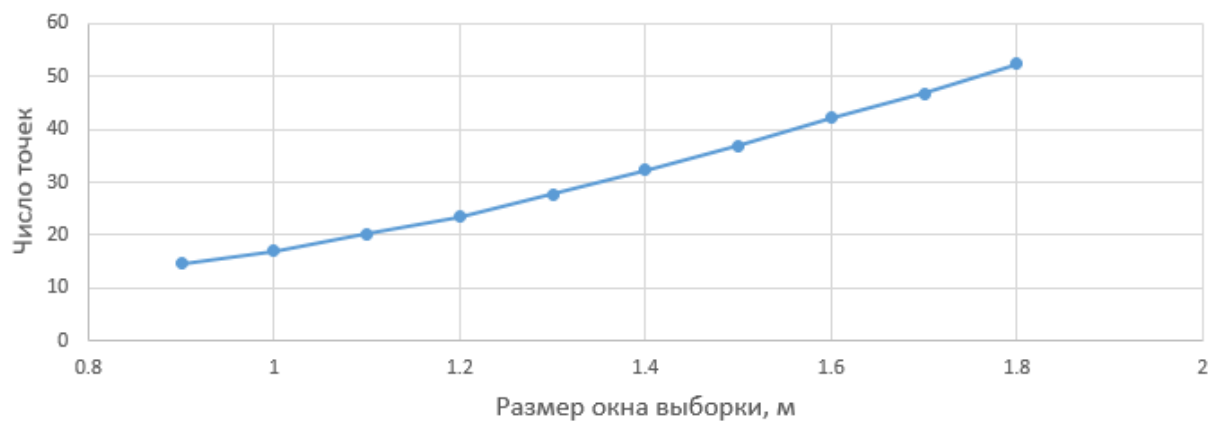


Рисунок Б.1 – Зависимость числа точек выборки от размера окна  
(поверхность 1)

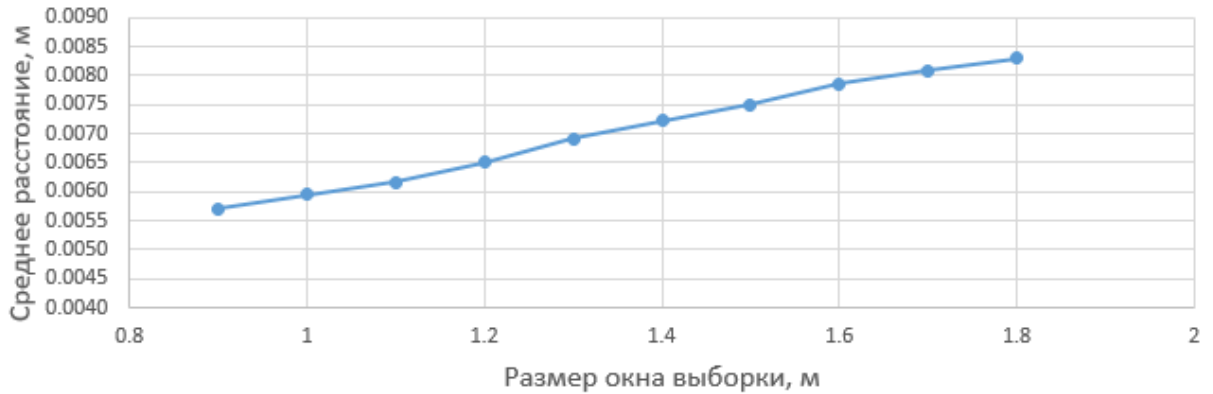


Рисунок Б.2 – Зависимость среднего расстояния от плоскости, в зависимости от размера окна выборки (поверхность 1)

Таблица Б.2 – Параметры интерполяции поверхности 2

№	$L$ , м	СКО $Z$ , м	Среднее расстояние, м	Число точек в выборке
3	1.1	0.0090	0.0062	20
4	1.2	0.0109	0.0065	24
5	1.3	0.0109	0.0069	28
6	1.4	0.0124	0.0072	32
7	1.5	0.0139	0.0075	37
8	1.6	0.0140	0.0079	42
9	1.7	0.0162	0.0081	47
10	1.8	0.0170	0.0083	52

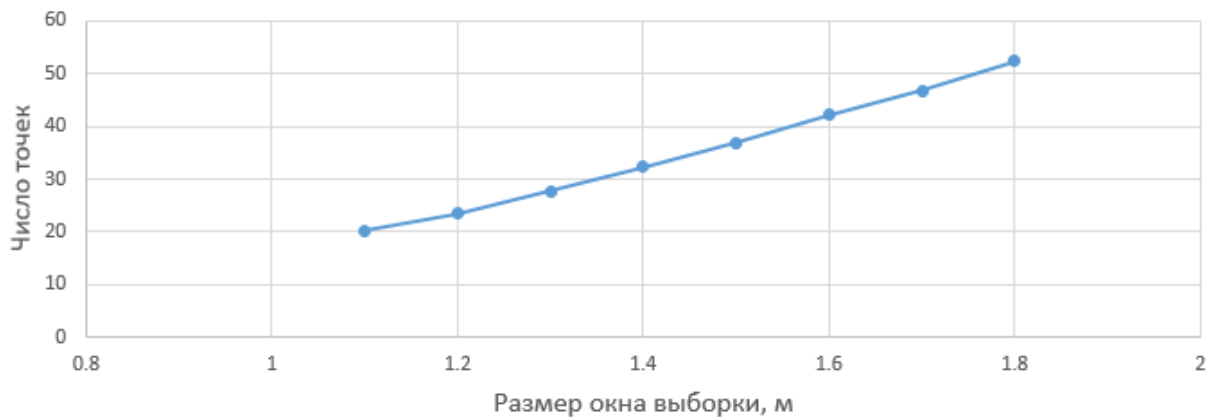


Рисунок Б.3 – Зависимость числа точек выборки от размера окна (поверхность 2)

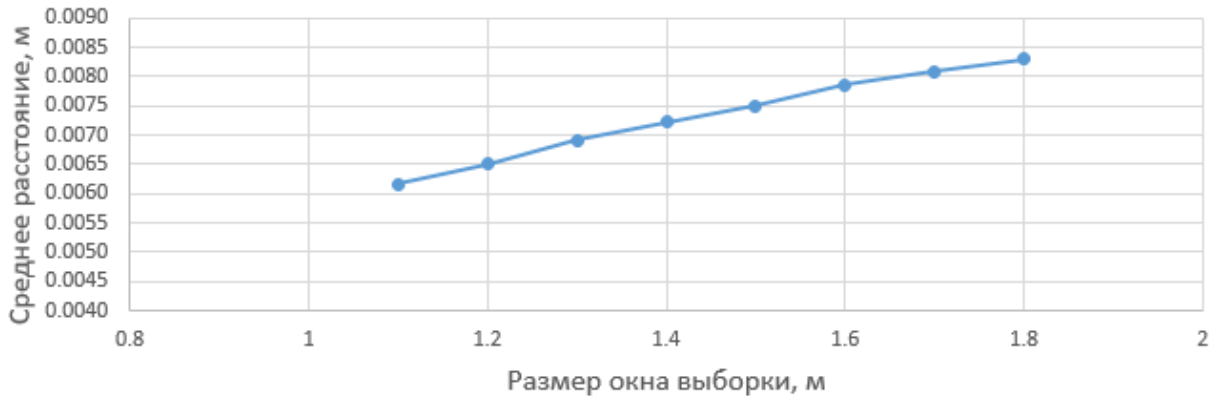


Рисунок Б.4 – Зависимость среднего расстояния от плоскости, в зависимости от размера окна выборки (поверхность 2)

Таблица Б.3 – Параметры интерполяции поверхности 3

№	$L$ , м	СКО $Z$ , м	Среднее расстояние, м	Число точек в выборке
1	0.9	0.0280	0.0110	18
2	1	0.0247	0.0211	21
3	1.1	0.0295	0.0218	25
4	1.2	0.0290	0.0217	29
5	1.3	0.0221	0.0223	34
6	1.4	0.0292	0.0228	39
7	1.5	0.0282	0.0233	45
8	1.6	0.0325	0.0235	50
9	1.7	0.0329	0.0237	57
10	1.8	0.0245	0.0237	63



Рисунок Б.5 – Зависимость среднего расстояния от плоскости, в зависимости от размера окна выборки (поверхность 3)

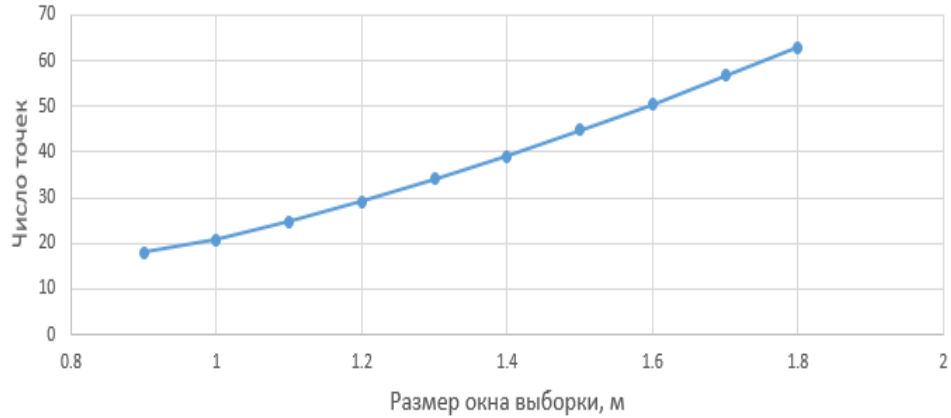


Рисунок Б.6 – Зависимость числа точек выборки от размера окна  
(поверхность 3)

Таблица Б.4 – Параметры интерполяции поверхности 4

№	$L$ , м	СКО $Z$ , м	Среднее расстояние, м	Число точек в выборке
2	1	0.0549	0.0071	12
3	1.1	0.0595	0.0089	25
4	1.2	0.0692	0.0089	20
5	1.3	0.0689	0.0094	24
6	1.4	0.0784	0.0098	29
7	1.5	0.0330	0.0102	31
8	1.6	0.0339	0.0107	39
9	1.7	0.0364	0.0111	41
10	1.8	0.0388	0.0115	47

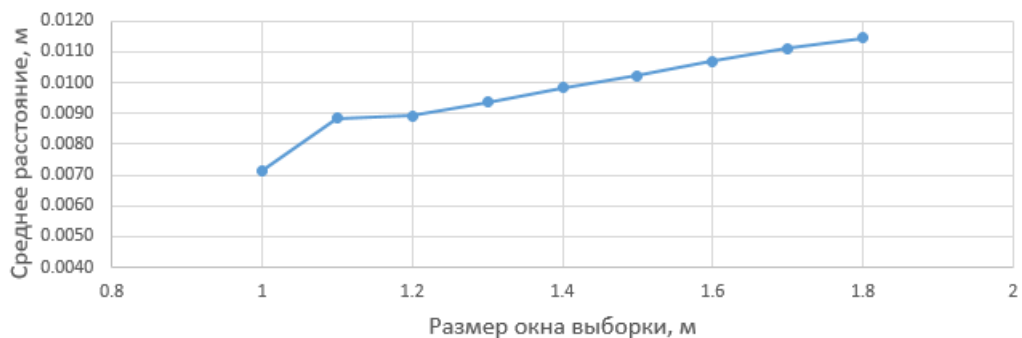


Рисунок Б.7 – Зависимость среднего расстояния от плоскости,  
в зависимости от размера окна выборки (поверхность 4)



Рисунок Б.8 – Зависимость числа точек выборки от размера окна  
(поверхность 4)

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Поиск оптимального значения допуска для поверхностей 1-4 (после исключения больших отклонений)

Таблица В.1 – Параметры интерполяции поверхности 1,  $\Delta = 10$  мм

№	Имя	X, м	Y, м	Z, м	Nv	No	Zi, м	dZ, м	dZ <sup>2</sup>	Mvz, м
1	1	442.898	1015.962	857.799	22	14	857.935	0.136		0.004
2	2	437.861	1019.002	861.764	51	43	861.766	0.002	0.000004	0.005
3	3	429.302	1019.208	864.789	23	16	864.794	0.005	0.000028	0.003
4	4	417.272	1018.92	867.114	22	20	867.112	-0.002	0.000003	0.003
5	5	418.25	1011.183	866.616	26	26	866.616	0	0.000000	0.003
6	6	425.687	1006.424	864.789	32	27	864.799	0.01	0.000106	0.004
7	7	433.243	1002.168	861.707	47	29	861.694	-0.013	0.000180	0.004
8	22	333.032	1001.79	858.889	48	21	858.883	-0.006	0.000033	0.005
9	23	337.532	1002.148	861.71	55	37	861.703	-0.007	0.000046	0.004
10	24	344.793	1006.504	864.727	32	26	864.742	0.015	0.000226	0.004
11	25	352.658	1011.155	866.639	28	27	866.629	-0.01	0.000094	0.004
12	26	360.413	1016.553	868.022	30	26	868.028	0.006	0.000037	0.004
13	27	360.477	1021.572	868.019	37	36	868.025	0.006	0.000036	0.005
14	28	332.905	1019.071	861.746	44	30	861.754	0.008	0.000058	0.004
15	29	329.366	1019.175	859.383	48	18	859.349	-0.034	0.001157	0.004
16	30	334.112	1039.3	858.294	30	12	858.311	0.017	0.000290	0.004
17	31	336.544	1032.923	862.008	39	26	862.008	0	0.000000	0.004
18	34	345.167	1031.437	864.841	27	23	864.848	0.007	0.000049	0.004
19	35	341.643	1019.111	864.814	36	28	864.811	-0.003	0.000010	0.004

20	36	350.476	1019.167	866.594	26	25	866.596	0.002	0.000003	0.004
21	37	352.703	1026.776	866.665	23	19	866.662	-0.003	0.000009	0.003
22	53	435.746	1037.382	859.863	58	24	859.874	0.011	0.000120	0.004
23	54	433.086	1035.932	861.826	47	24	861.823	-0.003	0.000009	0.004
24	55	425.791	1031.72	864.802	37	29	864.8	-0.002	0.000005	0.003
25	56	418.186	1026.897	866.643	39	32	866.638	-0.005	0.000024	0.003
26	57	410.267	1021.678	868.031	24	17	868.038	0.007	0.000052	0.003
27	13	410.603	1016.44	867.99	33	30	867.998	0.008	0.000071	0.003
28	38	360.819	1038.125	866.268	32	27	866.255	-0.013	0.000181	0.004
29	39	365.308	1030.204	867.853	30	28	867.847	-0.006	0.000039	0.004
30	40	365.647	1019.284	868.701	26	22	868.696	-0.005	0.000022	0.003
31	41	376.905	1019.276	869.562	39	18	869.554	-0.008	0.000069	0.003
32	42	385.326	1038.705	867.883	29	27	867.884	0.001	0.000002	0.003
33	43	385.199	1050.756	865.018	31	28	865.022	0.004	0.000012	0.004
34	44	385.467	1059.151	861.764	52	41	861.76	-0.004	0.000016	0.004
35	45	382.24	1062.852	859.21	43	17	859.154	-0.056		0.005
36	46	385.661	1019.197	869.772	20	13	869.75	-0.022	0.000485	0.003
37	47	393.82	1019.154	869.534	27	23	869.537	0.003	0.000011	0.004
38	48	405.068	1019.114	868.697	39	27	868.697	0	0.000000	0.004
39	49	403.919	1027.52	868.247	27	23	868.248	0.001	0.000000	0.004
40	50	409.951	1038.114	866.266	36	30	866.266	0	0.000000	0.004
41	51	417.194	1050.26	861.88	41	26	861.881	0.001	0.000002	0.004
42	52	418.699	1054.266	858.969	39	23	859.002	0.033	0.001064	0.004
43	9	420.121	983.139	857.608	33	19	857.721	0.113		0.004
44	10	420.273	987.604	860.67	39	26	860.685	0.015	0.000222	0.005
45	11	409.84	1000.201	866.294	38	34	866.287	-0.007	0.000043	0.004
46	12	404.103	1010.859	868.248	23	20	868.239	-0.009	0.000079	0.004

47	14	385.516	999.584	867.876	28	27	867.875	-0.001	0.000001	0.003
48	15	385.543	987.729	865.083	28	22	865.06	-0.023	0.000536	0.004
49	16	385.152	979.138	861.75	51	35	861.751	0.001	0.000001	0.004
50	17	385.358	973.844	857.717	26	11	858.359	0.642		0.005
51	18	353.181	991.884	863.316	36	31	863.313	-0.003	0.000011	0.003
52	19	353.405	987.62	861.687	41	32	861.683	-0.004	0.000018	0.004
53	20	360.915	1000.142	866.279	36	26	866.274	-0.005	0.000023	0.004
54	21	368.438	1008.054	868.095	23	23	868.102	0.007	0.000047	0.004
55	32	351.022	1054.984	857.841	24	13	857.888	0.047		0.003
56	33	353.504	1050.422	861.804	35	25	861.802	-0.002	0.000003	0.003
n=	51			Сумма	1936	1402			0.005534	0.214
D=	10	мм		Среднее	37.96078	27.4902		Mz(CKO)	0.010417	0.004196

В таблице X,Y,Z – заданные координаты точки; Zi – интерполированная отметка точки; dZ – отклонение, вычисляется  $dZ=Z-Z_i$ ; Mvz – среднее расстояние от точек до плоскости интерполирования; Nv среднее число точек в выборке (первый проход), No – среднее число точек (после отбраковки по допуску).  $dZ^2$  – квадрат dZ.

Таблица В.2 – Параметры интерполяции поверхности 2,  $\Delta = 10$  мм

№	Имя	X, м	Y, м	Z, м	Nv	No	Zi, м	dZ, м	$dZ^2$	Mvz, м
1	1	442.794	1016.146	857.95	17	7	858.03	0.08		0.001
2	2	437.708	1018.965	861.858	22	14	861.866	0.008	0.00006268	0.005
3	3	429.217	1018.884	864.849	15	10	864.825	-0.024	0.00057969	0.002
4	4	417.299	1019.28	867.118	24	23	867.108	-0.01	0.00009101	0.004
5	5	417.995	1011.349	866.672	13	11	866.673	0.001	0.00000221	0.003

6	6	425.913	1006.592	864.776	26	22	864.776	0	0.00000024	0.004
7	7	433.445	1002.06	861.575	25	19	861.573	-0.002	0.00000356	0.003
8	22	333.043	1001.788	858.881	26	11	858.879	-0.002	0.00000584	0.005
9	23	337.814	1002.295	861.877	20	14	861.858	-0.019	0.00035673	0.003
10	24	345.202	1006.517	864.835	17	16	864.831	-0.004	0.00001825	0.003
11	25	352.522	1011.345	866.62	22	18	866.615	-0.005	0.00002276	0.003
12	26	360.499	1016.447	868.035	17	14	868.026	-0.009	0.00007513	0.003
13	27	360.338	1021.455	868.009	16	14	868.012	0.003	0.00000673	0.002
14	28	332.839	1018.958	861.712	21	15	861.699	-0.013	0.00016254	0.004
15	29	329.586	1019.21	859.542	21	8	859.48	-0.062		0.002
16	30	334.217	1039.618	858.202	17	10	858.217	0.015	0.00021406	0.004
17	31	336.561	1032.948	862.006	17	15	862.006	0	0.00000021	0.003
18	34	344.916	1031.536	864.784	21	18	864.785	0.001	0.00000133	0.003
19	35	341.493	1018.943	864.775	17	14	864.78	0.005	0.00002771	0.004
20	36	350.514	1018.952	866.601	18	18	866.598	-0.003	0.00001067	0.003
21	37	352.54	1027.068	866.609	10	9	866.606	-0.003	0.00001182	0.002
22	53	435.914	1037.345	859.801	29	13	859.799	-0.002	0.00000426	0.004
23	54	433.192	1036.043	861.75	22	13	861.736	-0.014	0.00019826	0.004
24	55	425.679	1031.767	864.824	20	17	864.821	-0.003	0.00000705	0.004
25	56	418.146	1027.042	866.646	16	15	866.634	-0.012	0.00014728	0.004
26	57	410.372	1021.597	868.042	11	11	868.039	-0.003	0.00001214	0.003
27	13	410.289	1016.475	868.031	16	15	868.039	0.008	0.00006322	0.005
28	38	360.786	1038.035	866.261	16	15	866.259	-0.002	0.00000367	0.004
29	39	365.028	1030.129	867.82	22	22	867.819	-0.001	0.00000064	0.003
30	40	365.647	1019.191	868.704	16	9	868.69	-0.014	0.00019731	0.004
32	42	385.423	1038.96	867.827	22	22	867.835	0.008	0.00005703	0.004
33	43	385.194	1050.523	865.073	22	17	865.085	0.012	0.00014471	0.004

34	44	385.32	1059.089	861.769	19	16	861.798	0.029	0.00083734	0.004
35	45	382.217	1062.878	859.145	20	14	859.13	-0.015	0.00023045	0.004
36	46	385.396	1019.355	869.769	16	13	869.76	-0.009	0.00008347	0.005
37	47	394.002	1019.024	869.554	13	7	869.54	-0.014	0.00019268	0.004
38	48	405.322	1018.879	868.68	13	10	868.673	-0.007	0.0000559	0.004
39	49	403.791	1027.723	868.236	21	21	868.235	-0.001	0.00000094	0.003
40	50	410.052	1037.927	866.295	15	15	866.287	-0.008	0.00006737	0.004
41	51	417.044	1050.632	861.753	15	8	861.762	0.009	0.00007503	0.004
42	52	418.659	1054.213	858.999	30	8	859.044	0.045		0.004
43	9	419.791	983.294	857.898	15	11	858.011	0.113		0.005
44	10	420.194	987.708	860.794	30	28	860.789	-0.005	0.00002116	0.003
45	11	410.241	1000.296	866.261	17	17	866.261	0	0	0.002
46	12	403.956	1010.659	868.253	21	15	868.245	-0.008	0.00005826	0.004
47	14	385.322	999.63	867.893	22	22	867.888	-0.005	0.00002135	0.004
48	15	385.343	987.625	865.052	28	20	865.047	-0.005	0.00002152	0.003
49	16	385.252	979.025	861.69	13	13	861.706	0.016	0.00025403	0.003
50	17	385.126	973.869	857.744	20	16	858.331	0.587		0.004
51	18	353.259	991.81	863.309	18	16	863.312	0.003	0.00000732	0.003
52	19	353.662	987.841	861.875	29	24	861.867	-0.008	0.00006943	0.004
53	20	360.938	1000.306	866.308	20	20	866.305	-0.003	0.00000854	0.003
54	21	368.46	1007.802	868.082	14	14	868.082	0	0.00000004	0.002
55	32	350.863	1055.009	857.74	17	12	857.835	0.095		0.003
56	33	353.206	1050.444	861.701	20	12	861.661	-0.04	0.00159617	0.005
D=	10	мм		Среднее	20.78431	16.09804		Mz(CKO)	0.010927	0.003784

Таблица В.3 – Параметры интерполяции поверхности 3,  $\Delta = 10$  мм

№	Имя	Xt, м	Yt, м	Zt, м	Nv	No	Zi, м	dZ, м	dZ2	Mvz
1	1	442.727	1015.971	857.976	32	8	858.055	0.079		0.0025
2	2	437.815	1019.164	861.741	64	14	861.755	0.014	0.000202	0.0029
3	3	429.3	1019.059	864.786	43	18	864.778	-0.008	0.000071	0.0033
4	4	417.265	1019.163	867.101	32	18	867.106	0.005	0.000022	0.0044
5	5	418.177	1011.436	866.635	30	11	866.642	0.007	0.000043	0.0047
6	6	425.821	1006.549	864.782	41	12	864.796	0.014	0.000189	0.0047
7	7	433.145	1002.055	861.732	63	9	861.682	-0.05	0.002539	0.0042
8	22	332.959	1001.779	858.861	65	11	858.834	-0.027	0.000711	0.0026
9	23	337.608	1002.349	861.798	48	8	861.825	0.027	0.000725	0.0027
10	24	344.885	1006.662	864.76	28	10	864.807	0.047		0.0045
11	25	352.445	1011.214	866.621	34	14	866.619	-0.002	0.000003	0.0039
12	26	360.129	1016.517	867.977	34	17	867.993	0.016	0.000267	0.0037
13	27	360.411	1021.651	868.01	32	18	868.018	0.008	0.000065	0.0038
14	28	332.846	1019.217	861.736	54	15	861.69	-0.046	0.002090	0.0033
15	29	329.282	1019.044	859.164	60	5	859.286	0.122		0.0025
16	30	334.051	1039.472	858.12	51	15	858.115	-0.005	0.000030	0.0041
17	31	336.61	1032.988	862.041	40	10	862.025	-0.016	0.000259	0.0037
18	34	345.035	1031.688	864.783	35	17	864.777	-0.006	0.000038	0.0053
19	35	341.665	1018.991	864.85	36	19	864.848	-0.002	0.000005	0.0034
20	36	350.455	1019.283	866.601	28	21	866.61	0.009	0.000076	0.0039
21	37	352.545	1026.988	866.621	43	19	866.594	-0.027	0.000742	0.0035
22	53	435.859	1037.509	859.782	58	11	859.717	-0.065		0.0037
23	54	433.228	1035.918	861.725	59	9	861.704	-0.021	0.000446	0.0047
24	55	425.786	1031.762	864.81	37	24	864.787	-0.023	0.000546	0.0034
25	56	418.124	1027.08	866.608	42	23	866.625	0.017	0.000290	0.0038
26	57	410.542	1021.694	868.014	32	14	868.01	-0.004	0.000015	0.0035
27	13	410.351	1016.546	868.033	41	30	868.027	-0.006	0.000035	0.0032
28	38	360.645	1038.04	866.261	34	25	866.225	-0.036		0.004
29	39	365.397	1030.21	867.834	36	21	867.828	-0.006	0.000032	0.0048

30	40	365.559	1019.25	868.685	43	28	868.684	-0.001	0.000001	0.0034
31	41	376.964	1019.305	869.553	40	21	869.545	-0.008	0.000060	0.0049
32	42	385.43	1038.319	867.923	31	25	867.941	0.018	0.000325	0.0046
33	43	385.417	1050.452	865.068	29	19	865.109	0.041		0.0038
34	44	385.314	1059.194	861.737	48	14	861.77	0.033	0.001106	0.0038
35	45	382.366	1062.788	859.23	70	10	859.279	0.049		0.0042
36	46	385.507	1019.103	869.764	23	17	869.747	-0.017	0.000278	0.0028
37	47	393.958	1019.147	869.527	27	26	869.529	0.002	0.000004	0.0043
38	48	405.225	1019.081	868.694	29	26	868.671	-0.023	0.000510	0.0042
39	49	403.904	1027.678	868.199	37	18	868.222	0.023	0.000511	0.0038
40	50	410.065	1037.963	866.281	33	20	866.265	-0.016	0.000256	0.0035
41	51	417.29	1050.486	861.755	42	7	861.73	-0.025	0.000604	0.0017
42	52	418.591	1054.134	859.101	82	8	859.073	-0.028	0.000777	0.0027
44	10	420.285	987.622	860.665	83	5	860.681	0.016	0.000245	0.0046
45	11	409.956	1000.282	866.31	29	14	866.293	-0.017	0.000280	0.0048
46	12	403.866	1010.81	868.274	30	12	868.246	-0.028	0.000773	0.0047
47	14	385.275	999.643	867.881	48	31	867.895	0.014	0.000186	0.0034
48	15	385.338	987.534	865	31	17	865.015	0.015	0.000211	0.0031
49	16	385.339	979.142	861.756	47	20	861.755	-0.001	0.000000	0.0038
50	17	385.273	973.852	857.901	37	9	858.09	0.189		0.0044
51	18	353.215	991.764	863.36	37	15	863.334	-0.026	0.000687	0.0025
52	19	353.503	987.89	861.851	62	7	861.909	0.058	0.003380	0.0043
53	20	360.72	1000.212	866.36	37	13	866.294	-0.066		0.0039
54	21	368.074	1008.038	868.074	31	26	868.071	-0.003	0.000007	0.0042
55	32	351.005	1054.952	857.899	32	8	857.976	0.077		0.0046
56	33	353.592	1050.555	861.755	43	15	861.768	0.013	0.000162	0.0032
n=	50			Сумма	2313	877			0.019804	0.2079
D=	10	мм		Среднее	46.26	17.54		Mz(CKO)	0.019902	0.004158

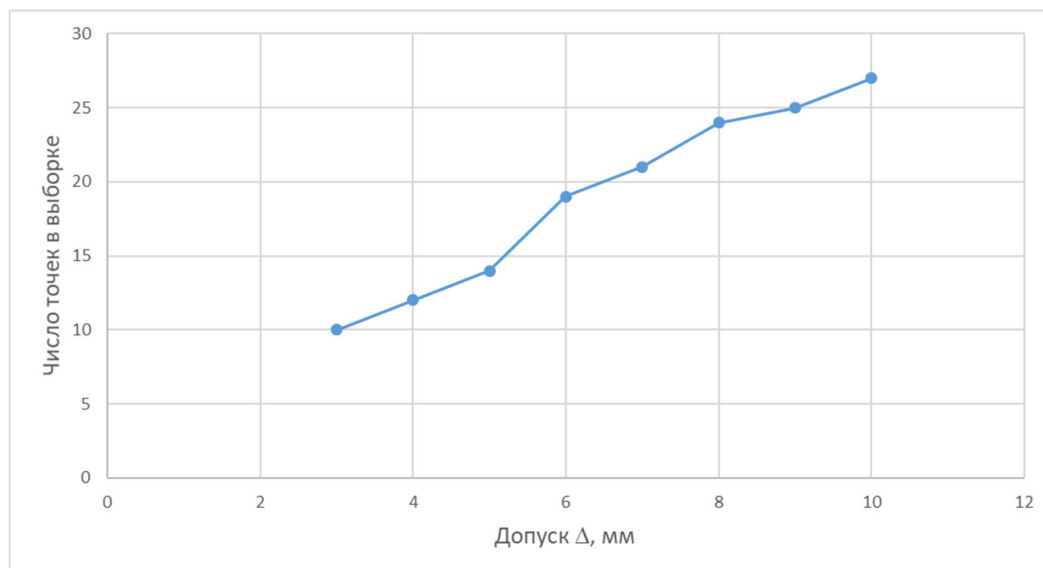
## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Поиск оптимального допуска  $\Delta$  для поверхностей 1-4

Таблица Г.1 – Параметры интерполяции поверхности 1

№	$\Delta$ , мм	СКО Z, м	$M_{vz}$ , м	$N_{cp}$
1	10	0.0104	0.0042	27
2	9	0.0132	0.0039	25
3	8	0.0121	0.0035	24
4	7	0.0126	0.0029	21
5	6	0.0131	0.0026	19
6	5	0.0113	0.0019	14
7	4	0.0120	0.0016	12
8	3	0.0124	0.0011	10

Рисунок Г.1 – Зависимость числа точек в выборке от величины  $\Delta$  (поверхность 1)

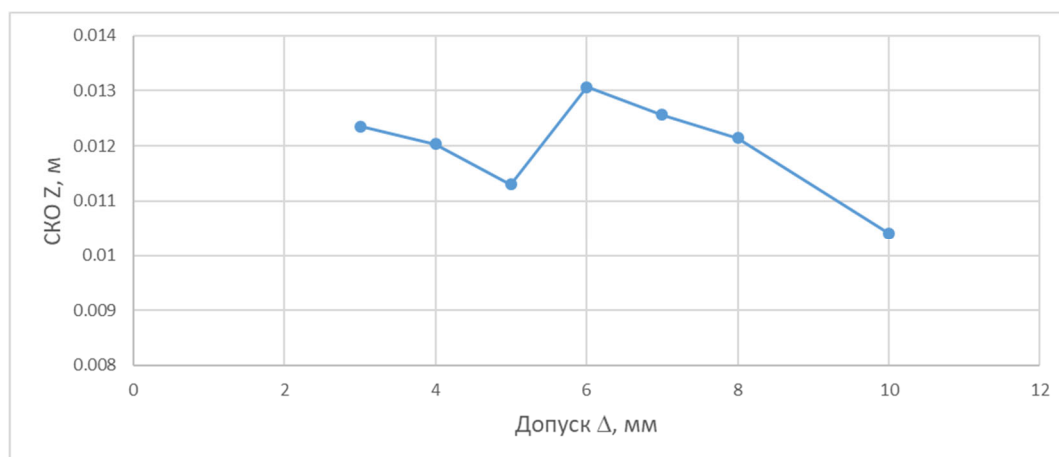
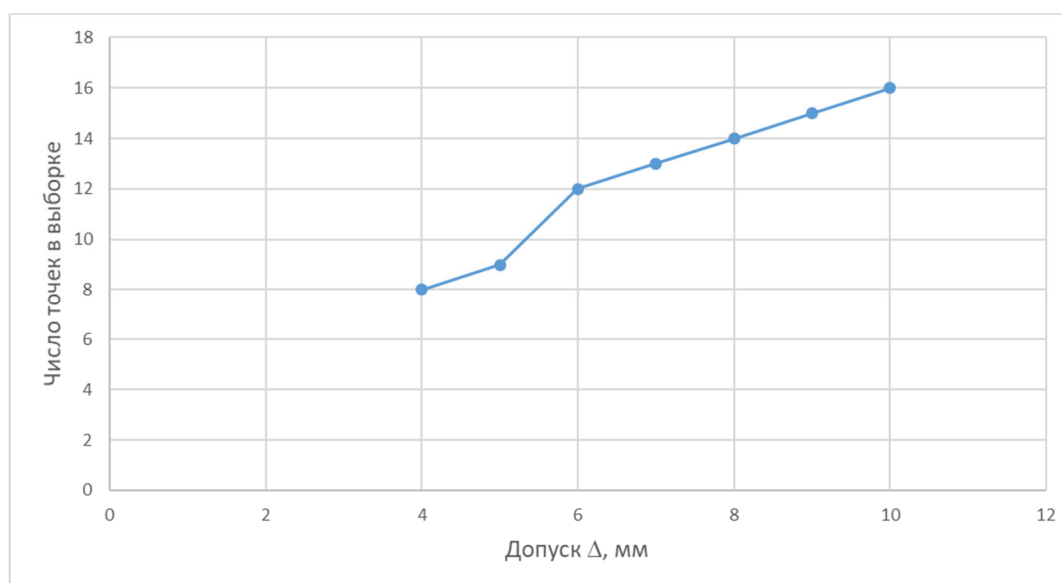
Рисунок Г.2 – Зависимость SKO Z от величины  $\Delta$  (поверхность 1)

Таблица Г.2 – Параметры интерполяции поверхности 2

№	$\Delta$ , мм	SKO Z, м	$M_{vz}$ , м	$N_{cp}$
1	10	0.0109	0.0038	16
2	9	0.0127	0.0035	15
3	8	0.0110	0.0030	14
4	7	0.0116	0.0026	13
5	6	0.0113	0.0021	12
6	5	0.0132	0.0014	9
7	4	0.0106	0.0010	8

Рисунок Г.3 – Зависимость числа точек в выборке от величины  $\Delta$  (поверхность 2)

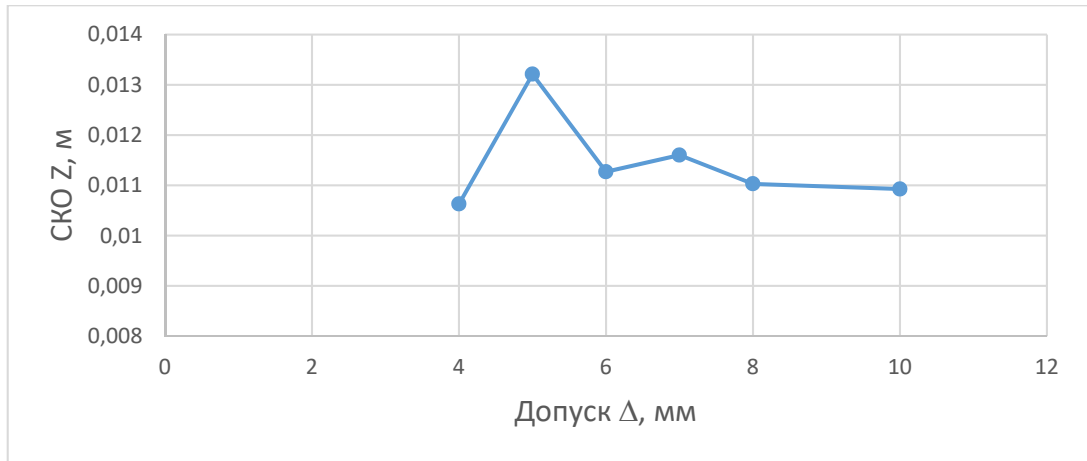
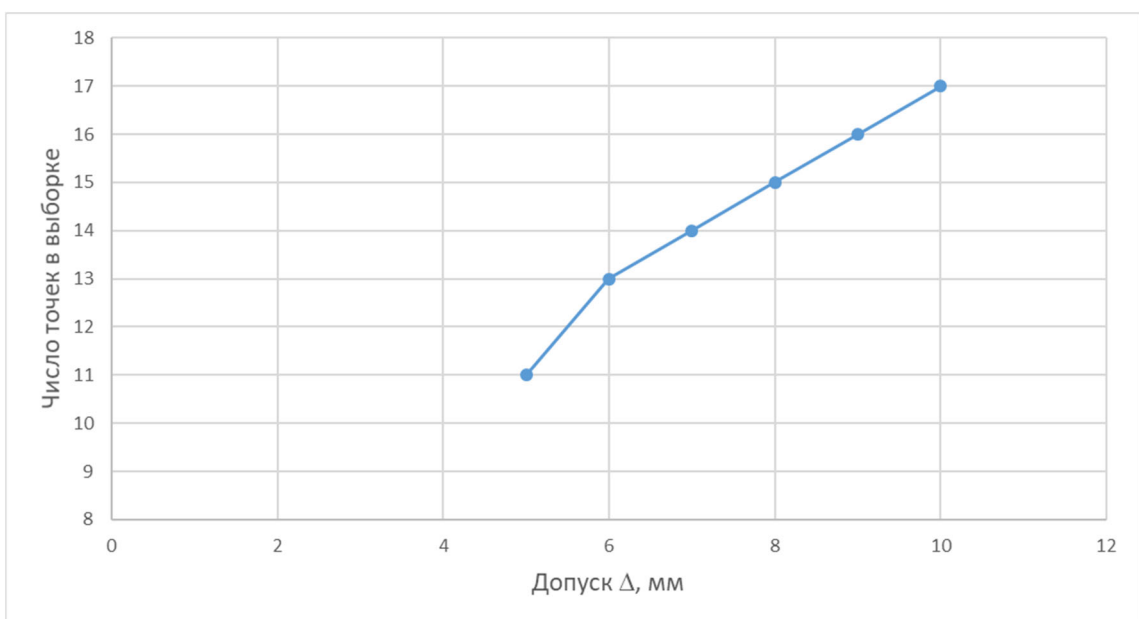
Рисунок Г.4 – Зависимость СКО  $Z$  от величины  $\Delta$  (поверхность 2)

Таблица Г.3 – Параметры интерполяции поверхности 3

№	$D$ , мм	СКО $Z$ , м	$M_{vz}$ , м	$N_{cp}$
1	10	0.019902	0.004158	17
2	9	0.023381	0.003765	16
3	8	0.017155	0.003258	15
4	7	0.016517	0.0027	14
5	6	0.017705	0.002483	13
6	5	0.021562	0.001888	11

Рисунок Г.5 – Зависимость числа точек в выборке от величины  $\Delta$  (поверхность 3)

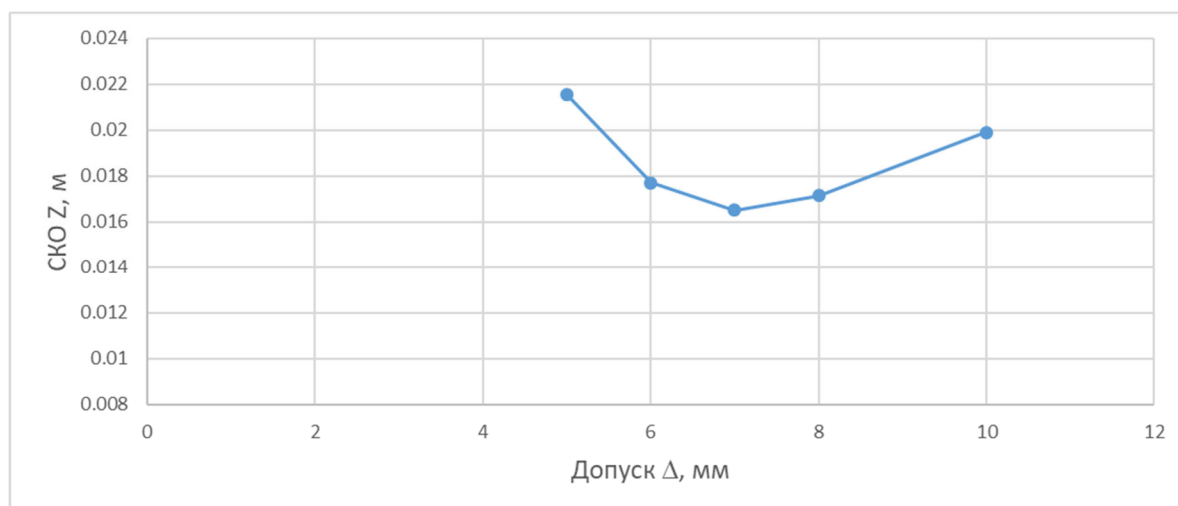


Рисунок Г.6 – Зависимость СКО  $Z$  от величины  $\Delta$  (поверхность 3)

Таблица Г.4 – Параметры интерполяции поверхности 4

№	$\Delta$ , мм	СКО $Z$ , м	$M_{vz}$ , м	$N_{cp}$
1	10	0.0104	0.0042	17
2	9	0.0132	0.0039	16
3	8	0.0121	0.0035	14
4	7	0.0126	0.0029	13
5	6	0.0131	0.0026	11
6	5	0.0113	0.0019	10
7	4	0.0120	0.0016	8
8	3	0.0124	0.0011	7

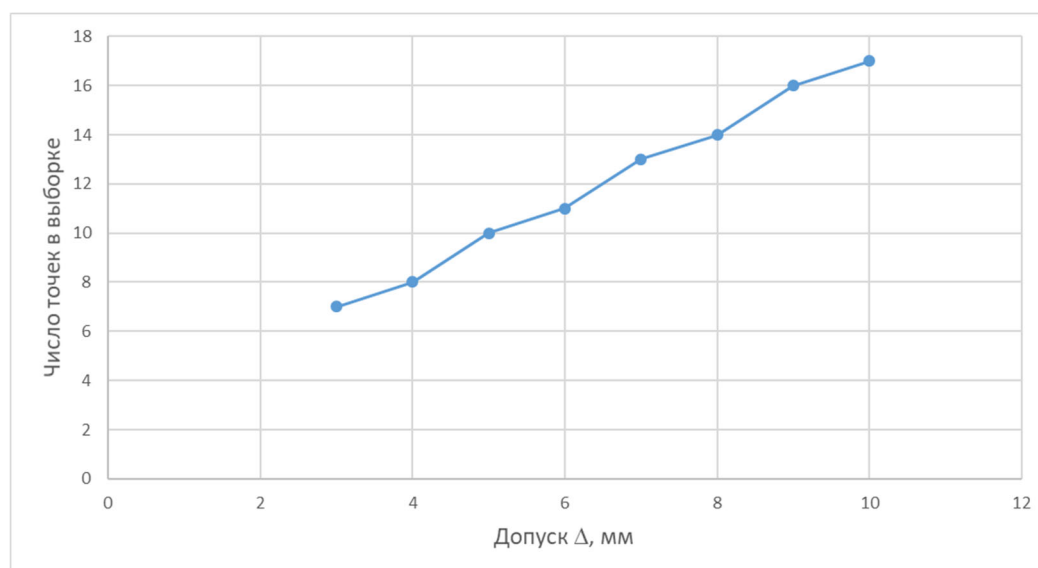


Рисунок Г.7 – Зависимость числа точек в выборке от величины  $\Delta$  (поверхность 4)

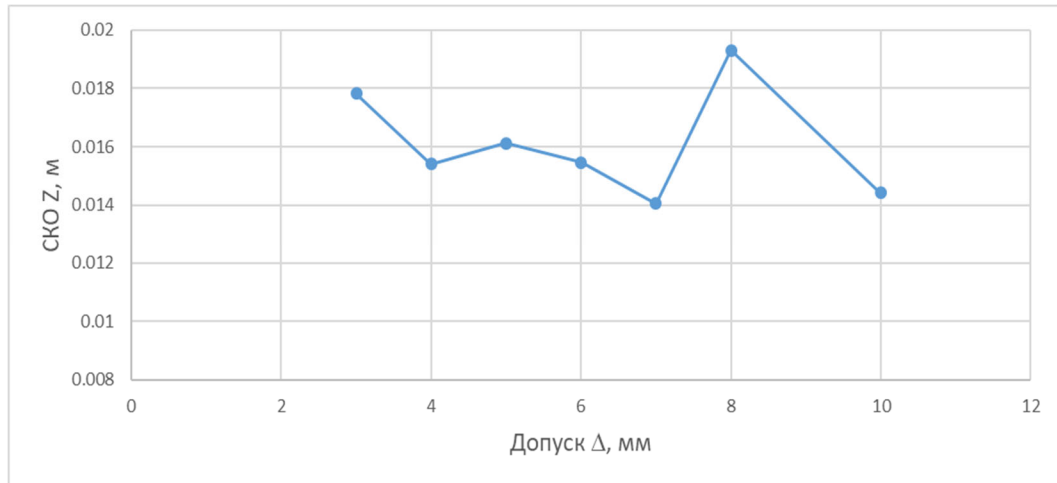


Рисунок Г.8 – Зависимость СКО Z от величины  $\Delta$  (поверхность 4)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Интерполирование поверхностей методом оптимальной плоскости с дополнительным условием

№	Имя	Xt, м	Yt, м	Zi1, м	N1	Zi2, м	N2	Zi3, м	N3	Zi4, м	N4	Zi2 - Zi1, м	Zi3 - Zi1, м	Zi4 - Zi1, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	437.877	1019.086	861.76	41	861.779	12	861.708	11	861.76	14	0.019	-0.052	0
2	3	429.264	1019.086	864.806	17	864.811	10	864.787	18	864.814	15	0.005	-0.019	0.008
3	4	417.285	1019.087	867.108	23	867.113	20	867.104	17	867.103	21	0.005	-0.004	-0.005
4	5	418.121	1011.273	866.643	26	866.652	15	866.64	9	866.649	16	0.009	-0.003	0.006
5	6	425.792	1006.633	864.806	25	864.805	25	864.808	11	864.825	17	-0.001	0.002	0.019
6	7	433.179	1002.168	861.726	33	861.726	20			861.739	11	0		0.013
7	22	332.989	1001.831	858.87	23	858.826	10	858.846	10	858.877	20	-0.044	-0.024	0.007
8	23	337.559	1002.235	861.743	44	861.726	17	861.768	10	861.764	13	-0.017	0.025	0.021
9	24	344.959	1006.707	864.794	25	864.795	15	864.829	10	864.791	12	0.001	0.035	-0.003
10	25	352.644	1011.339	866.638	20	866.635	19	866.661	15	866.611	16	-0.003	0.023	-0.027
11	26	360.327	1016.549	868.017	24	868.013	11	868.02	18	868.013	14	-0.004	0.003	-0.004
12	27	360.313	1021.716	867.998	33	868.002	13	868.002	21	868.011	19	0.004	0.004	0.013
13	28	332.94	1019.123	861.776	29	861.751	19	861.742	13	861.802	25	-0.025	-0.034	0.026
14	30	333.997	1039.469	858.155	18	858.137	13	858.092	16	858.129	18	-0.018	-0.063	-0.026
15	31	336.642	1033.007	862.026	25	862.028	14	862.026	9	862.065	20	0.002	0	0.039
16	34	345.013	1031.598	864.804	21	864.798	18	864.782	14	864.81	25	-0.006	-0.022	0.006
17	35	341.535	1019.153	864.788	29	864.788	11	864.815	22	864.777	15	0	0.027	-0.011
18	36	350.498	1019.152	866.6	26	866.595	18	866.617	17	866.586	19	-0.005	0.017	-0.014
19	37	352.682	1026.971	866.641	22	866.642	12	866.617	26	866.632	17	0.001	-0.024	-0.009
20	53	435.81	1037.414	859.827	26	859.818	13	859.786	9	859.798	21	-0.009	-0.041	-0.029
21	54	433.182	1036.025	861.753	30	861.744	13	861.702	11	861.751	12	-0.009	-0.051	-0.002
22	55	425.796	1031.582	864.813	29	864.82	18	864.806	21	864.818	16	0.007	-0.007	0.005
23	56	418.12	1026.947	866.646	33	866.645	16	866.636	23	866.652	19	-0.001	-0.01	0.006
24	57	410.375	1021.725	868.026	20	868.031	12	868.026	18	868.029	15	0.005	0	0.003

25	13	410.37	1016.5	868.026	34	868.03	18	868.023	31	868.036	19	0.004	-0.003	0.01
26	38	360.825	1038.004	866.276	26	866.269	16	866.252	23	866.297	15	-0.007	-0.024	0.021
27	39	365.38	1030.188	867.856	28	867.845	20	867.829	22	867.851	13	-0.011	-0.027	-0.005
28	40	365.616	1019.238	868.694	22	868.688	8	868.691	30	868.688	19	-0.006	-0.003	-0.006
29	41	376.953	1019.227	869.558	18			869.545	23	869.561	16		-0.013	0.003
30	42	385.373	1038.631	867.899	24	867.891	20	867.883	30	867.904	13	-0.008	-0.016	0.005
31	43	385.377	1050.565	865.075	31	865.074	18	865.076	19	865.09	16	-0.001	0.001	0.015
32	44	385.426	1059.126	861.774	41	861.782	16	861.803	11	861.785	21	0.008	0.029	0.011
33	46	385.401	1019.147	869.751	15	869.759	10	869.747	17	869.754	18	0.008	-0.004	0.003
34	47	393.946	1019.145	869.534	25	869.548	11	869.529	26	869.531	18	0.014	-0.005	-0.003
35	48	405.166	1019.152	868.687	24	868.691	14	868.676	26	868.693	13	0.004	-0.011	0.006
36	49	403.874	1027.546	868.25	26	868.243	20	868.235	21	868.251	10	-0.007	-0.015	0.001
37	50	409.979	1037.979	866.286	31	866.287	15	866.273	20	866.291	21	0.001	-0.013	0.005
38	51	417.312	1050.486	861.747	36	861.738	10	861.725	7	861.766	24	-0.009	-0.022	0.019
39	52	418.602	1054.198	859.085	24	859.063	9	859.071	10	859.08	25	-0.022	-0.014	-0.005
40	10	420.291	987.694	860.721	28	860.741	27	860.711	6	860.758	9	0.02	-0.01	0.037
41	11	409.985	1000.239	866.28	29	866.283	14	866.284	12	866.272	14	0.003	0.004	-0.008
42	12	403.882	1010.695	868.242	26	868.254	14	868.235	7	868.255	25	0.012	-0.007	0.013
43	14	385.375	999.608	867.88	25	867.886	20	867.889	32	867.892	11	0.006	0.009	0.012
44	15	385.36	987.661	865.039	24	865.055	20	865.052	17	865.067	19	0.016	0.013	0.028
45	16	385.355	979.093	861.734	30	861.749	12	861.728	21	861.759	28	0.015	-0.006	0.025
46	18	353.172	991.95	863.33	34	863.339	20	863.381	12	863.364	13	0.009	0.051	0.034
47	19	353.463	987.741	861.759	32	861.764	20			861.793	12	0.005		0.034
48	20	360.798	1000.251	866.281	22	866.28	22	866.311	15	866.29	18	-0.001	0.03	0.009
49	21	368.365	1008.072	868.098	25	868.102	11	868.102	20	868.111	15	0.004	0.004	0.013
50	33	353.481	1050.506	861.752	29	861.72	13	861.752	20	861.767	19	-0.032	0	0.015

$X_t, Y_t$  – координаты точки интерполирования;  $Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}$  – интерполированные отметки, индекс — это номер поверхности;  $N_1, N_2, N_3, N_4$  – число точек в выборке после отбраковки;  $Z_{i2} - Z_{i1}, Z_{i3} - Z_{i1}, Z_{i4} - Z_{i1}$  – разность отметок соответствующих точек поверхностей.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Таблица координат деформационных марок

№ марки	Отметки деформационных марок							Разность отметок		
	Дата съёмов геодезического мониторинга							Z5-Z4, м	Z6-Z4, м	Z7-Z4, м
	15.05.2018	25.08.2018	15.05.2019	15.08.2019	03.12.2019	15.03.2020	15.08.2020			
Z1, м	Z2, м	Z3, м	Z4, м	Z5, м	Z6, м	Z7, м				
1	854.622	854.623	854.623	854.625	854.626	854.629	854.625	0.001	0.004	0
2	857.577	857.577	857.578	857.578	857.578	857.58	857.578	0	0.002	0
3	861.071	861.07	861.067	861.066	861.066	861.067	861.067	0	0.001	0.001
4	863.467	863.465	863.456	863.455	863.455	863.455	863.455	0	0	0
5	863.004	862.999	862.989	862.99	862.988	862.992	862.987	-0.002	0.002	-0.003
6	861.089	861.087	861.085	861.084	861.081	861.084	861.083	-0.003	0	-0.001
7	857.6	857.601	857.601	857.601	857.601	857.601	857.599	0	0	-0.002
8	854.598	854.597	854.598	854.598	854.6	854.601	854.597	0.002	0.003	-0.001
9	854.643	854.641	854.642	854.64	854.641	854.641	854.640	0.001	0.001	0
10	857.669	857.667	857.667	857.666	857.666	857.666	857.666	0	0	0
11	862.624	862.616	862.605	862.608	862.608	862.605	862.605	0	-0.003	-0.003
12	864.647	864.637	864.622	864.624	864.622	864.621	864.621	-0.002	-0.003	-0.003
13	864.33	864.323	864.31	864.309	864.308	864.309	864.309	-0.001	0	0
14	864.394	864.386	864.374	864.375	864.375	864.375	864.375	0	0	0
15	861.415	861.413	861.408	861.407	861.408	861.407	861.406	0.001	0	-0.001
16	857.673	857.676	857.676	857.675	857.678	857.678	857.677	0.003	0.003	0.002
17	854.651	854.652	854.651	854.649	854.654	854.653	854.652	0.005	0.004	0.003
18	854.644	854.643	854.646	854.644	854.644	854.644	854.644	0	0	0
19	857.731	857.732	857.735	857.732	857.738	857.737	857.736	0.006	0.005	0.004
20	862.701	862.696	862.695	862.692	862.694	862.694	862.692	0.002	0.002	0
21	864.278	864.27	864.266	864.261	864.264	864.264	864.264	0.003	0.003	0.003
22	854.637	854.638	854.639	854.639	854.639	854.637	854.637	0	-0.002	-0.002
23	857.74	857.741	857.742	857.742	857.744	857.745	857.742	0.002	0.003	0
24	861.169	861.17	861.171	861.171	861.17	861.171	861.172	-0.001	0	0.001

25	863.03	863.023	863.024	863.022	863.022	863.023	863.022	0	0.001	0
26	864.436	864.429	864.424	864.421	864.42	864.421	864.420	-0.001	0	-0.001
27	864.413	864.402	864.398	864.396	864.396	864.396	864.396	0	0	0
28	857.499	857.498	857.5	857.501	857.503	857.503	857.505	0.002	0.002	0.004
29	854.664	854.664	854.664	854.665	854.665	854.665	854.665	0	0	0
30	854.637	854.636	854.636	854.637	854.637	854.639	854.639	0	0.002	0.002
31	857.448	857.447	857.448	857.45	857.451	857.45	857.452	0.001	0	0.002
32	854.57	854.569	854.57	854.573	854.575	854.575	854.576	0.002	0.002	0.003
33	857.597	857.597	857.595	857.597	857.598	857.599	857.600	0.001	0.002	0.003
34	860.997	860.992	860.991	860.989	860.985	860.987	860.987	-0.004	-0.002	-0.002
35	861.026	861.024	861.022	861.019	861.017	861.019	861.019	-0.002	0	0
36	862.919	862.91	862.908	862.905	862.903	862.904	862.904	-0.002	-0.001	-0.001
37	862.954	862.946	862.942	862.939	862.938	862.938	862.938	-0.001	-0.001	-0.001
38	862.585	862.576	862.57	862.567	862.566	862.566	862.566	-0.001	-0.001	-0.001
39	864.228	864.216	864.211	864.205	864.203	864.203	864.203	-0.002	-0.002	-0.002
40	865.226	865.214	865.205	865.203	865.2	865.199	865.199	-0.003	-0.004	-0.004
41	866.08	866.066	866.054	866.052	866.05	866.048	866.048	-0.002	-0.004	-0.004
42	864.4	864.388	864.381	864.376	864.376	864.375	864.374	0	-0.001	-0.002
43	861.434	861.428	861.427	861.423	861.421	861.422	861.422	-0.002	-0.001	-0.001
44	857.683	857.682	857.682	857.681	857.682	857.679	857.679	0.001	-0.002	-0.002
45	854.647	854.647	854.646	854.644	854.644	854.644	854.644	0	0	0
46	866.113	866.098	866.084	866.079	866.08	866.077	866.076	0.001	-0.002	-0.003
47	865.949	865.938	865.925	865.919	865.92	865.92	865.920	0.001	0.001	0.001
48	865.069	865.064	865.05	865.045	865.045	865.044	865.044	0	-0.001	-0.001
49	864.696	864.69	864.676	864.671	864.673	864.673	864.669	0.002	0.002	-0.002
50	862.688	862.685	862.679	862.671	862.672	862.671	862.671	0.001	0	0
51	857.715	857.717	857.715	857.713	857.714	857.713	857.711	0.001	0	-0.002
52	854.658	854.657	854.656	854.654	854.654	854.654	854.654	0	0	0
53	854.664	854.665	854.664	854.665	854.665	854.665	854.665	0	0	0
54	857.687	857.688	857.687	857.687	857.687	857.684	857.684	0	-0.003	-0.003
55	861.166	861.166	861.162	861.157	861.16	861.158	861.157	0.003	0.001	0
56	863.05	863.049	863.036	863.032	863.035	863.033	863.033	0.003	0.001	0.001
57	864.355	864.35	864.331	864.328	864.332	864.331	864.329	0.004	0.003	0.001

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

Таблица координат контрольных точек на поверхности перекрытия

Съемка 1 (15.08.2019)			Съемка 2 (03.12.2019)			Съемка 3 (15.03.2020)			Разность поверхностей		
Номер точки	X <sub>1</sub> , м	Y <sub>1</sub> , м	Z <sub>1</sub> , м	X <sub>2</sub> , м	Y <sub>2</sub> , м	Z <sub>2</sub> , м	X <sub>3</sub> , м	Y <sub>3</sub> , м	Z <sub>3</sub> , м	$\Delta Z_{21}=Z_2-Z_1$	$\Delta Z_{31}=Z_3-Z_1$
1	398.514	1029.802	868.465	398.534	1029.808	868.474	398.536	1029.804	868.462	0.009	-0.004
2	383.723	1033.948	868.614	383.730	1033.951	868.620	383.738	1033.943	868.612	0.006	-0.003
3	363.008	1032.095	867.397	363.023	1032.097	867.402	363.025	1032.087	867.391	0.005	-0.007
4	345.786	1034.310	864.592	345.796	1034.310	864.585	345.805	1034.298	864.590	-0.007	-0.002
5	369.534	1047.123	865.253	369.548	1047.118	865.258	369.547	1047.117	865.260	0.004	0.007
6	399.067	1045.391	865.839	399.079	1045.392	865.844	399.085	1045.392	865.856	0.005	0.017
7	417.714	1037.838	865.261	417.728	1037.845	865.255	417.734	1037.841	865.262	-0.006	0.001
8	385.389	1019.113	869.761	385.387	1019.118	869.757	385.387	1019.123	869.754	-0.005	-0.007
9	371.309	1009.074	868.460	371.311	1009.086	868.459	371.309	1009.084	868.450	-0.002	-0.010
10	358.007	1003.262	866.423	358.015	1003.280	866.421	358.009	1003.269	866.415	-0.002	-0.008
11	377.556	993.651	866.404	377.562	993.670	866.414	377.561	993.652	866.402	0.010	-0.002
12	404.338	997.669	866.406	404.350	997.693	866.415	404.349	997.675	866.405	0.009	-0.001
13	424.211	1019.115	865.848	424.224	1019.133	865.846	424.223	1019.123	865.837	-0.003	-0.011
14	406.300	1020.365	868.546	406.322	1020.378	868.549	406.308	1020.372	868.539	0.003	-0.007
15	400.430	1009.791	868.436	400.442	1009.806	868.444	400.429	1009.788	868.440	0.008	0.003
16	381.498	1004.635	868.582	381.510	1004.661	868.579	381.511	1004.645	868.574	-0.003	-0.009
									min	-0.007	-0.011
									max	0.010	0.017
									СКО	0.0059	0.0074

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

(обязательное)

Таблица координат поверхности перекрытия определенных методом медианной фильтрации

№	Имя	Xt, м	Yt, м	Zi1, м	N1	Zi2, м	N2	Zi3, м	N3	Zi4, м	N4	Zi2 - Zi1, м	Zi3 - Zi1, м	Zi4 - Zi1, м
1	2	437.877	1019.086	861.861	49	861.898	20	861.773	62	861.757	33	0.037	-0.088	-0.104
2	3	429.264	1019.086	864.799	26	864.877	17	864.783	44	864.821	23	0.078	-0.016	0.022
3	4	417.285	1019.087	867.159	24	867.13	21	867.098	33	867.109	36	-0.029	-0.061	-0.05
4	5	418.121	1011.273	866.639	26	866.687	17	866.615	25	866.642	27	0.048	-0.024	0.003
5	6	425.792	1006.633	864.809	31	864.783	28	864.822	40	864.785	23	-0.026	0.013	-0.024
6	7	433.179	1002.168	861.707	48	861.703	23	861.702	58	861.683	27	-0.004		-0.024
7	22	332.989	1001.831	858.893	54	858.792	24	858.839	62	858.889	49	-0.101	-0.054	-0.004
8	23	337.559	1002.235	861.759	53	861.727	22	861.788	48	861.792	28	-0.032	0.029	0.033
9	24	344.959	1006.707	864.768	33	864.834	19	864.833	28	864.817	22	0.066	0.065	0.049
10	25	352.644	1011.339	866.646	28	866.664	23	866.671	31	866.627	23	0.018	0.025	-0.019
11	26	360.327	1016.549	868.038	28	868.025	13	868.023	34	868.023	24	-0.013	-0.015	-0.015
12	27	360.313	1021.716	868.016	40	867.986	13	868.006	38	867.999	30	-0.03	-0.01	-0.017
13	28	332.94	1019.123	861.83	43	861.723	23	861.71	51	861.822	36	-0.107	-0.12	-0.008
14	30	333.997	1039.469	858.435	29	858.328	20	858.218	50	858.164	46	-0.107	-0.217	-0.271
15	31	336.642	1033.007	862.004	38	862.037	17	862.018	42	862.135	37	0.033	0.014	0.131
16	34	345.013	1031.598	864.789	28	864.857	21	864.756	37	864.809	31	0.068	-0.033	0.02
17	35	341.535	1019.153	864.803	37	864.803	14	864.814	36	864.816	27	0	0.011	0.013
18	36	350.498	1019.152	866.606	26	866.545	18	866.595	27	866.609	29	-0.061	-0.011	0.003
19	37	352.682	1026.971	866.677	27	866.719	13	866.619	43	866.652	27	0.042	-0.058	-0.025
20	53	435.81	1037.414	859.847	60	859.865	30	859.737	58	859.838	33	0.018	-0.11	-0.009
21	54	433.182	1036.025	861.819	48	861.738	22	861.696	58	861.829	29	-0.081	-0.123	0.01
22	55	425.796	1031.582	864.865	36	864.83	18	864.797	35	864.84	26	-0.035	-0.068	-0.025
23	56	418.12	1026.947	866.667	40	866.683	17	866.635	40	866.653	34	0.016	-0.032	-0.014
24	57	410.375	1021.725	868.027	24	868.046	12	868.023	27	868.042	24	0.019	-0.004	0.015

25	13	410.37	1016.5	868.037	35	868.055	19	868.036	42	868.059	27	0.018	-0.001	0.022
26	38	360.825	1038.004	866.285	31	866.299	18	866.272	35	866.303	25	0.014	-0.013	0.018
27	39	365.38	1030.188	867.854	30	867.868	20	867.821	37	867.877	25	0.014	-0.033	0.023
28	40	365.616	1019.238	868.709	26	868.711	17	868.694	44	868.698	27	0.002	-0.015	-0.011
29	41	376.953	1019.227	869.554	38	869.544	10	869.553	41	869.565	26		-0.001	0.011
30	42	385.373	1038.631	867.882	25	867.879	21	867.893	35	867.946	25	-0.003	0.011	0.064
31	43	385.377	1050.565	864.999	34	865.121	23	865.098	30	865.159	28	0.122	0.099	0.16
32	44	385.426	1059.126	861.773	53	861.932	19	861.804	49	861.819	37	0.159	0.031	0.046
33	46	385.401	1019.147	869.754	20	869.763	13	869.749	23	869.752	24	0.009	-0.005	-0.002
34	47	393.946	1019.145	869.53	31	869.545	14	869.529	27	869.539	25	0.015	-0.001	0.009
35	48	405.166	1019.152	868.668	37	868.702	15	868.693	28	868.689	29	0.034	0.025	0.021
36	49	403.874	1027.546	868.255	29	868.254	20	868.255	39	868.271	21	-0.001	0	0.016
37	50	409.979	1037.979	866.308	35	866.334	15	866.295	33	866.328	31	0.026	-0.013	0.02
38	51	417.312	1050.486	861.774	43	861.73	14	861.711	42	861.792	41	-0.044	-0.063	0.018
39	52	418.602	1054.198	859.155	44	859.035	31	859.039	83	859.078	51	-0.12	-0.116	-0.077
40	10	420.291	987.694	860.705	42	860.712	30	860.745	75	860.819	23	0.007	0.04	0.114
41	11	409.985	1000.239	866.272	36	866.308	14	866.289	29	866.315	26	0.036	0.017	0.043
42	12	403.882	1010.695	868.258	28	868.242	21	868.266	26	868.259	34	-0.016	0.008	0.001
43	14	385.375	999.608	867.883	27	867.868	22	867.924	46	867.898	22	-0.015	0.041	0.015
44	15	385.36	987.661	865.043	32	865.043	25	865.03	31	865.049	30	0	-0.013	0.006
45	16	385.355	979.093	861.801	47	861.912	13	861.734	47	861.794	51	0.111	-0.067	-0.007
46	18	353.172	991.95	863.342	38	863.355	24	863.368	35	863.391	36	0.013	0.026	0.049
47	19	353.463	987.741	861.773	41	861.89	29	861.937	59	861.788	33	0.117		0.015
48	20	360.798	1000.251	866.313	33	866.272	22	866.317	34	866.338	29	-0.041	0.004	0.025
49	21	368.365	1008.072	868.104	25	868.126	12	868.091	27	868.125	26	0.022	-0.013	0.021
50	33	353.481	1050.506	861.767	36	861.697	23	861.838	45	861.714	34	-0.07	0.071	-0.053

$X_t, Y_t$  – координаты точки интерполирования;  $Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}$  – интерполированные отметки, индекс — это номер поверхности;  $N_1, N_2, N_3, N_4$  – число точек в выборке после отбраковки;  $Z_{i2} - Z_{i1}, Z_{i3} - Z_{i1}, Z_{i4} - Z_{i1}$  – разность отметок соответствующих точек поверхностей.