

## АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание ученой степени  
доктора философии (PhD) 6D071100 – Геодезия

Сейтказина Гульнур Саркытбековна

### ГЕОМОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы.** Задача геодезического мониторинга относится к одной из наиболее распространенных и ответственных в практике выполнения геодезических работ. В XX веке были разработаны основные принципы выполнения геодезического мониторинга, технологические схемы наблюдений и математические модели расчета точности, интервалов наблюдений и обработки результатов. В настоящее время, методы и технологии геодезического мониторинга претерпели существенные изменения. Эти изменения связаны с разнообразием геометрических параметров возводимых сооружений (длина, высота, диаметр и пр.) и возможностями возведения сооружений (отсутствие ограничений, связанных с условиями окружающей среды, типом основания под сооружением, возведение объектов в сейсмических зонах). С этой точки зрения очевидно, что современные сооружения испытывают более сложные нагрузки, что ведет к более сложным деформационным процессам. Среди современных инженерных сооружений, технология возведения которых претерпела существенные изменения, особое место занимают спортивные сооружения. Эксплуатация спортивных сооружений связана с наличием специфических нагрузок, таких как воздействие огромного количества зрителей (стадионы, велотреки) или нагрузок непосредственно от проводимых соревнований (бобслейные трассы, автодромы). В таких условиях существующие подходы к проектированию и проведению геодезического мониторинга спортивных сооружений не обеспечивают требуемой точности, детальности и оперативности работ. Выполнение геодезического мониторинга спортивных сооружений требует разработки и усовершенствования существующих математических моделей расчёта точности, методики выполнений наблюдений и моделей анализа результатов измерений.

Классический подход к организации и проведению геодезического мониторинга инженерных сооружений приведен в работах авторов Гуляева Ю.П., Зайцева А.К., Михелева Д.Ш., Ключина Е.Б., Симоняна В.В., Шеховцева Г.А.

Проблеме геодезического мониторинга инженерных сооружений посвящены работы ряда отечественных ученых, рассматривающих вопросы организации мониторинга, анализа деформаций и применения современных технологий в условиях Республики Казахстан.

Работы зарубежных ученых направлены в первую очередь на совершенствование технологии выполнения работ. Следует отметить разработки научных школ Штуттгарта (D. Wujanz, F. Neitzel, W. Busch), Милана (F. Fregonese, M. Scaioni, G. Alba), Ноттингема (X. Meng) и Братиславы (А. Корáčík, Р. Куrинovič, I. Lipták, J. Erdélyi).

**Актуальность темы.** Геодезический мониторинг спортивных сооружений является отдельной задачей мониторинга, которая связана с проведением наблюдений за сооружениями, испытывающими различные статические и динамические нагрузки. Предложенные ранее методы и модели расчета точности наблюдений, методы и технологии выполнения мониторинга, и математические модели обработки результатов мониторинга базировались на совершенно другом состоянии строительной отрасли и геодезического производства. В таких условиях возникает необходимость в использовании усовершенствованных моделей расчета точности

наблюдений, новых технологий и моделей анализа измерений, которые будут отображать современные условия проектирования и возведения спортивных сооружений.

Современные достижения в области расчета строительных конструкций, в том числе и спортивных сооружений, позволили совершенно по-новому взглянуть на проблему моделей расчета точности и периодичности наблюдений. Существующие математические модели определения точности базируются на принятых стандартных значениях, которые весьма приблизительно характеризуют процесс деформирования инженерных сооружений. В большинстве случаев нормирование точности геодезического мониторинга проводится с использованием инструктивных показателей, которые разработаны для типовых сооружений, к которым спортивные сооружения не относятся. Существенным недостатком является рассмотрение инженерного сооружения как статичного объекта, в котором перемещения происходят по одним и тем же законам, а разные части здания рассматриваются, как однородные. При таком подходе места выполнения мониторинга (места установки деформационных знаков, марок) назначаются, либо, исходя из опыта наблюдателя, либо умозрительно без какого-то бы ни было научного обоснования. Исходя из этого, научно обоснованной будет комплексная модель расчета ожидаемых перемещений на основе рассмотрения взаимодействие здание-основание-окружающая среда. Таким образом, актуальной является разработка математической модели определения точности геодезического мониторинга за перемещениями, как функции деформаций полученных с использованием упрощенных моделей строительной механики.

Сложная геометрия и необходимость контроля различных деформационных параметров спортивных сооружений (пространственные перемещения, наблюдение за поверхностями, оболочками, отдельными узлами, наблюдение за развитием трещин, и т.д.) ограничивают использование традиционных методов мониторинга таких как, геометрическое нивелирование или линейно-угловые измерения. Одновременно с этим, в нормативной литературе рассматриваются и рекомендуются методы и технологии, которые либо устарели, либо существенно изменились за последние двадцать лет. Следовательно, важнейшей задачей является разработка методики и технологии геодезического мониторинга спортивных сооружений с использованием современных методов измерений. В качестве такого метода особыми преимуществами обладает метод наземного лазерного сканирования, который позволяет получить пространственную модель спортивного сооружения для ее комплексного исследования и анализа.

Анализ результатов мониторинга на сегодняшний день выполняется и предоставляется в основном в виде графиков перемещений и расчетов отдельных деформационных параметров, таких как крен, прогиб, кручение, и пр. Однако, пространственная модель сооружения, полученная по результатам лазерного сканирования, позволяет выполнять более комплексный и детальный анализ деформации сооружения. В таком случае, особую актуальность приобретает задача разработки новых моделей и методик анализа результатов мониторинга. Избыточность данных наземного лазерного сканирования позволяет использовать для моделирования перемещений более сложные математические модели, примером которых служат сплайн-функции и их модификации в виде В-сплайнов и неравномерных рациональных В-сплайнов.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности темы диссертационного исследования, направленного на совершенствование моделей расчета точности наблюдений, разработку новых технологий, методик и моделей анализа результатов геодезического мониторинга спортивных сооружений.

**Цель исследования.** Совершенствование методики и технологии геодезического мониторинга деформационных процессов спортивных сооружений на основе высокоточных геодезических измерений.

**Объект исследования** – Международный комплекс лыжных трамплинов «Сункар».

**Предмет исследования** – деформационные процессы конструкций спортивных сооружений.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методов и технологий геодезического мониторинга спортивных сооружений, включая методы расчёта точности геодезических наблюдений и методы анализа результатов мониторинга деформационных процессов;

- исследовать и обосновать применение методов строительной механики, в том числе конечно-элементного моделирования, для оценки расчетных перемещений спортивных сооружений и разработки модели определения требуемой точности геодезического мониторинга, на примере лыжного трамплина «Сункар»;

- разработать методику рационального размещения деформационных марок на конструкциях спортивных сооружений на основе результатов моделирования напряжённо-деформированного состояния;

- разработать и обосновать методику анализа пространственных перемещений спортивных сооружений по данным геодезического мониторинга с использованием теории сплайн-функций.

**Методы исследования** позволяют полностью решить поставленные задачи. Для разработки математической модели расчета точности геодезического мониторинга использованы базовые принципы и методы строительной механики, а также теоретический и вычислительный алгоритм метода конечных элементов. Разработка методики размещения деформационных марок выполнено по результатам расчетов перемещений и напряжений спортивного сооружения методом конечных элементов. Для моделей анализа и интерпретации результатов геодезического мониторинга использованы методы вычислительной математики, а именно теория и приложения сплайн-функций.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Математическая модель расчета точности геодезического мониторинга, основанная на конечно-элементном моделировании, позволяющая рассчитывать точность наблюдений по предельным расчетным перемещениям и методика оптимального размещения деформационных марок в зонах концентрации напряжений.

2. Методика исследования пространственных перемещений спортивных сооружений с использованием теории сплайн-функций, обеспечивающая анализ пространственно-неоднородных геодезических данных и выявление закономерностей изменения перемещений.

**Научная новизна диссертационной работы:**

1. Разработана комплексная научно-методическая основа геодезического мониторинга спортивных сооружений, включающая математическую модель определения требуемой точности измерений на основе конечно-элементного моделирования, а также методику рационального размещения деформационных марок в зонах ожидаемых максимальных перемещений и концентрации напряжений, что позволяет обоснованно назначать точность и определять схему мониторинга без предварительного выдвижения гипотез о характере деформаций.

2. Предложена методика анализа пространственных перемещений спортивных сооружений с использованием теории сплайн-функций, позволяющая выполнять аппроксимацию и интерпретацию пространственно-неоднородных геодезических наблюдений, выявлять закономерности деформирования сооружений и обосновывать проектные решения по защитным мероприятиям.

**Практическая значимость диссертационной работы:**

- разработана технология геодезического мониторинга спортивных сооружений методом наземного лазерного сканирования, которая включает технологическую схему выполнения работ и может быть использована при проведении геодезического мониторинга других типов сооружений;

- разработаны методические рекомендации по улучшению нормативной базы в разделе геодезического мониторинга инженерных сооружений;

- предложен расчетный алгоритм моделирования сложных криволинейных объектов с использованием методов вычислительной геометрии, а именно сплайн-функций. Практически расчетный алгоритм реализован на языке программирования Matlab.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в учебный процесс Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, а также использованы при выполнении производственных проектов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается использованием методов теории геодезических измерений и строительной механики, применением конечно-элементного моделирования и современных численных методов анализа деформаций, а также сопоставлением результатов моделирования с данными высокоточных геодезических наблюдений на комплексе лыжных трамплинов «Сункар». Полученные результаты являются обоснованными и подтверждены публикациями в научных изданиях и апробацией на международных научных конференциях.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в анализе современных методов геодезического мониторинга спортивных сооружений и выявлении ограничений нормативных подходов к расчёту точности. Разработана математическая модель назначения точности мониторинга на основе строительной механики и конечно-элементного моделирования. Выполнено моделирование деформаций лыжных трамплинов комплекса «Сункар» и обосновано размещение деформационных марок. Предложена технология мониторинга спортивных сооружений с применением наземного лазерного сканирования.

**Публикации и апробация диссертационной работы.** По материалам диссертационного исследования опубликовано семь печатных работ, в т.ч.: две статьи в рецензируемых журналах (база Scopus; Civil Engineering Journal (Q1) и Journal Geodesy and Geodynamics (Q2)); одна статья в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МНВО РК и четыре статьи в сборниках международных конференций, форумов и конгрессов, две из них входящий в базу Scopus.

**Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:**

1. Исследована математическая модель расчёта перемещений спортивных сооружений с использованием методов строительной механики, в частности метода конечных элементов, на примере лыжного трамплина «Сункар».

2. Разработана математическая модель расчёта точности геодезического мониторинга спортивных сооружений на основе принципов строительной механики.

3. Разработана и обоснована методика рационального размещения деформационных марок на конструкциях спортивных сооружений на основе результатов моделирования напряжённо-деформированного состояния, на примере лыжного трамплина «Сункар».

4. Разработана технология геодезического мониторинга спортивных сооружений методом наземного лазерного сканирования.

5. Разработана и обоснована методика анализа пространственных перемещений спортивных сооружений по данным геодезического мониторинга с использованием теории сплайн-функций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 68 рисунков, список литературы из 94 наименований.