

На правах рукописи

Булаева Евгения Александровна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ
СПУТНИКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА-2013

Работа выполнена на кафедре Астрономии и космической геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Краснорылов Игорь Ильич

Официальные оппоненты: Певнев Анатолий Кузьмич
доктор технических наук, профессор, Институт
физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, лаборатория
физики колебаний пробных масс, главный научный
сотрудник

Шануров Геннадий Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Московский
государственный университет геодезии и
картографии, кафедра высшей геодезии, профессор

Ведущая организация: ФГКУ «27 ЦНИИ» Минобороны России, научно-
исследовательский центр топографо-геодезического
и навигационного обеспечения

Защита диссертации состоится «21» ноября 2013 г. в «10» часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, дом 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан «18» октября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Вшивкова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Решение таких специфических задач как мониторинг геологической среды (в части решения задач локальной геодинамики, а также смещений и деформаций грунтов), мониторинг деформаций сооружений (смещений в горизонтальной плоскости и вертикальном направлении) требует применения современных технологий, кроме высокой точности обеспечивающих заданную регулярность и автоматизацию получения информации.

Под термином «геологическая среда» нами рассматривались, прежде всего, геодинамические процессы, протекающие в приповерхностных структурах, на которых могут располагаться крупные инженерные сооружения и которые могут исследоваться геодезическими методами. Например, нарушение устойчивости гидротехнического сооружения (ГТС), создающего водохранилище больших объемов, может обернуться катастрофическими последствиями, соизмеримыми со стихийными бедствиями. Поэтому, контроль за состоянием ГТС, в том числе мониторинг плотин ГЭС, и земной коры в зоне их расположения, представляется совершенно необходимым. Решение может быть осуществлено на основе использования спутниковых технологий и применения математических методов для обработки и интерпретации полученных результатов.

Актуальность изучения и анализа возможностей мониторинга на основе наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) заключается в его высокой эффективности. Системы спутникового мониторинга могут функционировать непрерывно, не требуя присутствия человека, предоставляя информацию о пространственных смещениях (по трём координатам) в режиме реального времени. При этом основой являются результаты измерений на постоянно действующих референцных станциях и спутниковых приёмниках, устанавливаемых в контролируемых точках, обеспечивающие мониторинг инженерных сооружений и геодинамических процессов в приповерхностных структурах локальных территорий, примыкающих к ГТС, с точностью определения смещений на уровне средних квадратических ошибок (СКО) 1-2 мм.

В связи с этим требуется разработка методики спутникового мониторинга, что является одной из задач диссертационной работы. Поэтому тема диссертации, посвященная разработке такой методики и анализу её эффективности, а в целом внедрению спутниковых технологий в одно из важнейших направлений хозяйственной деятельности – повышение эффективности ГТС, особенно их безопасной эксплуатации, является актуальной.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертации является разработка методики спутникового мониторинга, на основании которой могут быть сформулированы частные методики (с учетом свойств объектов наблюдений) смещений крупных инженерных сооружений и геодинамических процессов в приповерхностных структурах, на которых они расположены.

Решению в диссертационной работе подлежат такие задачи как:

- определение требований к результатам мониторинга и на этой основе определение требований к системе мониторинга, её аппаратно-программному обеспечению, периодичности и оперативности измерений;
- разработка математической модели мониторинга – формульных зависимостей результатов измерений и конечных результатов (смещений, деформаций);
- алгоритмизация математической модели;
- испытания методики на реальных объектах мониторинга.

Научная новизна работы состоит в теоретическом обосновании и доведении до практического использования разработанной автором методики спутникового мониторинга геологической среды и крупных ГТС со средними квадратическими ошибками определения смещений и деформаций на уровне 1-2 мм. В работе разработан математический аппарат, основанный на совместном использовании метода наименьших квадратов и гармонического анализа непрерывных рядов результатов ГНСС-наблюдений, позволяющий комплексно оценивать как трендовые, так и периодические изменения состояния объектов мониторинга, а также осуществлять фильтрацию данных спутниковых наблюдений.

Положения, выносимые на защиту, связаны с применением систем спутникового мониторинга на Нижнекамской ГЭС, изучением деформаций в приокском районе Русской платформы. На защиту выносятся следующие результаты:

- методика спутникового мониторинга геологической среды;
- методика спутникового мониторинга крупных ГТС;
- обоснование точностных возможностей спутникового мониторинга геологической среды;
- обоснование точностных возможностей спутникового мониторинга крупных ГТС;
- результаты практической реализации спутникового мониторинга приокского района Русской платформы;
- результаты практической реализации спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС;
- рекомендации по внедрению спутниковой технологии на проектируемых и уже введенных в эксплуатацию ГЭС.

Практическая значимость работы состоит в том, что автором разработаны рекомендации по возможным вариантам внедрения спутниковой технологии и целесообразности её применения на ГЭС, а также рекомендации по совместной эксплуатации двух систем (спутниковой и технологии отвесов). Кроме того представленная методика мониторинга геологической среды может применяться при изучении локальной геодинамики платформенных территорий. Полученные результаты использовались в Институте геоэкологии РАН при выполнении исследований в приокском районе Русской платформы, а также в ОКР «Центр-П-М» по заказу Российского космического агентства, выполненной ОАО «НПК «РЕКОД» на Нижнекамской ГЭС.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований докладывались автором и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАИК 2005, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.; на Международной научно-технической

конференции «Геодезия, картография и кадастр –XXI век», посвященной 230-летию основания МИИГАиК (25-27 мая 2009 г., Москва); на XVI Международной конференции «Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы восточно-европейской платформы» (20-24 сентября 2010 г., Воронеж).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в шести научно-технических статьях, пять из которых – в утвержденных ВАК изданиях. Материалы также представлены в научно-техническом отчете по результатам опытной эксплуатации Системы спутникового мониторинга на Нижнекамской ГЭС, подготовленном с участием автора.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует специальности 25.00.32 «Геодезия». Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктом 3 паспорта специальности ВАК – Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и технологии...»; пунктом 6 – «Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений...»; пунктом 8 – «Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры...»; пунктом 11 – «Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений...».

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит 136 страниц, состоит из введения, трех глав, заключения, списка источников информации (71 наименование, в том числе 13 на английском языке) и двух приложений. Работа содержит 15 таблиц и 48 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, формулировки цели, задач работы и ожидаемых научных результатов, которые автор предполагал получить в результате исследований.

В первой главе «Анализ современных технологий мониторинга состояния геологической среды и инженерных сооружений» рассмотрены современные методы геодезического мониторинга геологической среды и

инженерных сооружений. Проведен сравнительный анализ традиционных и спутникового методов в организации процессов мониторинга, в том числе зарубежный и отечественный опыт применения постоянно действующих референционных станций для спутникового мониторинга объектов. Сформулированы требования к разработке технологических решений применения спутникового метода для мониторинга.

Во второй главе «Разработка методики спутникового мониторинга объектов» обоснована и представлена методика математической обработки спутниковых измерений в задаче мониторинга крупных инженерных сооружений, математический аппарат анализа получаемых результатов.

Задача мониторинга реализуется системой аппаратно-программных средств записи, хранения и математической обработки спутниковой измерительной информации с референционных станций, оснащенных спутниковой аппаратурой, средств связи и электропитания, средств предупреждения о несоответствии состояния объекта ожидаемым параметрам. Первичная математическая обработка и последующий анализ данных спутниковых измерений является одним из основных этапов технологии мониторинга объектов.

Мониторинг должен установить: происходит ли изменение пространственного положения объектов (конструкций) и получить числовые характеристики смещений. Результаты измерений, таким образом, меняются с течением времени. Смещения таких высокоинерциальных систем, как плотины ГЭС и других крупных инженерных сооружений имеют, как показано ниже, плавный характер и могут быть описаны соответствующей функцией $f(t)$. Одной из таких функций является тригонометрический ряд Фурье.

В соответствии с этим для проведения низкочастотной фильтрации результаты измерений Δ_i представлялись в виде:

$$\Delta_i + V_i = c + d(t_i - t_0) + f(ab), \quad (1)$$

$$f(a b) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^k \left[a_j \cos j \frac{\pi}{N} (t_i - t_0) + b_j \sin j \frac{\pi}{N} (t_i - t_0) \right]. \quad (2)$$

в котором:

$j = 1, 2, \dots, k$ – номер гармоники в ряде Фурье; V – вектор остаточных уклонений; $2N$ – число измерений; a, b – коэффициенты гармонического ряда; c, d – коэффициенты линейного тренда

Вычисление коэффициентов осуществлялось под условием:

$$\left[\bar{V}^T P \bar{V} \right] = \min. \quad (3)$$

При решении задачи необходимо было определиться с числом коэффициентов a и b в гармоническом ряде Фурье. Это было сделано с учетом свойств конкретного объекта. При непрерывных спутниковых измерениях число измерений практически всегда во много раз превышает число определяемых параметров. В то же время такие инженерные сооружения, как плотина ГЭС имеют периодические смещения, обладающие низкочастотным спектром, следовательно, в уравнение поправок необходимо включить ограниченное число гармоник, присущих объекту мониторинга. Соответствующий спектр был получен по заранее выполненным (пробным) измерениям.

Для проверки этого утверждения мы провели сравнение спектральных характеристик результатов определения, полученных с использованием спутниковой и, применяемой для определения взаимного положения секций плотины (штатной), технологии. Объектом наблюдения здесь выступает взаимное смещение двух соседних секций плотины ГЭС. В штатной технологии инструментом являются прямые и обратные отвесы, измеряющие растяжение/сжатие «шва» – участка на гребне плотины. Отсчеты снимаются один раз в час. В штатной технологии обратных отвесов отсчетной является плоскость, содержащая отвесную линию, положение которой зависит от силы тяжести меняющейся массы воды. В основе спутниковой технологии лежит геометрический принцип, не связанный с силой тяжести. Спутниковые антенны расположены на расстоянии 3 м друг от друга по разные стороны от «шва». Обе технологии выявляют линейные смещения двух соседних секций плотины.

Для первичной математической обработки результатов спутниковых измерений и вычисления координат использовалась программа «Trimble 4D Control», на выходе которой получается набор изменений координат (x, y) ,

осредненных на каждый час определений. Для дальнейших вычислений смещения переведены в систему ГЭС (ось x направлена вдоль оси плотины, ось y – перпендикулярно оси x с положительным направлением по току воды) и из них исключен тренд (по программе «Спектр-МНК», составленной в ОАО «НПК «РЕКОД» на основе предложенного автором алгоритма).

Для наборов координат, определенных по результатам измерений двух технологий, были вычислены коэффициенты разложения в ряд Фурье и амплитудные характеристики в соответствии с (2). Амплитудный спектр смещений плотины щенНижекамской ГЭС с учетом 16 гармоник, полученный по измерениям прямых и обратных отвесов, представлен на рисунке 1.

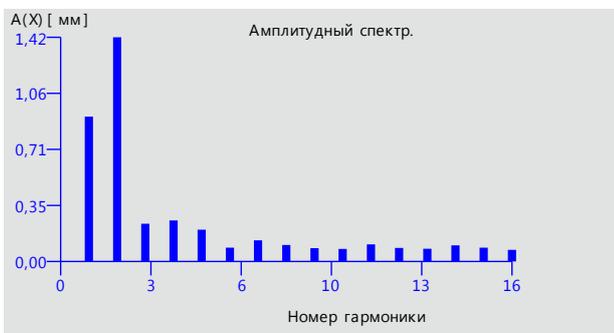


Рисунок 1 – Амплитудный спектр взаимных смещений секций плотины Нижекамской ГЭС для смещений по координате x , определенных по штатной технологии (учтены 16 гармоник)

Как следует из этого рисунка, значимыми для плотины Нижекамской ГЭС являются первая и вторая гармоники. На рис. 2 представлен амплитудный спектр смещений по координате x в системе ГЭС (вдоль плотины), полученный с использованием спутниковой технологии. Слева с учетом максимального числа гармоник (256), а справа с учетом только 16 гармоник.

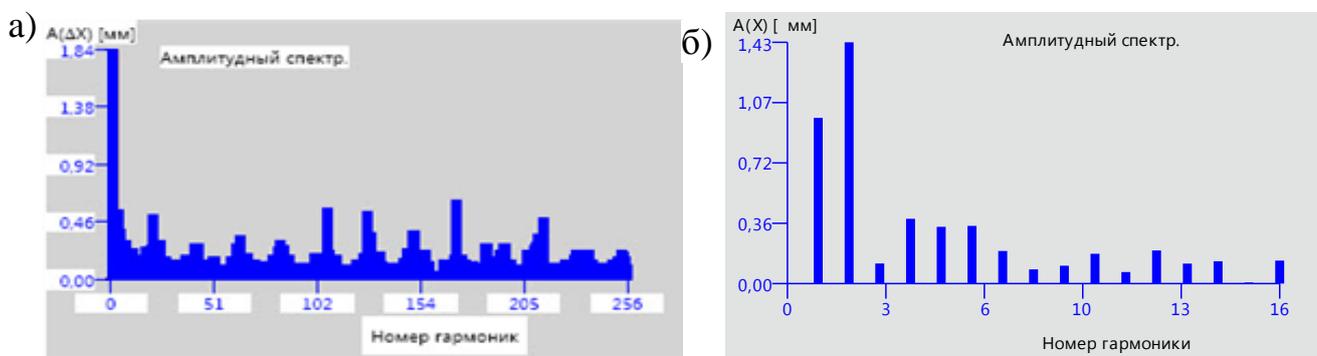


Рисунок 2 – Амплитудный спектр взаимных смещений секций плотины Нижекамской ГЭС: а) учтены все гармоники (256); б) учтены первые 16 гармоник

Совпадение спектров для двух технологий по 16-ти гармоникам свидетельствует о том, что спутниковая технология выявляет присущие плотине колебания, которые фиксируются и штатной технологией (отвесы). Как видно из рисунка 2 и подтверждается нашими расчетами, значимыми являются первые две гармоники. Аналогичные результаты получены и по координатам y и h .

На рисунке 3 представлены результаты спутниковых измерений без аппроксимации (смещения по координате x в виде пиков) и плавная кривая на выходе низкочастотного фильтра с учетом первых 2-х гармоник. Колебания высокочастотных гармоник, присущие спутниковым измерениям, следует считать шумом. Их необходимо исключать из обработки, так как они являются следствием остаточного влияния таких ошибок измерений как тропосферные задержки сигналов и многопутность.



Рисунок 3 – Изменения значений координаты x и плавная кривая на выходе низкочастотного фильтра (2 гармоники)

Вычисление коэффициентов c , d (линейный тренд), a , b (гармоническая часть) осуществляется под условием (3) что приводит к решению:

$$(A^T P A) \bar{X} = A^T P \bar{D}, \quad (4)$$

$$K_{\bar{X}} = \mu^2 (A^T P A)^{-1}, \quad (5)$$

$$\mu^2 = \frac{[\bar{V}^T P \bar{V}]}{2N - m}, \quad (6)$$

где A , P – соответственно матрица коэффициентов и весовая матрица измерений; \bar{X} , $K_{\bar{X}}$ – вектор и ковариационная матрица определяемых параметров; μ – СКО единицы веса; m – число определяемых параметров, $2N$ – число измерений.

Оценка точности любой координаты по внутренней сходимости выполняется по формуле:

$$m^2_{\text{вн.сх.}(xyh)} = \mu^2_{xyh} \left(\frac{k+1/2}{N} \right), \quad (7)$$

где k – число учитываемых гармоник в решении по методу наименьших квадратов.

Априорная оценка точности получаемых результатов выполнялась нами с учетом низкочастотной фильтрации рядом Фурье. СКО $m_{\text{ап}}$ результатов для каждой из координат вычисляется по формуле:

$$m^2_{\text{ап.}(xyh)} = \mu^2_k \left(\frac{k+1/2}{T/2\Delta t} \right) \quad (8)$$

где μ_k – средняя квадратическая ошибка единицы веса при сглаживании путем представления измерений виде ряда Фурье с k гармониками; T – период наблюдений (для ГЭС ≥ 8 суток); Δt – интервал осреднения данных (в нашем случае для ГЭС $\Delta t=1$ час).

После первичной обработки измерительной информации для контролируемых точек и почасового осреднения полученных составляющих смещений координат, дальнейшая обработка измерений начиналась с оценки их качества. По результатам оценки принимается решение об их включении (или исключении) в дальнейшую обработку. Качество измерений оценивается по трем критериям.

Качественными признаются измерения, для которых:

$$|\Delta| \leq t\mu. \quad (9)$$

Здесь $\mu^2 = \frac{[v_i^2]}{2N-1}$, а $0 \leq t \leq 3$ – нормированное значение случайной величины (то есть $t=3$ соответствует вероятности 0.9973). Качественным признается весь интервал измерений, если $\mu \leq \mu_{\text{доп}}$. Значение $\mu_{\text{доп}}$ устанавливается из опыта (по предварительным наблюдениям).

Признаком достаточного качества одного измерения или измерений всего интервала служит также близость нулю сумм независимо измеренных векторов в замкнутых фигурах. Разработанная программа («Спектр-МНК») определяет качество информации по вышеописанным критериям. В работе установлено, что при большом значении μ большими, как правило, оказываются и невязки в замкнутых фигурах, оказывается большим и число отбракованных измерений по

критерию (9).

При наличии в штатной системе мониторинга высокоточных измерителей, таких как отвесы, контроль измерений и конечных результатов может быть выполнен сравнением результатов двух систем. В работе получены формулы для оценки результатов спутниковых определений по двойным измерениям:

$$m_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} d_i^2}{n_j}, \quad (10)$$

$$m_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^k n_j m_j^2}{\sum_{j=1}^k n_j}, \quad (11)$$

где $m_j, m_{\text{ср}}$ – ср.кв.ошибки спутниковых определений в j -ом интервале измерений и в совокупности k - интервалов соответственно; d_i - разность результатов двух технологий в j -ом интервале измерений; n_j – число измерений в j -ом интервале.

По результатам исследований, приведенных в разделе 2, нами сделаны следующие заключения. Для применения методики и получения результатов со средними квадратическими ошибками на уровне 1 мм определена необходимость выполнения ряда действий.

Для реализации разработанной методики *должны быть проведены следующие подготовительные работы*: 1) до старта (или на начальном этапе) мониторинга необходимо провести «привязку» референчных станций к внешней сети (например, IGS), для обеспечения определения их взаимного положения на уровне 1 мм и контроля их неподвижности выполняются вычисления базовых векторов внутри сети; 2) задать периодичность наблюдений в зависимости от объекта наблюдений и требуемой частоты выдачи результатов; 3) определить значимые гармоники для объекта мониторинга.

Методика математической обработки измерений и интерпретация результатов включают следующие этапы: 1) вычисление координат и их изменений для контролируемых точек на основе первичной математической обработки; 2) определение параметров временного ряда координат (приращений координат), в том числе всего интервала обработки и интервала между соседними «отсчётами» внутри временного ряда, при необходимости, следует перевести полученные спутниковым методом значения в систему координат объекта

мониторинга; 3) обработка временного ряда с учетом разделения трендовой и периодической части, выборки измерений на основе оценки их качества; 4) удаление тренда, осуществление низкочастотной фильтрации 5) восстановление смещений в точках контроля с учетом значимых гармоник и тренда объекта для получения искомым значений результатов вычисленных смещений контролируемых точек объекта мониторинга; б) осуществление выдачи результатов в режиме, близком к реальному времени на текущий момент и в интервале прогноза.

В третьей главе «Результаты экспериментальных исследований разработанной методики для мониторинга геологической среды и состояния гидротехнических сооружений» приведены результаты практической реализации технологии мониторинга геологической среды на примере приокского района Русской платформы и результаты экспериментальной отработки методики обработки результатов мониторинга на примере Нижнекамской ГЭС.

Мониторинг геологической среды в приокском районе Русской платформы.

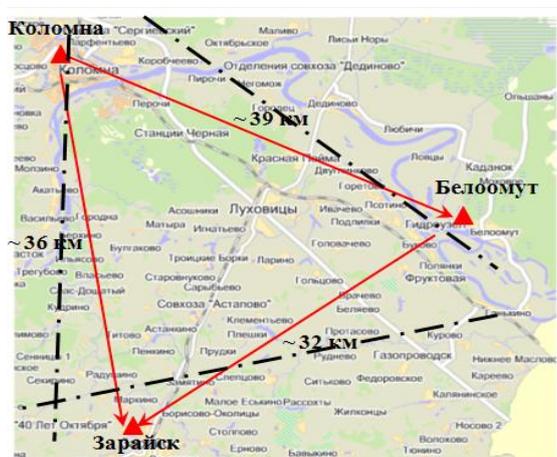
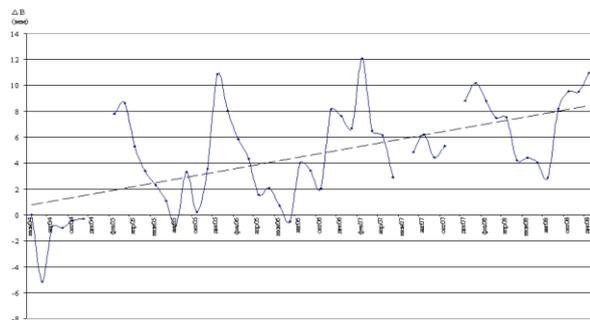


Рисунок 4 – Схема расположения определяемых базовых линий на территории Московской области

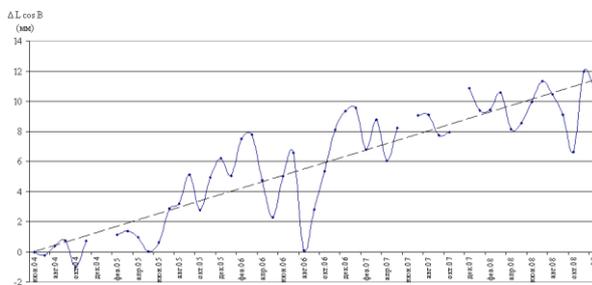
Для проведения исследований и с учетом рекомендации Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН был выбран бассейн р. Ока в районе городов Зарайск, Коломна, Белоомут, представляющих интерес для проведения геологического мониторинга (приокский район Русской платформы), расположенный, на стыке Мещерской низменности, Московско-Окской равнины и Среднерусской возвышенности (рис. 4).

Исследования выполнены с использованием спутниковых наблюдений на постоянно действующих референчных станциях Москвы и Московской области (проект «Москва», см. рис. 4), оборудованных двухчастотными спутниковыми приемниками RS500 GRX 1202 GG Pro с антеннами AT504 GG Choke-Ring (ф. Leica).

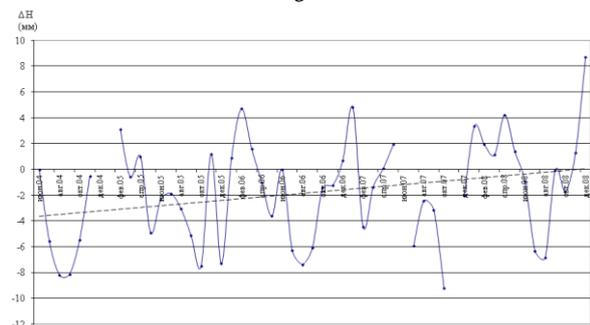
Измерительная информация на опорных станциях сформирована сеансами четырехсуточных GPS-измерений на начало каждого месяца с июня 2004 г. по декабрь 2008 г. (55 месяцев). Каждый из дней обрабатывался отдельно. Далее эти данные осреднялись, и в итоге каждой координаты соответствует одно числовое значение в месяц. Вычисления выполнялись в системе координат ITRF2000, а начальные значения каждой из станций для каждой базовой линии, определены на эпоху 1997.0. На графиках (рис. 5) для примера представлены изменения координат станции Зарайск, определенной от станции Коломна на интервале 55 месяцев. Аналогичные вычисления проведены для двух других векторов.



а



б



в

Рисунок 5 – График изменения положения станции Зарайск определенной от станции Коломна ($T=55$ мес.):

а – составляющая по широте;

б – составляющая по долготе;

в – составляющая по высоте

Три вектора (базовые линии) в каждом месяце вычислялись независимо друг от друга, что обеспечило возможность определения СКО положения станций и исчерпывающий контроль вычислений по сумме векторов в треугольнике (см. рис. 4). Чтобы убедиться в отсутствии грубых ошибок и определить точность результатов, нами вычислены суммы векторов в треугольнике Коломна-Белоомут-Зарайск.

Вычисленные по замыканиям СКО составили: по широте – 2,2 мм, по долготе – 2,0 мм, по высоте – 2,9 мм. СКО положения одного вектора составляют по широте – 1,3 мм, по долготе – 1,2 мм, по высоте – 1,7 мм.

Разница между минимальными и максимальными значениями изменений координат относительно начальных значений находится на уровне от 8 мм (долготная составляющая станции Зарайск, определенной от станции Белоомут) до 21 мм (долготная составляющая станции Белоомут, определенной от станции Коломна), а в среднем составляет 14 мм.

В таблице 1 приведены численные значения средних квадратических ошибок, вычисленных уклонений (разностей от первого значения), полученным до и после аппроксимации для изменений координат станции Зарайск (от станций Коломна и Белоомут) и станции Белоомут (от станции Коломна) с учетом двух наборов гармоник. После аппроксимации средние квадратические ошибки уменьшились в 1.5-2 раза. Как видно из таблицы 1, гармоники 0, 1, 2, 4 достаточно хорошо аппроксимируют исходный ряд данных.

Таблица 1 – Средние квадратические ошибки уклонений, вычисленные до и после аппроксимации ряда данных (в миллиметрах)

Набор данных	Коломна-Белоомут			Белоомут-Зарайск			Коломна-Зарайск		
	ΔB	$\Delta L \cos B$	ΔH	ΔB	$\Delta L \cos B$	ΔH	ΔB	$\Delta L \cos B$	ΔH
СКО уклонений после исключения тренда	2,15	3,13	3,52	2,21	1,65	2,83	3,04	1,75	3,60
СКО уклонений: аппроксимация гармониками 0,1,2,3,4,6,8,12	1,05	1,69	2,54	0,98	1,12	2,03	1,79	1,19	2,43
СКО уклонений: аппроксимация гармониками 0,1,2,4	1,37	2,19	2,68	1,28	1,25	2,37	1,86	1,45	2,66

На рис. 6 в качестве примера приведены графики, характеризующие изменения координат станции Зарайск, определенной от станции Коломна (тренд исключен), на которых особенно явно прослеживается периодическая часть.

Как видно из графиков, периодическая часть имеет, в основном, сезонный характер с годовым и полугодовым периодами. Так верхние «пики» приходятся на январь/март, а нижние на август/октябрь. Амплитуды выявленных вариаций составляют в среднем 5 – 8 мм. Тренд же (вековая составляющая, см. рис. 5) может быть отнесен к движению мини-блоков земной коры.

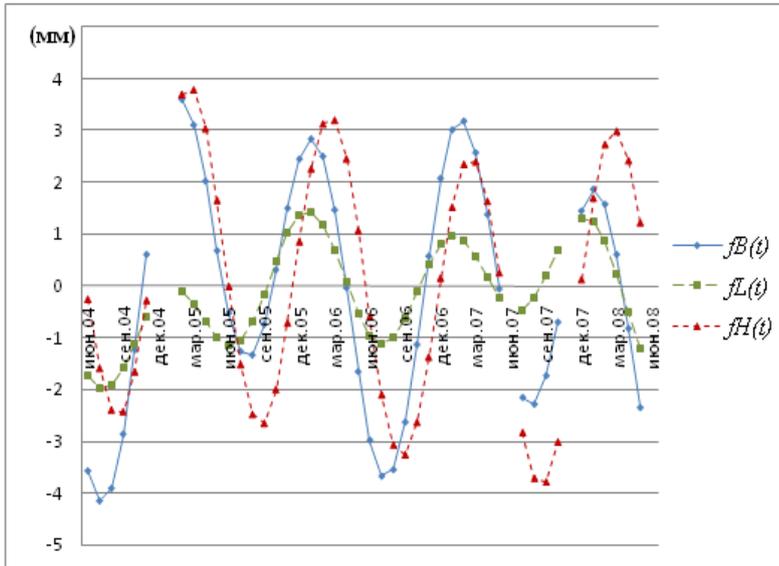


Рисунок 6 – Функция аппроксимации 0, 1, 2, 4 гармониками изменения составляющих координат станции Зарайск, определенной от станции Коломна на интервале $T = 48$ мес

В таблице 2 приведены координаты линий трендов (см. рис. 5), соответствующие начальному и конечному моменту наблюдений, вычисленные по ним относительные изменения координат станций.

Таблица 2 – Положения линий трендов на графиках и относительные изменения координат (в миллиметрах)

Координатные составляющие		Коломна-Белоомут	Белоомут-Зарайск	Коломна-Зарайск
B	начало набл.	3,9	-0,8	0,9
	конец набл.	7,1	6,6	8,5
относит. смещение		3,2	7,4	7,6
L	начало набл.	0,0	-0,2	0,0
	конец набл.	19,0	-4,7	11,5
относит. смещение		19,0	-4,5	11,5
H	начало набл.	-5,5	1,0	-3,5
	конец набл.	-3,1	3,1	0,0
относит. смещение		2,4	2,1	3,5

Интерпретация представленных выше данных приведена, в частности, в статье [5], подготовленной с участием сотрудников Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН. Примененные инструменты и методика вычислений позволили определить изменения положения координат станций с точностью 1-2 мм. Следовательно, причинами выявленных изменений могут быть локальные геодинамические процессы. Этот опыт показывает высокую эффективность применения средств и методов спутниковой геодезии для изучения современных деформаций и геодинамических условий (прежде всего, напряжённого состояния)

верхнекорового слоя литосферы, для выявления и более конкретного понимания сути современных геодинамически активных зон. Очевидно, что это имеет большое прикладное значение, в том числе для оценки геодинамической безопасности инженерных сооружений.

Система спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС.

Нижнекамская ГЭС является равнинной русловой электростанцией. В состав сооружений ГЭС входят бетонная водосливная плотина, намывные русловая и пойменные плотины максимальной высотой 30 м и общей длиной 2976 м, здание ГЭС совмещённого типа, судоходные шлюзы. По плотине ГЭС проложены железнодорожные пути и федеральная автодорожная магистраль М7 «Волга».

Система мониторинга установлена в сентябре 2010г. и непрерывно функционирует с апреля 2011г. Итоговая оценка точностных возможностей спутникового мониторинга выполнена по измерениям в интервале с 1 июня по 31 июля 2011г. В этот же период проводились измерения взаимного положения секций 8 и VSP штатной системой мониторинга. Сравнение двух видов измерений явилось одним из способов объективной оценки точностных возможностей спутникового мониторинга.

Система спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС состоит из следующих элементов:

- одной базовой (референцной) станции (N_s) и двух контролируемых точках плотины (на соседних секциях 8 и VSP на расстоянии около 3 м), на которых установлены спутниковые приемники DL-V-3 с антеннами GPS-702-GG (фирмы Novatel);
- объектового центра мониторинга в составе сервера со стандартным программным обеспечением;
- программного обеспечения (ПО) для управления работой спутникового оборудования и вычисления координат контролируемых точек с точностью на уровне СКО ~1 см («Trimble 4D Control», Trimble), ПО вычисления смещений контролируемых точек с точностью на уровне СКО 1-2 мм («Спектр-МНК», ОАО «НПК «РЕКОД»);
- каналов связи.

На рисунке 7 схематично показано расположение и общие принципы взаимодействия элементов системы спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС.

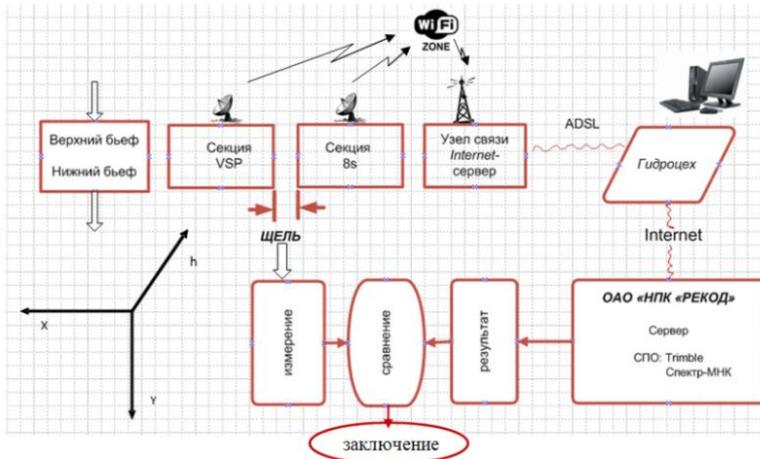


Рисунок 7 – Схема расположения и взаимодействия элементов системы мониторинга Нижнекамской ГЭС

Конкретные условия расположения антенн спутниковых приёмников оказались такими, что горизонт радиовидимости референционной станции полностью открыт, а горизонт спутниковых антенн контролируемых точек открыт, начиная с угла возвышения 30° . На обеих антеннах присутствует переотражение радиосигналов одинаковой направленности.

В процессе обработки измерительной информации вычисление геоцентрических и топоцентрических координат фазовых центров антенн приемников производилось по программе «Trimble 4D Control», в результате был получен набор изменений координат (x, y) , осредненных на каждый час определений. Дальнейшие вычисления, в том числе коррекция входной информации (заполнение пропусков измерений (отсутствие осредненного часового значения), отбраковка некачественных измерений), переход в систему координат ГЭС, вычисление спектров, низкочастотная фильтрация, формирование выходной информации выполнялись в программе «Спектр - МНК» (разработанной ОАО «НПК «РЕКОД» на основе предложенного автором алгоритма).

На рисунках 8 и 9 на интервале 1 месяц в качестве примера показаны изменения координат антенн на секциях относительно исходных (референчных) значений.

Оценка точности по так называемой внутренней сходимости (программная оценка точности) в период с 1 по 28 июня 2011 года получилась на уровне 1 мм по каждой координате.

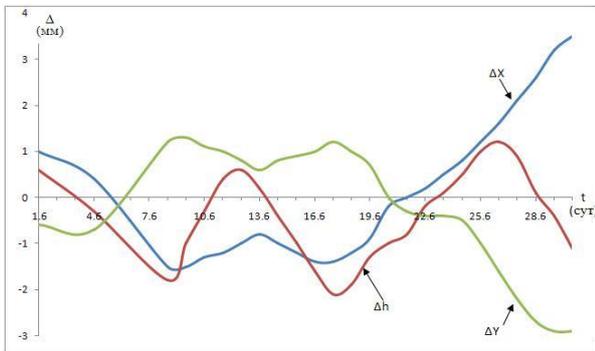


Рисунок 8 – Изменение координат антенны на секции 8 относительно референционной станции N_s

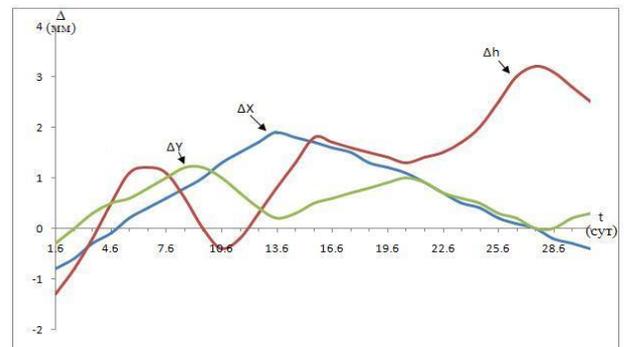


Рисунок 9 – Изменение координат антенны на секции VSP относительно секции 8

Поскольку определялись три вектора в замкнутой фигуре, есть возможность вычислить в ней невязки. Средние квадратические ошибки определения составляющих векторов, вычисленные по невязкам в треугольнике N_s -8- VSP в целом по интервалу измерений 01.06-31.07.2011, составили: $m_x=3,2$ мм; $m_y=2,2$ мм; $m_h=4,5$ мм, а для каждого из векторов в среднем: $m_x=1,8$ мм; $m_y=1,3$ мм; $m_h=2,6$ мм соответственно.

Ошибки получились довольно значимыми (требования к точности, как было отмечено выше, на уровне СКО 1.5 мм в плане и 2 мм по высоте), поскольку сказалось влияние многопутности на секциях 8 и VSP . Но взаимное положение двух секций определяется с высокой точностью, так как ошибки исключаются из-за одинаковых условий наблюдений. Это подтверждается сравнением результатов спутниковых наблюдений с результатами штатной системы мониторинга.

На ГЭС один раз в сутки с СКО порядка 1-2 мм по осям x и y выполнялись измерения взаимного смещения соседних секций 8 и VSP с использованием прямых и обратных отвесов. Разность показаний двух технологий в интервале 01-30.06.2011 в качестве примера представлена в графическом виде на рисунке 10. Констатируется хорошее согласие результатов двух независимых технологий.

Средние квадратические ошибки разностей двух технологий в период 27.04-28.07.2011 составили $m_{dx}=1,0$ мм, $m_{dy}=0,6$ мм. В соответствии с эксплуатационной документацией точность отсчетов отвесами характеризуется СКО 0,5-0,7 мм.

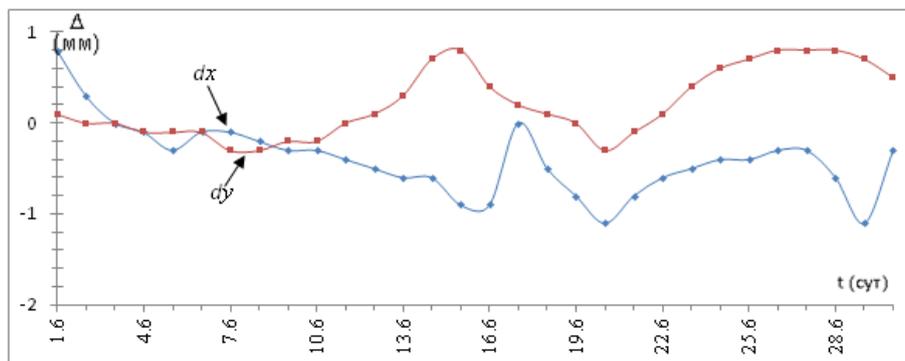


Рисунок 10 – Разность показаний двух технологий в интервале 01-30.06.2011 г.

Это дает основание полагать спутниковые и натурные измерения равноточными. По разностям между ними оценена точность каждого вида измерений. В результате получены одинаковые СКО спутниковых и натурных определений $m_x=0,7$ мм, $m_y=0,4$ мм.

Как и следовало ожидать, ошибки определения взаимного положения двух соседних секций оказались меньше ошибок, вычисленных по невязкам замкнутой фигуры. Что объясняется тем что, на результаты по векторам N_s-8 и N_s-VSP оказывают влияние ошибки, сопровождающие спутниковые измерения, особенно переотражение сигналов. На результаты же по вектору $8-VSP$ влияют, в основном, только аппаратные ошибки, связанные с двумя приемниками, расположенными на соседних секциях.

Этот вывод подтверждают и автоковариационные функции координат по трем векторам. По осям x и y по вектору $8-VSP$ они представлены на рисунке 11.

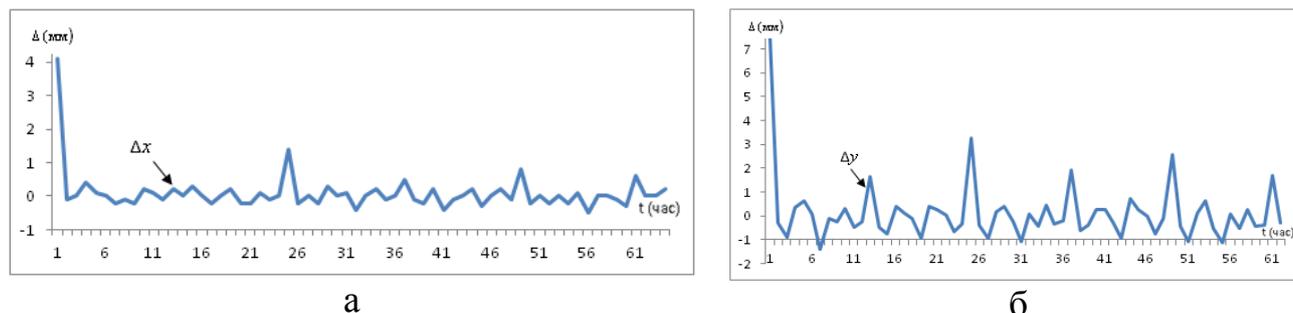


Рисунок 11 – Автоковариационные функции координат по вектору $8-VSP$: а) по оси x (вдоль плотины); б) по оси y (по току воды)

В таблице 3 представлены дисперсии по всем осям координат, в ней же приведены соответствующие радиусы корреляции при условии, что значимой является корреляция с коэффициентом более 0,4.

Таблица 3 – Дисперсии и радиусы корреляции в интервале 01.06-31.07.2011г.

Наименование вектора	Дисперсии мм ²			Радиусы корреляции час		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>h</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>h</i>
<i>N_s – 8</i>	57	33	205	30	30	30
<i>N_s – VSP</i>	41	18	160	25	25	25
<i>8 – VSP</i>	4,2	7,5	37	25	25	25

Как видно из таблицы, дисперсии результатов измерений по вектору 8-*VSP* оказались в 2 и более раз меньше дисперсий по векторам от референцной станции (*N_s*) к секциям. Этим объясняется и уменьшение в 2-3 раза СКО взаимного смещения секций 8 и *VSP* по осям *x* и *y* (0,7 мм и 0,4 мм), полученных из сравнения спутниковых и натуральных измерений, и СКО (1,8 мм и 1,3 мм), полученных в среднем по невязкам в замкнутой фигуре.

Из вышеизложенного можно заключить, что спутниковая технология на основе глобальных навигационных спутниковых систем позволяет в благоприятных для измерений условиях определять смещения гребня плотины со средними квадратическими ошибками в плане порядка 1 мм. Такая же точность обеспечится и в задаче мониторинга локальных геодинамических процессов, в том числе неустойчивых участков приплотинной зоны. Поэтому есть все основания рекомендовать для мониторинга смещений гребней плотин и неустойчивых участков приплотинной зоны использование спутниковой технологии, которая не имеет себе равных по оперативности и сравнима по точности с традиционными технологиями.

Заключение. В соответствии с поставленной в диссертации целью по разработке методики спутникового мониторинга гидротехнических сооружений и геодинамических процессов в приповерхностных структурах, на которых они расположены, в диссертации получены следующие основные результаты.

1. Изложен отечественный и зарубежный опыт применения спутниковой технологии для определения координат объектов. Выполнен анализ

традиционных средств и методов мониторинга инженерных сооружений и геологической среды, обоснованы преимущества и показаны недостатки спутникового метода мониторинга.

2. Применительно к поставленной цели и задачам обоснована теория спутникового мониторинга, на основе положений метода наименьших квадратов, гармонического анализа и использования корреляционных функций. При изложении гармонического анализа получены формулы априорной оценки точности результатов.

3. Разработана методика мониторинга спутниковыми методами, на основании сформулированы две частных методики с учетом свойств объектов наблюдений (геодинамические процессы, плотина ГЭС), апробирована на реальном измерительном материале – измерениях референчных станций г. Москвы и Московской области (проект «Москва»). Получены и обоснованы критерии качества определения смещений на основе спутниковых измерений.

С использованием разработанной методики на материале спутниковых измерений периода 2004 – 2008г. выполнен эксперимент по определению тектонических движений в бассейне р. Оки. Полученные результаты использовались в Институте геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН (ИГЭ РАН) при выполнении исследований в приокском районе Русской платформы. Анализ экспериментальных данных выявил ряд закономерностей локальной геодинамики в исследуемом районе: периодическую часть с годовым и полугодовым периодами и вековую составляющую (тренд), которая на интервале 4,5 лет вычисляется с СКО одной координаты в текущий период времени на уровне 1 мм

4. С использованием разработанной методики, реализованной в системе спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС, подтверждены возможности определения линейных смещений гребня плотины ГЭС с СКО в плане 1 мм, по высоте 2-3 мм. Полученные результаты использовались при выполнении исследований в ОКР «Центр-П-М», выполненной ОАО «НПК «РЕКОД» на Нижнекамской ГЭС.

Новыми результатами, полученными в диссертации, являются.

1. Методики спутникового мониторинга крупных инженерных сооружений типа ГЭС, на примере плотины ГЭС, и геологической среды, а именно локальных геодинамических процессов платформенных территорий, эффективность которых проверена в ходе научно-производственных экспериментов на реальном измерительном материале с использованием непрерывных ГНСС измерений.

2. Теоретическое обоснование и алгоритмизация предложенных методик, с учетом специфики решаемых задач, включая подтверждение точностных возможностей спутникового мониторинга геологической среды и гидротехнических сооружений.

3. Доказано, что спутниковый мониторинг соответствующих объектов и процессов может быть обеспечен на уровне средних квадратических ошибок 1 мм в плане и 2-3 мм по высоте.

На основе практической реализации методики даны рекомендации по использованию спутникового мониторинга объектов. Представленный опыт наблюдений за динамикой положения референчных станций проекта «Москва» показывает высокую эффективность применения методов спутниковой геодезии для изучения современных деформаций и геодинамических условий, что имеет большое прикладное значение, особенно для оценки геодинамической безопасности инженерных сооружений разного уровня. В работе использовались три постоянно действующих станции и небольшая по площади территория. Сегодня сети станций устанавливаются во многих регионах России, в связи с этим открываются перспективы проведения дальнейших исследований.

Нижекамскую ГЭС можно рассматривать в качестве типовой русловой равнинной гидростанции, и представленная методика может быть реализована на любом подобном объекте. Поэтому есть все основания рекомендовать для мониторинга смещений гребней плотин.

По теме диссертации опубликованы работы:

1. Краснорылов И.И., Булаева Е.А. Анализ результатов наблюдений спутников, образующих Глобальные навигационные системы, методами

математической статистики // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2004 – специальный выпуск – с. 19-27.

2. Булаева Е.А., Монахова М.А. Исследование точностных возможностей Спутниковой системы межевания земель в режимах статики и реального времени // Геодезия и картография, 2005, №9, с. 7-11.

3. Бойков А.В., Булаева Е.А., Монахова М.А. Возможности Спутниковой системы по высокоточному определению координат объектов // Геодезия и картография, 2006, №8, с. 5-10.

4. Булаева Е.А. Об организации мониторинга геологической среды с применением Системы точного позиционирования проекта «Москва» // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2010, №4, с. 82-85.

5. Макаров В.И., Бойков В.В., Булаева Е.А. Опыт использования методов спутниковой геодезии (GPS) для изучения современных движений и деформаций земной коры платформенных территорий на примере приокского района Русской плиты // материалы XVI Международной конференции «Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы восточно-европейской платформы» Том II, 20 – 24.09.2010 г., Воронеж, – с. 33-39.

6. Безбородов В.Г., Бойков В.В., Булаева Е.А. Опыт спутникового мониторинга плотины Нижнекамской ГЭС // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2012, №4, с. 72-75.

Результаты исследований автора использовались в научно-техническом отчете «Результаты опытной эксплуатации «Система спутникового мониторинга Нижнекамской ГЭС», со стороны ОАО «НПК «РЕКОД» проф. В.В.Бойков (руководитель), Е.А.Булаева, к.ф-м.н. С.Ю.Епифанов, А.А. Колозин, к.т.н. М.А.Монахова, О.Н.Терехова, А.В.Устинов, со стороны Группы натуральных измерений ГЭС Р.Р.Резитдинов и Р.М.Вафина. - М.: ОАО «Научно-производственная корпорация «РЕКОД», 2011г. – 30 с.