

На правах рукописи

Кобелева Наталья Николаевна



Совершенствование методики построения по геодезическим данным
прогнозных математических моделей для изучения деформаций
гидротехнических сооружений

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2017

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

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Хорошилов Валерий Степанович.

Официальные оппоненты:

Пимшин Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор кафедры строительных производств;

Азаров Борис Федотович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», заместитель заведующего кафедрой оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита состоится 19 декабря 2017 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

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

Автореферат разослан 1 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е. И. Аврунев

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 16.10.2017. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

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

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К настоящему времени в Российской Федерации возведено большое количество высоконапорных гидротехнических сооружений, к надежности которых (вследствие возможности катастрофических последствий при их разрушении) предъявляются повышенные требования. Анализ поведения подобных сооружений и их оснований в процессе эксплуатации по результатам проведенных натурных наблюдений выявил заметное отличие их реального состояния от расчетных значений, предполагаемых на стадии проектирования. Следует отметить, что заметно отличаются и сами нагрузки, существенно изменяющие эксплуатационные параметры сооружения.

Согласно принятой Российским акционерным обществом «Единая энергетическая система России» в 2001 г. «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» и положений Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» от 1997 г. оценка эксплуатационного состояния гидротехнического сооружения и его безопасность должны производиться на основании сравнения измеренных количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями. Данные показатели, характеризующие критерии безопасности эксплуатации сооружения, должны быть рассчитаны на стадии проектирования и уточнены в процессе эксплуатации. Это достигается в результате разработки прогнозных математических моделей, построенных и откалиброванных по данным натурных наблюдений за поведением сооружения.

Одними из главных и незаменимых видов натурных наблюдений являются геодезические исследования гидротехнических сооружений. Они направлены на решение трех взаимосвязанных проблем: наблюдение за процессами перемещений точек сооружений, анализ результатов наблюдений и прогнозирование процессов перемещений наблюдаемых точек, что по существу, определяет современное толкование системы мониторинга сооружений.

Геодезические исследования в настоящее время развиваются и совершенствуются в большей степени в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и, особенно, прогнозированию уделяется в них недостаточное внимание. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку математического аппарата для изучения по геодезическим данным протекающих в сооружениях процессов и деформаций земной коры внесли ученые: Брайт П. И., Гуляев Ю. П., Гридчин А. Н., Есиков Н. П., Михелев Д. Ш., Маркузе Ю. П., Мазуров Б. Т., Николаев С. А., Панкрушин В. К., Рязанцев Г. Е., Ardito R., Maier G., Mata J., Karimi I., Sani A. A., Jafari M., Li F., Wang Zh., Su H. и др.

В многогранном комплексе исследований по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений особое место занимают разработки ряда коллективов сотрудников: Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева» (Александровская Э. К., Дурчева В. Н., Гордон Л. А., Костылев В. С., Орехов В. В. и др.); Акционерного общества «Ленгидропроект» имени Жука (Бронштейн В. И., Вульфович Н. А., Грошев М. Е., Савич А. И., Речицкий В. В.); Филиала Публичного акционерного общества «Федеральная гидрогенерирующая компания РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного» (СШГЭС) (Толошинов А. В., Александров Ю. И.).

К настоящему времени собран значительный объем данных натурных наблюдений за эксплуатируемыми гидротехническими сооружениями. При их обработке традиционно применяется регрессионный анализ, на основании ко-

того могут быть выявлены закономерности и взаимосвязности в реакции контролируемых параметров сооружения на внешние воздействия. А выполненные ранее исследования в области разработки прогнозных математических моделей сводились, в основном, к описанию осадок сооружений различными функциями времени с использованием корреляционно-регрессионных моделей с последующей экстраполяцией по ним прогнозов осадки; при этом прогнозировались, в основном, средние величины осадок и не оценивалась точность прогнозов. Отметим, что корректное применение подобных моделей применимо лишь в случаях, если при математической обработке данных натурных наблюдений удастся выявить и учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции сооружения на воздействующие факторы.

По мере совершенствования численных методов анализа все большее внимание уделяется результатам, полученным с использованием расчетных математических моделей. В этом случае могут быть смоделированы различные нагрузки эксплуатационного периода, включая температурное воздействие внешней среды, учет сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды, в том числе и такие ведущие к необратимым изменениям составляющие, как пластичность, возникновение и продвижение трещин, необратимые перемещения плотины, реологические свойства основания и др. С этой целью применяются различные методы математического моделирования для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований: на основе искусственных нейронных сетей в сочетании с гибридным методом конечных элементов; на основе динамического анализа состояния бетонных плотин в частотной области за счет изменения формы колебаний; путем решения дифференциальных уравнений для моделирования деформаций на основе данных единой системы объединенных датчиков; в результате использования теории нестационарных временных рядов для анализа структурных данных с использованием алгоритма максимизации ожидания для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей; использование совместного подхода технологии вейвлет-анализа для

создания исходной модели данных о поведении плотины с последующим построением идентификационной модели, способной осуществлять связь между нагрузками и поведением плотины, и др.

Прогнозные модели, построенные на основе теории динамических систем, позволяют учитывать невыявленное инерционное запаздывание и более объективно выполнять прогнозирование величин деформации сооружения и оценивать параметры математической модели. Значительный вклад в разработку методологических и теоретических положений для построения прогнозных моделей данного типа внес доктор технических наук, профессор Гуляев Ю. П.

Цель и задачи исследований. Цель диссертационной работы заключается в совершенствовании методики построения прогнозных математических моделей динамического типа для изучения процесса деформаций гидротехнических сооружений на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков (на примере плотины СШГЭС).

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

– выполнить анализ и обосновать актуальность и новизну исследований; проанализировать существующие методы построения прогнозных математических моделей для изучения поведения гидротехнических сооружений;

– разработать обоснованную методику построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа для анализа перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– построить различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения перемещений высоконапорной плотины СШГЭС с различными входными воздействиями, дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием;

– выявить методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для анализа процесса перемещений;

– выполнить анализ построенных прогнозных моделей для выбора наиболее оптимальной (с точки зрения точности и простоты) прогнозной модели для описания процесса перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.

Объект и предмет исследования. Объектом настоящего исследования является деформационный процесс, протекающий в результате эксплуатации бетонной плотины СШГЭС за период наполнения и сработки водохранилища, представленный геодезическими данными о перемещении плотины.

Предметом исследования является методика построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения перемещений плотины СШГЭС в процессе наполнения и сработки водохранилища.

Научная новизна результатов исследований представлена решением при разработке методики следующих задач:

– разработана обоснованная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– выявлены методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (гидростатическое давление, температура в нижней и верхней базовых точках плотины и их комбинации), дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием;

– построены различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС;

– теоретическое обоснование и практический опыт построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков вносит существенный вклад в теорию и практи-

ку их конструирования, предложенную доктором технических наук, профессором Гуляевым Ю. П.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики построения различных вариантов прогнозных математических моделей на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для описания поведения плотины СШГЭС.

Практическая значимость работы заключается в возможности выбора наиболее оптимального (с точки зрения точности и простоты) варианта математической модели для прогнозирования процесса перемещений контролируемых точек высоконапорных гидротехнических сооружений на основе геодезических данных.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решаются на основе методов корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа, элементов математической статистики, теории погрешностей измерений и методов математического моделирования; для численных расчетов использовались возможности математико-статистического аппарата и прикладной программы MS EXCEL.

Положения, выносимые на защиту:

– методические решения построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков позволяют корректно конструировать прогнозные математические модели для изучения основных закономерностей процесса перемещений плотины СШГЭС;

– анализ построения различных вариантов прогнозных математических моделей с различными входными воздействиями, дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием позволил выявить и предложить наиболее оптимальные прогнозные модели для прогнозирования перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика и содержание диссертации соответствуют областям исследования: 6 – Геодези-

ческое 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 нефтедобывающих комплексов; 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 РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена корректной математической обработкой и моделированием большого объема натуральных геодезических данных.

Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в период 2014–2017 гг.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 10 научных статьях; в том числе семь из которых опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 122 страницы печатного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 175 наименований, содержит 7 таблиц, 32 рисунка, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертационного исследования и ее актуальность; определены цели и задачи исследования, предмет и объект исследований; сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту; отмечены научная новизна и практическая значимость; приведены основные научные и практические результаты.

В первом разделе диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой прогнозных математических моделей, выполнен анализ существующих методов их построения. Отмечается, что результаты геодезических наблюдений за деформациями высоконапорных бетонных плотин представляют собой в интегральной количественной форме объективную и достаточно точную информацию о сложном взаимодействии сооружения с грунтовым основанием и внешней средой. Отмечено, что степень влияния различных воздействующих на величину перемещения контролируемых деформационных точек возможно прогнозировать с помощью корреляционно-регрессионных моделей, однако их корректное применение возможно лишь в том случае, если при математической обработке результатов наблюдений удастся выявить и учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие внешние факторы.

Более совершенны в этом плане модели динамического типа, обладающие свойствами целого ряда методов для описания деформаций сооружения, которые имеют подвижную структуру, в достаточной мере соответствующую самой физической сущности развития процесса. Модели подобного типа достаточно корректно учитывают инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой и реагируют на изменения во времени воздействующих факторов. Следует заметить, что при этом в определенной степени возможен и объективный учет остаточной части инерционного запаздывания, обусловленный действием неучтенных и случайных факторов, который возможно

выявить в виде модели авторегрессии 1-го или 2-го порядка для описания закономерности развития процесса.

Во втором разделе диссертации выполнено методическое и теоретическое обоснование построения различных вариантов прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для описания поведения плотины СШГЭС. Отмечено, что выбор рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования обусловлен тем, что данный тип уравнений позволяет последовательно и наглядно, шаг за шагом, начиная с последних значений перемещений и остаточных ошибок на периоде основания прогноза, вычислять прогнозные значения контролируемых точек. В то же время они учитывают инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой, реагируя на воздействующие факторы. Горизонтальные перемещения контролируемых точек тела бетонной плотины являются одними из важнейших показателей прочности и устойчивости плотины в эксплуатационный период и являются следствием воздействия водохранилища на тело самой плотины и температурных изменений в теле плотины, зависящих от изменения температуры внешней среды и неупругих деформаций скального основания и материала плотины.

Водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС было наполнено до проектной отметки НПУ = 540 м осенью 1990 г. и с 1991 г. ГЭС и ее сооружения вышли на проектный эксплуатационный режим. Для данного режима эксплуатации плотины характерно годовое циклическое изменение основной нагрузки – гидростатического давления уровня верхнего бьефа (УВБ) на верхнюю грань плотины и дно водохранилища. Каждый годовой цикл имеет две ветви – ветвь нагружения (наполнение водохранилища: май – октябрь); ветвь разгрузки (сработка водохранилища: ноябрь – апрель).

Динамическая модель, представленная рекуррентным уравнением 1-го порядка, для изучения процесса перемещения сооружения для одного входного воздействия имеет вид

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta u_k + \gamma \omega_k. \quad (1)$$

В представленной модели (1) следует выделить постоянно действующую составляющую, которая характеризует среднегодовое влияние температуры воздуха, гидростатического давления и других внешних факторов на тело плотины. Введем обозначение для данной составляющей как x_0 . Очевидно, что данная величина может быть выражена как $x_0 = \beta_0 u_0$, где u_0 – постоянное действующее входное воздействие, а β_0 – степень влияния данного воздействия. Поскольку u_0 и x_0 , как правило, не наблюдаются, то необходимо оценивать значение x_0 в целом. Данная процедура позволяет не только определить x_0 , но и упрощает вычисления, тем самым повышая степень обусловленности системы нормальных уравнений, которые решают при оценивании параметров, и повышает устойчивость математической модели.

На начальном этапе конструирования динамической модели на основе метода наименьших квадратов (МНК) осуществляется вычисление оценок параметров φ , β , x_0 по результатам наблюдений за входом $\{u_k\}$ и выходной переменной $\{x_k\}$ на периоде основания прогноза $k = 1, 2, \dots, N$. Для оценивания представим условное математическое ожидание выражения (1) в следующем виде:

$$M\{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi x_{k-1} + \beta u_k + \gamma \omega. \quad (2)$$

Выражение (2) записано из условия, что ω_k – случайный процесс с нулевым математическим ожиданием, а оценка $\hat{x}_{k/k-1}$ включает в себя осредненный тренд, т. е. детерминированную основу наблюдаемого процесса. Оценивание в этом случае производится путем минимизации функционала следующего вида:

$$F(\varphi, \beta, x_0) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2. \quad (3)$$

Оценки параметров ϕ, β, x_0 находятся в процессе решения следующей системы нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\phi} \sum_{k=2}^N x_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N x_{k-1} u_k &= \sum_{k=2}^N x_k x_{k-1}, \\ \hat{\phi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} u_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N u_k^2 &= \sum_{k=2}^N x_k u_k, \\ \hat{\phi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N u_k + x_0 N &= \sum_{k=2}^N x_k. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Данная система нормальных уравнений (4) может оказаться слабо обусловленной из-за недостаточной вариации значений выходной переменной x_k и входа u_k . С целью снижения возможности появления слабо обусловленных систем уравнений и упрощения самого процесса вычислений, решение задачи оценивания параметров ϕ, β, x_0 по центрированному процессу осуществляется в два этапа.

На первом этапе вычисляются оценки параметров ϕ, β , с этой целью осуществляется центрирование процесса, т. е. переход от x_k и u_k к их центрированным по времени значениям ($\dot{x} = x_k - \bar{x}$ и $\dot{u} = u_k - \bar{u}$, где \bar{x} и \bar{u} – это средние значения величин перемещения и гидростатического давления на выбранном периоде основания прогноза). И уже по центрированному процессу выполняется

минимизация функционала вида: $F_1(\phi, \beta) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2$; система

нормальных уравнений (4) в данном случае принимает уже более простой вид

$$\left. \begin{aligned} \hat{\phi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\phi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{u}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{u}_k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После вычисления прогнозных значений оценок параметров $\hat{\phi}, \hat{\beta}$ вычисляется \hat{x}_0 по формуле: $\hat{x}_0 = \bar{x}(1 - \hat{\phi}) - \hat{\beta}\bar{u}$.

Динамическая модель, представленная рекуррентным уравнением 1-го порядка для двух входных воздействий, имеет вид

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta_1 u_k + \beta_2 T + \gamma \omega_k. \quad (6)$$

В процессе решения вначале минимизируется функционал вида $F(\varphi, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$; условное математическое ожидание при этом имеет вид: $M\{x_k / x_{k-1}, u_k, T_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi x_{k-1} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k$. Затем вычисляются оценки параметров $\varphi, \beta_1, \beta_2$ из решения соответствующей системы нормальных уравнений.

Так, основные воздействующие факторы в ряде случаев могут иметь взаимную корреляционную зависимость, что приводит, как правило, к неустойчивости модели. Если в ней учитываются совместно эти воздействия, то возникает задача декорреляции этих воздействий. В этом случае бывает целесообразно строить модель, которая представляется в виде системы моделей, каждая из которых предназначена для решения общей сложной прогнозной задачи. Декорреляция основных воздействий реализуется путем последовательного ввода в строящуюся модель тех или иных воздействий. Последовательность ввода в этом случае определяется первичностью и вторичностью действия факторов; как правило, вначале вводится влияние температуры, а затем – гидростатическое давление.

В качестве такой прогнозной модели 1-го порядка служит модель вида

$$\begin{aligned} u_k &= \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k + u_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k + \Delta x_0. \end{aligned} \quad (7)$$

где $u_k; T_k$ – входные воздействия в первых двух уравнениях модели (гидростатическое давление и температура тела бетона плотины в базовых точках), вызывающие изменение перемещения x_k в зависимости от изменения гидростатического давления и температуры. Третье уравнение представляет зависи-

мость Δx_k от Δu_k , где Δx_k – разности фактических и найденных по второму уравнению величин перемещений x_k , вычисленные на периоде основания прогноза, а Δu_k – соответствующие разности между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями входной переменной u_k .

Решение системы уравнений (7) осуществляется поэтапно. На первом

этапе выполняется минимизация функционала: $F_1(\varphi_1, \beta_1) = \sum_{k=2}^N \left(u_k - \hat{u}_{k/k-1} \right)^2$, на

втором – минимизация функционала: $F_2(\varphi_2, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$, на треть-

ем – $F_3(\varphi_3, \beta_3) = \sum_{k=2}^N \left(\Delta x_k - \Delta \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$. Условные математические ожидания со-

ответственно имеют вид

$$\begin{aligned} M \{ u_k / u_{k-1}, T_k \} &= \hat{u}_{k/k-1} = \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k, \\ M \{ x_k / x_{k-1}, T_k \} &= \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k, \\ M \{ \Delta x_k / \Delta x_{k-1}, \Delta u_k \} &= \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценки параметров $\varphi_1, \beta_1, \varphi_2, \beta_2, \varphi_3, \beta_3$ вычисляются в процессе решения соответствующих систем нормальных уравнений.

Динамическая модель, представленная рекуррентным уравнением 2-го порядка для одного входного воздействия, имеет вид

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta u_k + \gamma \omega_k. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) производится путем минимизации функционала

вида $F(\varphi_1, \varphi_2, \beta) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$, при этом условное математическое ожида-

ние имеет вид: $M \{ x_k / x_{k-1}, u_k \} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta u_k$. Оценки парамет-

ров $\varphi_1, \varphi_2, \beta$ вычисляются из решения соответствующей системы нормальных уравнений.

Динамическая модель, представленная рекуррентным уравнением 2-го порядка для двух входных воздействий, имеет следующий вид:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) производится путем минимизации функционала вида $F(\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$; условное математическое ожидание при этом имеет вид: $M\{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k$. Затем вычисляются оценки параметров $\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2$ из решения соответствующей системы нормальных уравнений.

Декоррелированная модель 2-го порядка может быть представлена в виде системы уравнений, решение которых осуществляется подобно решению системы уравнений (7)

$$\begin{aligned} u_k &= \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k + u_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \varphi_3 x_{k-2} + \beta_2 T_k + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k + \Delta x_0. \end{aligned} \quad (11)$$

На втором этапе осуществляется оценивание параметров и определение порядка модели авторегрессии с целью учета влияния неучтенных факторов (шумовой компоненты). С этой целью вычисляются асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции для полученных остаточных ошибок, которые вычисляются как разница между результатами реальных перемещений контролируемой точки тела плотины и полученными перемещениями по соответствующим построенным прогнозным моделям. Вычисление оценок корреляционной функции производится с использованием формулы для оценивания временных рядов

$$\hat{K}_\varepsilon[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (12)$$

где временной сдвиг $m = 0, 1, 2, \dots, M \ll N$.

Остаточные ошибки $\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1}$, как результат неучтенных и случайных факторов, характеризуют корректность построения модели с точки зрения структурной идентификации, с одной стороны, а с другой, – это характеристика свойств шумовой компоненты ω_k . В результате, используя остаточные ошибки, производится математическое описание процесса шума ω_k известными моделями авторегрессии 1-го или 2-го порядков. Выбор порядка модели авторегрессии осуществляется в процессе анализа построенных графиков корреляционной функции по остаточным ошибкам. Построенные графики могут иметь вид, представленный на рисунке 1.

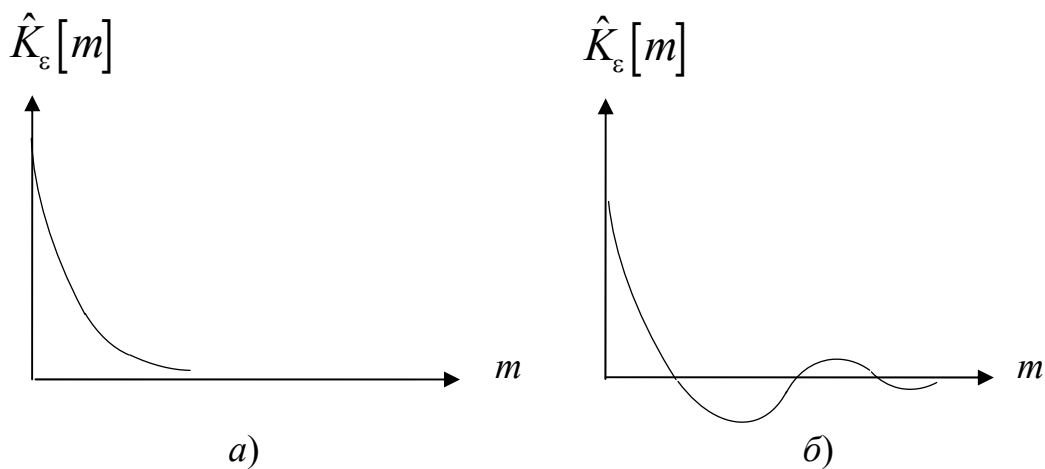


Рисунок 1 – График корреляционной функции: а) 1-го порядка, б) 2-го порядка

Так, выражение математической модели для шумовой компоненты в виде авторегрессии 2-го порядка имеет вид

$$\omega_k = \mu \omega_{k-1} + \eta \omega_{k-2} + \xi_k, \quad (13)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

Оценка параметров μ , η производится путем минимизации функционала вида

$$F(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu \hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta \hat{K}_\varepsilon[m-2] \right)^2. \quad (14)$$

При этом оценки $\hat{\mu}$, $\hat{\eta}$ находят из решения соответствующей системы нормальных уравнений.

В третьем разделе диссертации представлены результаты практических исследований при построении прогнозных моделей на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения процесса перемещения, происходящего под воздействием различных входных воздействий по разрабатываемой методике. Общее число построенных прогнозных моделей различных типов составило более 20.

Ниже представлены прогнозные модели, представляющие наибольший интерес с точки зрения прогнозирования.

Модель 2-го типа (1-го порядка) вида $x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1843x_{k-1} + 1,7858U_k - 1,3775T_k - 839,408 + 0,8279\omega_k, \\ \omega_k &= 1,4969\omega_{k-1} - 0,7452\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (15)$$

Модель 2-го типа (1-го порядка) вида $x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z2, 0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,3218x_{k-1} + 0,5927U_k + 1,6304T_k - 249,804 + 1,7192\omega_k, \\ \omega_k &= 0,8682\omega_{k-1} - 0,1992\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (16)$$

Модель 2-го типа (2-го порядка) вида $x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1117x_{k-1} + 0,0652x_{k-2} + 1,8371U_k - 1,3854T_{k.\text{низ}} - 852, + 0,7576\omega_k, \\ \omega_k &= 1,5204\omega_{k-1} - 0,7637\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (17)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) вида $\Delta x(\Delta U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{k.\text{низ}} + 142,243, \\ x_k &= 0,8174x_{k-1} + 1,1214T_{k.\text{низ}} + 11,523, \\ \Delta x_k &= 0,0062\Delta x_{k-1} + 1,6224\Delta U_k + 0,1338 + 1,2290\omega_k, \\ \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,1530\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (18)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) $\Delta x(\Delta U_k; T_{k.низ}; T_{k.верх}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_{k/k-1} &= 0,861 2U_{k-1} + 0,606 2T_{k.низ} - 0,074 8T_{k.верх} + 68,848, \\ x_{k/k-1} &= 0,655 5x_{k-1} + 1,027 5T_{k.низ} + 13,275 6T_{k.верх} - 31,219, \\ \Delta x_k &= 0,380 3\Delta x_{k-1} + 1,021 3\Delta U_k + 4,205 + 1,863 0\omega_k, \\ \omega_k &= 0,440 4\omega_{k-1} - 0,125 5\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (19)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) $\Delta x(\Delta U_k; T_{k.верх}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,776 4U_{k-1} + 3,006 0T_{k.верх} + 100,260, \\ x_k &= 0,532 2x_{k-1} + 20,7204T_{k.верх} - 45,273, \\ \Delta x_k &= 0,380 8\Delta x_{k-1} + 1,0372\Delta U_k - 2,957 + 1,941 8\omega_k, \\ \omega_k &= 0,573 6\omega_{k-1} - 0,225 5\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнительный анализ величин значений остаточных ошибок с использованием стандарта σ (как показателя рассеяния) представлен в таблице 1.

В результате выполненных исследований можно утверждать следующее:

– из моделей с одним и двумя входными воздействиями следует отдавать предпочтение моделям с двумя входными воздействиями, которые более корректно описывают процесс перемещений (столбцы 2 и 3);

– для моделей одного и того же типа дискретность исходных данных в 15 дней более предпочтительная в сравнении с 30 днями (столбцы 3 и 4);

– для моделей одного и того же типа введение транспортного запаздывания предпочтительнее при его введении при прогнозировании процесса перемещений, а не при конструировании самой модели (столбцы 4 и 5);

– модели 1-го и 2-го порядка одного типа практически «равнозначно» описывают процесс перемещений, но при этом модели 2-го порядка более сложные в их конструировании (столбцы 4 и 6);

– модели 3-го типа более корректно описывают процесс перемещений в сравнении со всеми другими моделями (столбцы 7 и 8);

– практически все построенные модели оказались адекватно описывающими процесс; оценивание по остаточным ошибкам с использованием оценок авто-

корреляции по формуле Бартлетта практически во всех случаях дало положительные результаты; нет причин сомневаться в адекватности построенных моделей.

Таблица 1 – Значения остаточных ошибок для различных типов моделей, мм

Дата (год, месяц, число)	Модель 1-го типа (D30)	Модель 2-го типа (D30)	Модель 2-го типа (D15;Z0)	Модель 2-го типа (D15;Z2.0)	Модель 2-го типа (D15;Z0); 2-го порядка	Модель 3-го типа (D15;Z0);	Модель 3-го типа (D15;Z0);
1	2	3	4	5	6	7	8
2007 г., Май 15	-	-	3,089	-3,361	1,039	-	-
Май 30			0,477	-0,250	-2,502	-0,865	-1,935
Июнь 15	1,029	-2,736	-2,945	4,161	-2,628	-1,449	1,221
Июнь 30			-3,409	3,037	-6,555	-0,091	0,134
Июль 15	-7,122	-6,026	-6,858	-4,111	-4,834	-5,631	-5,010
Июль 30			-4,428	-3,633	-2,287	-2,316	-2,031
Август 15	-6,037	-2,102	-2,032	-2,029	-1,442	-0,338	1,562
Август 30			-1,298	-1,751	-1,600	-0,056	1,706
Сентябрь 15	-5,169	-1,154	-1,389	-5,027	2,109	-1,751	-1,069
Сентябрь 30			2,573	-3,029	3,566	2,666	4,517
Октябрь 15	+2,149	+3,934	3,738	-1,914	3,702	2,302	2,219
Октябрь 30			3,944	0,240	4,062	1,708	3,352
Ноябрь 15	+4,540	+4,138	4,352	1,127	3,187	1,870	2,094
Ноябрь 30			3,472	1,336	2,517	0,756	0,680
Декабрь 15	+4,564	+2,221	2,926	3,534	0,996	0,712	-1,855
Декабрь 30			1,285	3,144	-0,160	-0,578	-6,227
2008 г., Январь 15	+3,634	-0,825	0,275	4,885	-2,033	0,303	-0,564
Январь 30			-1,807	4,675	-2,881	-0,393	0,530
Февраль 15	+3,616	-3,817	-2,606	5,689	-4,651	0,007	4,716
Февраль 30			-4,585	3,063	-2,688	-2,117	2,102
Март 15	+0,773	-1,829	-2,621	1,593	-0,510	-0,825	0,308
Март 30			-0,516	0,629	0,638	-0,454	0,210
Апрель 15	-1,071	+0,766	0,551	0,399	3,553	-0,256	0,026
Апрель 30			3,156	-1,039	2,135	1,464	0,738
Май 15	-2,247	+2,859	1,716	-5,319	1,039	-2,061	-3,140
σ	4,020	3,064	3,052	3,208	2,926	1,1746	2,595

В таблице 2 представлены результаты прогнозирования по модели (17) методом инверсной верификации на известные даты натурных наблюдений для перемещений гребня ключевой секции 33 плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

В таблице 3 представлены «возможные» результаты прогнозирования на период 2019–2020 гг. по усредненным значениям УВБ и температуре в нижней и верхней базовых точках, исходя из предположения, что данный период эксплуатации может быть умеренным или холодным по температуре, или характеризоваться высокой приточностью. Использовались модели (17) и (19).

Таблица 2 – Результаты прогнозирования по модели 2-го типа (2-го порядка) и с транспортным запаздыванием

Дискретность модели	Этап 2008–2009 гг.				Этап 2009–2010 гг.				Этап 2010–2011 гг.			
	результаты прогноза, мм				результаты прогноза, мм				результаты прогноза, мм			
	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка
15.05.08					5.05.09 64,13	63,28	+0,8		13.05.10 70,36	63,16 63,68	+7,2	+6,7
30.05.08	30.05.08 67,72	71,58 66,17	-3,9	+1,7	30.05.09 80,10	80,24	-0,1		23.05.10 67,22	65,31	+1,9	
15.06.08					03.06.09 82,53	82,93 83,66	-0,4		10.06.10 90,70	87,26 87,87	+3,4	+2,8
30.06.08	30.06.08 81,84	91,23 84,12	-9,4	-2,3					30.06.10 113,42	107,38 110,08	+6,1	+3,3
15.07.08					1.07.09 105,13	106,57	-1,4		09.07.10 117,28	108,10 115,72	+9,2	+1,6
30.07.08					27.07.09 119,54	115,77	+3,8					
15.08.08					17.08.09 – авария							
30.08.08					27.08.09 126,94	123,46	+3,5		30.08.10 121,12	119,86	+1,3	
15.09.08	11.09.08 99,93	109,03 101,41	-9,1	+1,5					9.09.10 123,20	120,09	+3,1	
30.09.08					25.09.09 130,66	128,77	+1,9					
15.10.08	07.10.08 124,46	128,62 121,22	-4,2	+3,2					14.10.10 129,92	129,14	+0,8	
30.10.08					29.10.09 123,14	124,34	-1,2		28.10.10 134,14	129,57 131,00	+4,6	+3,1
15.11.08	13.11.08 132,21	133,85	-1,6		13.11.09 122,13	123,84	-1,7					
30.11.08	26.11.08 132,60	133,08	-0,5									
15.12.08					11.12.09 120,93	121,50	-0,7		14.12.10 136,23	128,55 135,34	+7,7	+1,9
30.12.08	27.12.08 127,33	125,47	+1,9									
15.01.09	11.01.09 124,07	122,86	+1,2		12.01.10 120,40	119,49	+0,9		11.01.11 132,95	134,76	-1,8	
30.01.09												
15.02.09	13.02.09 109,60	109,56	+0,1		11.02.10 118,22	113,96 116,08	+4,3	+2,1	11.02.11 126,47	126,62	-0,2	
28.02.09					25.02.10 114,30	108,05 113,01	+6,3	+1,3				
15.03.09	13.03.09 92,00	92,43	-0,4		11.03.10 108,26	103,76 106,91	+4,5	+1,3	11.03.11 114,00	111,17	+2,8	
30.03.09					30.03.10 97,00	93,71 100,07	+3,3	-3,1				
15.04.09									11.04.11 87,81	85,38	+2,4	
30.04.09	28.04.09 64,84	66,54	-1,7		28.04.10 72,83	71,31 70,81	+1,5	+2,0				

Таблица 3 – Результаты прогнозирования по моделям (17) и (19)
и с транспортным запаздыванием

Период основания прогноза	Исходные Радиальные перемещения, $X_{\text{вых}}$, мм	Дата прогноза: 2019–2020 гг.			
		Прогнозное значение (конец месяца), мм			
		Дата прогноза	Умеренный	Холодный	Высокая приточность
Май, 2007 г.	66,1	Май, 2019 г.	67,7	65,1	66,3
Июнь	91,83	Июнь	91,8	97,3	112,5
Июль	102,68	Июль	105,9	115,5	117,4
Август	114,27	Август	117,3	120,1	124,7
Сентябрь	121,95	Сентябрь	123,8	127,5	131,4
Октябрь	131,95	Октябрь	131,5	132,3	135,7
Ноябрь	135,48	Ноябрь	132,6	134,1	137,3
Декабрь	131,7	Декабрь	128,1	136,1	132,0
Январь, 2008 г.	121,95	Январь, 2020 г.	120,4	129,4	124,2
Февраль	110,37	Февраль	109,8	119,1	113,6
Март	91,48	Март	94,5	97,0	99,0
Апрель	73,28	Апрель	77,6	72,8	74,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ, обоснована актуальность и новизна исследований; проанализированы существующие методы построения прогнозных математических моделей для изучения состояния гидротехнических сооружений;

– разработана обоснованная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа, представленных рекуррентными уравнениями 1-го и 2-го порядков для анализа перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– построены различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (гидростатическое давление, температура в нижней и верхней базовых точках), дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием для прогнозирования перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС;

– выявлены методические особенности построения прогнозных математических моделей с точки зрения исходных данных (дискретности данных), порядка математической модели, числа основных воздействующих факторов

и транспортного запаздывания для выбора наиболее оптимальных (с точки зрения точности и простоты) математических моделей с целью описания процесса перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– теоретическое обоснование и практический опыт построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков вносит существенный вклад в теорию и практику их конструирования;

– в качестве перспективы разработанная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей может быть рекомендована к использованию при изучении деформаций высоконапорных плотин.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Гуляев, Ю. П. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004-2007 годы) [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 16–20.

2 Прогнозирование процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации 2007–2009 годов [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Д. В. Лисицкий, Н. Н. Кобелева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 23–28.

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

4 Хорошилов, В. С. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004–2007 гг.) [Текст] / В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева, П. Н. Губонин // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 49–58.

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

6 Хорошилов, В. С. Совершенствование методики построения математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуатации после аварии 2009 года [Текст] / В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева, Ю. П. Гуляев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 23–30.

7 Кобелева, Н. Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин [Текст] / Н. Н. Кобелева // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 55–63.

8 Кобелева, Н. Н. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 214–220.

9 Кобелева, Н. Н. Построение прогнозной модели для изучения процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС по геодезическим данным [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // 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. 2. – С. 19–26.

10 Кобелева, Н. Н. Оценка состояния крупнейших плотин мира [Текст] / Н. Н. Кобелева // 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. 143–149.