

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК [556.555:551.583](470.2)

ГОЛОВАНЬ ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Специальность: 1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (ФГБОУ ВО (РГГМУ))

Научный руководитель: **Мякишева Наталия Вячеславовна**, доктор географических наук, профессор кафедры инженерной гидрологии ФГБОУ ВО «РГГМУ»

Официальные оппоненты: **Шмакова Марина Валентиновна**, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования Института озераведения Российской академии наук – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Марков Михаил Леонидович, кандидат географических наук, доцент, заведующий отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный гидрологический институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Доктор технических наук, доцент

А.Г. Соколов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Озера представляют собой ресурсы водоснабжения населения и промышленности, транспортные пути, являются регуляторами речного притока, используются для гидротехнического строительства, нужд энергетики и сельского хозяйства. Эффективность использования водоемов во многом зависит от знаний о состоянии водных объектов и их уровненом режиме. Так, уровень воды фиксирует водные ресурсы озер, определяя количество воды в водоеме, и в то же время служит интегральным показателем динамики их биоценозов. Он является одним из основных гидроэкологических показателей, который влияет на гидрологический и гидрохимический режимы озер, формируя, в первую очередь, режим солености (минерализации) и качество вод. Уровень воды в озере определяет зоны затопления и подтопления, а также границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос.

Разработка методов рационального использования водных ресурсов невозможна без расчета максимальных и средних многолетних уровней воды в условиях меняющегося климата. Эти данные необходимы при решении ряда геоэкологических и водохозяйственных задач, таких как проектирование водозаборов и водосбросов, рекреационная и рыбохозяйственная деятельность, прогноз неблагоприятных геоэкологических явлений, вызванных затоплением и подтоплением территории. При этом при решении практических задач по управлению количеством и качеством воды и разработке действенных способов борьбы с последствиями техногенных воздействий на водные объекты чаще всего приходится иметь дело с неизученными и слабо изученными водными объектами. Основным нормативом, регламентирующим особенности гидрологических расчетов при отсутствии данных наблюдений, является

СП 529.1325800.2023. Однако, на данный момент, в этом документе отсутствуют региональные карты и зависимости.

Характер колебаний уровня режима озер претерпевает определенные изменения, связанные в первую очередь с неустойчивостью климата. Повышение глобальной температуры воздуха с начала 1970-х гг. (Доклад об особенностях ..., 2010; Второй оценочный доклад ..., 2014) вызывает определенную трансформацию межгодовых и сезонных колебаний суммарного притока речных вод в озера, определяя новые условия формирования уровня режима озер (Георгиевский В.Ю., 2015). Изучение характеристик уровней воды для расчета максимальных значений неизученных озер на основе современных наблюдений на озерах-аналогах в условиях изменяющегося климата, представляет интерес с точки зрения уточнения статистических параметров распределения уровней воды, региональных зависимостей и обновления гидрологических карт для обеспечения новых проектируемых сооружений.

Учет закономерностей межгодовых колебаний уровней воды озер, позволит на научной основе подойти к проектированию различных сооружений, проведению водоохранных мероприятий, установлению зон затопления и разработке методов рационального использования водных ресурсов.

Цель работы – выявление и обобщение временных и пространственных закономерностей колебаний уровня воды разнотипных озер Северо-Запада Российской Федерации в условиях меняющегося климата, и разработка методик расчета уровней озер различной обеспеченности при отсутствии данных наблюдений.

В соответствии с целью сформулированы следующие **задачи**:

1. Выявить однородные периоды формирования уровня режима.

2. Выявить пространственно-временные особенности естественного уровня режима озер в условиях меняющегося климата на примере рядов минимальных, максимальных и средних годовых уровней воды.

3. Выполнить районирование территории.

4. Рассчитать для исследуемых озер максимальные уровни воды различной обеспеченности при наличии данных наблюдений.

5. Разработать методику расчета максимальных уровней воды различной обеспеченности при отсутствии данных наблюдений на основе озер-аналогов для выделенных однородных районов.

6. Разработать методику расчета средних многолетних уровней воды для периода, когда водный объект не покрыт льдом.

Настоящая работа посвящена оценке состояния водного режима озер, изучению временных и пространственных закономерностей естественных колебаний уровня воды озер Северо-Запада Российской Федерации в условиях меняющегося климата. В данном исследовании приводятся результаты разработки региональных методик расчета максимальных и средних многолетних уровней воды различной обеспеченности для водоемов данного региона при производстве комплексных инженерных изысканий в условиях отсутствия данных наблюдений. Полученные результаты позволят на научной основе подойти к рациональному использованию водных ресурсов. Исследуемый район, включающий Кольский полуостров, Карелию и северо-запад Русской равнины, выбран в качестве объекта исследования, т.к. является территорией максимального сосредоточения озер в нашей стране.

Объектами исследования являются 44 озера, расположенные на территориях Карелии, Ленинградской, Новгородской, Архангельской, Псковской областей, Кольского полуострова.

Предмет исследования – морфометрические и гидрологические характеристики естественных озер Северо-Запада Российской Федерации.

Фактический материал. Для решения поставленных задач использовались следующие данные:

1. Натурные морфометрические данные по 44 озерам Северо-Запада Российской Федерации, собранные в глобальной базе данных *WORLDLAKE*.

2. Ряды средних месячных и годовых значений температуры воздуха (t , °C) и осадков (P , мм). Данные получены по результатам наблюдений на 16 метеорологических станциях.

3. Ряды средних годовых, минимальных и максимальных уровней воды (H , см). Данные получены по результатам наблюдений на 44 гидрологических постах, собранных в базе данных «Основные гидрологические характеристики озер ЕТР» (ГГИ) и в гидрологических ежегодниках.

Степень изученности проблемы. Исследованиями многолетних колебаний уровней озер в разное время занимались Н.А. Багров, М.И. Будыко, М.И. Юдин, А.М. Догановский, Н.В. Мякишева, О.А. Дроздов, Т.В. Покровская, Р.Д. Курдин, В.Е. Привальский, Ю.А. Трапезников, А.С. Григорьев, Н.Н. Филатов, А.В. Фролов и др. В ФГБУ ГГИ был опубликован научно-прикладной справочник «Основные гидрологические характеристики озер Российской Федерации и их многолетние изменения» (Под редакцией В.Ю. Георгиевского, 2021 г.). Изучению циклических колебаний уровней воды посвящены работы А.В. Шнитникова, А. Яани, А.М. Догановского, И.В. Филатовой, В.Ф. Логинова, В.И. Сазонова и др. Ряд исследований посвящен установлению зависимостей уровней от различных индексов атмосферной циркуляции (Н.В. Мякишева, А.М. Догановский, А.В. Шнитников, А.И. Афанасьев, В.К. Клиге, А. Яани и др.). Вопросами гидрологического районирования занимались А.В. Фролов, Д.Д. Квасов, Ю.П. Пармузин, А.В. Измайлова и др.

Методы исследования. Анализ данных осуществлялся с соблюдением требований СП 529.1325800.2023 и других нормативных документов. Оценка

однородности рядов гидрологических наблюдений осуществлялась на основе генетического и статистического анализов исходных данных наблюдений. Временные ряды анализировались, как случайный процесс с использованием современных методов вероятностного анализа (кластерный анализ, спектральный анализ, регрессионный анализ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Пространственно-временные закономерности межгодовой изменчивости уровней воды озер Северо-Запада Российской Федерации в пределах однородных районов.
2. Рекомендации для расчета уровней воды различной обеспеченности исследуемых озер при проведении комплексных инженерных изысканий.
3. Методика расчета максимальных уровней воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, основанная на полученных региональных зависимостях.
4. Методика расчета среднего многолетнего уровня воды неизученных озер Северо-Запада Российской Федерации с учетом озер-аналогов для рационального использования и охраны водных ресурсов.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. Произведена оценка состояния водного режима озер на исследуемой территории и выявлены основные пространственно-временные закономерности межгодовой изменчивости минимальных, максимальных и средних годовых уровней воды, связанные с изменением климата.
2. Выведена зависимость среднего многолетнего уровня воды от удельного водосбора и рассчитаны переходные коэффициенты к среднемноголетнему уровню в период, когда водный объект не покрыт льдом.
3. Впервые рекомендовано в качестве нуля графика неизученного озера использовать не отметку порога стока озера, а отметку среднего многолетнего минимального уровня межи – \overline{H}_{min} .

4. Разработаны рекомендации по определению параметров кривых распределения максимальных уровней воды неизученного озера для выделенных однородных районов по озерам-аналогам.

5. Впервые предлагается в качестве характеристики изменчивости максимального уровня озера рассматривать коэффициент вариации, приведенный к значению среднего многолетнего минимального уровня за меженный период.

6. Рассчитаны максимальные уровни воды различной обеспеченности исследуемых озер, с учетом рекомендаций, предложенных автором в данной работе. Полученные результаты могут использоваться в качестве аналогов при выполнении инженерных изысканий.

Практическая значимость результатов работы.

Выявленные пространственно-временные закономерности в уровненом режиме озер исследуемого района рекомендуется учитывать при разработке методов рационального использования водных ресурсов и водоохранных мероприятий. Так же автором была получена зависимость для определения средних многолетних уровней воды, определяющих границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов. Е.В. Головань были разработаны и внедрены рекомендации по определению параметров кривых распределения максимальных уровней воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для Северо-Запада Российской Федерации и Кольского полуострова. Данные рекомендации использованы в работе ООО «Фирма Уником».

Личный вклад автора. Постановка целей и задач исследования, сбор гидрологических и метеорологических данных, их обработка, обобщение и интерпретация результатов были выполнены лично автором в ходе реализации научного проекта Министерства науки и высшего образования РФ, № *FSZU-2020-0009* «Исследование физических, химических и

биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Тема диссертационного исследования и его содержание соответствуют требованиям паспорта специальности ВАК 1.6.21 – Геоэкология по следующим пунктам: п. 6. – «Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, биологических, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли», п. 8. – «Разработка теории, методологии и методов комплексных инженерных изысканий для геоэкологической характеристики природно-техногенной среды», п. 12. – «Оценка состояния водного режима территорий и геоэкологические последствия его изменения в связи с изменениями климатических параметров. Геоэкологический анализ влияния регулирования речного стока на водные, прибрежно-водные и наземные экосистемы и обоснование путей сохранения и восстановления водных и наземных экосистем».

Апробация работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № *FSZU-2020-0009* «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий». Основные результаты докладывались на международной научной конференции «Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии» (2018 г.), на всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (2019 г.), на международной научно-практической конференции «География: развитие науки и образования» (2020 г.), на международной научной конференции «Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению» (2020 г.), на международной научно-практической

конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» (2020 г.), на III всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» (2020 г.), на VI международной конференции молодых ученых (школа-практика) «Водные ресурсы: изучение и управление» (2020 г.), на VIII всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (2021 г.), на международной научно-практической конференции с участием представителей стран СНГ «Оценка состояния ресурсов, экосистем озер и морей в условиях современных изменений климата и социо-экономического развития» (2022 г.).

По теме диссертационного исследования опубликовано 18 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и 9 приложений. Общий объем работы составляет 298 страниц, включая 22 таблицы, 366 рисунков.

Благодарности: автор выражает глубокую благодарность д.г.н., профессору А.М. Догановскому, д.г.н., профессору Н.В. Мякишевой, к.г.н. А.В. Сикану, к.г.н. Д.И. Исаеву, к.т.н. Е.В. Гайдуковой.

Содержание диссертации

Во введении представлена общая характеристика работы, дается обоснование актуальности темы исследования, излагаются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводится аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации.

Вторая глава содержит физико-географическое описание исследуемого района, условия происхождения озер. Приводятся результаты кластерного анализа, выполненного в программе *Statistica* с целью выделения регионов с преобладанием определенных морфометрических и гидрологических особенностей исследуемых водоемов. Полученные группы озер находятся в пределах однородных районов: Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита (район 1), Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита (район 2), западная часть Русской плиты, затронутая валдайским оледенением (район 3).

Приведены результаты вероятностного анализа многолетних колебаний характеристик климата – значений температуры воздуха и количества осадков за весь год, а также отдельно за холодный и теплый периоды, для 16 метеорологических станций: Каневка, Ковдор, Мурманск, Янискоски, Бабаево, Торопец, Великие Луки, Пушкинские горы, Вытегра, Сортавала, Паданы, Реболы, Архангельск, Няндомы, Тихвин, Гдов.

На рисунках 1 и 2 в качестве примера приведены хронологические графики хода средних значений температуры воздуха за год, за теплый и холодный периоды и годовой суммы осадков за год, за теплый и холодный периоды по метеостанции Реболы.

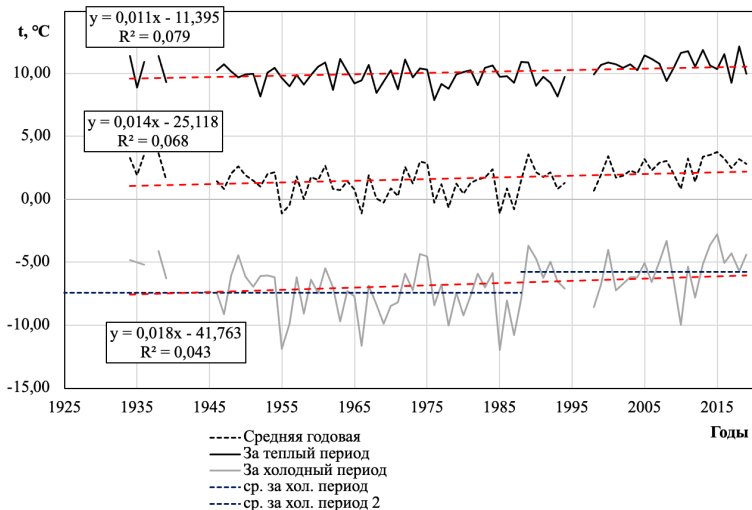


Рисунок 1 – Хронологические графики средних годовых температур приповерхностного слоя атмосферы за теплый, холодный периоды и за весь год по метеостанции Реболы

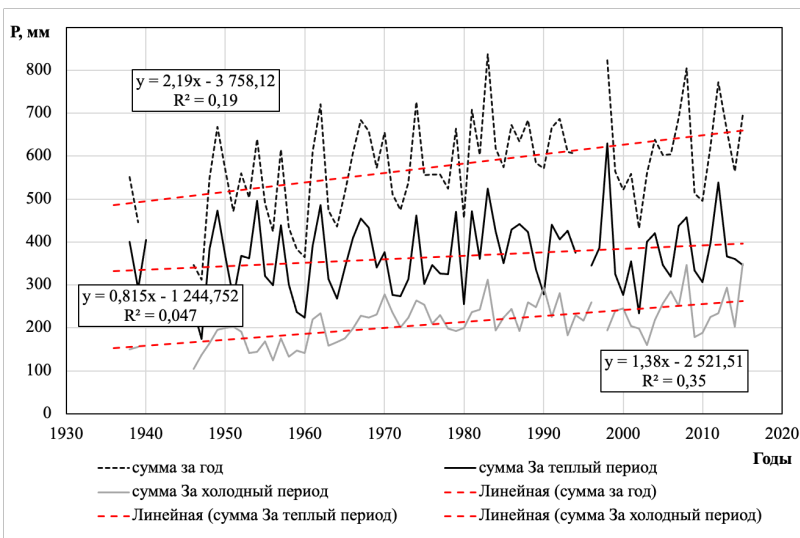


Рисунок 2 – Хронологические графики годовых сумм осадков за теплый, холодный периоды и за весь год по метеостанции Реболы

В результате было выявлено наличие статически значимых положительных линейных трендов среднегодовой температуры воздуха для всех выделенных районов исследуемой территории, которые составляют + 0,24 °C/10 лет на Кольском полуострове, + 0,12 °C/10 лет в Карелии и + 0,18 °C/10 лет на Северо-Западе.

Установлено, что для рассматриваемого периода на всей территории преобладали положительные тенденции годовых осадков. Так, для Кольского полуострова (район 1) и северных территорий района 3 (Северо-Запад Русской равнины) линейный тренд годовых осадков за 1966—2018 годы в среднем составил 13 мм/10 лет, за холодный период 7 мм/10 лет, а за теплый период 4 мм/10 лет. Для района 2 (Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита) линейный тренд годовых сумм осадков за этот же период наблюдений в среднем равен 22,7 мм/ 10 лет, за холодный период 13 мм/10 лет, а за теплый период 9 мм/10 лет. Для южных территорий района 3 линейный тренд годовых сумм осадков за этот же период наблюдений в среднем равен 21,6 мм/ 10 лет, за холодный период 12,5 мм/10 лет, а за теплый период 9 мм/10 лет.

Общность в характере многолетнего хода годовых сумм осадков и температуры воздуха на всей исследуемой территории как основного климатического фактора водного режима озер служит основанием к тому, чтобы при сравнительном анализе режима уровней озер климатическое влияние принять однородным.

При этом следует отметить, что глобальные изменения климата проявлялись на водосборах исследуемых водоемов по-разному, эти изменения не являются когерентными, что обусловлено региональными особенностями и влиянием антропогенных факторов. Общее для всей рассматриваемой территории – наличие положительного тренда среднегодовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы за весь рассматриваемый период, а также наличие положительного тренда сумм

осадков за холодный период и, как следствие, за весь год.

Третья глава посвящена изучению закономерностей многолетней изменчивости колебаний уровней воды озер исследуемых районов в условиях меняющегося климата, т.к. они формируют разнопериодные изменения среды обитания биоценозов. В связи с чем меняются размеры мелководий, глубины, минерализация, количество фосфатов с водосбора, условия прогревания воды, продолжительность вегетационного периода (Догановский А.М., 2007). Приведены результаты генетического анализа, который заключался в изучении структуры многолетних колебаний уровня воды и выявлении физических причин, обуславливающих неоднородность исходных данных гидрологических наблюдений за средними годовыми, максимальными и минимальными уровнями.

Для анализа отобраны 44 разнотипных озера региона, по которым имеются наиболее продолжительные ряды гидрометрических наблюдений.

В связи с тенденцией потепления климата, наблюдающейся в последние десятилетия XX века, разработан ряд рекомендаций для оценки рядов гидрологической информации с нарушенной стационарностью (однородностью) в результате влияния климатических факторов (СП 529.1325800.2023; Методические рекомендации по..., 2010а, 2010б; Стандарт ГГИ, 2017), которые использовались в данной работе. Согласно п. 4.6 СП 529.1325800.2023 определение расчетных характеристик следует производить по однородным рядам наблюдений. Оценка однородности рядов гидрологических наблюдений осуществлялась на основе генетического и статистического анализов исходных данных.

В результате генетического анализа условий формирования уровня режима, который заключается в выявлении физических причин, обуславливающих неоднородность рядов, установлено, что на 6 рассматриваемых озерах (оз. Ведлозеро, оз. Водлозеро, оз. Тулмозеро, оз. Суоярви, оз. Сандал, оз. Кубенское) ряды данных наблюдений являются

неоднородными в результате влияния хозяйственной деятельности человека. Для выполнения условия однородности в дальнейших расчетах, на исследуемых озерах использовались ряды данных наблюдений за период после даты нарушения естественного уровня режима.

Результаты расчета линейных трендов в рядах средних годовых уровней воды в целом за весь период наблюдений показали, что на большинстве озер прослеживается тенденция к повышению уровней воды. На 12 озерах были выявлены статистически значимые при 5 % уровне значимости линейные тренды, при этом 4 из них имеют тенденцию на понижение. Заметные изменения водности, обусловленные влиянием климатических факторов, в бассейнах большинства озер произошли, начиная с конца 1970-х годов. Наиболее значительные изменения отмечены в режиме уровней озер 2 района (Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита).

Анализ полученных результатов показал, что наблюдается общая тенденция на рост минимальных уровней воды во всех выделенных районах. В среднем линейный тренд составляет 3 см/10 лет. Основной фактор, влияющий на изменения уровня режима – климат, в частности рост температуры воздуха и сумм осадков за холодный период. Известно, что повышение температуры привело к уменьшению глубины промерзания почвы и увеличению ее дренирующих свойств, возрастанию количества и продолжительности зимних оттепелей, во время которых происходит снеготаяние и водоотдача из снежного покрова, пополнение запасов грунтовых вод и формирование поверхностного стока (Георгиевский В.Ю., 2015). Все это влечет за собой увеличение уровней воды в период зимней межени и, как следствие, увеличение минимальных уровней воды.

В рядах максимальных уровней воды статистически значимые тренды выявлены только на 4 озерах, 3 из которых находятся в Карелии (рисунок 3).

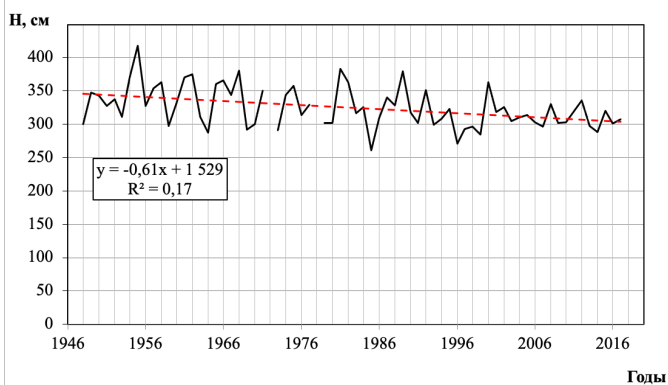
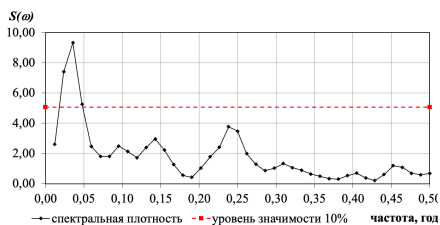


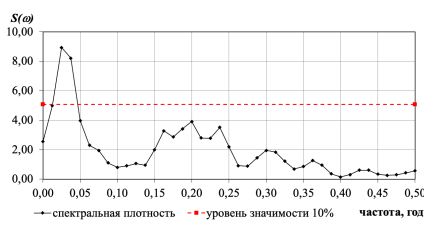
Рисунок 3 – Хронологический график максимальных уровней воды оз. Суоярви

Также в этой главе приводятся результаты оценки спектральной плотности средних годовых уровней озер, которая была выполнена в программе *Statistica*. В ходе анализа были выявлены пики спектральной плотности $S(\omega)$ выше уровня значимости 10 %, которые соответствуют различным периодам колебаний уровня воды в озерах. В результате спектрального анализа установлено, что основной вклад в изменчивость межгодовых колебаний вносят квазипятилетние (частота $0,17 \text{ год}^{-1}$) и квазитридцатилетние колебания (частота $0,037 \text{ год}^{-1}$). При этом вклад высокочастотных колебаний (около 5-летних циклов) больше на озерах, которые расположены преимущественно в северной части (Кольский полуостров, Карелия, северные регионы района 3), при продвижении на юг вклад низкочастотных колебаний увеличиваются и около 30-летние колебания преобладают среди выделенных циклов на озерах. Внутривековые уровенные циклы включают разное количество второстепенных циклов, имеющих различную длительность и амплитуду колебаний.

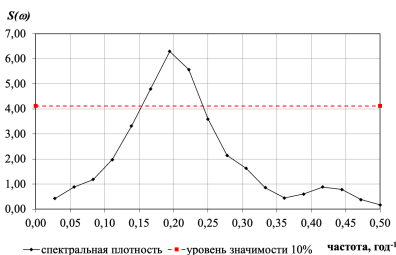
В качестве примера на рисунке 4 приведены графики спектральной плотности оз. Ильмень, оз. Сямозеро, оз. Гимольское и оз. Валдайское.



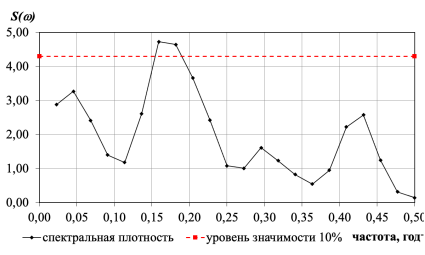
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Графики спектральной плотности средних годовых уровней

а) оз. Ильмень, б) оз. Сямозеро, в) оз. Гимольское, г) оз. Валдайское

В четвертой главе представлены результаты расчетов максимальных уровней воды различной обеспеченности исследуемых озер с учетом рекомендаций (СП 529.1325800.2023) для оценки рядов гидрологической информации с нарушенной стационарностью в результате влияния климатических факторов. Полученные значения позволят оценить потенциальные риски для окружающей среды и биоразнообразия, предотвращать чрезвычайные ситуации, а также разработать пути рационального использования водных ресурсов. Таким образом, расчет наивысших уровней воды помогает в понимании и предсказании воздействия гидрологических процессов на экосистемы и способствует разработке экологически обоснованных стратегий использования природных ресурсов.

В данной работе предлагается в качестве нуля графика озер использовать отметку среднего многолетнего минимального уровня межени $-\bar{H}_{min}$. Предполагается, что эту отметку при полевых изысканиях определить с приемлемой точностью не сложнее, чем порог стока. Дополнительную информацию можно получить на основе опроса местных жителей. Кроме того, в большинстве случаев эта отметка близка к отметке уровня озера, который нанесен на топографические карты. Исходя из этого все ряды максимальных уровней воды были приведены к значениям средних многолетних минимальных уровней воды, после чего проводились основные расчеты по определению максимальных уровней воды различной обеспеченности.

Расчет основных статистических характеристик приведенных рядов уровней озер исследуемого района выполнялся методом моментов. Вычисление ординат аналитических кривых было произведено по распределению Крицкого–Менкеля и Пирсона III типа (при наличии отрицательных значений коэффициентов асимметрии в рядах).

С использованием полученных статистических параметров были построены эмпирические и аналитические кривые обеспеченностей и рассчитаны максимальные уровни воды озер различной обеспеченности.

На рисунке 5 представлена аналитическая кривая Крицкого–Менкеля для озера Ловозеро, полученная по приведенному ряду.

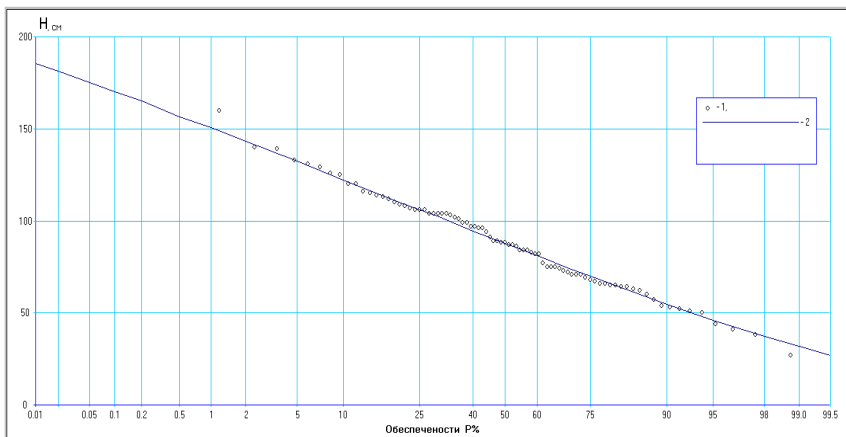


Рисунок 5 – Кривая обеспеченности Крицкого—Менкеля для уровней оз. Ловозеро ($C_s/C_v = 0,4$; $C_v = 0,30$)

В данной главе приводятся результаты расчетов отметок уровней воды озер 1 %, 5 % и 10 % обеспеченности в мБС. Полученные результаты рекомендуется использовать для расчетов при проектировании различных объектов на территории Северо-Запада Российской Федерации.

В результате обобщены статистические параметры кривых обеспеченностей Крицкого—Менкеля для выделенных районов. Коэффициент вариации C_v для всех районов рекомендуется принять равным 0,28, а отношение C_s/C_v согласно таблице 1.

Таблица 1 – Отношение C_s/C_v в пределах выделенных районов

	Район 1 (Кольский полуостров)	Район 2 (Карелия)	Район 3 (западная часть Русской плиты)
C_s/C_v	0,5	0	1,0

При решении геоэкологических задач расчет наивысших уровней воды является ключевым инструментом для оценки рисков затопления и подтопления территории в прибрежных зонах. Поэтому основным выводом этой главы является рекомендация использовать обобщенные значения соотношения C_s/C_v для выделенных районов при расчетах максимальных

уровней воды заданной обеспеченности в случае отсутствия данных наблюдений (рисунок 6).

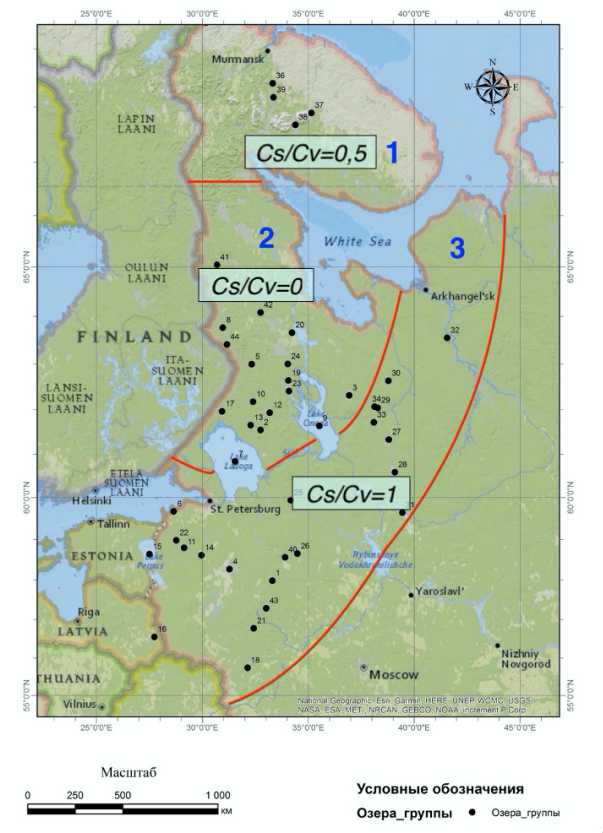


Рисунок 6 – Соотношение C_s/C_v для выделенных районов ($C_v = 0,28$)

В пятой главе по данным, полученным в четвертой главе, разработаны и апробированы методики определения максимальных уровней озер различной обеспеченности и среднего многолетнего уровня воды при отсутствии данных наблюдений. При выполнении комплексных инженерных изысканий специалистам, как правило, необходимо рассчитать максимальные уровни различной обеспеченности на неизученных водоемах,

т.к. предсказание этих уровней важно для оценки воздействия на природные экосистемы, для защиты жизненного пространства и имущества людей.

В действующем нормативном документе СП 529.1325800.2023 [97] для расчета максимальных уровней неизученных проточных озер рекомендуется рассчитывать средний многолетний весенне-летний подъем уровня воды в озере над порогом стока, который принимается за нуль графика. Значения коэффициента вариации (C_v) и отношение коэффициента вариации к коэффициенту асимметрии (C_s/C_v) при этом также рекомендуется определять по данным наблюдений на соседних, изученных озерах.

На практике при использовании этих рекомендаций возникают определенные трудности. Поэтому в данной работе автором предлагается следующее:

1. В качестве нуля графика озер использовать отметку среднего многолетнего минимального уровня межени – \bar{H}_{min} .
2. В качестве характеристики изменчивости максимального уровня озера рассматривать коэффициент вариации, приведенный к значению среднего многолетнего минимального уровня воды.
3. Параметры кривых распределения максимальных уровней воды неизученного озера определять на основе полученных нами региональных обобщений.

При разработке методики расчета максимальных уровней воды были использованы данные наблюдений на всех исследуемых озерах, за исключением озер с площадью удельного водосбора (A/Ω) более 100. Оставшиеся озера были разбиты на две группы. Первая группа включала только малые и средние озера, с площадью зеркала менее 100 км². Вторая группа включала все озера.

Было установлено, что для первой группы озер имеет место устойчивая зависимость среднего максимального уровня воды над \bar{H}_{max} от показателя $(A/\Omega)^{0,5}$ для всей рассматриваемой территории (рисунок 7):

$$\bar{H}_{max} = 21(A/\Omega)^{0,5} \quad (2)$$

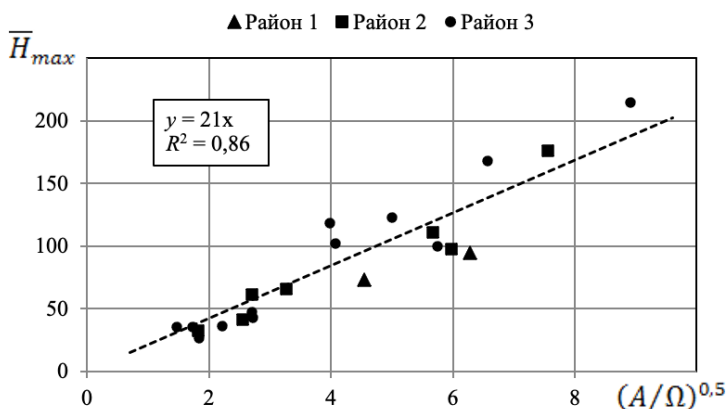


Рис.7. Зависимость среднего максимального уровня озера от показателя $(A/\Omega)^{0,5}$ для территории Северо-Запада Российской Федерации

Для второй группы озер выведено уравнение множественной регрессии, включающее в качестве предикторов площадь зеркала озера, площадь водосбора озера и их комбинацию в виде показателя $(A/\Omega)^{0,5}$:

$$\bar{H}_{max} = 22(A/\Omega)^{0,5} - 0,049\Omega + 0,0032A \quad (3)$$

Свободный член оказался статистически не значим, поэтому параметры выражения (3) получены при нулевом свободном члене (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры уравнения множественной линейной регрессии для зависимости (2)

Характеристика	Коэффициент	Стандартная ошибка	Статистика Стьюдента
Свободный член	0	–	–
Площадь зеркала озера, Ω	– 0,049	0,015	– 3,23
Площадь водосбора озера, A	0,0032	0,00054	5,93
$(A/\Omega)^{0,5}$	22,0	1,04	21,2

График связи эмпирических и рассчитанных по формуле (3) максимальных уровней представлен на рисунке 8.

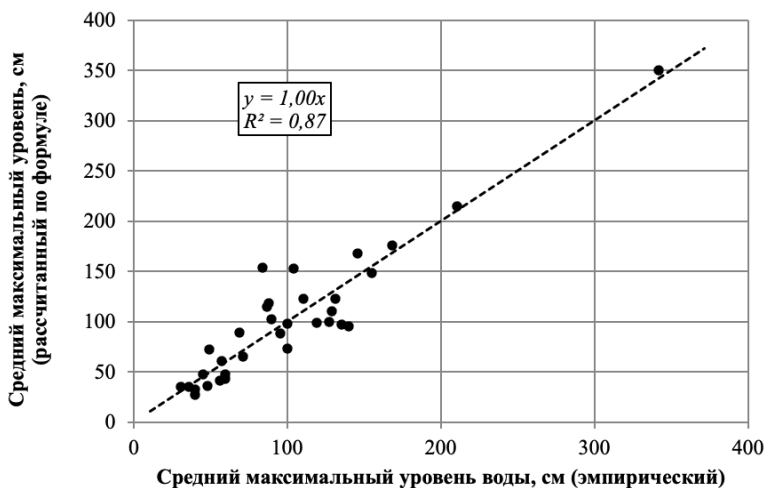


Рисунок 8 – График связи эмпирических и рассчитанных по формуле (3) средних максимальных уровней воды для озер Северо-Запада Российской Федерации

Для средних и малых озер с удельным водосбором менее 100 выявлена зависимость среднеквадратического отклонения максимального уровня воды от среднего многолетнего максимального уровня (рисунок 9). При построении графика были исключены озера, которые используются как водохранилища сезонного регулирования.

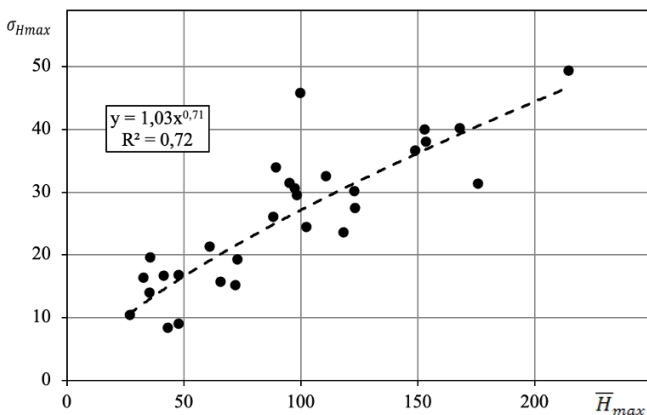


Рисунок 9 – График связи среднего максимального уровня воды и среднеквадратического отклонения для средних и малых озер Северо-Запада Российской Федерации

Зависимость аппроксимирована степенным выражением:

$$\sigma_{Hmax} = \bar{H}_{max}^{0,7} \quad (4)$$

Относительная ошибка расчета по формуле (4) составила 20%, максимальная – 66%.

Для апробации методики по полученным зависимостям были рассчитаны значения средних многолетних максимальных уровней воды для имеющихся озер, после чего были определены максимальные уровни воды 1 %, 5 %, 10 % по рассчитанным в третьей главе районным соотношениям C_s/C_v . Вычисление ординат аналитических кривых было произведено по распределению Крицкого–Менкеля и Пирсона III типа для сравнения и выбора наиболее подходящего типа кривой в условиях меняющегося климата.

В результате было установлено, что значения, полученные по аналитическим кривым Пирсона III типа, дают завышенное значение в среднем в 2 раза относительно значений, рассчитанные по фактическим

данным наблюдений. Нами установлено, что лучшие результаты получаются при использовании кривых Крицкого–Менкеля. В связи с чем, для определения уровней воды заданной обеспеченности при отсутствии данных наблюдений для озер, расположенных на Северо-Западе Российской Федерации для каждого из выделенных районов в условиях меняющегося климата, рекомендуется использовать аналитические кривые Крицкого–Менкеля.

Как указывалось ранее, отметки минимальных уровней воды неизученных озер можно снимать с топографических карт. Важно отметить, что данную величину рекомендуется уточнять при полевых изысканиях. Для определения точности такого способа определения отметок минимальных уровней воды с топографических карт масштаба 1:50000 были сняты отметки, которые сравнивались со значениями, полученными в результате расчета по фактическим данным наблюдений. В ходе анализа получено, что в 70 % случаев расчеты среднего многолетнего максимального уровня воды дают надежный результат в случае снятия отметки уровня воды с карты и в 80 % случаев – при расчете значений уровней воды 1 % обеспеченности.

Согласно Водному кодексу Российской Федерации, границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос устанавливаются от местоположения соответствующей береговой линии водного объекта, которая, в свою очередь, определяется по среднему многолетнему уровню воды в период, когда водный объект не покрыт льдом (ВК. РФ ст. 5.4, ст. 65). В связи с этим, при выполнении инженерно-гидрометеорологических изысканий стоит задача определения среднего многолетнего уровня воды.

В результате обобщения полученных результатов расчетов по фактическим данным наблюдений была выявлена зависимость среднего многолетнего уровня воды от удельного водосбора (рисунок 10), которая аппроксимируется степенным выражением:

$$\bar{H} = 9,21(A/\Omega)^{0,36} \quad (4)$$

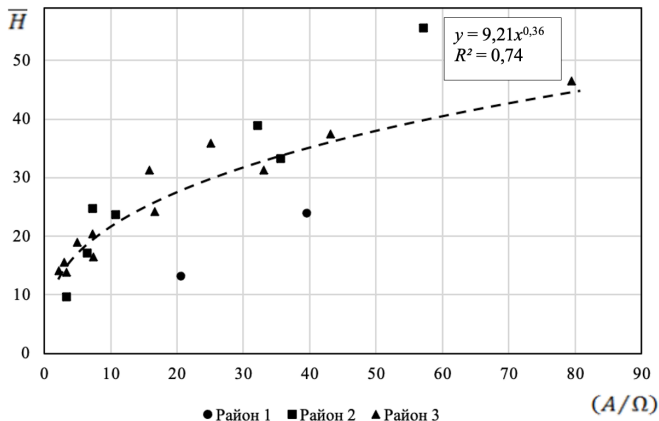


Рисунок 10 – Зависимость среднего многолетнего уровня озера от показателя (A/Ω) для территории Северо-Запада Российской Федерации

Погрешность расчета по полученной зависимости колеблется от 1 см (районы 2 и 3) до 15 см (район 1). Для каждого из выделенных районов с преобладанием определенных морфометрических и гидрологических особенностей озер были рассчитаны переходные коэффициенты от значения среднего многолетнего уровня воды к среднему многолетнему уровню в период, когда водный объект не покрыт льдом. Для первого района (Кольский полуостров) этот коэффициент равен 1,11; для второго (Карельский сегмент Балтийского щита) – 1,03 и для третьего района (Северо-Запад Русской равнины) он равен 1.

Заключение

Основные выводы диссертационной работы сводятся к следующим:

1. Выявлены особенности естественного уровенного режима озер и выделены однородные периоды его формирования. Установлено, что в рядах средних годовых уровней воды за весь период наблюдений на большинстве

озер прослеживается тенденция к повышению уровней воды. Также наблюдается общая тенденция на рост минимальных уровней воды во всех выделенных районах.

2. Установлено, что основной вклад в изменчивость межгодовых колебаний вносят квазипятилетние (частота $0,17 \text{ год}^{-1}$) и квазитридцатилетние колебания (частота $0,037 \text{ год}^{-1}$). При этом вклад высокочастотных колебаний (около 5-летних циклов) больше на озерах, которые расположены преимущественно в северной части (Кольский полуостров, Карелия, северные регионы района 3), при продвижении на юг вклад низкочастотных колебаний увеличивается и около 30-летние колебания преобладают среди выделенных циклов на озерах.

3. Разработана методика для расчета максимальных уровней воды неизученных озер, которая отличается универсальностью, что позволяет применить единый подход при расчете максимальных уровней озер различного типа. Методика дает возможность на научной основе подойти к решению ряда геоэкологических и водохозяйственных задач, проектированию различных сооружений, проведению водоохранных мероприятий, установлению зон затопления и других задач при выполнении комплексных инженерных изысканий. Данная методика апробирована на фактическом материале и дает надежные результаты.

4. Рекомендуется в качестве нуля графика неизученных озер использовать отметку среднего многолетнего минимального уровня межени, что позволяет применить системный подход при расчете максимальных уровней не только проточных озер, но и периодически сточных и бессточных озер.

5. Рассчитаны максимальные уровни воды различной обеспеченности исследуемых озер. Полученные результаты рекомендуется использовать при выполнении расчетов во время комплексных инженерных изысканий.

6. Рассчитаны и обобщены параметры кривых распределения

максимальных уровней неизученных озер Северо-Запада Российской Федерации и южной части Кольского полуострова, что позволяет уточнить результаты расчетов при изысканиях. При проведении комплексных инженерных изысканий рекомендуется использовать отношение C_s/C_v средним в пределах выделенных районов: Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита – $C_s/C_v = 0,5$; Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита – $C_s/C_v = 0$; Северо-Запад Русской равнины – $C_s/C_v = 1,0$. А коэффициент вариации C_v при этом для всех районов принять равным 0,28.

7. Разработана методика для расчета средних многолетних уровней воды, что позволяет определить границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос неизученных озер. Методика апробирована на фактическом материале и дает надежные результаты.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Давыденко Е.В.**, Гайдукова Е.В., Дрегваль М.С. Особенности уровня режима озер Кольского полуострова // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 61. – С. 437-445. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-437-445

2. **Мякишева Н.В., Давыденко Е.В., Орлов Д.А.** Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России II. Ладожское озеро // Естественные и технические науки. – 2020. – № 12 (150). – С. 166-172.

3. **Мякишева Н.В., Давыденко Е.В., Орлов Д.А.** Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России. Арктический регион. Умбозеро // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 12 (часть 1). – С. 166-172. DOI: 10.17513/use.37754

4. **Давыденко Е.В., Серебрякова Е.Д.** Влияние климатических и антропогенных факторов на уровень режим озер зон избыточного и достаточного увлажнения. // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 6. – С. 83-87. DOI: 10.17513/use.37845

Статьи в других изданиях:

1. **Фруммин Г.Т., Давыденко Е.В.** Межгодовая динамика атмосферных осадков в Санкт-Петербурге // В сборнике: Анализ, прогноз и управление

природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК – 2015). Материалы 9-й Международной научно-практической. Научный Совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – 2015. – С. 420-423.

2. **Давыденко Е.В.**, Фрумин Г.Т. Динамика атмосферных осадков в Санкт-Петербурге // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXVIII Герценовские чтения. Санкт-Петербург. – 2015. – С. 73-75

3. Фрумин Г.Т., **Давыденко Е.В.** Межгодовая динамика атмосферных осадков в Санкт-Петербурге // В сборнике: Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата "ГЕОРИСК - 2018". Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков: в 2 томах. Отв. ред. Н.Г. Мавлянова. – 2018. – С. 143-146.

4. **Давыденко Е.В.** Определение отметок порогов слива на неизученных озерах // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Под редакцией О.М. Макарьевой. – 2018. – С. 709-710.

5. **Давыденко Е.В.**, Сикан А.В. Расчёт максимальных уровней воды неизученных озёр на примере водоёмов Северо-Запада РФ // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 219-220.

6. **Давыденко Е.В.** Исследование закономерностей распределения озёр Северо-Запада России в зависимости от их морфологии и гидрологического режима // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции. Отв. редакторы С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. – 2020. – С. 281-284.

7. **Давыденко Е.В.** Влияние морфологии котловин озёр на их уровеньный режим // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург. – 2020. – С. 428-433.

8. **Давыденко Е.В.**, Мякишева Н.В. Разномасштабная изменчивость уровней воды Ладожского озера // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2020. – С. 335-336.

9. **Давыденко Е.В.** Режим уровней воды озер Кольского полуострова // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 152-156.

10. **Давыденко Е.В.** Определение максимальных уровней воды неизученных озёр на примере водоёмов Северо-Запада РФ // VI Международная конференция молодых ученых (школа-практика) «Водные ресурсы: изучение и управление» Петрозаводск, 1-5 сентября. – 2020.

11. **Давыденко Е.В.,** Серебрякова Е.Д. Уровненный режим озер Чебаркуль и Увильды (Челябинская область) // География: развитие науки и образования. Сборник статей по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 249-252

12. **Давыденко Е.В.,** Сикан А.В. Расчет максимальных уровней озер Северо-Запада России при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь. – 2021. – С. 249-252

13. **Ekaterina V. Davydenko, Aleksandr V. Sikan** Calculation of the maximum levels of lakes in North-West Russia in the absence of hydrometric observation data // «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science». – 2021. V.834. DOI:10.1088/1755-1315/834/1/012011

14. **Мякишева Н.В., Головань Е.В.** Уровненный режим озер разных классов водообмена // Сборник трудов VI Международной конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022. Сборник трудов VI Международной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 168-171.