

На правах рукописи

Тюсов Григорий Анатольевич

Климатические аспекты функционирования традиционных источников энергии в регионах России в условиях меняющегося климата

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Научный руководитель: кандидат географических наук
Акентьева Елена Марковна

Официальные оппоненты: Хан Валентина Моисеевна, доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», главный научный сотрудник;

Гужов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", доцент, директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки «Энергоменеджмент и энергосберегающие технологии».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится «__» _____ 2020 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью и в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.046.04, Зайцевой И.С.
[e-mail: d00204604@igras.ru](mailto:d00204604@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

И.С. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наблюдаемое в настоящее время изменение климата и необходимость адаптации к нему являются повседневной реальностью. Изменение климата является одним из важнейших вызовов XXI в., который выходит за рамки научной дискуссии и представляет собой комплексную междисциплинарную проблему, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития, как России, так и всего мирового сообщества.

Важное значение для адаптации к изменению и изменчивости климата имеет развитие климатического обслуживания отраслей экономики и социальной сферы. В 2009 г. на Третьей Всемирной климатической конференции 155 стран одобрили создание Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания (ГРОКО), цель которой «улучшение производства, доступности, предоставления и применения климатических прогнозов и обслуживания, основанных на достижениях науки». ГРОКО направлена на сокращение разрыва между климатической информацией и практическими задачами её конечных потребителей. В разработанный план осуществления ГРОКО было включено 4 приоритетных области: сельское хозяйство и продовольственная безопасность, уменьшение опасности бедствий, здравоохранение и управление водными ресурсами. В дальнейшем, на 16 сессии Комиссии по климатологии ВМО в 2014 г. принято решение расширить сферу применения ГРОКО и добавить в число приоритетных областей энергетику.

Степень разработанности темы. Включение энергетического сектора в ГРОКО вызвано растущей обеспокоенностью о надежности функционирования разных типов электростанций в условиях меняющегося климата. Энергетика является одним из наиболее климатозависимых секторов экономики. Так, Агентство по ядерной энергии ОЭСР (NEA) в 2013 г. объявило о начале двухлетнего исследования по оценке уязвимости АЭС и стоимости их адаптации к климатическим изменениям. Причиной этого является увеличение вероятности волн тепла, сопровождающихся засухами, сильных штормов, наводнений и т.п. Такие процессы могут стать фактором, ограничивающим мощности как обычных тепловых электростанций, так и АЭС, которым требуется вода для охлаждения энергоблоков. В соответствии с результатами климатического моделирования [IPCC, 2014; Второй..., 2014] подобные события в будущем, вероятно, будут более частыми. Учитывая проектные сроки службы АЭС (60 лет для новых станций), становится ясным, что нестабильность климата должна учитываться уже на стадии проектирования. Модернизация с целью повышения устойчивости к природным воздействиям, очевидно, потребует и для уже существующих энергоблоков.

В Пятом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата констатируется, что изменение климата будет влиять как на предложение, так и на спрос в энергетическом секторе, что неизбежно повысит чувствительность сектора к климатическим факторам. В этих условиях исследования влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на безопасное и эффективное функционирование тепловой, атомной и гидроэнергетики на территории России становятся особенно актуальными.

Цель и задачи. Цель работы состоит в оценке влияния современных и будущих изменений специализированных климатических параметров на работу АЭС, ТЭС и крупных ГЭС на территории России и предложении соответствующих адаптационных мер. Для достижения поставленной цели решены следующие основные **задачи**:

1. анализ нормативных документов по проектированию и эксплуатации АЭС, ТЭС и крупных ГЭС, содержащих климатические параметры;
2. выбор специализированных климатических параметров, наиболее значимых для функционирования традиционных источников электроэнергии;
3. апробация применения программы ClimPACT, разработанной Комиссией по климатологии ВМО, для оценки воздействия климатических изменений на работу АЭС и ТЭС;
4. анализ изменений выбранных климатических параметров в различных регионах России с использованием программы ClimPACT на основе данных метеонаблюдений и данных климатического моделирования;
5. применение информации об изменении специализированных климатических и гидрологических параметров, полученных по наблюдаемым данным и данным Региональной климатической модели ГГО (РКМ ГГО), для оценок воздействия климатических изменений на безопасность и эффективность работы атомной, тепловой и гидроэнергетики;
6. выявление районов с наибольшими погодно-климатическими рисками для различных типов электростанций;
7. предложение адаптационных мер для энергетического сектора России к изменяющимся климатическим условиям.

Научная новизна. Получен ряд новых фундаментальных знаний и прикладных результатов:

- впервые протестирован и апробирован для анализа влияния изменения климата на безопасность и эффективность работы тепловой и атомной энергетики программный продукт ClimPACT; информация о выявленных ошибках программы передана в ВМО;

– впервые получены оценки изменения специализированных климатических индексов ClimPACT для выявления районов с наибольшими погодно-климатическими рисками при производстве электроэнергии на АЭС и ТЭС на основе данных метеонаблюдений и результатов регионального климатического моделирования;

– впервые получены оценки возможного изменения выработки электроэнергии на ГЭС ООО «РусГидро» к середине XXI в. на основе данных метеонаблюдений и климатического моделирования;

– на базе результатов, полученных в данной работе, сформулированы предложения по адаптации энергетического сектора России к изменяющимся климатическим условиям.

Теоретическая и практическая значимость. Представлена методика на основе использования специализированных климатических индексов. Расчёты с использованием ClimPACT, позволяют совместить данные метеонаблюдений и результаты климатического моделирования для выявления районов с наибольшими погодно-климатическими рисками для атомной и тепловой энергетики. Полученные зависимости между характеристиками стока рек и выработкой электроэнергии на ГЭС дают возможность использовать выходные данные РКМ ГГО для оценок изменения безопасности и эффективности работы ГЭС в будущем. Результаты следует учитывать при разработке стратегии адаптации тепловой, атомной и гидроэнергетики России к наблюдаемым и ожидаемым в будущем климатическим изменениям.

Положения, выносимые на защиту.

1. Набор специализированных климатических параметров, наиболее значимых для функционирования АЭС и ТЭС России в условиях меняющегося климата.

2. Результаты анализа изменений выбранных климатических параметров для атомной и тепловой энергетики в различных регионах России с использованием программы ClimPACT по данным метеонаблюдений и результатам климатического моделирования.

3. Результаты анализа изменений климатических и гидрологических параметров, значимых для функционирования ГЭС, по данным метеонаблюдений и результатам климатического моделирования.

4. Выявленные районы с наибольшими погодно-климатическими рисками для производства электроэнергии.

5. Предложения по адаптации энергетического сектора России к изменяющимся климатическим условиям.

Достоверность результатов полученных в диссертации и положений, выносимых на защиту, подтверждена примененными методами обработки исходных данных и современными подходами статистического моделирования. Надежность результатов

определяется выверенной и проанализированной информацией и подтверждена большим объемом выполненных вычислений по нескольким десяткам рядов наблюдений.

Апробация работы. Результаты исследования доложена на научных следующих научных мероприятиях: молодёжная конференция «Третьи ежегодные молодежные межвузовские чтения памяти И.Г. Москаленко», 2014 г., международные научно-практические конференция в рамках XI и XII Большого географического фестиваля СПбГУ в 2015 и 2016 гг., сессии Ученого Совета ГГО в 2013–2018 гг., курсы повышения квалификации климатологов УГМС Росгидромета в ГГО в 2015–2016 гг., международная научная конференция «Третьи Виноградовские чтения – Грани гидрологии» в 2018 г., всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» в 2019 г. Результаты работы использованы при выполнении гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00063), а также НИОКР, выполняемых в ГГО.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано: 4 статьи в рецензируемых периодических научных журналах рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией России для публикации результатов диссертаций, включая 1 статью в издании, реферируемом Web of Science и Scopus, а также 4 публикации в тезисах и материалах научных мероприятий.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов. Автору принадлежит постановка цели и задач исследования, разработка программы и непосредственное участие в её реализации на всех этапах. Автором лично проведено обобщение литературных и полученных экспериментальных данных, сформулированы научные положения работы и выводы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка литературы и Приложения. Объем работы составляет 168 страниц (включая Приложение), содержит 42 таблицы и 97 рисунков (в том числе 22 таблицы и 78 рисунков в Приложении). Список литературы содержит 107 библиографических источников, из них 30 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю к.г.н. Е.М. Акентьевой за помощь и поддержку на всех этапах работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана общая характеристика работы, раскрывается её актуальность и научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации атомной, тепловой и гидроэнергетики. Проанализировано состояние исследований в области воздействия изменения климата на энергетический сектор экономики России и мира. Проведен анализ сводов правил и нормативных документов для проектирования, строительства и эксплуатации энергетических объектов. Выполнено обобщение специализированной климатической информации для тепловой, атомной и гидроэнергетики. Рассмотрены системы охлаждения агрегатов и особенности функционирования электростанций в условиях меняющегося климата, изложенные в отечественных и зарубежных изданиях.

Во **второй главе** проведён анализ воздействия климатических изменений на безопасность и эффективность работы АЭС и ТЭС.

В **разделе 2.1.** рассмотрено влияние изменений режимов температуры и увлажнения на функционирование АЭС и ТЭС. Одним из ключевых показателей эксплуатации генерирующих мощностей является эффективность использования установленной мощности электростанций, которая характеризуется коэффициентом использования установленной мощности. Значение последнего зависит как от технологических факторов и характеристик, так и от метеорологических условий. Проведён анализ климатообусловленных аварийных ситуаций на атомных электростанциях в России и зарубежом. Установлено, что причиной таких остановок стали “занормативные” показатели температуры. Важной проблемой является достаточное количество и качество воды, используемой в большинстве систем охлаждения агрегатов электростанций, что делает их крайне уязвимыми в условиях ограниченности водных ресурсов и конкуренции с другими водопользователями. Повышение температуры воды создаёт ограничения для систем охлаждения на АЭС и ТЭС и может стать причиной возникновения рисков для их нормальной работы.

Изменения в доступности воды могут иметь последствия для строительства новых и эксплуатации уже существующих энергоустановок, которые будут всё в большей степени конкурировать с другими. Поэтому местоположение новых электростанций должно быть тщательно проанализировано при принятии решений об их строительстве.

Имеющиеся данные по связи температуры воздуха с располагаемой мощностью [Калатузов, 2014], свидетельствуют, что при достижении критической температуры

мощность выработки начинает резко снижаться. Об этом говорят результаты расчётов зависимости располагаемой мощности ТЭС от температуры наружного воздуха, для градирен Липецкой, Ереванской и Артемовской ТЭС (рис. 1).

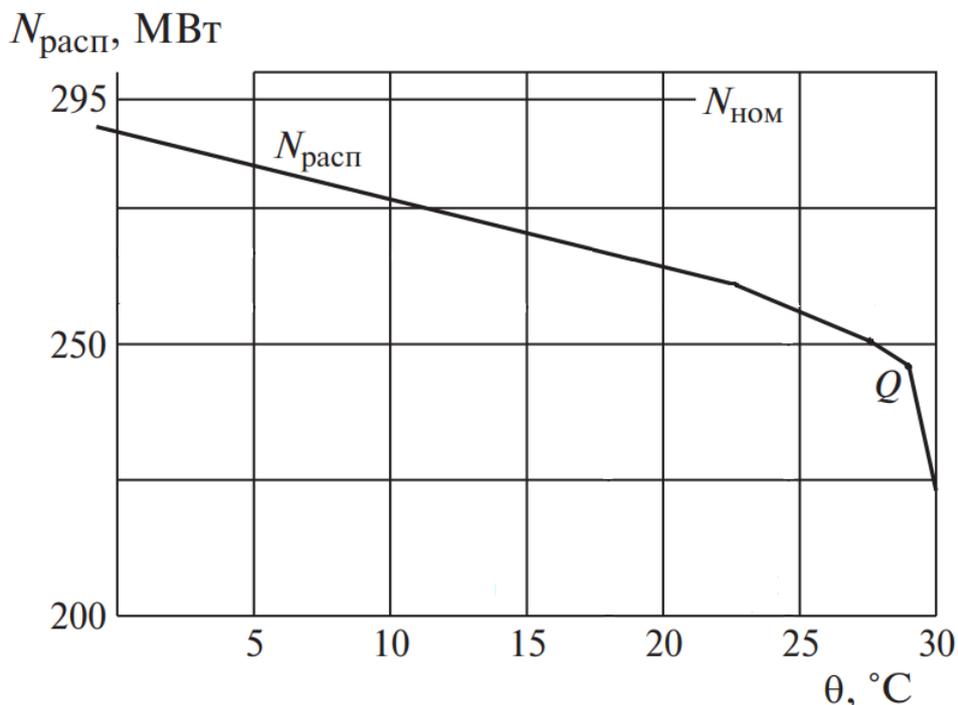


Рис. 1. Зависимость располагаемой мощности ТЭС ($N_{расп}$, МВт) от температуры воздуха [Калатузов, 2014].

Аномально жарким летом 2010 г. на европейской территории России сложилась критическая ситуация в области производства электроэнергии на АЭС и ТЭС. В экстремально жарких условиях, когда высокие температуры наружного воздуха держались не только в дневные, но и в ночные часы, снижалась максимальная мощность генерирующего оборудования. Из-за жары и засухи в этот период гидростанции Волжско-Камского каскада, вырабатывающие значительную долю электричества в Европейской части России, работали с минимальной нагрузкой, что еще больше увеличило нагрузку на атомные и тепловые электростанции. В результате на ряде АЭС произошли аварийные остановки энергоблоков.

В разделе 2.1 описана апробация применения программы ClimPACT для оценки воздействия климатических изменений на работу АЭС и ТЭС на территории России. Данный программный продукт использован для расчёта специализированной климатической информации в рамках реализации российского сегмента ГРОКО. ClimPACT разработан экспертной группой «Взаимодействие с пользователями в целях адаптации к климату и управления рисками» в составе Комиссии по климатологии ВМО с целью оперативной оценки изменений экстремальных значений климатических параметров, наиболее значимых для конкретных отраслей экономики и социальной

сферы, включая энергетический сектор. В процессе выполнения диссертационного исследования в программе был выявлен ряд ошибок и уточнены некоторые индексы.

Среднемесячные климатические данные сглаживают большую часть важной информации, от которой зависят различные отрасли экономики. По этой причине индексы, полученные из ежедневных данных, позволяют объективно извлечь информацию из метеорологических наблюдений, которая затрагивает различные сферы деятельности с особым упором на экстремальные явления.

Входными данными для проведения расчётов специализированных климатических индексов являются ряды суточной максимальной и минимальной температуры воздуха и количества осадков, которые предварительно проходят автоматический контроль на наличие ошибок в данных. Так как в программе ClimPACT отсутствует опция проверки однородности рядов, эта процедура была выполнена в соответствии с методами, изложенными в методических рекомендациях по расчёту специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики (2017). При проверке однородности использовались 4 статистических теста: два параметрических по проверке нулевой гипотезы о равенстве средних и распределении по преобразованным критериям Стьюдента и Колмогорова (Александрсона и Буишанда), третий использует непараметрический критерий (Петита), и четвертый основан на отношении Фон-Ноймана, позволяющим принимать или отвергать гипотезу об однородности ряда.

На основе суточных данных ClimPACT рассчитывает около 40 различных индексов, характеризующих изменение экстремальности термического и влажностного режимов в пункте наблюдений. Параметры многих индексов задаются пользователем в соответствии с конкретной прикладной задачей. Для более корректного расчёта метеорологических характеристик заданной обеспеченности используется процедура бутстрепа. Итоговые результаты представляются в виде таблиц и графиков. Для параметров с межгодовой изменчивостью рассчитывается коэффициент линейного тренда, его ошибка и значимость. Для оценки значимости климатических индексов используется так называемое р-значение (p-value). Проверка гипотез с помощью р-значения является альтернативой классической процедуре проверки через критическое значение распределения. Чем р-значение меньше, тем больше "сила" отклонения нулевой гипотезы (т.е. гипотезы об отсутствии взаимосвязи или корреляции между исследуемыми переменными) и тем больше ожидаемая значимость результата.

Визуализация изменений рассчитываемых индексов выполняется с помощью локально взвешенного сглаживания (locally weighted scatter plot smoothing – LOWESS).

Этот метод восстановления регрессии является устойчивым к шуму в исходных данных и позволяет получить робастную оценку данных путем учета веса каждого значения ряда.

В разделе 2.3 проведён отбор значимых для функционирования АЭС и ТЭС климатических параметров, рассчитываемых в программе ClimPACT. Рассмотрен комплекс климатических факторов, влияющих на производство энергии на АЭС и ТЭС. На основе анализа литературных источников и нормативных документов, посвященных воздействию условий внешней среды на функционирование тепловой и атомной энергетики, а также в процессе взаимодействия с потребителями климатической информации, определено, что для нормальной эксплуатации ТЭС и АЭС наиболее важно бесперебойное функционирование конечного поглотителя тепла, которыми являются атмосфера и/или водоём. В результате отобраны индексы, отражающие критические состояния окружающей среды, при которых могут возникнуть занормативные состояния систем охлаждения агрегатов электростанций. В данной работе рассмотрены следующие показатели термического режима и режима увлажнения территории:

— максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days - CDD);

— продолжительность самой длинной волны тепла в году (волна тепла – не менее 3-х последовательных суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 90 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки; Heat wave duration – HWD);

— число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN).

В разделе 2.4 проведён анализ изменения климатических параметров в различных регионах России по данным метеонаблюдений. Приведены результаты расчёта и анализа выбранных климатических параметров. Для оценок наблюдаемых климатических изменений использовали массив суточных данных ВНИИГМИ–МЦД по температуре воздуха и осадкам с 1950 по 2017 гг., в качестве базового принят период 1971–2000 гг. Использованы данные 26 метеостанций в 7 районах с высокой плотностью расположения объектов энергетики: Калининградская обл., Санкт-Петербург и Ленинградская обл., Центральный регион, Центрально-Черноземный регион, Ростовская обл., Свердловская обл., Южно-Сибирский регион (рис. 2). Районы выбирали так, чтобы в них находились как АЭС, так и ТЭС. Исключением является Южно-Сибирский регион, где расположены только ТЭС, приуроченные к Кузнецкому и Канско-Ачинскому угольным бассейнам.

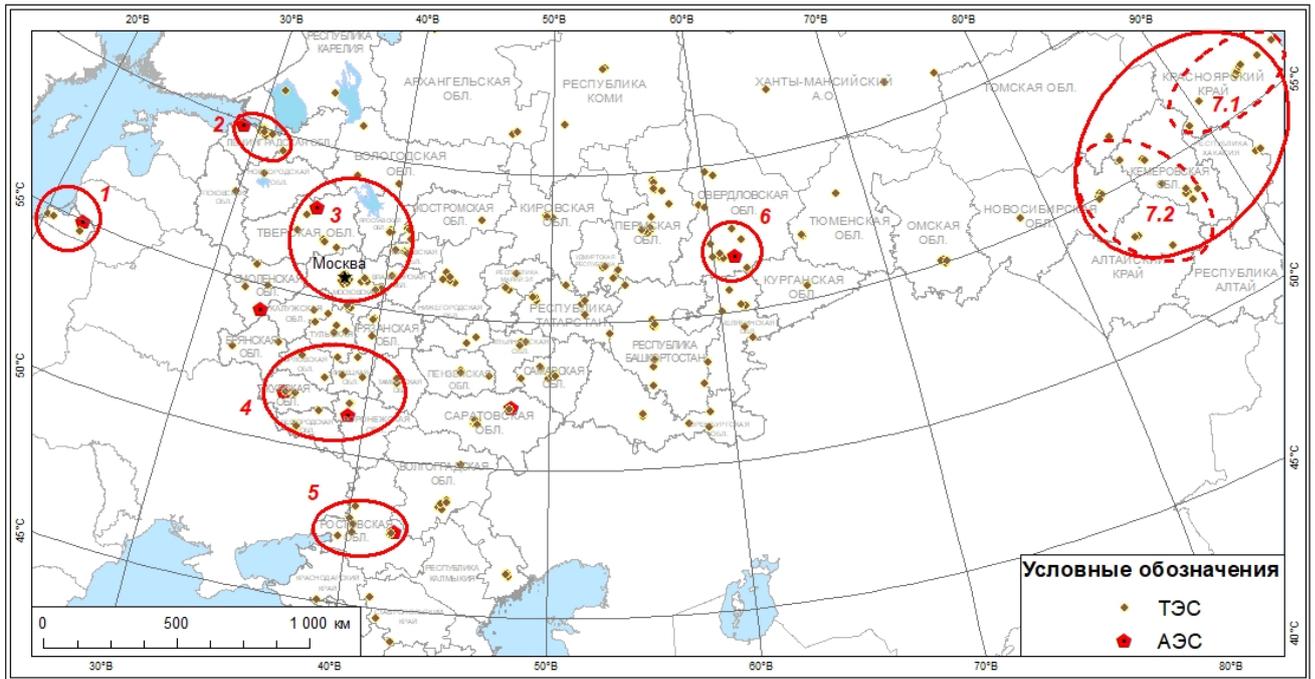


Рис. 2. Районы с высокой плотностью расположения ТЭС и АЭС.

- 1 - Калининградская обл.; 2 - Санкт-Петербург и Ленинградская обл.;
 3 - Москва и Московская обл.; 4 - Центрально-Черноземный регион;
 5 - Ростовская обл.; 6 - Свердловская обл.; 7 - Южно-Сибирский регион.

Анализ климатической информации по наблюдаемым данным показывает, что наибольшие риски для систем охлаждения АЭС и ТЭС наблюдаются в Центрально-Черноземном регионе, где зафиксированы значимые тренды продолжительности самой длинной волны тепла. Из графика изменения индекса 5TX5TN на метеостанции Каменная Степь (рис. 3) так же следует значительное увеличение данного показателя. Это – единственный регион из всех рассматриваемых в данном исследовании, где очевидны значимые тренды увеличения засушливых периодов. В зоне повышенных рисков находятся также Ростовская и Свердловская обл., где отмечено увеличение повторяемости и длительности тепловых волн. Однако, в отличие от Ростовской обл., продолжительность засушливых периодов в Свердловской обл. имеет тенденцию к сокращению. Наименьшие риски для систем охлаждения электростанций характерны для Калининградской обл., на территории которой изменений температурного и влажностного режимов нет.

Все результаты расчёта специализированных климатических индексов по наблюдаемым данным и графики их изменения представлены в Приложении к работе.

Отдельно рассчитан индекс CDD для теплого периода – с апреля по октябрь – $CDD_{\text{апр-окт}}$. Именно в этот сезон риски возникновения аварийных ситуаций на электростанциях наиболее велики из-за температурных условий окружающей среды. В ClimPACT не предусмотрена функция по уточнению внутригодового интервала по месяцам, поэтому для расчёта этого индекса использована программа Excel.

метеостанция: Каменная степь, индекс: 5TX5TN

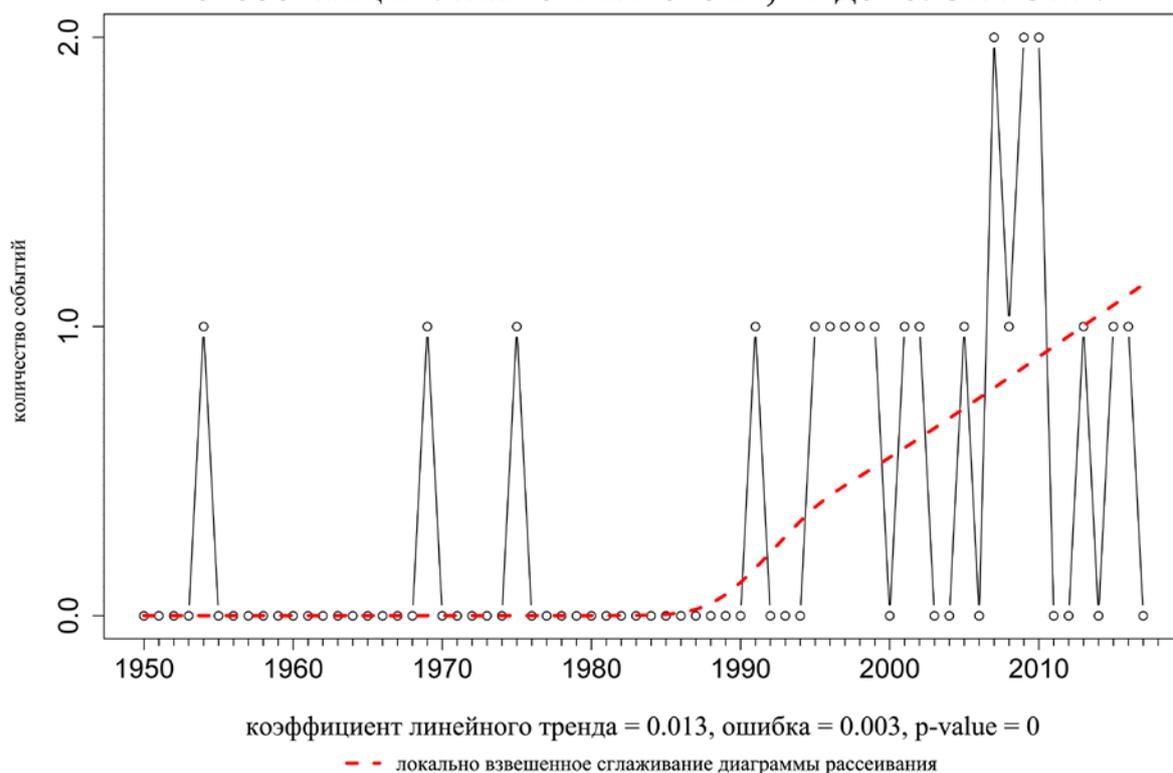


Рис. 3. Изменение числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами выше 95% обеспеченности (5TX5TN), рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки по данным метеостанции Каменная Степь (Центрально-Чернозёмный регион).

Продолжительность сухого периода для индекса $CDD_{\text{апр-окт}}$ короче, чем CDD . Коэффициент линейного тренда в данном случае значительно возрастает – от 2 до 10 раз и в некоторых районах с отрицательного становится положительным (Калининград, Бологое, Москва, Богородицкое). Его ошибка при этом остается практически неизменной и превышает доверительный интервал в 5 %. То же касается и статистической значимости (p-value). Лишь в Рыльске положительный тренд по увеличению $CDD_{\text{апр-окт}}$ (как и CDD) статистически значим – p-value = 0.023.

В разделе 2.5 даны оценки изменений специализированных климатических индексов к середине XXI в. Прогнозные оценки специализированных климатических индексов основаны на данных ансамблевых расчётов РКМ ГГО. Данная модель разработана и постоянно развивается с конца 1990-х гг. и является единственной региональной климатической моделью для территории России. Её пространственное разрешение 25 км. В настоящее время она входит в проект сравнения CORDEX (Coordinated regional climate downscaling experiment) – аналог CMIP5 для региональных моделей.

В ходе расчетов РКМ ГГО использует на боковых границах модельной области данные по температуре воздуха, ветру, влагосодержанию атмосферы и давлению на подстилающей поверхности, полученные по глобальной модели ГГО (версия T42L25) за

каждый 6-часовой интервал. Обе модели имеют одинаковые разрешение вертикальной сетки (25 6-слоев разной толщины) и параметризации физических процессов в атмосфере и деятельном слое почвы.

Расчёты проводили по 30 разным начальным условиям в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для двух периодов: 1990–1999 гг. (базовый) и 2050–2059 гг. (будущий) по сценарию RCP 8.5 МГЭИК. Таким образом, для каждого периода ансамблевый расчёт составляет 300 расчетных лет, что позволяет описать с его помощью широкий спектр климатической изменчивости. Изменчивость климата представляет в данном исследовании основной источник неопределенности перспективных оценок изменений регионального климата, поскольку используется единственная система глобальной и региональной моделей и один сценарий радиационного воздействия.

На основе информации об изменении климатических характеристик, проведен расчет описанных выше индексов для базового и будущего периодов. Изменения индексов на период 2050–2059 гг. рассчитаны относительно базового периода 1990–1999 гг. (табл. 1). В качестве модельных точек выбраны локации 10 метеостанций, по которым проведен анализ наблюдаемых климатических изменений, во всех 7 исследуемых районах. Для выбранных 10 метеостанций вычислены средние значения климатических индексов по наблюдаемым данным для периода 1990–1999 гг. Такой подход позволил сопоставить результаты климатического моделирования с наблюдаемыми показателями для верификации прогнозных оценок.

Таблица 1. Изменения значений индексов CDD, HWD, 5TX5TN к 2050–2059 гг. по сравнению с 1990–1999 гг. по оценкам региональной модели ГГО

Регион	CDD			HWD			5TX5TN		
	<i>I</i>	ΔI	σ	<i>I</i>	ΔI	σ	<i>I</i>	ΔI	σ
Калининградская обл.	23.3	-1.4	6.0	7.4	8.9	6.3	0.2	1.9	1.2
Санкт-Петербург и Ленинградская обл.	24.4	-1.2	6.9	7.5	8.7	6.8	0.2	2.1	1.2
Центральный регион	18.4	-0.9	9.3	8.5	8.0	7.2	0.2	2.2	1.3
Центрально-Черноземный регион	21.6	1.1	11.2	9.2	9.0	8.7	0.4	2.1	1.4
Ростовская обл.	31.1	3.3	27.6	8.8	11.8	9.3	0.3	2.3	1.3
Свердловская об.	27.5	-1.7	12.5	6.5	6.0	5.4	0.1	1.9	1.1
Южно-Сибирский регион	25.0	-3.6	8.8	6.6	5.6	5.6	0.1	1.1	0.9

Примечание: *I* – значение индекса в 1990–1999 гг. по данным наблюдений; ΔI – средние по ансамблю изменения индекса к 2050–2059 гг. по сравнению с 1990–1999 гг.; σ – среднеквадратическое отклонение изменений в ансамбле.

Здесь и далее в таблицах жирным шрифтом отмечены значения изменений параметров, превышающие или равные стандартному отклонению.

В разделе 2.6 определены районы с наибольшими погодно-климатическими рисками для производства электроэнергии на АЭС и ТЭС. Во всех рассматриваемых районах к середине XXI в. следует ожидать практически двукратного увеличения максимальной

длительности волн тепла (HWD) и возрастания в 4–5 раз повторяемости случаев с длительными экстремально жаркими температурами (5TX5TN). При этом в зоне наибольшего риска оказываются Центрально-Черноземном регион и Ростовская обл. В этих районах риски бесперебойной работы систем охлаждения энергоблоков электростанций, обусловленные высокими температурами воздуха и охлаждающей воды, становятся еще более значимыми из-за увеличения потребления энергии на кондиционирование в летний период.

На примере Ростовской обл. проведена оценка воздействия климатических изменений на функционирование энергетических систем.

В **третьей главе** проведён анализ воздействия климатических изменений на безопасность и эффективность работы крупных ГЭС – одних из наиболее климатозависимых источников электроэнергии. При разработке стратегии развития гидроэнергетики необходимо учитывать вероятность уязвимости водных ресурсов вследствие изменения климата, причем не только с точки зрения изменения общего количества воды и объема ее потребления в различных областях (коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и др.), но и по возможности учитывая внутригодовую смену режимов водных потоков. В условиях климатических изменений выработка электроэнергии на ГЭС и условия их эксплуатации могут измениться в связи с изменением объема стока и интенсивности и частоты экстремальных явлений.

В **разделе 3.1** изучено изменение климатических и гидрологических параметров, значимых для работы ГЭС. Анализ проведён по данным метеонаблюдений и результатам климатического моделирования по гидрологическим сезонам. Для исследования были выбраны крупные ГЭС ООО «РусГидро»: Волжско-Камский каскад (ВКК), Саяно-Шушенская, Зейская и Бурейская.

Анализ наблюдаемых климатических изменений проводился за период 1950–2015 гг. по суточным данным температуры воздуха и осадков по 21 метеостанции, которые расположены на территории водосборных бассейнов рассматриваемых ГЭС.

В Волжском бассейне, начиная с 1970-х гг. фиксировали значительный рост температуры воздуха в январе–марте (на 1.5–3.0°C), увеличение суммы положительных температур, частоты оттепелей. Температура воздуха в весенний и летне-осенний периоды имела тенденцию к незначительному росту на всей территории бассейна за исключением южной части. Количество осадков увеличилось, особенно в северной части водосбора р. Кама. Изменения температуры и характера увлажнения на территории повлекли трансформацию водного режима. Сток весеннего половодья уменьшился по объему и

максимальному расходу и растянулся по времени. Существенно увеличился зимний и летне-осенний меженный сток.

На водосборе Саяно-Шушенского водохранилища средняя годовая температура воздуха за весь анализируемый период увеличилась на 2–3°C. Температура воздуха, осредненная по гидрологическим сезонам, также имела положительный тренд во все сезоны: с октября по март 3–4°C, а с апреля по сентябрь 1–2°C. Такое изменение температурного режима, привело к увеличению доли жидких осадков и уменьшению периода снегонакопления, сглаживанию осенне-весенних экстремумов стока. При анализе изменения годовых сумм осадков за последние 50 лет значимых трендов не отмечено.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха в бассейне рек Зеи и Буреи составило около 2°C и имело положительный тренд во все сезоны. Максимальный рост температуры был с декабря по март – около 4°C за 50 лет; в октябре–ноябре – 2°C, в теплый период года значимых изменений не зафиксировано. В последние 20 лет увеличилось количество осадков в весенне-летний период, когда формируется основная часть годового стока.

Анализ ожидаемых изменений климатического и гидрологического режимов проведён по данным моделирования ансамбля из 10 МОЦАО (моделей общей циркуляции атмосферы и океана) CMIP5 и РКМ ГГО, по двум сценариям радиационного воздействия: RCP4.5 (слабое потепление) и RCP8.5 (сильное потепление) на середину XXI в. Показателем достоверности результатов являются межмодельные стандартные отклонения. Данные по водосборам рассматриваемых ГЭС осреднены в узлах модельной сетки.

Для Волжского бассейна прогноз по росту средней температуры воздуха к середине XXI в. в зимний период (декабрь–март) – 3.0–4.0°C, в весенний (апрель–июнь) и летне-осенний (июль–ноябрь) – 2.5–3.0°C. Такое увеличение температуры можно считать статистически значимым, т.к. межмодельное стандартное отклонение составляет около 1°C.

Наибольший рост осадков для территории ВКК ожидается зимой. К середине XXI в. по сценарию сильного потепления он достигнет 13 % на верхней Волге и 17 % на р. Кама. Весной эти значения составят соответственно 6–7 % и 8–9 %, а в летне-осенний период – 1–2 % и 4–6 %. На нижней Волге ожидается уменьшение осадков в летне-осенний период на 2–4 %. Итоговое увеличение осадков на водосборе р. Волги к середине XXI в. в летне-осенний период составит около 2 %.

Прогнозные оценки изменений как слоя стока, так и сумм осадков неопределенны. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока к середине XXI в. составят около 10 %. Прогнозируемое по всем климатическим сценариям дальнейшее повышение

зимних температур воздуха позволяет считать, что увеличенный зимний приток воды в водохранилища ВКК, наблюдающийся со второй половины 1970-х гг., сохранится, по крайней мере, до середины XXI в. Эта тенденция наиболее выражена на водосборе р. Кама, где увеличение зимнего стока может достигнуть 100 %. Уменьшение слоя стока в период весеннего половодья к середине XXI в. составит 10–20 %. Изменения как слоя стока, так и сумм осадков в летне-осенний период наиболее неопределенны: от увеличения на 1–2 % на водосборе р. Кама до уменьшения на 6–8 % на верхней Волге. Ожидаемые годовые изменения слоя стока (рис. 4), осредненные по площадям водосборов водохранилищ ГЭС ВКК, в основном положительны (табл. 2). Наибольшее увеличение к середине XXI в. ожидается в бассейне р. Кама (6–7 %). На остальной территории ВКК изменения не значительны (0–2 %).

Таблица 2. Изменение слоя стока на водосборах водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., (%)

Водосборы водохранилищ ГЭС ВКК	Гидрологические сезоны						Год	
	Зима (декабрь–март)		Весна (апрель–июнь)		Лето-осень (июль–ноябрь)			
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)						
Иваньковская	32	34	-18	-17	-8	-7	1	0
Угличская	36	39	-19	-18	-8	-7	1	0
Рыбинская	43	48	-21	-19	-8	-7	2	2
Нижегородская	51	58	-21	-21	-7	-6	2	2
Чебоксарская	43	48	-19	-18	-5	-5	1	0
Жигулевская	59	70	-18	-19	-4	-3	2	2
Саратовская	58	68	-18	-20	-4	-3	2	1
Волгоградская	55	64	-18	-19	-4	-3	1	0
Камская	85	110	-9	-13	2	2	8	7
Воткинская	87	111	-11	-15	1	1	7	6
Нижнекамская	84	105	-16	-20	-2	-2	4	3

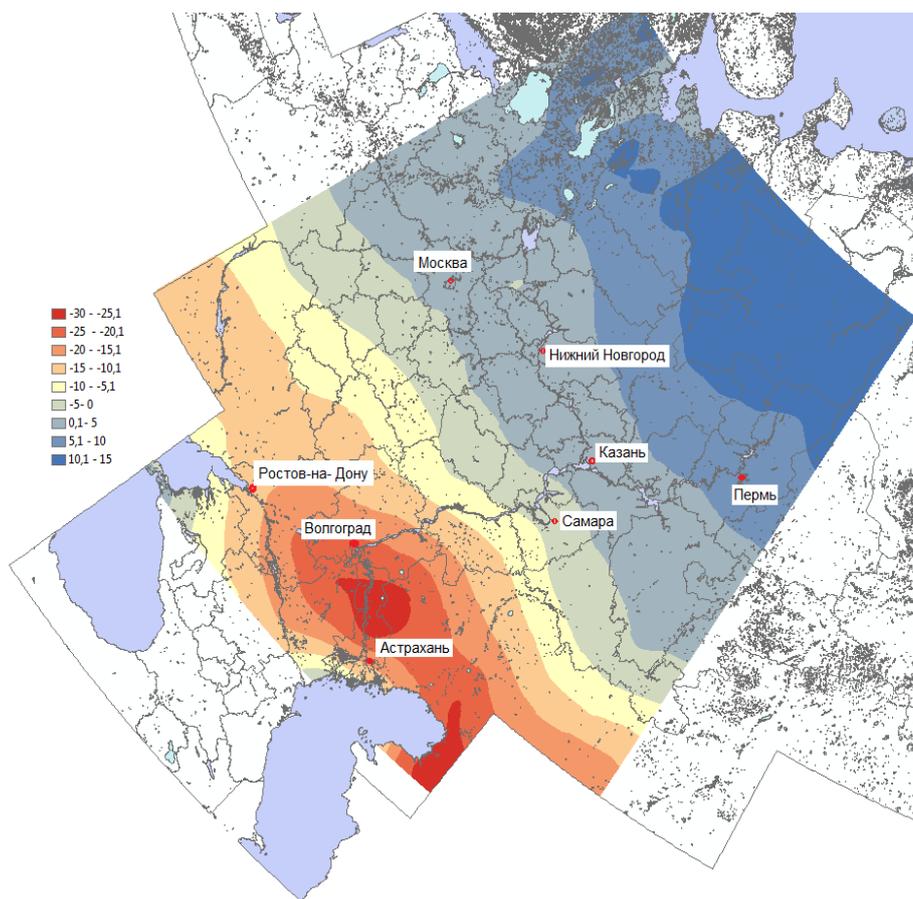


Рис. 4. Изменение годового слоя стока на европейской территории России к середине XXI в. по отношению к 1980–1999 гг. по сценарию сильного потепления (RCP8.5), %.

Значительный практический интерес для функционирования объектов гидроэнергетики представляет оценка изменений объема стока редкой повторяемости. Выполнены расчеты вероятного изменения этого показателя в период весеннего половодья 1 % и 0.01 % обеспеченности на водосборах ГЭС ВКК к середине XXI в. Здесь и далее при расчетах использовались статистические распределения Крицкого-Менкеля, Пирсона III типа, а в ряде случаев нормальное распределение.

Для водосборов всех ГЭС ВКК, за исключением Саратовской и Волгоградской, прогнозируется увеличение объема стока редкой повторяемости в период весеннего половодья. Этот вывод не противоречит данным табл. 2, которые демонстрируют уменьшение среднего объема стока в весенний период. Наблюдаемое сейчас и ожидаемое в будущем изменение климата приведет к увеличению межгодовой изменчивости метеорологических величин даже при наличии трендов уменьшения средних значений.

Саяно-Шушенская ГЭС. По данным ансамбля климатических моделей в бассейне верхнего течения р. Енисей ожидается увеличение температуры воздуха практически во все сезоны года в среднем 2.5–3.0°C. Увеличение сумм осадков в зимний и поздне-осенний сезоны прогнозируется на 17–20 %, весной на 9–12 %, в летне-осенний период значимых изменений не ожидается.

Расчетные данные, полученные по величине стока, говорят о возможном значительном (до 100 %) увеличении слоя стока в зимний период в бассейне верхнего течения р. Енисей к середине XXI в. (табл. 3). Весной эта характеристика практически не изменится, а летом ожидается уменьшение (≈ 8 %); суммарно за год вероятно возрастание на 5–8 % (рис. 5).

Ожидается и увеличение слоя стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в бассейне верхнего течения р. Енисей к середине XXI в. в период половодья на 20–30 %.

Таблица 3. Изменение слоя стока на водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС по гидрологическим сезонам к середине XXI в., (%)

Сценарий радиационного воздействия	Гидрологический сезон				Год
	Зимний (декабрь–март)	Весенний (апрель–июнь)	Летне-осенний (июль–сентябрь)	Поздне-осенний (октябрь–ноябрь)	
Слабое потепление (RCP4.5)	74	-1	-8	32	5
Сильное потепление (RCP8.5)	115	0	-8	47	8

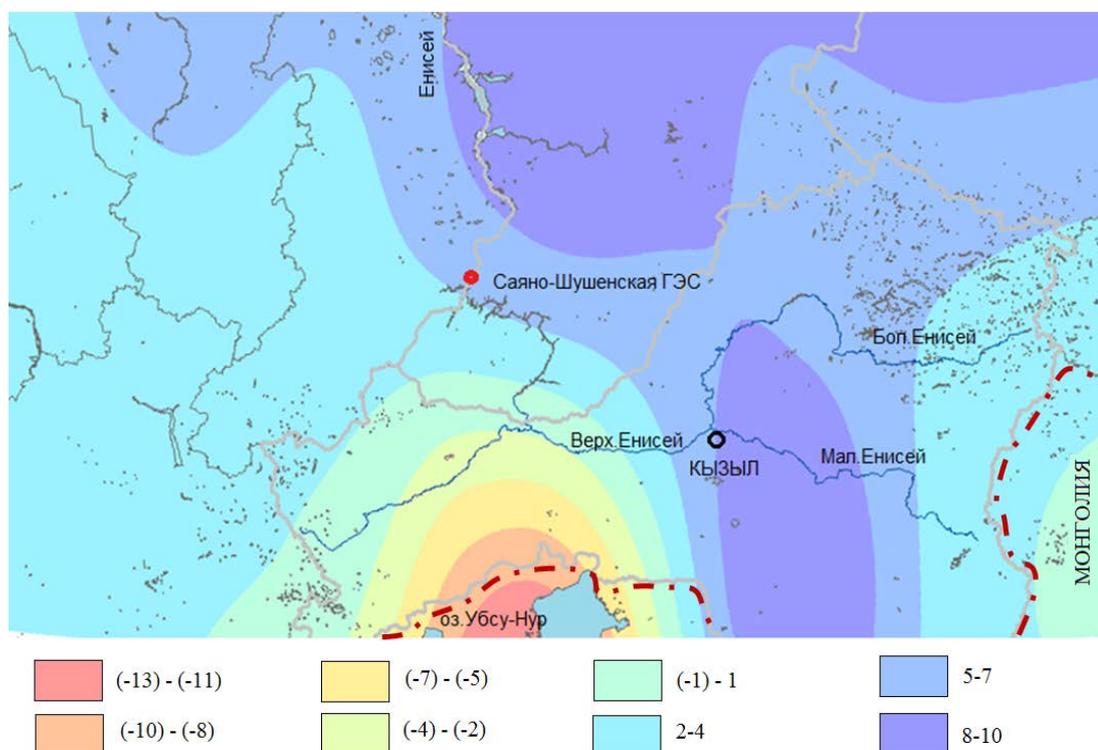


Рис. 5. Изменение годового слоя стока в верхнем течении Енисея к середине XXI в. по отношению к 1980–1999 гг. по сценарию сильного потепления (RCP8.5), %

Бурейская и Зейская ГЭС. Увеличение среднемесячных температур воздуха к середине XXI в. в бассейне Амура ожидается в зимний и осенний период около 3–4°C, в весенне-летний период 2–3°C.

Прогнозные оценки изменения количества осадков имеют бóльшую неопределенность, чем изменения температуры. Межмодельные стандартные отклонения изменения сумм осадков составляют 5–6 % в зимний и весенний периоды, 8–9 % летом и осенью. По прогнозным данным рост осадков к середине XXI в. зимой и осенью по сценарию сильного потепления может достигнуть 18 % на водосборе р. Буряя и 25 % – на р. Зейя. В весенний и летний период эти значения составят соответственно 9 % и 11 %. В теплый период года на фоне возрастания сезонного количества осадков увеличится доля конвективных осадков. Это означает, что вероятно увеличение повторяемости гроз и ливней.

Прогнозные оценки изменения слоя стока характеризуются значительной неопределенностью. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока - 10 %. Прогнозируемое по всем сценариям дальнейшее повышение зимних температур воздуха, вероятно, обеспечит увеличение зимнего притока воды в водохранилища Бурейской и Зейской ГЭС. Прогнозируется увеличение слоя стока в зимний и осенний периоды к середине XXI в. (табл. 4). На водосборе р. Буряя увеличение стока может достигнуть 40 %, а р. Зейя – более 50 %; в весенне-летний период – 3–5 % и 11–15 % соответственно. Среднегодовое увеличение слоя стока к середине XXI в., вероятно, составит на водосборе р. Буряя 9–10 % и р. Зейя – 9–13 %. Прогнозные расчёты изменения слоя стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в период весенне-летнего половодья свидетельствуют о возможном двукратном росте этого показателя к середине XXI в.

Таблица 4. Изменение слоя стока на водосборах водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС по гидрологическим сезонам к середине XXI в., (%)

Сценарий радиационного воздействия	Гидрологический сезон			Год
	Зимний (декабрь–март)	Весенне-летний (апрель–сентябрь)	Осенний (октябрь–ноябрь)	
Бурейская ГЭС				
Слабое потепление (RCP4.5)	37	5	36	10
Сильное потепление (RCP8.5)	37	3	42	9
Зейская ГЭС				
Слабое потепление (RCP4.5)	16	11	43	9
Сильное потепление (RCP8.5)	19	15	57	13

Для уточнения воздействия ожидаемых климатических изменений на функционирование ГЭС проведён расчёт стока в створах всех электростанций.

Прогнозные оценки основаны на данных суточного моделирования РКМ ГГО по сценарию сильно потепления (RCP8.5). Для расчёта речного стока использовали гидрологическую модель маршрутизации стока на речной сети CaMa-Flood, входной информацией для которой служит избыток влаги, рассчитанный в каждой ячейке сетки региональной модели за каждые сутки. По данным о расходе воды в речных руслах были получены величины относительного изменения объема стока – среднегодовое, по гидрологическим сезонам и 1 % обеспеченности для водосборов исследуемых гидроузлов на период 2050–2059 гг. по отношению к базовому периоду 1990-1999 гг.

Полученные таким образом расчёты (табл. 5) несколько отличаются от результатов моделирования по ансамблю МОЦАО в абсолютных значениях. Но общая направленность ожидаемых изменений гидрологического режима на водосборах рассматриваемых ГЭС остаётся неизменным.

Таблица 5. Среднее изменение (%) объёма стока за гидрологические сезоны на период 2050–2059 гг.; РКМ ГГО, сценарий RCP8.5

Гидрологический сезон	Волжско-Камский каскад ГЭС									
	Характеристика	Угличская	Рыбинская	Нижегородская	Чебоксарская	Жигулёвская	Саратовская	Волжская	Камская	Воткинская
декабрь–март	ΔI	73	54	46	50	33	31	27	31	27
	σ	46	28	23	26	14	13	11	18	11
апрель–июнь	ΔI	-8	0	3	1	3	4	5	7	5
	σ	15	8	10	10	11	11	11	12	11
июль–ноябрь	ΔI	19	14	12	10	-4	-5	-7	-2	-7
	σ	28	23	24	23	11	11	11	12	11
Саяно-Шушенская ГЭС										
декабрь–март	ΔI	73								
	σ	28								
апрель–июнь	ΔI	5								
	σ	24								
июль–сентябрь	ΔI	16								
	σ	17								
октябрь–ноябрь	ΔI	38								
	σ	27								
Зейская ГЭС										
декабрь–март	ΔI	15								
	σ	26								
апрель–сентябрь	ΔI	12								
	σ	17								
октябрь–ноябрь	ΔI	15								
	σ	27								

Примечание: ΔI – средние по ансамблю изменения объёма стока к 2050–2059 гг. по сравнению с 1990–1999 гг.; σ – среднеквадратическое отклонение.

Выполненный анализ наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI в. климатических изменений на водосборах водохранилищ крупных ГЭС России показал, что практически для всех них ожидается увеличение притока воды к водохранилищам к середине XXI в., что теоретически может способствовать увеличению выработки электроэнергии. Увеличение стока в холодный период года, обусловленное возрастанием доли жидких осадков и частоты оттепелей из-за повышения температуры воздуха, приводит к выравниванию годового хода слоя стока. Это также способствует оптимизации режима работы ГЭС. К негативным последствиям климатических изменений для гидроэнергетики можно отнести рост межгодовой изменчивости гидрологических характеристик: вероятно значительное увеличение слоя стока редкой обеспеченности особенно в дальневосточном регионе.

В разделе 3.2 даны прогнозные оценки эффективности работы ГЭС с учетом климатических изменений. Расчёты по прогнозу выработки выполнены на основе статистических зависимостей за 30 летний период (1982-2011 гг.) по выработке электроэнергии на ГЭС от объема стока. Они основаны на погодичных данных о выработке энергии, притоке воды к створу ГЭС и объёме воды, проходящей через сооружения гидроузла. В качестве параметра, влияющего на выработку электроэнергии на ГЭС, принимался сток в нижнем бьефе.

Для большинства ГЭС имеется тесная линейная корреляционная связь между выработкой электроэнергии на станции и стоком в её нижнем бьефе ($r_{\text{ср}} = 0.88$). Необходимо отметить, что представленные зависимости имеют смысл только в пределах существующих эксплуатационных режимов конкретных ГЭС.

На основе полученных статистических зависимостей, проведен расчёт относительного изменения выработки электроэнергии на рассматриваемых ГЭС к середине XXI в. (табл. 6). Из результатов видно, что для всех ГЭС, исследуемых в данной работе, прогнозируется тенденция к увеличению годовой выработки электроэнергии за счет возрастания объема стока. Наиболее заметно эта тенденция проявляется на ГЭС, расположенных в азиатской части России. Для ГЭС Волжско-Камского каскада прогнозируемое изменение выработки в среднем по ансамблю оказывается меньше стандартного отклонения, вследствие сильного влияния климатической изменчивости на разброс оценок в ансамбле. По-видимому, в более отдаленной перспективе (к концу XXI в.), когда эффект потепления в силу увеличения радиационного воздействия должен быть большим, чем в середине века, можно ожидать роста отношения сигнала к шуму для большинства регионов.

Таблица 6. Изменение (%) годовой выработки электроэнергии на ГЭС для периода 2050–2059 гг.; РКМ ГГО, сценарий RCP8.5

ГЭС	Угличская	Рыбинская	Нижегородская	Чебоксарская	Жигулевская	Саратовская	Волжская	Камская	Воткинская	Саяно-Шушенская	Зейская
Среднее изменение годовой выработки электроэнергии	8.2	13.8	9.2	5.0	2.5	1.9	2.3	3.4	3.3	17.6	5.9
Стандартное отклонение	10.2	13.6	9.8	5.5	7.2	5.3	6.2	6.4	8.3	12.1	5.8

Полученные данные необходимо учитывать при проектировании новых ГЭС и модернизации уже существующих гидротехнических сооружений. Кроме того, в будущем целесообразно использовать мультимодельные ансамбли, включающие различные региональные модельные системы и сценарии МГЭИК для всесторонней оценки неопределенностей, сопутствующих предсказанию значимых для энергетики изменений климата.

В **четвёртой главе** сформулированы предложения по адаптации атомной, тепловой и гидроэнергетики к наблюдаемым и ожидаемым в будущем климатическим изменениям.

Рассматриваются возможные адаптационные меры для снижения рисков при производстве электроэнергии на рассматриваемых в работе АЭС, ТЭС и ГЭС. Общей проблемой при разработке адаптационных стратегий является акцент на краткосрочные меры. Средне- и долгосрочное планирование часто затруднительно из-за ограниченности финансирования и высокой неопределенности среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

В **разделе 4.1** даны рекомендации по адаптации атомной и тепловой энергетики. Наблюдаемые и ожидаемые изменения специализированных климатических характеристик создают риски для устойчивого функционирования систем охлаждения энергоблоков ТЭС и АЭС. Для повышения надежности и эффективности этих систем необходим комплексный подход к адаптации, который включает технологические, поведенческие и институциональные меры.

Технологическая адаптация направлена на модернизацию и замену существующих систем электроснабжения, интеграцию энергоэффективных инфраструктур и технологий (табл. 7). Необходимо учитывать функциональную уязвимость систем энергоснабжения от погодно-климатических воздействий, являющуюся причиной экономической уязвимости. Следует учитывать эту зависимость, при внедрении новых технологий и проводить детальные экономические оценки затрат и получаемых выгод от инноваций.

Таблица 7. Основные меры по адаптации системы энергоснабжения и обеспечению ее надежности

Основное направление	Мероприятие по обеспечению надежности, устойчивости и адаптации объектов системы электроснабжения
Техническое перевооружение и реконструкция электрических сетей	Использование современных энергоэффективных электрических агрегатов и технологий
	Более широкое применение передвижных электростанций и подстанций
	Строительство подстанций закрытого исполнения и минимальных размеров
	Освоение подземного пространства для размещения электросетевого хозяйства
Повышение управляемости процессов передачи и распределения электроэнергии	Применение схем с минимальным временем восстановления электроснабжения потребителей при возникновении аварийных режимов
	Постепенный переход к активно-адаптивным распределительным сетям
	Установка на электростанциях автономных источников генерации для пуска электростанции при потере связи с энергосистемой и автономного электроснабжения пиковых водогрейных котлов в аварийных режимах
Совершенствование принципов построения топологии сетей для повышения их пропускной способности	Выполнение низковольтных линий изолированными проводами, более устойчивыми к природным катаклизмам
	Использование сверхпроводящих кабелей
	Применение высокотемпературных проводов воздушных линий
Повышение энергоэффективности при генерации тепловой и электрической энергии и при их потреблении	Разработка инвестиционных программ по внедрению централизованного хладоснабжения на базе тригенерации (процесс совместной выработки электричества, тепла и холода), применения термотрансформаторов и других видов установок
	Внедрение цифровых технологий в системах управления технологическими процессами и режимами
	Развитие возобновляемых источников энергии на основе комплексной оценки эффективности таких источников для повышения гибкости системы энергоснабжения
	Внедрение аккумуляторов тепла и холода во всех элементах системы энергоснабжения
Повышение эффективности управления производством и потреблением энергии	Специальная подготовка персонала для работы в условиях воздействия экстремальных климатических явлений, основанная на подходах экологического и энергетического менеджмента
	Повышение уровня производственной культуры и технологической дисциплины
	Разработка стратегии повышения потребительской ценности централизованной системы теплоснабжения на основе совершенствования организационно-экономических механизмов управления ею
	Создание стимулирующих механизмов для формирования финансовых резервов с целью покрытия убытков от климатических воздействий

Поведенческая адаптация охватывают большой спектр возможных действий по обновлению планов аварийного, эксплуатационного и технического обслуживания и подготовки кадров с целью минимизации риска в эксплуатации. Изменяя и улучшая методы управления, возможно, экономически эффективно снизить уязвимость агрегатов электростанций без каких-либо изменений в технологии. Поведенческая адаптация включает также большой набор мер по экономии электроэнергии и контролю ее потребления конечными пользователями, адаптация которых может положительно повлиять на уязвимость энергосистем в период тепловых волн, так как многие системы электроснабжения подвержены отключениям электроэнергии именно из-за повышенного спроса.

Институциональная адаптация направлена на механизмы принятия решений руководителями всех уровней, развитие межсекторального сотрудничества и тесное взаимодействие между производителями и потребителями климатической информации.

Целесообразны актуализация нормативных документов для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС, содержащих климатические характеристики, с целью учета климатической информации за последнее 30-летие; организация мониторинга повторяемости и интенсивности опасных для генерации погодных явлений, прежде всего, для АЭС; учет возможного снижения мощности энергоблоков АЭС и ТЭС в летний период при планировании развития энергетической отрасли в районах наибольших климатических рисков.

В разделе 4.2 описаны предложения по адаптации гидроэнергетики. Для адаптации гидроэнергетического сектора к наблюдаемым и ожидаемым изменениям климата рекомендуется осуществление мероприятий по перерасчету максимальных проектных расходов паводков редкой обеспеченности с использованием наблюдаемых данных последних десятилетий. Внесение изменений в СНиПы и СТО строительства гидротехнических сооружений, направленных на повышение их устойчивости к росту нагрузок при более частых режимах форсировки. Учёт внутригодового перераспределения стока при осуществлении водно-хозяйственной деятельности. Пересмотр сложившихся графиков работ по техническому обслуживанию узлов и агрегатов из-за сокращения сроков зимней межени и увеличением зимнего стока. В связи с прогнозируемым увеличением частоты и интенсивности экстремальных паводковых расходов для повышения надежности и безопасности ГЭС и защиты территории от наводнения необходима разработка рекомендаций по регулированию паводковых вод за счет строительства дополнительных водосборных сооружений, противопаводковых гидроузлов. Повышение эффективности функционирования гидроэнергетики в условиях климатических изменений целесообразно проводить с учетом полученных связей между стоком и выработкой.

При планировании водопользования следует учитывать вероятные изменения и перераспределения стока с учётом нужд всех заинтересованных водопользователей.

В **Заключении** представлены основные результаты и сформулированы выводы, полученные при работе над диссертацией.

1. Впервые протестирован и апробирован для анализа влияния изменения климата на безопасность и эффективность работы тепловой и атомной энергетики программный продукт ClimРАСТ в рамках реализации российского сегмента ГРОКО. Предложены соответствующие специализированные климатические параметры.

2. Совместный анализ наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI в. изменений климатических параметров, значимых для функционирования АЭС и ТЭС, доказал возрастание климатических рисков для этих секторов энергетики России.

3. Комплексная оценка статистических характеристик полученных трендов специализированных климатических параметров позволила выявить районы с наибольшими погодно-климатическими рисками для бесперебойной и эффективной работы АЭС и ТЭС.

4. Анализ изменений климатических и гидрологических параметров, значимых для функционирования ГЭС ООО «РусГидро» (Волжско-Камский каскад, Саяно-Шушенская, Зейская и Бурейская), по данным метеонаблюдений и результатам климатического моделирования позволил получить оценки возможного изменения выработки электроэнергии на этих ГЭС к середине XXI в. и определить соответствующие риски для гидроэнергетики, обусловленные климатическими изменениями.

5. На основании полученных в работе результатов сформулированы предложения по адаптации энергетического сектора России к изменяющимся климатическим условиям.

В Приложении в виде таблиц (Приложение 1) и графиков (Приложение 2) приведены результаты расчётов рассматриваемых в работе климатических индексов.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК России для защиты кандидатских диссертаций:

1. **Тюсов Г.А.** Оценка наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI века климатических изменений на водосборах крупных водохранилищ ГЭС России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2014. № 4. С. 60-71.
2. Акентьева Е.М., Сидоренко Г.И., **Тюсов Г.А.** К оценке влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на гидроэнергетических потенциал регионов РФ // Труды ГГО, 2014. № 570. С. 95-105.
3. Акентьева Е.М., **Тюсов Г.А.** Использование программного продукта ClimPACT для оценок воздействия климатических факторов на производство электроэнергии (на примере функционирования ТЭС и АЭС) // Труды ГГО, 2015. № 578. С. 86–100.
4. **Тюсов Г.А.**, Е.М. Акентьева, Т.В. Павлова, И.М. Школьник. Оценки возможного влияния будущих изменений климата России на функционирование объектов энергетики // Метеорология и гидрология, 2017. № 12. С. 47–57 (переводная версия: **Tyusov G.A.**, Akentyeva E.M., Pavlova T.V., Shkolnik I.M. Projected climate change impacts on the operation of power engineering facilities in Russia // Russian Meteorology and Hydrology, 2017. Vol. 42, Is. 12. Pp. 775–782. <https://doi.org/10.3103/S1068373917120056>).

Публикации в других изданиях:

1. **Тюсов Г.А.** Анализ влияния климатической изменчивости на функционирование АЭС и ТЭС (на примере Калининградской области) // Географы в годы войны и мира: Матер. междунар. конф. [Электронный ресурс]. М.: Издательство «Перо», 2015. С. 563–566.
2. **Тюсов Г.А.** Специализированные климатические характеристики для электроэнергетики (на примере АЭС и ТЭС Центрально-Чернозёмного района России) // Географические исследования Евразии: история и современность: Матер. междунар. конф. [Электронный ресурс]. М.: Издательство «Перо», 2016. С. 276–279.
3. Петерс А.А., Васильев М.П., **Тюсов Г.А.** Погодно-климатические риски для секторов экономики и социальной сферы Нижегородской области // В сб.: Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. – СПб., 2018. С. 433–439.
4. **Тюсов Г.А.**, Акентьева Е.М. Воздействие климатических изменений на электроэнергетику России // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сб. тезисов. СПб.: РГГМУ, 2019. С. 554–556.