

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Федеральное государственное бюджетное учреждение
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ИМ. А. И. ВОЕЙКОВА

На правах рукописи

Тюсов Григорий Анатольевич

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

Специальность: 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
к.г.н., в.н.с. Е.М. Акентьева

Санкт-Петербург – 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНОЙ, ТЕПЛОВОЙ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ.....	8
1.1. Особенности функционирования традиционной энергетики в условиях меняющегося климата.....	8
1.2. Специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС	9
1.2.1. Системы охлаждения агрегатов АЭС и ТЭС	9
1.2.2. Климатические параметры, входящие в нормативные документы для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС.....	12
1.3. Специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации ГЭС	16
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АЭС И ТЭС.....	19
2.1. Влияние изменений режимов температуры и увлажнения на функционирование АЭС и ТЭС.....	19
2.2. Апробация применения программы ClimРАСТ для оценки воздействия климатических изменений на работу АЭС и ТЭС.....	24
2.3. Выбор значимых для функционирования АЭС и ТЭС климатических параметров, рассчитываемых в программе ClimРАСТ.....	28
2.4. Анализ изменений выбранных климатических параметров в различных регионах России с использованием программы ClimРАСТ на основе данных метеонаблюдений и результатов климатического моделирования.....	29
2.5. Оценки изменений специализированных климатических индексов к середине XXI в., полученные по данным Региональной модели ГГО.....	46

2.6. Выявление районов с наибольшими погодно-климатическими рисками для производства электроэнергии на АЭС и ТЭС.....	49
2.6.1. Оценки воздействия климатических изменений на энергетический сектор на уровне субъекта РФ (на примере Ростовской области).....	50
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КРУПНЫХ ГЭС	54
3.1. Анализ изменений климатических и гидрологических параметров, значимых для работы ГЭС, на основе данных метеонаблюдений и результатов климатического моделирования.....	55
3.1.1. Наблюдаемые изменения климатического и гидрологического режима на водосборах ГЭС.....	55
3.1.2. Ожидаемые изменения климатического и гидрологического режима на водосборах ГЭС.....	59
3.2. Прогнозные оценки эффективности работы ГЭС с учетом климатических изменений	78
ГЛАВА 4. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО АДАПТАЦИИ АТОМНОЙ, ТЕПЛОВОЙ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ К НАБЛЮДАЕМЫМ И ОЖИДАЕМЫМ В БУДУЩЕМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ.....	83
4.1. Предложения по адаптации атомной и тепловой энергетики	83
4.2. Предложения по адаптации гидроэнергетики	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
ЛИТЕРАТУРА	96
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	107
Приложение 1. Значения специализированных климатических индексов CDD, HWD, 5TX5TN, рассчитанные за 1950–2017 гг.	107
Приложение 2. Изменения значений специализированных климатических индексов CDD, HWD, 5TX5TN в период 1950–2017 гг.	129

Введение

Изменение климата является одним из важнейших вызовов XXI в., который затрагивает все аспекты устойчивого развития, как Российской Федерации, так и всего мирового сообщества. Большое значение для адаптации к изменению и изменчивости климата имеет развитие климатического обслуживания отраслей экономики и социальной сферы [Оценка..., 2011]. В 2009 г. на Третьей Всемирной климатической конференции была принята Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания (ГРОКО), цель которой заключается в «улучшении производства, доступности, предоставления и применения климатических прогнозов и обслуживания, основанных на достижениях науки». ГРОКО направлена на сокращение разрыва между климатической информацией, которую предлагают ученые и поставщики информации, и практическими задачами конечных потребителей [Знания..., 2011]. В последующий период был разработан План осуществления ГРОКО с подробным описанием важнейших элементов, необходимых для ее функционирования в четырех первоначальных приоритетных областях (сельское хозяйство и продовольственная безопасность, уменьшение опасности бедствий, здравоохранение и управление водными ресурсами). На 16 сессии Комиссии по климатологии ВМО в 2014 г. было принято решение расширить сферу применения ГРОКО и включить в число приоритетных областей энергетический сектор.

Принятие такого решения вызвано растущей обеспокоенностью по поводу надежности функционирования разных типов электростанций в условиях меняющегося климата. Так, например, Агентство по ядерной энергии ОЭСР (NEA) объявило о начале двухлетнего исследовательского проекта по оценке уязвимости АЭС и стоимости их адаптации к климатическим изменениям [Trossoli, 2014]. Причиной этого является рост 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 соответствующей температуры для охлаждения энергоблоков. В соответствии с результатами

климатического моделирования [Оценочный..., 2008; IPCC, 2014; Второй..., 2014] подобные события в будущем, вероятно, будут более частыми. Учитывая ожидаемый срок службы АЭС (60 лет для новых проектов), становится ясным, что нестабильность климата должна быть отражена в проектной документации. Модернизация с целью повышения устойчивости к природным воздействиям, очевидно, потребуется и для уже существующих энергоблоков [Энергетическая..., 2015].

Энергетика является одним из наиболее климатозависимых секторов экономики. 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 исследование влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на безопасное и эффективное функционирование тепловой, атомной и гидроэнергетики на территории России становятся особенно актуальными [Федоров и др., 2010; Энергетика..., 2010].

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 необходимо решить следующие основные **задачи**:

1. анализ нормативных документов по проектированию и эксплуатации АЭС, ТЭС и крупных ГЭС, содержащих климатические параметры;
2. выбор специализированных климатических параметров, 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 характеристик, 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. Научная значимость работы заключается в том, что представленная методика на основе использования специализированных индексов ClimPACT позволяет 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 Региональной модели 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, 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.

Глава 1. Специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации атомной, тепловой и гидроэнергетики

1.1 Особенности функционирования традиционной энергетики в условиях меняющегося климата

Влияние климата и его изменений на развитие энергетической отрасли выражается в следующем:

- климатические условия во многом определяют особенности функционирования и технико-экономические показатели всех типов электростанций, поэтому изменение климата вызовет необходимость корректировки проектирования и эксплуатации электростанций;
- климатические условия определяют потребность в энергии, следовательно, их изменение может существенно изменить тепло- и энергопотребление во многих регионах России;
- специфика энергетики заключается в том, что продукцию этой отрасли практически невозможно накапливать и сохранять, поэтому потребности в энергии должны быть спрогнозированы и учтены заранее;
- климатические условия в значительной мере определяют экологические последствия деятельности объектов энергетики.

Суммарная установленная мощность ТЭС России составляет 149.6 ГВт, атомных – 23.2 ГВт, объем потребляемой воды превышает 240 км³ в год. Это 38 % стока Енисея или годовой сток Волги. Ежегодные потери воды с испарением достигают 12.5 км³. Стоимость воды растет в среднем на 18 % в год [Гашо, 2015]. Поэтому в настоящее время стоимость воды существенно превосходит затраты на ее подготовку и перекачивание.

От надёжности и готовности ТЭС и АЭС работать эффективно с установленной мощностью зависит надёжность энергообеспечения в условиях меняющегося климата и других непредвиденных обстоятельствах. Малоснежные зимы становятся проблемой для функционирования ГЭС: снижают объём запаса воды в водохранилищах и выработку электрической энергии. Очевидно, что

в условиях климатических изменений необходимо исследовать воздействия этих изменений на все технологические процессы, связанные с производством энергии на АЭС, ТЭС и ГЭС. Результаты этих исследований необходимо учитывать во всей технологической схеме производства электроэнергии и при техническом обосновании новых процессов.

В данной работе основное внимание уделяется анализу особенностей функционирования традиционных источников энергии, т.е. тепловой и атомной энергетике, а также крупной гидроэнергетике в условиях изменения режима температуры и увлажнения в районах расположения электростанций.

1.2. Специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС

1.2.1. Системы охлаждения агрегатов АЭС и ТЭС

Процессы производства электроэнергии на атомных и тепловых электростанциях требуют постоянного отвода отработавшего тепла. Устройства, предназначенные для отвода тепла, называются конденсаторами. Конденсационная установка играет очень важную роль в экономичности преобразования энергии пара в электроэнергию. От режима работы конденсатора зависит, с какой эффективностью единица перегретого пара преобразуется в электроэнергию, а также какое количество электроэнергии получится на выходе. Система охлаждения является одним из самых крупных объектов на электростанции. Поэтому при строительстве очень важно выбрать оптимальный вариант системы, выбирая между стоимостью эксплуатации, капитальными вложениями и эффективностью работы. Существуют следующие виды систем охлаждения конденсатора:

1. Системы водяного охлаждения конденсатора:
 - обратная с прудом-охладителем,
 - прямоточная.
2. Системы воздушного охлаждения конденсатора:

- непосредственного воздушного охлаждения,
- косвенного воздушного охлаждения с промежуточным теплоносителем,
- с брызгальным бассейном,
- с градирнями мокрого типа (с принудительной и естественной вентиляцией),
- с градирнями сухого типа (с принудительной и естественной вентиляцией),
- с градирнями мокро-сухого типа.

Основной принцип работы систем водяного охлаждения заключается в том, что охлаждение и конденсация отработавшего пара в них осуществляется в поверхностных конденсаторах путем нагрева циркуляционной воды. Разделение на оборотные и прямоточные системы зависит от типа источника водоснабжения охлаждающей воды. В оборотных системах источником воды является водоём-охладитель, в прямоточных вода берётся из русла реки.

При прямоточной системе вода для технических нужд после использования сбрасывается в тот же источник ниже по течению, что приводит к повышению температуры водотока. Система оборотного охлаждения реализуется путем сооружения плотин на малых и средних реках или создания прудов. При этом требуются большие площади поверхности искусственных водоемов для лучшего охлаждения оборотной воды и соответственно площади затопления получаются значительными.

Выбор системы охлаждения и источников водоснабжения электростанции следует проводить на основе комплексного анализа гидрологических, геологических и климатических данных с учетом требований охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов, надежности и экономичности работы электростанции, стоимости и сроков строительства. Предпочтение следует отдавать оборотным системам с наливными и отсеченными водоёмами-охладителями. Если площадь проектируемого водоёма-охладителя недостаточна для проектной мощности новой или расширяемой электростанции, следует рассматривать комбинированные системы, сочетающие водоём, брызгальные установки над акваторией и другие гидроохладители [СП-ТЭС, 2007]. В этой связи наибольшее распространение

(до 70 %) получили системы оборотного охлаждения с градирнями башенного типа. Градирни, являясь компактными и рациональными гидроохладителями, позволяют размещать электрические станции на значительном расстоянии от крупных источников воды, на территории городов, вблизи от потребителей электроэнергии. При отводе избыточного тепла через градирню вода используется многократно и требуются лишь небольшие ее добавления для восполнения потерь, сопутствующих охлаждающим устройствам. В градирнях или брызгальных бассейнах оборотная вода снижает температуру за счет испарения части подогретой в конденсаторе воды и конвективного теплообмена при контакте с воздухом, затем вода вновь подается в теплообменники-конденсаторы. В градирнях часть оборотной (охлаждающей) воды теряется за счет капельного уноса (0.05–3.5 %) и испарения (1.0–1.5 %). При этом повышается содержание соли в воде в оборотной системе. Регулирование солесодержания осуществляется методом водообмена с помощью продувки системы. Отмеченные потери компенсируются добавлением в систему технической воды.

Отдельно строительные нормы регламентируют охлаждение оборудования, требующего более низких температур охлаждающей воды, чем в оборотной системе технического водоснабжения (газоохладители генератора, парозежкторные и компрессионные холодильные машины и др.) и рекомендуют использовать подпиточную воду до поступления ее в циркуляционную систему.

Для электростанций с пиковыми режимами нагрузок и теплофикационных, а также размещаемых в районах с высокими температурами и влажностью воздуха следует рассматривать целесообразность применения вентиляторных градирен. Количество градирен должно быть, как правило, не менее двух.

От совершенства системы охлаждения, при прочих равных условиях, зависит величина удельных расходов топлива и выбросов вредных газов CO_2 , NO_x , SO_2 в окружающую среду. Чем ниже температура охлаждающей воды, тем меньше расход топлива и выбросы в атмосферу.

Указанные схемы систем охлаждения энергоблоков электростанций делают функционирование АЭС и ТЭС в значительной степени зависимым как от температуры и влажности наружного воздуха, так и от наличия и температуры охлаждающей воды. Поэтому в нормативных документах по строительству объектов атомной и тепловой энергетики большое внимание уделяется климатическим характеристикам, отражающим температурный режим и режим увлажнения в районах расположения электростанций.

1.2.2. Климатические параметры, входящие в нормативные документы для проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС

До недавнего времени оценке влияния климатических изменений на функционирование АЭС и ТЭС не уделялось большого внимания. И международные эксперты, и российские специалисты, наиболее значимыми считали последствия изменения климата для альтернативных источников энергии (ветро- и гелиоэнергетики, малой гидроэнергетики), что без сомнения справедливо. Тем не менее, снабжение ТЭС и АЭС топливом и водой, рассеивание выбросов, эффективность охлаждения энергоблоков в значительной степени определяется именно климатическими факторами. Например, увеличение сумм осадков может привести к дополнительному намоканию угля на открытых топливных складах, что на 1–3 % уменьшает тепловую экономичность энергоустановок. В масштабах страны это вызывает дополнительный расход топлива 0.5–1.0 млн. т.у.т. в год. На эффективность работы газотурбинных установок оказывают заметное влияние колебания температуры воздуха. Так, рост температуры воздуха на 5°C уменьшает выработку энергии на 1–4 % [Aivalioti, 2015]. Особую тревогу вызывают изменения повторяемости и интенсивности опасных погодных явлений (смерчей, ливней, экстремальных температур и скоростей ветра и т.д.), что может нанести ущерб агрегатам электростанций и подвергнуть опасности окружающие населенные пункты [Ebinger, 2011].

В России более половины энергии производится на тепловых электростанциях (ТЭС). Лидирующее положение теплоэнергетики является исторически сложившейся и экономически оправданной закономерностью развития отечественной энергетики. В любой электростанции предусмотрена система охлаждения отработанного теплоносителя, чтобы довести его температуру до необходимого для повторного цикла значения. Если поблизости от электростанции есть населенный пункт, то это тепло используется для нагрева воды для отопления домов или горячего водоснабжения. Если же потребителя излишнего тепла нет, то оно просто сбрасывается в атмосферу через различные системы охлаждения.

Климатическая информация в тепловой энергетике используется, прежде всего, при проектировании и строительстве энергетических объектов. Строительство тепловых электростанций опирается на нормативные климатические сведения, учёт которых обеспечивает надёжность и долговечность функционирования узлов и агрегатов станции [Правила..., 2003; СП-ТЭС-2007; СП 90.13330.2012; Инженерные..., 2016; СП 296.1325800.2017]. Обширный набор климатических параметров используется как при выборе района размещения ТЭС, так и для выбора конкретной площадки строительства ТЭС и обоснования проекта. При задании проектной мощности ТЭС на базе паросиловых установок обязательным условием выступает учёт расчётных температур воздуха: температура наиболее холодных и наиболее жарких суток и пятидневки обеспеченностью 0,98, самая жаркая декада и т.д. [Нормы..., 1981]. Ограничения по мощности и длительности выработки электростанции определяются по максимальным дневным температурам охлаждающей воды жаркого лета 10 % обеспеченности. [СП ТЭС-2007]. Важной расчетной климатической характеристикой является также непрерывная продолжительность с обеспеченностью 90 %, 95 % и 99 % различных сочетаний температуры с относительной влажностью ($R > 50 \%$, $t > 20^\circ\text{C}$; $R > 80 \%$, $t > 20^\circ\text{C}$; $R > 80 \%$, $t > 30^\circ\text{C}$) [Ницис, 1979].

При проектировании градиен согласно СНиП 2.04.02-84 [Пособие..., 1989] учитываются значения среднесуточных температур атмосферного воздуха по сухому и влажному термометрам (или относительной влажности воздуха) по многолетним наблюдениям при обеспеченности 1–10 % за летний период года. Выбор обеспеченности зависит от категории водопотребителя.

Атомная энергетика вырабатывает около 17 % общего объема произведенной электроэнергии в России. На сегодняшний день в нашей стране эксплуатируется 10 атомных электростанций (АЭС) с 33 энергоблоками установленной мощностью 23.2 ГВт. В стадии строительства ещё 5 АЭС.

Атомные станции относятся к опасным объектам и поэтому при их строительстве следование нормативным документам, в отличие от ряда других объектов строительства, является обязательным. Прежде всего, необходимым элементом обеспечения надежности и безопасности объектов использования ядерной энергии является учет экстремальных метеорологических воздействий в соответствии с принятой в нормах МАГАТЭ классификацией “экстремальных метеорологических переменных” и “экстремальных метеорологических явлений” [Руководство..., 2008].

Помимо основного нормативного документа “Руководство МАГАТЭ по безопасности N 50-SG-53» и ряда глав СНиП и СП (СНиП II-02-96, 2.01.07-85, 23-01-99*, СП-11-102-97, СП –11-103-97, СП 33-101-2003) и ГОСТ 16350-85 «Климат России. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей» 1986 г., используются специальные для ядерной энергетики нормативные документы и рекомендации. Это:

- ПИНАЭ 5. 6 Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа, 1986 г.; НП-064-05;
- Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекте использования атомной энергии, 2005 г.;
- РБ-022-01. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. Госатомнадзор России, 2001 г.;

- Методические рекомендации по определению расчетных максимальных скоростей ветра для проектирования атомных электростанций;
- ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок [ПУЭ 7..., 2015].

Несмотря на то, что гидрометеорологический режим площадок АЭС исследуется в процессе инженерных изысканий в соответствии с требованиями российских нормативных документов и рекомендациями МАГАТЭ [Meteorological..., 2011; Инженерны..., 2012], необходимо продолжение режимных наблюдений в период строительства и эксплуатации АЭС, что является особенно актуальным в условиях климатических изменений. На примере организации режимных наблюдений в районе строящихся Нижегородской и Белорусской АЭС в работе [Брюхань и др., 2014, 2017] анализируются особенности мониторинга гидрометеорологических условий для обоснования проектирования инженерной защиты АЭС от воздействия опасных и особо опасных гидрометеорологических процессов.

Процессы охлаждения энергоагрегатов на АЭС во многом схожи с процессами на ТЭС, описанными выше. Однако риски, связанные с возникновением аварийных ситуаций и их возможными последствиями повышают требования к необходимой климатической информации. При проектировании и эксплуатации АЭС показатели обеспеченности берутся с большим запасом. Так при выборе площадки размещения станции к неблагоприятным факторам по метеорологическим условиям согласно требованиям действующих нормативных документов относятся: ураганы, тайфуны, смерчи, экстремальные температуры воздуха, гололед, удары молнии, лавины снежные и экстремальные ветровые и снеговые нагрузки обеспеченностью 0.01 % (повторяемостью 1 раз в 10000 лет) [Инженерные..., 2012].

Основные расчетные характеристики гидрологического режима для исследуемых водных объектов обеспечивающих работу атомных станций включают максимальные наблюдаемые и расчетные расходы и уровни дождевых паводков и весеннего половодья (до обеспеченности 0.01 %); минимальные

наблюдаемые и расчетные зимние и летне-осенние среднемесячные и среднесуточные расходы и уровни (различной обеспеченности, включая 97 %); средний годовой сток различной обеспеченности, включая 97 %; внутригодовое распределение стока по сезонам и месяцам за характерные годы 50, 95 и 97 % обеспеченности; расчетные максимальные расходы стока обеспеченностью до 0.01 %.

Важность качественной климатической информации для безопасного функционирования АЭС подтверждается актуализированным в 2014 г. документом, подготовленным ВМО [Meteorological..., 1985]. В этом документе подробно рассматриваются статистические распределения, используемые для расчета климатических характеристик различной повторяемости. Подчеркивается, что для надежного расчета вероятностей экстремальных значений метеорологических величин необходимо использовать ряды наблюдений не менее 100 лет и при наличии более ранних данных об опасных явлениях, содержащихся в исторических источниках, также принимать их во внимание. В документе обращается внимание на полезность использования различных программных продуктов, подготовленных ВМО, в частности программы ClimPACT, для определения тенденций изменения климатических параметров, значимых для работы АЭС и ТЭС, и выявления районов с наибольшими рисками для функционирования этих электростанций.

1.3. Специализированная климатическая информация для проектирования и эксплуатации ГЭС

При производстве гидроэлектроэнергии влияние климата всегда ощущалось очень остро. Обязательность учета климатических факторов на этапе проектирования ГЭС обеспечивается основными принципами природоохранного и градостроительного законодательства, а также ст. 19 Федерального закона «О безопасности ГТС». От природно-климатических условий региона будет зависеть конструкция водоподпорных сооружений, состав сооружений гидроузла,

режимы работы ГЭС, использование водных ресурсов другими водопотребителями [Рекомендации..., 1990; СТО 17330282.27.140.003-2008; СТО РусГидро 01.01.78-2012; Нормы..., 2013; СП 80.13330.2016]. Также процесс создания ГЭС регулируется строительными нормами и правилами, по которым обосновываются основные параметры гидроузлов и режимы их безопасной эксплуатации, а именно [СП 58.13330.2012] «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования» и дополняющий его свод правил СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». В рамках данного исследования отдельно следует отметить, что как на этапе проектирования, так при дальнейшей эксплуатации, как отдельных ГЭС, так и каскадов, важна информация о температуре и влажности воздуха, ветровом режиме, режиме осадков, от которых зависит сток и, следовательно, объем притока воды в водохранилище, уровни в верхнем и нижнем бьефе [Сидоренко, Алимурзоев, 2014]. При проектировании водосливных сооружений ГЭС особенно важной является информация об экстремальных значениях метеорологических величин, в частности, данные о суммах осадков редкой обеспеченности (1.0 %, 0.1 %).

При экономическом обосновании строительства ГЭС учитываются изменения в месячных суммах осадков, вызывающие изменения выработки электроэнергии [Масликов, Сидоренко, 2015].

Нормы притока в период половодья в значительной степени зависят и от интенсивности снеготаяния. Если объем притока воды окажется выше нормы, то могут потребоваться холостые сбросы воды; если же он будет ниже нормы, то к концу половодья водохранилище может оказаться незаполненным до нормального подпорного горизонта. Недовыработку ГЭС в таких случаях приходится компенсировать энергией ТЭС. Проекты ГЭС включают данные о среднем месячном количестве осадков и о максимальном суточном количестве осадков [Рекомендации..., 1997]. Учитываются данные о повторяемости особо опасных по интенсивности и продолжительности осадков [Хайруллин, 1997], которые могут разрушить гидротехнические сооружения.

При изменении климатических условий в конкретном районе производство электроэнергии на ГЭС и условия их эксплуатации могут измениться в связи со следующими факторами [Шикломанов и др., 2008; Георгиевский и др., 2012].

- изменения сумм осадков и испарения приведут к изменению объема стока и его годового хода (например, сдвиг весеннего половодья на более ранний период);

- изменения интенсивности и частоты экстремальных погодных явлений (наводнений и засух) могут увеличить стоимость гидроэнергетических проектов и условия эксплуатации ГЭС;

- изменения в режиме перемещения взвешенных наносов могут увеличить изнашиваемость турбин и уменьшить выработку электроэнергии;

- изменение ледового режима повлияет на условия эксплуатации ГЭС.

Однако наибольшее значение для гидроэнергетики имеет климатообусловленное изменение стока рек. Изменение выработки гидроэлектроэнергии на конкретных ГЭС в отдельные годы при неизменности технических условий функционирования их оборудования и стабильности экономической ситуации в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу. При снижении притока производство гидроэлектроэнергии сократится, а при его увеличении возрастет [Линз, 1991; Резниковский, Рубинштейн, 1995; Шикломанов, IPCC, 2007; Акентьева и др., 2010; Климатические..., 2010].

Негативные воздействия изменения климата варьируются в широких пределах в зависимости от региона и конкретного водосборного бассейна. Первая оценка трансграничных рек, озер и подземных вод в европейском регионе показала, что во многих бассейнах последствия изменения климата наблюдаются уже сейчас [Руководство..., 2009].

Глава 2. Анализ воздействия климатических изменений на безопасность и эффективность работы АЭС и ТЭС

2.1. Влияние изменений режимов температуры и увлажнения на функционирование АЭС и ТЭС

Как отмечалось выше, влияние климата на производство энергии, вырабатываемой на ископаемом топливе, в основном связано с эффективностью цикла генерации и требованиями к системам охлаждения энергоблоков. Воздействие вытекает из потребностей в нагревании и охлаждении агрегатов электростанций как при использовании цикла Ренкина (термодинамический цикл преобразования тепла в работу с помощью двухфазного рабочего тела (воды, ртути, фреона и т.д.), включающий испарение и конденсацию)), так и цикла Брейтона (термодинамический цикл, описывающий рабочие процессы газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела).

Одним из ключевых показателей эксплуатации генерирующих мощностей является эффективность использования установленной мощности электростанций, которая характеризуется коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ). Среднее значение КИУМ электростанций России во все годы эксплуатации не превышает 50 % [Калатузов, 2012].

Значение КИУМ зависит от многих факторов, основными из которых являются: тип установленного оборудования; количество и структура потребителя; величина тепловой нагрузки (для ТЭЦ); уровень воды в водохранилищах (для ГЭС); конкурентность цен на электрическую и тепловую энергию; качество эксплуатации, ремонтов, реконструкций и ограничения мощности по техническому состоянию и функциональному соответствию оборудования. Наряду с указанными факторами большое влияние на величину КИУМ оказывают метеорологические условия. Аномальная жара способствует снижению мощности энергоблоков или их полной остановки, как это было в 2011 г. в отдельных районах США и Франции.

Эффективность и надежность термодинамических циклов изменяется в зависимости от средних условий окружающей среды, таких как температура воздуха и воды, давление, влажность, а также в зависимости от оптимальности выбора системы охлаждения. Рост температуры повышает удельный объем потребления воздуха и энергии в компрессоре и уменьшает генерацию вырабатываемой энергии. Это вызвано тем, что более высокая температура воздуха обуславливает более низкое атмосферное давление и снижает эффективность сжигания топлива из-за недостаточной концентрации кислорода. Имеющиеся данные по связи температуры воздуха с мощностью, свидетельствуют, что при достижении критической температуры мощность выработки начинает резко снижаться. Зависимость располагаемой мощности ТЭС от температуры наружного воздуха рассчитана В.А. Калатузовым [2014] для градирен Липецкой, Ереванской и Артемовской ТЭС (рисунок 1). Несмотря на то, что эти станции расположены в разных климатических условиях зависимость, их мощность имеет одинаковую взаимосвязь с температурой воздуха.

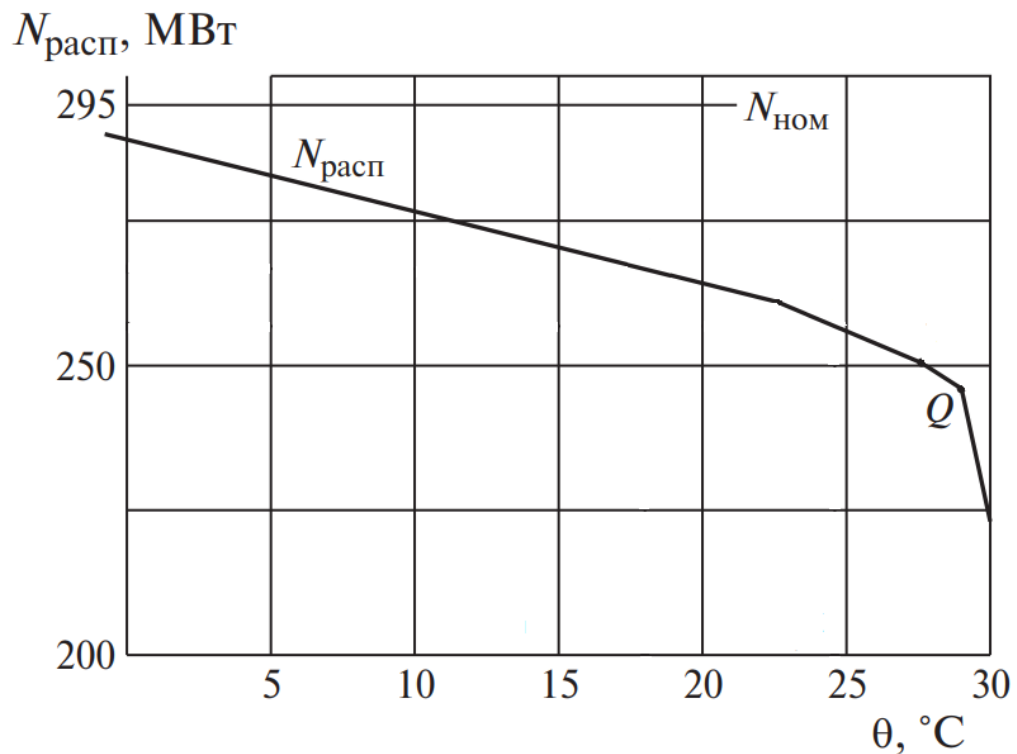


Рисунок 1. Зависимость располагаемой мощности ТЭС ($N_{расп}$, МВт) от температуры воздуха [Калатузов, 2014].

Таким образом, температура окружающей среды влияет на эффективность турбин, котлов и генераторных установок. [Linnerud et al., 2011] указывает, что во время тепловой волны мощность АЭС может быть снижена более чем на 2 % при повышении температуры окружающего воздуха на 1°C из-за физических ограничений для систем охлаждения в сочетании с экологическими нормами.

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. Например, в Соединенных Штатах каждый киловатт/час электроэнергии, вырабатываемой в процессе парового цикла, требует около 94.6 литров воды [Effects..., 2008; Feeley et al., 2008]. При этом доступные водные ресурсы на территории США могут снизиться к 2030 г. на 30 % по сравнению с 2005 г., а потребление воды в системах охлаждения агрегатов электростанций возрастет почти на 50 %. Это связано с увеличением потерь воды, вызванным испарением, и, следовательно, уменьшением объема воды, возвращаемой к водным объектам.

Более высокие температуры воды создают ограничения для систем охлаждения на АЭС и ТЭС и могут стать причиной возникновения рисков для их нормальной работы. [Rademaekers et al., 2010] указывает на то, что при повышении температуры воды на 5°C эффективность работы АЭС в среднем падает на 1 %. [Van Vliet et al., 2012] отмечает, что АЭС и ТЭС, которые имеют прямоточные системы охлаждения, более уязвимы, чем те, которые используют замкнутые системы охлаждения посредством градирен. Прямоточные системы выводят отработанную воду в водоемы и возвращают ее обратно обычно при более высоких температурах. Правила по сбросу воды требуют, чтобы электростанции снижали температуру использованной воды и, следовательно, мощность. Иначе они будут подвергнуты штрафам и другим санкциям. Тем не менее, при экстремальных тепловых волнах сброс теплой воды может быть разрешен для поддержания электроснабжения, несмотря на очевидно вредные воздействия на окружающую среду.

С изменением климата генерация на основе угля будет все в большей степени связана с необходимостью улавливания и хранения двуокиси углерода, что увеличит спрос на воду для его очистки и сжатия. Это может увеличить количество воды, потребляемой на 1 кВт электричества, почти на 80 % [Aivatoli, 2015]. В результате для электростанции мощностью 550 МВт потребуется дополнительно 125 МВт мощности для улавливания и хранения углекислого газа. Кроме того, повышение температуры воздуха может также повысить температуру воды и отрицательно повлиять на эффективность охлаждения установки, что, в свою очередь, также ведет к увеличению спроса на водные ресурсы.

Изменения в доступности воды могут иметь последствия для строительства новых и эксплуатации уже существующих энергоустановок, которые будут все в большей степени конкурировать с другими водопользователями (сельское хозяйство, ЖКХ, предприятия обрабатывающей промышленности и т.д.). Поэтому местоположение новых электростанций должно быть тщательно проанализировано при принятии решений об их строительстве. [Effects of Climate Change..., 2008] иллюстрирует эту проблему для проектов электростанций в Аризоне и Нью-Йорке, где планы по сооружению новых ТЭС были отклонены из-за возможной нехватки воды к середине XXI в. в связи с климатическими изменениями.

Примером воздействия изменений температурного режима на работу АЭС явилась ситуация с производством электроэнергии, сложившаяся летом 2003 г. в Европе, когда во Франции наблюдался один из самых жарких периодов в истории метеонаблюдений [Extreme..., 2011]. Температура воздуха отмечалась на 20–30 % выше средних значений. Максимальная температура составила 40°C и сохранялась в течение двух недель в течение августа. Низкое количество осадков в июле и высокие температуры вызвали дефицит воды и резко ухудшили условия работы ТЭС и АЭС. Во Франции работают 19 АЭС, которые обеспечивают производство 80 % электроэнергии. Их функционирование зависит от температуры воды в природных водоемах. 14 из 19 станций расположены рядом с внутренними водными объектами; остальные пять находятся у моря. Во

время тепловой волны температуры воды в реках превысила допустимые пределы, и процесс охлаждения реакторов замедлился.

В результате Франция должна была снизить свою генерирующую мощность на 4000 МВт, что эквивалентно мощности четырех энергоблоков или 6 % всех АЭС Франции. Семнадцать реакторов были остановлены или сократили свое производство из-за ограничений водозабора и сброса перегретой воды. В общей сложности в течение всего лета сокращение ядерной электроэнергии составило 5.3 ТВт*ч. Органы контроля ядерной безопасности разрешили сброс воды с температурой до 30°C, что значительно превысило стандартный предел 24°C. В итоге электроснабжение в стране не испытывало значительных перебоев, даже несмотря на увеличение спроса. Однако Франция, ключевой производитель электроэнергии в Европе, должна была сократить вдвое объем экспорта энергии в Швейцарию, Великобританию, Италию, Бельгию и Испанию в часы пиковых нагрузок.

Аномально жарким летом 2010 г. на европейской территории России также сложилась критическая ситуация в области производства электроэнергии на АЭС и ТЭС. В условиях аномальной жары, когда высокие температуры наружного воздуха держались не только в дневные, но и в ночные часы, росла температура циркуляционной воды на входе в конденсаторы турбин – до 35–38°C, а по некоторым ТЭЦ – до 40°C. В результате снижалась максимальная мощность генерирующего оборудования. Кроме того, повышение температуры охлаждающей воды привело к тяжелым условиям работы систем газо- и маслоохлаждения турбин.

Из-за жары и засухи в этот период гидростанции Волжско-Камского каскада, вырабатывающие значительную долю электричества в европейской части России, работали с минимальной загрузкой, что еще больше увеличило нагрузку на атомные и тепловые электростанции. В результате на ряде АЭС произошли аварийные остановки энергоблоков. Температурные условия в районах расположения АЭС в этот период и их сравнение со средними показателями второй половины XX в. приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики температуры воздуха в районах расположения АЭС в
периоды аварийных остановок энергоблоков

АЭС	Дата аварийной остановки в 2010 г.	Ближайшая метео- станция	Т _{ср} пятидневки перед аварией			Т _{ср} для этой пятидневки 1961–1990 гг.			Температура воздуха, °С, обеспечен- ностью 0.92	Температура воздуха, °С, обеспечен- ностью 0.98
			Т _{max}	Т _{min}	Т _{ср}	Т _{max}	Т _{min}	Т _{ср}		
Калининская	05.08	Тверь	30.6	17.0	23.8	22.7	11.5	17.1	21.0	25.0
ЛАЭС	07.08	Санкт-	28.8	19.1	23.9	22.5	14.7	18.6	22.0	25.0
	16.08	Петербург	28.3	19.0	23.7	19.8	12.7	16.3	22.0	25.0
Ново- воронежская	04.08	Воронеж	38.4	19.8	29.1	25.0	13.9	19.4	25.0	29.0
Курская	22.07	Курск	35.3	22.9	29.1	24.1	14.2	19.1	23.0	27.0

Из данных таблицы 1 видно, что в период аварийных остановок энергоблоков сложились экстремальные погодные условия. Так, температура наиболее жаркой пятидневки, являющейся важным показателем температурного режима для систем охлаждения, превысила эту характеристику относительно периода 1961–1990 гг. на 5–10°C. Анализ причин аварийных остановок показал, что к аварийным ситуациям привели не только аномальные погодные условия, но и человеческий фактор.

2.2. Апробация применения программы ClimPACT для оценки воздействия климатических изменений на работу АЭС и ТЭС

Проектные характеристики АЭС и ТЭС учитывают климатические условия в районах расположения электростанций в период в основном до 1980-х гг. Поэтому представляет интерес провести анализ изменения температурного и влажностного режимов в рассматриваемых районах в конце XX – начале XXI вв., а также оценить возможные изменения климата на среднесрочную перспективу – к середине XXI в. и создать основу для обновленной Энергетической стратегии России, разработанную на сегодняшний день для временного горизонта до 2035 г. [Энергетическая..., 2015].

Оценку воздействия климатических изменений на работу АЭС и ТЭС было решено проводить с использованием программы ClimPACT [Alexander et al., 2013]. Данная работа выполнялась в контексте реализации российского сегмента

ГРОКО для энергетической отрасли. Программный продукт ClimPACT разработан в 2013 г. группой экспертов «Взаимодействие с пользователями в целях адаптации к климату и управления рисками» в составе Комиссии по климатологии ВМО. При его создании за основу был взят программный продукт RClimDEX [Zhang, Yand, 2004; Zhang et. al., 2005]. При этом набор климатических индексов был существенно изменен и дополнен в соответствие с целями ГРОКО. Данная разработка направлена на создание климатической продукции и обслуживания с целью оперативной оценки изменений экстремальных значений климатических параметров, наиболее значимых для конкретных отраслей экономики и социальной сферы.

Среднемесячные климатические данные сглаживают большую часть важной информации, от которой зависят различные отрасли экономики. По этой причине индексы, полученные из ежедневных данных, являются попыткой объективно извлечь информацию из метеорологических наблюдений, которая затрагивает различные сферы деятельности с особым упором на экстремальные явления. Климатические индексы предоставляют ценную информацию, содержащуюся в ежедневных данных, без необходимости передавать сами ежедневные данные. На основании экспертных оценок признана необходимость дальнейшей работы по мониторингу и анализу ежедневных климатических данных для выявления тенденций экстремальных климатических событий [Peterson, Manton, 2008].

Первоначально набор индексов, рассчитываемых с помощью ClimPACT, был предназначен для оценок влияния изменения и изменчивости климата на здравоохранение, водные ресурсы и сельское хозяйство. В дальнейшем, на 16 сессии Комиссии по климатологии ВМО в 2014 г. было принято решение расширить сферу применения климатических индексов и для других климатозависимых секторов, в частности, для энергетического. Расчеты, проводимые в рамках данного исследования, являются частью мировой программы по апробации предложенных климатических индексов для различных регионов Земли.

ClimPACT создана в среде “R” – языке программирования для статистической обработки данных и работы с графикой с открытым кодом. Входными данными для проведения расчётов являются ряды суточной максимальной и минимальной температуры воздуха и количества осадков. Данные автоматически проверяются на наличие ошибок и полноту рядов. Наиболее распространённой ошибкой является превышение минимальной температуры воздуха над максимальной, вероятно, из-за некорректного ввода данных в первичные базы данных. Помимо контроля качества данных важна их непрерывность. Так, для расчета ежемесячных индексов максимальное количество дней с отсутствующими значениями не должно превышать 3, а для годовых – 15. При расчете годового значения на основе среднемесячных показателей требуются значения за все 12 месяцев. Для вычисления характеристик обеспеченности необходимо наличие не менее 70 % данных.

Так как в программе ClimPACT отсутствует опция проверки однородности рядов, эта проверка была выполнена в соответствии с методами, изложенными в [Методические..., 2017]. При проверке однородности использовались четыре статистических теста: два параметрических теста состоят в проверке нулевой гипотезы о равенстве средних и распределении по преобразованным критериям Стьюдента и Колмогорова (тесты Александорсона и Буишанда), третий тест использует непараметрический критерий (тест Петита), и четвертый основан на отношении Фон-Ноймана, позволяющим принимать или отвергать гипотезу об однородности ряда. Если не выполняется только один из тестов, ряд считается однородным. В случае, когда два теста отрицают однородность на 1 % уровне значимости, ряд считается сомнительным и дальнейшие операции с ним и выводы на его основе следует делать с осторожностью.

Расчет специализированных климатических индексов (более 40) производится в автоматическом режиме. При этом параметры большинства индексов задаются пользователем в соответствии с конкретной прикладной задачей (пороговые значения температуры воздуха, обеспеченности, продолжительность периода и т.п.). Для более корректного расчета

метеорологических характеристик заданной обеспеченности используется процедура бутстрепа [Zhang et al., 2005]. Этот метод исследования распределения статистик вероятностных распределений основан на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки. Метод бутстрепа особенно актуален при использовании выборки небольшого объема.

Итоговые результаты представляются в виде таблиц и графиков. Для параметров с межгодовой изменчивостью рассчитывается коэффициент линейного тренда (linear trend slope), его ошибка (slope error) и значимость изменения параметра за анализируемый период. 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 [Cleveland, 1979]. Для оценки веса каждого значения ряда применяется фильтрация с использованием квадратического ядра, рассчитанного через медиану вариационного ряда ошибок. Практически такой подход позволяет удалить случайные отклонения, но сохранить тренд и отдельные колебания, т.е. позволяет получать качественные оценки динамики рассматриваемых индексов за указанный интервал времени.

2.3. Выбор значимых для функционирования АЭС и ТЭС климатических параметров, рассчитываемых в программе ClimPACT

Одним из важнейших факторов, влияющих на производство энергии на АЭС и ТЭС является термический режим, который влияет на условия охлаждения энергоблоков. Кроме того, от температуры наружного воздуха зависит эффективность работы электростанций [Forster et al., 2010; Klein et al., 2013; Steininger et al., 2015; Totschnig et. al., 2017]. На основе анализа литературных источников и нормативных документов, посвященных воздействию условий внешней среды на функционирование ТЭС и АЭС [Основные..., 2000; Учет..., 2005; Бедняков и др., 2012], а также в результате взаимодействия с потребителями климатической информации были выделены климатические факторы, отражающие критические состояния окружающей среды, при которых могут возникнуть занормативные состояния систем охлаждения агрегатов электростанций. Определено, что для нормальной эксплуатации ТЭС и АЭС наиболее важно бесперебойное функционирование конечного поглотителя тепла, которыми являются атмосфера и водоём (пруд-охладитель). На основе полученной информации из 40 индексов ClimPACT был выбран необходимый для решения поставленных задач набор климатических индексов. В данной работе рассматриваются следующие показатели режимов температуры и 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 минимальной и максимальной 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).

Указанные параметры температуры воздуха были выбраны для дальнейших расчетов, т.к. эта информация является значимой как для систем охлаждения агрегатов электростанций с градирнями и брызгальными бассейнами, так и с водоемами-охладителями [Основные..., 2000].

2.4. Анализ изменений выбранных климатических параметров в различных регионах России с использованием программы ClimPACT на основе данных метеонаблюдений и результатов климатического моделирования

Для оценок наблюдаемых климатических изменений использовался находящийся в открытом доступе массив суточных данных ВНИИГМИ–МЦД по температуре воздуха и осадкам с 1950 по 2017 гг., в качестве базового был принят период 1971–2000 гг. На первом этапе работы были отобраны данные 50 метеостанций в 7 районах с высокой плотностью расположения объектов энергетики: Калининградская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Центральный регион, Центрально-Черноземный регион, Ростовская область, Свердловская область, Южно-Сибирский регион (рисунок 2). Районы выбраны так, чтобы в них находились как атомные, так и тепловые электростанции. Исключением является Южно-Сибирский регион: здесь расположены только ТЭС, приуроченные к Кузнецкому и Канско-Ачинскому угольным бассейнам.

После проверки исходных данных на однородность было отобрано 26 массивов, прошедших тесты на однородность. Дальнейший анализ климатических параметров проводился в рамках определённых выше районов исследования.

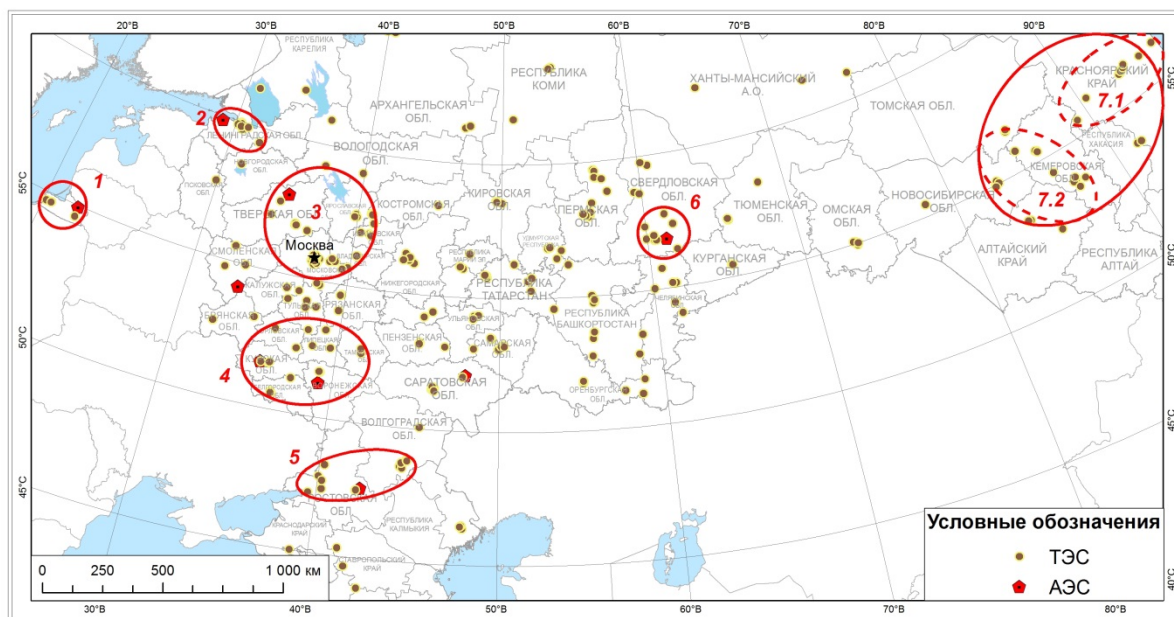


Рисунок 2. Районы с высокой плотностью расположения ТЭС и АЭС.

1 – Калининградская область; 2 – Санкт-Петербург и Ленинградская область; 3 – Центральный регион; 4 – Центрально-Черноземный регион; 5 – Ростовская область; 6 – Свердловская область; 7 – Южно-Сибирский регион.

Калининградская область

На территории Калининградской области анализировались данные по 4 метеостанциям: Советск (26614 – здесь и далее код ВМО), Балтийск (27701), Калининград (26702) и Железнодорожный (26706).

За анализируемый период максимальная продолжительность засухи (индекс CDD) в Калининградской области колебалась от 15 до 30 дней, при среднем многолетнем значении – 20 дней. Лишь в 1 из 4 пунктов выражен тренд по уменьшению данного показателя с конца 1980-х гг. (рисунок 3), однако он, как и 3 других, не является статистически значимым. Показатель значимости тренда (p-value) колеблется в пределах от 0.432 до 0.879, при допустимом значении 0.05.

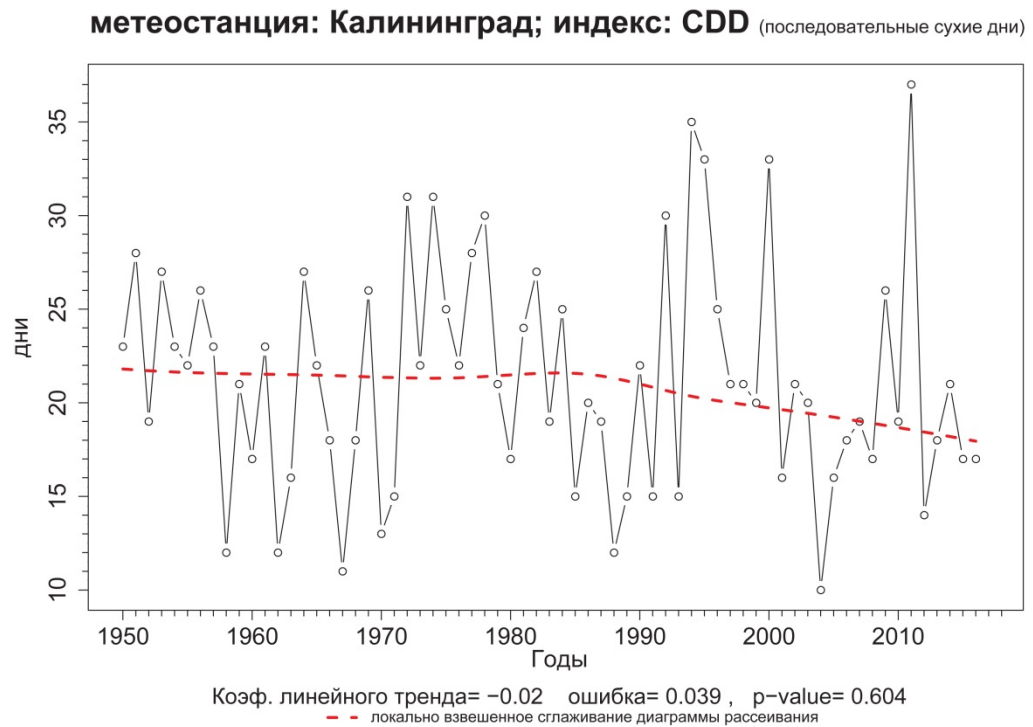


Рисунок 3. Максимальная продолжительность сухих периодов (CDD) (метеостанция Калининград).

Второй рассматриваемый показатель - продолжительность самой длинной волны тепла (HWD), до середины 1980-х гг. в среднем колебался от 4 до 6 дней. А с 1990 г. наблюдается его значительный рост и за последние 25 лет среднее значение достигло 8–9 дней. Тем не менее, статистически значимыми эти тренды назвать нельзя: p-value колеблется от 0.132 до 0.601 (рисунок 4).

Третий индекс, последовательного количества жарких дней и ночей (5TX5TN), за первые 40 лет анализируемого периода зафиксирован лишь единожды на территории Калининградской области в 1968 г. А с 1990 г. данный показатель стал регулярным для региона (рисунок 5). Несмотря на слабый наклон линии тренда (из-за малого числа явлений), для 2 из 4 пунктов наблюдения (Балтийск и Советск) резкий рост экстремально жарких длительных периодов является статистически значимым (p-value 0.000–0.002). Регулярно наблюдаемые в последнее десятилетие экстремальные температуры позволяют с высокой долей вероятности предполагать возможность таких событий и в дальнейшем.



Рисунок 4. Продолжительность самой длинной волны тепла (HWD) (метеостанция Калининград).



Рисунок 5. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (метеостанция Балтийск).

Ленинградская область

На исследуемой территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области расположены 11 ТЭС и 1 АЭС. Анализ климатических индексов проводился по данным метеостанции Санкт-Петербург (26063). За анализируемый период значимые тренды индекса CDD не наблюдались. Значение индекса колебалось от 13 до 25–30 дней, при среднем для всего периода 20 дней.

Индекс продолжительности самой длинной волны тепла (HWD) для данного района в среднем составил 8 дней (при колебании от 4 до 12 дней, с абсолютным максимумом 43 дня в 2010 г.). В последнее 20 лет средняя продолжительность самой длинной годовой волны тепла увеличилась до 11 дней. Тем не менее, значимого тренда в изменении этого показателя не отмечалось (р-значение 0.062).

Анализ изменения числа периодов с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) показал, что данное явление было зафиксировано дважды в 1972 г., а с 1986 г. приобрело регулярный характер (18 случаев за 32 года). Такой рост является статистически значимым – р-значение 0.

Таким образом, в данном регионе периоды с экстремально высокими температурами начали проявляться в последние 30 лет и стали носить регулярный характер.

Центральный регион

На территории Центрального региона расположена одна атомная и более 20 тепловых электростанций. Анализ климатических индексов проводился по данным метеостанций Бологое (26298), Максатиха (27208), ВДНХ (27612), Переславль-Залесский (27425).

Индекс CDD за анализируемый период не имел ярко выраженных трендов. Его среднее значение составило 20 дней (большинство показателей колебалось в промежутке от 15 до 20 дней).

Продолжительности самой длинной волны тепла (HWD) в данном регионе составила 7 дней (в среднем от 4 до 8 дней, с абсолютным максимумом 45 дней

в 2010 г.). За последние 20 лет наблюдается тенденция слабого увеличения этого показателя в среднем на 2 дня. Однако статистическая значимость с 1950 г. не имеет чёткой выраженности – p -значение 0.057–0.152.

Анализ индекса 5TX5TN показал, что данное явление до 1990-х гг. носило единичный характер, а с 1990 г. стало регулярным (в среднем по одному случаю на 2 года) и статистически значимым (p -значение 0.001–0.033).

Центрально-Черноземный регион

В Центрально-Чернозёмном регионе расположено две атомные и 17 тепловых электростанций. Анализ климатических индексов проводился по данным 7 метеостанций: Рыльск (33166), Поньри (34003), Курск (34009), Богородицкое (34110), Воронеж (34123), Каменная степь (34139) и Готня (34202).

Максимальная продолжительность засухи (индекс CDD) с 1950 по 2017 гг. колебалась в интервале от 20 до 30 дней. Изменения данного показателя за весь период носили разнонаправленный характер, значимых трендов при этом не наблюдалось (рисунок 6).

Показатель продолжительности самой длинной волны тепла (HWD) за последние 68 лет вырос с 6–7 до 10–11 дней по региону. При этом такое изменение можно считать значимым. P -значение лишь на 2 из 7 рассматриваемых метеостанций превысило допустимый порог значимости (0.05): 0.079 и 0.671 для Поньрей и Богородицкого соответственно. Для остальных 5 метеостанций p -значение колебалось от 0.002 до 0.047 (рисунок 7).

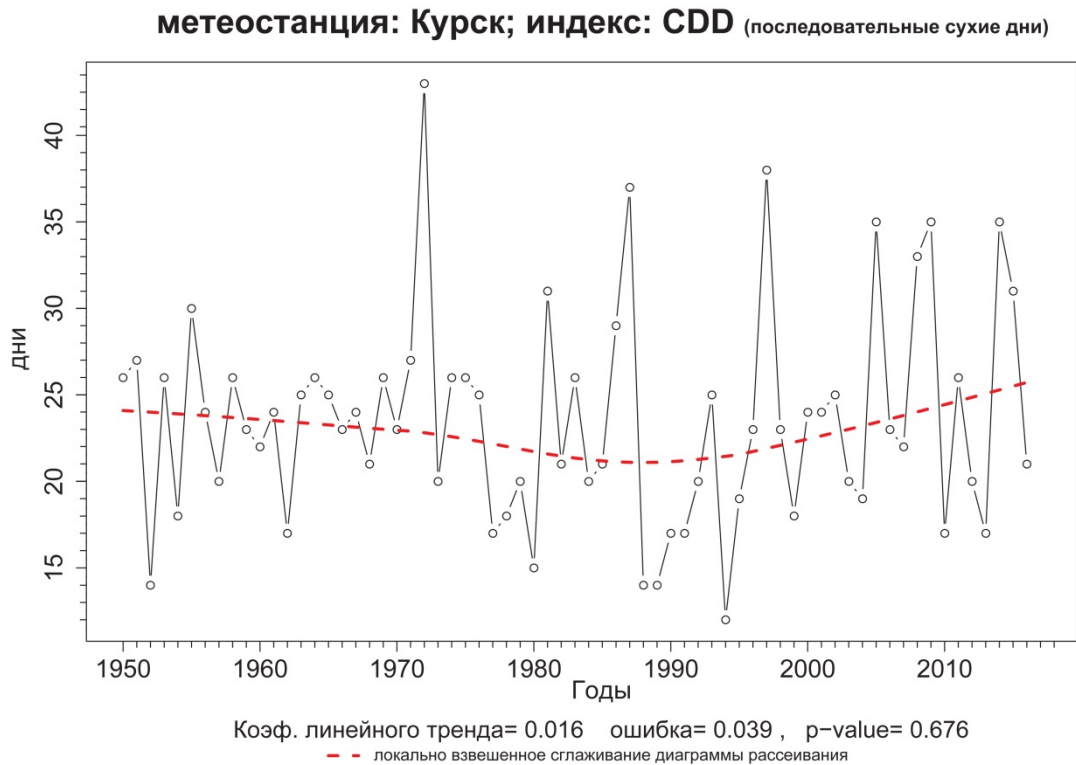


Рисунок 6. Максимальная продолжительность сухих периодов (CDD) (метеостанция Курск).

Третий анализируемый индекс, последовательного количества жарких дней и ночей (5TX5TN), за исследуемый период показал значимый тренд (p-значение 0.000–0.001) для всего региона, за исключением м/ст. Готня (0.218). Резкое увеличение показателя наблюдается с начала 1990-х гг. (рисунок 8), при этом для метеостанций Рыльск и Поныри данный показатель до этого времени не фиксировался вовсе.

Так же следует отметить, что в районе расположения Нововоронежской АЭС в 1993 г. был зафиксирован абсолютный максимум температуры воздуха за всю историю наблюдений: +42.3°C.

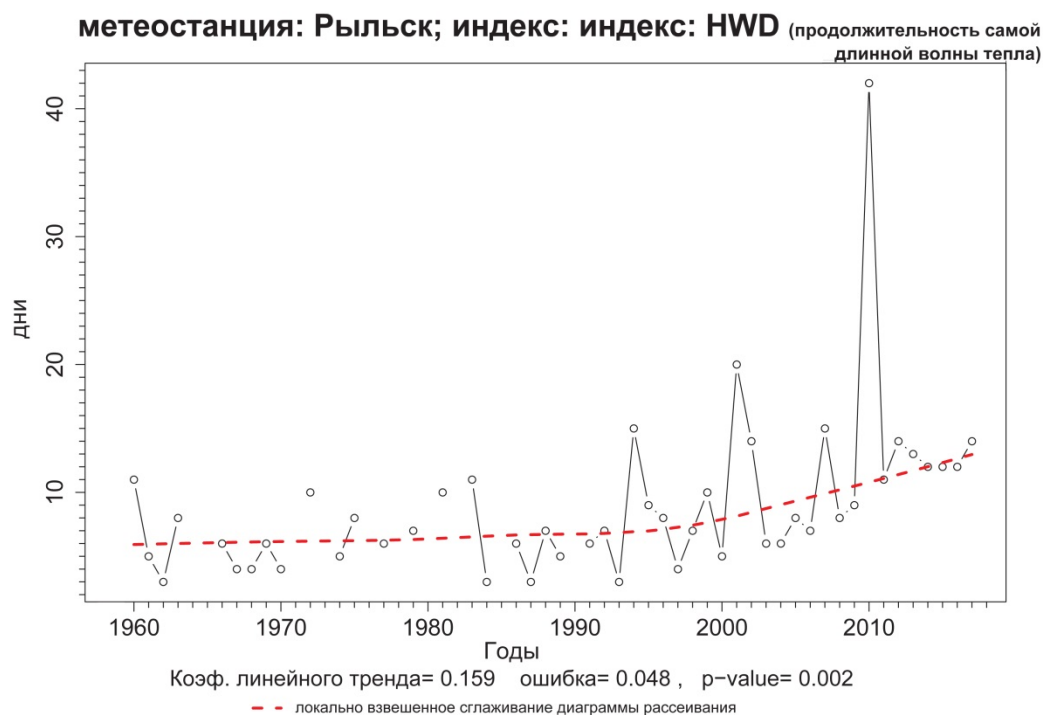


Рисунок 7. Продолжительность самой длинной волны тепла (HWD) (метеостанция Рыльск).

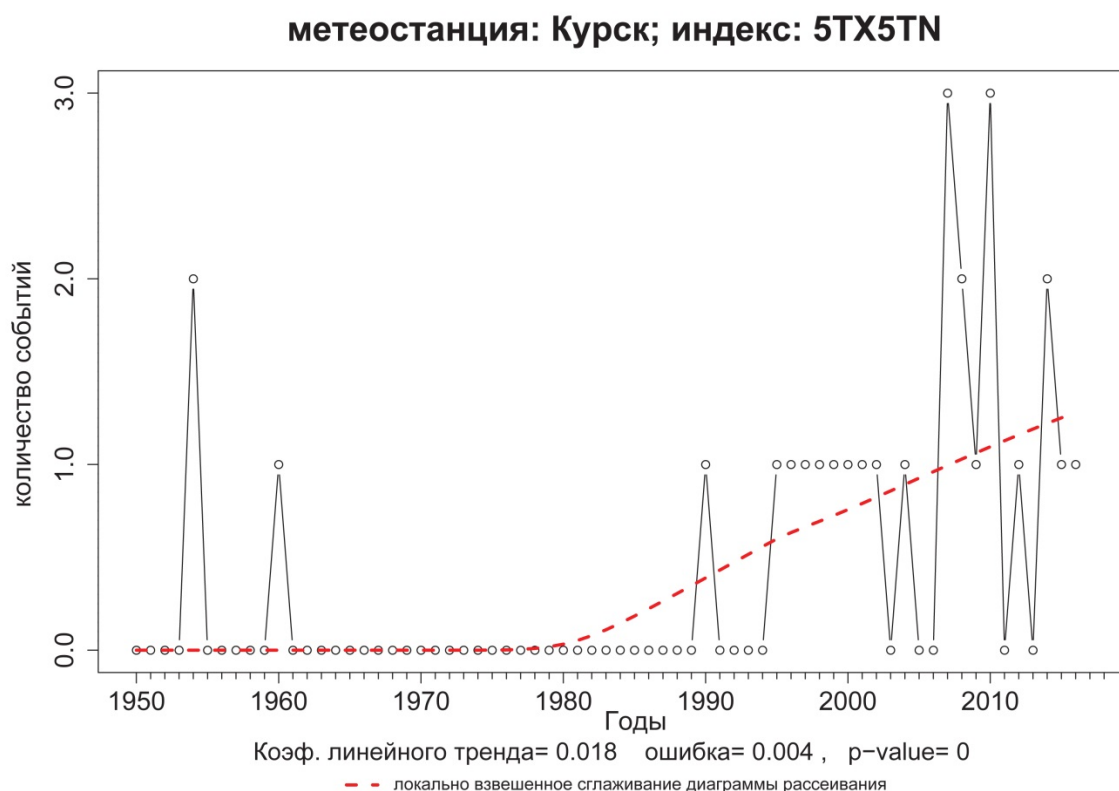


Рисунок 8. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (метеостанция Курск).

Ростовская область

Самый южный район исследования включает в себя территорию Ростовской области, в которой расположено 7 ТЭС и 1 АЭС. Анализ климатических индексов проводился по данным метеостанций Цимлянск (34646) и Ростов-на-Дону (34730).

Индекс CDD за анализируемый период не имел явного тренда, лишь незначительное снижение показателя в первой половине 1980-х гг., не повлиявшее на статистическую значимость (р-значение 0,345–0,643). Средняя продолжительность максимальной засухи составила 31 день (большинство значений колебалось в промежутке от 23 до 38 дней). Продолжительность самой длинной волны тепла (HWD) за прошедшие 68 лет в среднем составила 8 дней: значения колебались в интервале от 3 до 9 дней, с абсолютным максимумом 25 дней в 2010 г. За исследуемый период наблюдается статистически значимый тренд по увеличению данного показателя (р-значение 0.010–0.026). Анализ индекса 5TX5TN показал, что данное явление до 1990 г. наблюдалось лишь трижды (в 1954–55 и 1975 г.), а с 1990 г. приобрело регулярный характер. Это обуславливает значимый тренд по увеличению долгих экстремально жарких дней и ночей (р-значение 0.002–0.050).

Свердловская область

В Свердловской области расположено 8 ТЭС и 1 АЭС. Анализ специализированных климатических параметров проводился по данным метеостанций Екатеринбург (28440) и Верхнее Дуброво (28445).

Максимальная продолжительность засухи (CDD) с 1950 по 2017 гг. колебалась от 14 до 75 дней, с преобладающими значениями в диапазоне от 22 до 34, а среднее составило 29 дней. Для метеостанции Екатеринбург зафиксировано уменьшение продолжительности засухи с 33 до 28 дней (р-значение от 0.066) (рисунок 9).

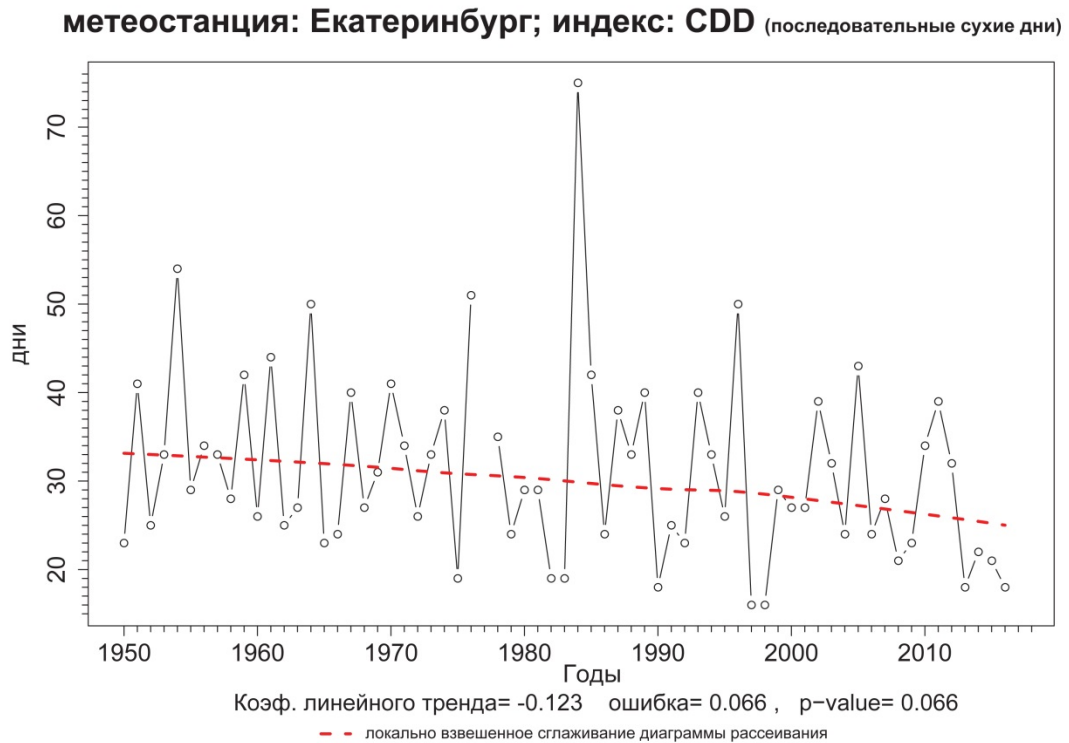


Рисунок 9. Максимальная продолжительность сухих периодов(CDD) (метеостанция Екатеринбург).

Изменение продолжительности самой длинной волны тепла имело выраженную положительную динамику с 1970-х гг. Если для первой половины (1950–1979 гг.) анализируемого периода её средняя продолжительность составляла 4 дня, то во второй половине (1980–2017 гг.) уже 7. При этом такой рост показателя является статистически значимым: р-значение составляет 0.002–0.015 (рисунок 10).

Последовательно жаркие (выше 95 % обеспеченности от 5 дней подряд) максимальные и минимальные суточные температуры воздуха стали регулярно проявляться лишь в последние 20 лет (рисунок 11). Данное увеличение можно считать статистически значимым – р-значение (0.001–0.035), не смотря на малое число событий для всего анализируемого периода.

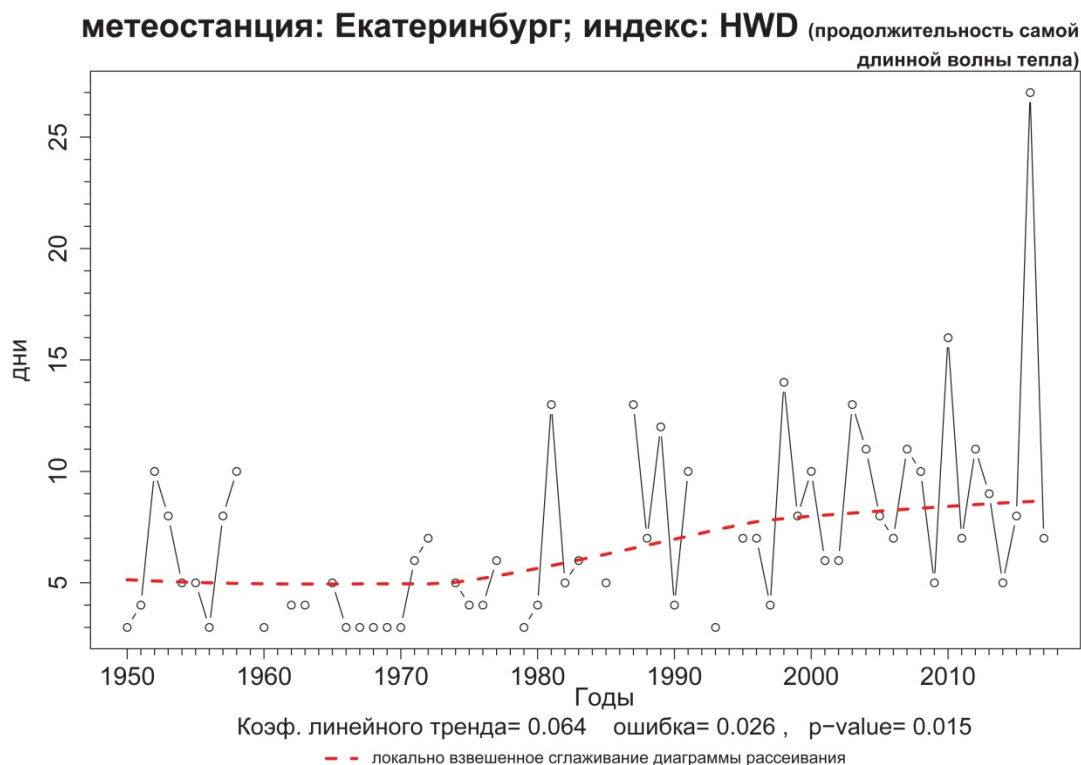


Рисунок 10. Продолжительность самой длинной волны тепла (метеостанция Екатеринбург).

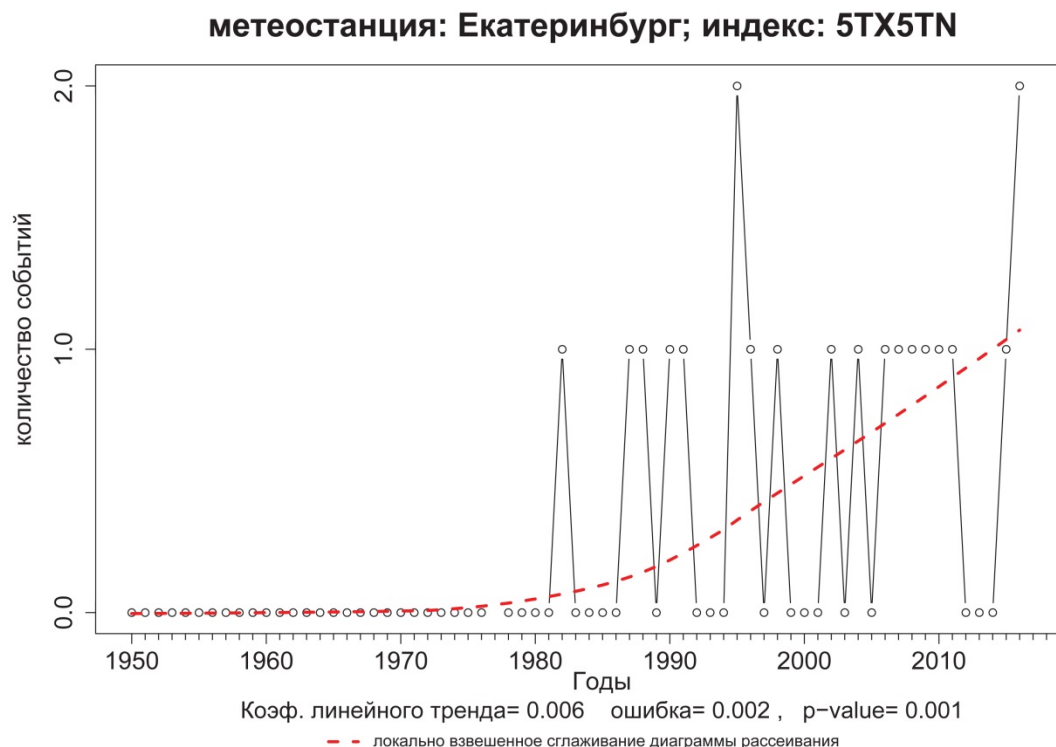


Рисунок 11. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (метеостанция Екатеринбург).

Южно-Сибирский регион

Южно-Сибирский регион является наиболее крупным и климатически неоднородным из всех рассматриваемых в данном исследовании. Поэтому он подразделяется на 2 района: Канско-Ачинский и Кузбасский. Для данного региона традиционными источниками энергии являются тепловые станции, что обусловлено близостью сырьевой базы. Здесь расположено более 30 ТЭС.

Для Канско-Ачинского района анализ климатических индексов проводился по данным метеостанций Ачинск (29467), Красноярск (29570) и Солянка (29580). За исследуемый период среднее значение индекса CDD составило 27 дней. Значимый тренд по уменьшению засушливого периода (p -значение 0.008) наблюдался на метеостанции Солянка. Для Ачинска уменьшение данного показателя началось с 1990-х гг. и за последние 25 лет максимальная продолжительность засухи сократилась до 24 дней, против 27 дней для периода 1950–1990 гг.

Индекс продолжительности самой длинной волны тепла (HWD) для данного района в среднем составил 5 дней. С начала 1990-х гг. наблюдается статистически значимый рост данного показателя (p -значение 0.006–0.024): для Ачинска с 4 дней до 1990 г. до 7 дней после, для Красноярска с 5 до 7 дней, для Солянки с 5 до 6 дней.

Анализ изменения количества периодов с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности, рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) показал, что данное явление носило единичный характер для всей территории и фиксировалось лишь с середины 1990-х гг. Из-за малого количества явлений трендовые изменения в данном случае не проявились.

Для Кузбасского района анализ климатических индексов проводился по данным метеостанций Болотное (29539), Огурцово (29638) и Кузедеево (29849).

За анализируемый период (1950–2017 гг.) выявлен тренд по уменьшению продолжительности засухи (CDD) на 5 дней (с 22–29 до 17–25 дней). Однако значимым такое изменения является только для пунктов Болотное и Кузедеево – p -значение 0.035–0.054, для Огурцово p -значение (0.270) превышает допустимые

порог 0.05. Продолжительности самой длинной волны тепла (HWD) для района в среднем составила 6 дней (и в среднем колебалась от 3 до 9 дней). За исследуемый период наблюдался тренд по увеличению показателя с начала 1980-х гг., который можно считать значимым для двух пунктов наблюдения (р-значение: 0.043 – Огурцово и 0.048 – Кузедеево). Анализ индекса 5TX5TN показал, что данное явление стало проявляться с конца 1990-х годов и не носило регулярный характер, вследствие этого отсутствие трендов.

Отдельно для всех анализируемых данных был 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. Т.к. в ClimPACT не предусмотрена функция по уточнению внутригодового интервала по месяцам, для расчета этого индекса использовалась программа Excel. Очевидно, что продолжительность сухого периода при расчете индекса $CDD_{\text{апр-окт}}$ короче, чем у индекса 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). Ошибка его расчета при этом остается практически неизменной и зачастую превышает доверительный интервал в 5 %. То же самое касается и статистической значимости (p-value). Лишь в Рыльске положительный тренд по увеличению $CDD_{\text{апр-окт}}$ статистически значим – p-value = 0.023, как и годовой индекс CDD.

Обобщенная информация об изменении индексов CDD, $CDD_{\text{апр-окт}}$, HWD, 5TX5TN за период 1950–2017 гг. для всех рассматриваемых районов представлена в таблицах 2 и 3. Все результаты расчётов климатических индексов по наблюдаемым данным представлены в виде таблиц и графиков в приложениях 1 и 2 соответственно.

Таблица 2.

Характеристики изменения индексов CDD, HWD, 5TX5TN по
наблюдаемым данным в исследуемых районах

Район	Метеостанция		Индекс	Анали- зируемый период	Средн. значение индекса	Кэф. линейного тренда	Ошибка линейного тренда	p-значение
Калининградская область	Советск	26614	CDD	1959– 2017	21.5	0.010	0.049	0.835
			5TX5TN		0.3	0.014	0.004	0
			HWD		6.0	0.013	0.025	0.601
	Балтийск	26701	CDD	1959– 2017	20.5	0.043	0.054	0.432
			5TX5TN		0.2	0.006	0.004	0.123
			HWD		6.2	0.043	0.028	0.132
	Калининград	26702	CDD	1950– 2017	21.2	-0.02	0.039	0.604
			5TX5TN		0.0	0	0.001	0.742
			HWD		5.9	0.018	0.021	0.398
	Железнодорожный	26706	CDD	1959– 2017	21.3	-0.008	0.051	0.879
			5TX5TN		0.1	0	0.002	0.818
			HWD		5.8	0.021	0.024	0.395
	Санкт-Петербург	26063	CDD	1950– 2017	20.3	0.002	0.032	0.950
			5TX5TN		0.3	0.013	0.003	0
			HWD		7.6	0.079	0.041	0.062
Центральный регион	Бологое	26298	CDD	1966– 2017	19.5	-0.020	0.055	0.716
			5TX5TN		0.1	0.006	0.003	0.033
			HWD		7.1	0.102	0.061	0.101
	Максатиха	27208	CDD	1959– 2017	20.4	0.017	0.058	0.768
			5TX5TN		0.1	0.005	0.002	0.009
			HWD		7.2	0.073	0.050	0.152
	Переславль- Залесский	27425	CDD	1959– 2016	21.2	0.002	0.048	0.974
			5TX5TN		0.3	0.015	0.005	0.003
			HWD		7.1	0.076	0.051	0.140
	Москва (ВДНХ)	27612	CDD	1950– 2017	20.7	-0.025	0.039	0.515
			5TX5TN		0.2	0.010	0.003	0.001
			HWD		7.8	0.076	0.039	0.057
Центрально-Черноземный регион	Рыльск	33166	CDD	1959– 2017	23.7	0.123	0.058	0.038
			5TX5TN		0.3	0.018	0.003	0
			HWD		8.9	0.159	0.048	0.002
	Поныри	34003	CDD	1959– 2017	22.8	0.079	0.053	0.146
			5TX5TN		0.2	0.013	0.004	0.001
			HWD		8.4	0.089	0.049	0.079
	Курск	34009	CDD	1950– 2017	23.6	0.016	0.039	0.676
			5TX5TN		0.4	0.018	0.004	0
			HWD		8.6	0.083	0.036	0.027
	Богородицкое	34110	CDD	1950– 2017	24.6	-0.010	0.040	0.802
			5TX5TN		0.2	0.010	0.003	0.001
			HWD		8.1	0.015	0.035	0.671

Таблица 2. Продолжение

Район	Метеостанция		Индекс	Анали- зируемый период	Средн. значение индекса	Коэф. линейного тренда	Ошибка линейного тренда	p-значение
Центрально-Черноземный регион	Воронеж	34123	CDD	1950– 2017	25.3	0.003	0.038	0.944
			5TX5TN		0.2	0.011	0.002	0
			HWD		8.3	0.076	0.037	0.047
	Каменная Степь	34139	CDD	1950– 2017	26.9	-0.058	0.052	0.268
			5TX5TN		0.3	0.013	0.003	0
			HWD		7.9	0.08	0.031	0.012
	Готня	34202	CDD	1950– 2017	24.6	-0.003	0.040	0.951
			5TX5TN		0.3	0.006	0.003	0.037
			HWD		8.0	0.078	0.037	0.039
Ростовская область	Цимлянск	34646	CDD	1952– 2017	31.3	-0.056	0.059	0.345
			5TX5TN		0.2	0.01	0.003	0.002
			HWD		8.1	0.067	0.029	0.026
	Ростов-на-Дону	34730	CDD	1950– 2017	30.6	0.027	0.058	0.643
			5TX5TN		0.1	0.004	0.002	0.050
			HWD		7.2	0.067	0.023	0.005
Свердловская область	Екатеринбург	28440	CDD	1950– 2017	31.2	-0.123	0.066	0.066
			5TX5TN		0.1	0.006	0.002	0.001
			HWD		6.6	0.064	0.026	0.015
	Верхнее Дуброво	28445	CDD	1959– 2017	26.6	-0.029	0.063	0.647
			5TX5TN		0.2	0.007	0.003	0.035
			HWD		6.3	0.102	0.031	0.002
Южно-Сибирский регион	Канско-Ачинский район	Ачинск	CDD	1950– 2017	25.9	-0.042	0.054	0.441
			5TX5TN		0.1	0.004	0.002	0.046
			HWD		5.5	0.049	0.017	0.006
		Красноярск	CDD	1950– 2017	27.3	-0.026	0.051	0.614
			5TX5TN		0.0	0.001	0.001	0.170
			HWD		5.5	0.037	0.015	0.020
		Солянка	CDD	1950– 2017	29.2	-0.247	0.091	0.008
			5TX5TN		0.1	0.004	0.002	0.062
			HWD		5.3	0.029	0.013	0.024
	Кузбасский район	Болотное	CDD	1950– 2017	22.7	-0.097	0.045	0.035
			5TX5TN		0.1	0	0.001	0.918
			HWD		5.2	-0.02	0.016	0.205
		Огурцово	CDD	1958– 2017	26.6	-0.077	0.069	0.270
			5TX5TN		0.1	0.003	0.002	0.071
			HWD		5.3	0.046	0.022	0.043
		Кузедеево	CDD	1955– 2017	19.2	-0.091	0.046	0.054
			5TX5TN		0.0	0.002	0.001	0.148
			HWD		4.9	0.034	0.017	0.048

Примечание: жирным шрифтом выделены значения индексов, имеющих значимые тренды (p-значение ≤ 0.05).

Таблица 3.

Характеристики изменения индексов CDD и CDD_{апр-окт}
по наблюдаемым данным в исследуемых районах

Район	Метеостанция		CDD	Анали- зируемый период	Коэффициент линейного тренда	Ошибка линейного тренда	p-значение	
Калининградская область	Советск	26614	Год	21.5	0.010	0.049	0.835	
			Апр-окт	19.4	0.041	0.049	0.398	
	Балтийск	26701	Год	20.5	0.043	0.054	0.432	
			Апр-окт	19.0	0.055	0.052	0.293	
	Калининград	26702	Год	21.2	-0.020	0.039	0.604	
			Апр-окт	19.1	0.005	0.037	0.897	
	Железнодорожный	26706	Год	21.3	-0.008	0.051	0.879	
			Апр-окт	19.0	0.055	0.039	0.166	
Санкт-Петербург		26063	Год	20.3	0.002	0.032	0.950	
			Апр-окт	17.5	0.028	0.027	0.290	
Центральный регион	Бологое	26298	Год	19.5	-0.020	0.055	0.716	
			Апр-окт	17.2	0.002	0.047	0.959	
	Максатиха	27208	Год	20.4	0.017	0.058	0.768	
			Апр-окт	18.1	0.033	0.058	0.573	
	Переславль-Залесский	27425	Год	21.2	0.002	0.048	0.974	
			Апр-окт	18.0	0.019	0.049	0.699	
	Москва (ВДНХ)	27612	Год	20.7	-0.025	0.039	0.515	
			Апр-окт	18.0	0.017	0.036	0.637	
Центрально-Черноземный регион	Рыльск	33166	Год	23.7	0.123	0.058	0.038	
			Апр-окт	20.6	0.129	0.055	0.023	
	Поныри	34003	Год	22.8	0.079	0.053	0.146	
			Апр-окт	20.3	0.082	0.048	0.094	
	Курск	34009	Год	23.6	0.016	0.039	0.676	
			Апр-окт	21.0	0.033	0.043	0.438	
	Богородицкое	34110	Год	24.6	-0.010	0.040	0.802	
			Апр-окт	21.2	0.037	0.038	0.330	
	Воронеж	34123	Год	25.3	0.003	0.038	0.944	
			Апр-окт	22.8	0.039	0.038	0.308	
	Каменная Степь	34139	Год	26.9	-0.058	0.052	0.268	
			Апр-окт	23.1	-0.009	0.045	0.836	
	Готня	34202	Год	24.6	-0.003	0.040	0.951	
Апр-окт			21.7	0.030	0.043	0.491		

Таблица 3. Продолжение

Район	Метеостанция		CDD	Анали- зируемый период	Коэффициент линейного тренда	Ошибка линейного тренда	p-значение
Ростовская область	Цимлянск	34646	Год	31.3	-0.056	0.059	0.345
			Апр-окт	29.3	-0.036	0.060	0.550
	Ростов-на-Дону	34730	Год	30.6	0.027	0.058	0.643
			Апр-окт	26.9	0.002	0.069	0.972
Свердловска я область	Екатеринбург	28440	Год	31.2	-0.123	0.066	0.066
			Апр-окт	20.0	-0.040	0.045	0.376
	Верхнее Дуброво	28445	Год	26.6	-0.029	0.063	0.647
			Апр-окт	18.6	-0.022	0.049	0.649
Южно-Сибирский регион	Канско-Ачинский район	Ачинск	Год	25.9	-0.042	0.054	0.441
			Апр-окт	17.3	-0.06	0.031	0.057
		Красноярск	Год	27.3	-0.026	0.051	0.614
			Апр-окт	16.4	-0.043	0.029	0.152
		Солянка	Год	29.2	-0.247	0.091	0.008
			Апр-окт	16.8	-0.044	0.030	0.146
	Кузбасский район	Болотное	Год	22.7	-0.097	0.045	0.035
			Апр-окт	16.9	-0.033	0.026	0.205
		Огурцово	Год	26.6	-0.077	0.069	0.270
			Апр-окт	19.6	-0.017	0.043	0.699
		Кузедеево	Год	19.2	-0.091	0.046	0.054
			Апр-окт	15.0	-0.022	0.028	0.499

Примечание: жирным шрифтом выделены значения индексов, имеющих значимые тренды (p-значение ≤ 0.05).

Данные таблицы 2 показывают, что наибольшие риски для систем охлаждения АЭС и ТЭС наблюдаются в Центрально-Черноземном регионе, где зафиксированы значимые тренды как продолжительности самой длинной волны тепла, так и числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности. Кроме того, это единственный регион из всех рассматриваемых в данном исследовании, где наблюдаются значимые тренды увеличения засушливых периодов. В зоне повышенных рисков находятся также Ростовская и Свердловская области, где отмечено увеличение повторяемости и длительности тепловых волн. Однако, в отличие от Ростовской области, продолжительность

засушливых периодов в Свердловской области имеет тенденцию к сокращению. Наименьшие риски для систем охлаждения электростанций характерны для Калининградской области, на территории которой практически отсутствуют изменения температурного и влажностного режимов.

2.5. Оценки изменений специализированных климатических индексов к середине XXI в., полученные по данным Региональной модели ГГО

В основе прогнозных оценок специализированных климатических индексов лежат данные ансамблевых расчетов будущих изменений климата с помощью системы моделей глобального и регионального климата – это созданные в отделе динамической метеорологии ГГО спектральная глобальная (версия T42L25) и встроенная в нее конечно-разностная региональная модели «атмосфера-криосфера-деятельный слой почвы» [Шнееров и др., 2001; Школьник и др., 2012; Мелешко и др., 2014]. Модели имеют пространственные разрешения соответственно 200 км и 25 км. Региональная и глобальная климатические модели имеют одинаковые разрешение вертикальной сетки (25 б-слоев разной толщины) и параметризации физических процессов в атмосфере и деятельном слое почвы. Эти процессы включают перенос солнечной и длинноволновой радиации в облачной атмосфере, крупномасштабную конденсацию и конвекцию, турбулентный обмен теплом, влагой и моментом количества движения, перенос тепла и влаги в деятельном слое почвы, процессы таяния (накопления) снега и др. Оценка качества результатов климатического моделирования по РКМ ГГО проводится по данным реанализа. Анализ ретроспективных расчетов за 1990–2009 гг. по средней сезонной температуре воздуха у подстилающей поверхности и давления показал (рисунок 12), что модель удовлетворительно воспроизводит термический и циркуляционный режим атмосферы, а также временную изменчивость осадков на рассматриваемой территории [Школьник, Ефимов, 2015]. РКМ, разработанная и постоянно развивающаяся с конца 1990 гг. в ГГО им. А.И. Воейкова по сей день является единственной региональной моделью,

созданной специальной для территории России. Так же следует отметить, что РКМ ГГО входит в CORDEX (Coordinated regional climate downscaling experiment) –аналог CMIP5 для региональных моделей.

В ходе расчетов региональная модель использует на боковых границах модельной области данные по температуре воздуха, ветру, влагосодержанию атмосферы и давлению на подстилающей поверхности, полученные в результате расчетов по глобальной модели за каждый шестичасовой интервал. Всего с каждой моделью было проведено 30 экспериментов по моделированию будущих изменений климата по сценарию RCP 8.5 МГЭИК [Van Vuuren et al., 2011]. Расчеты проводились от разных начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для двух десятилетних периодов 1990–1999 гг. (базовый) и 2050–2059 гг. (будущий).

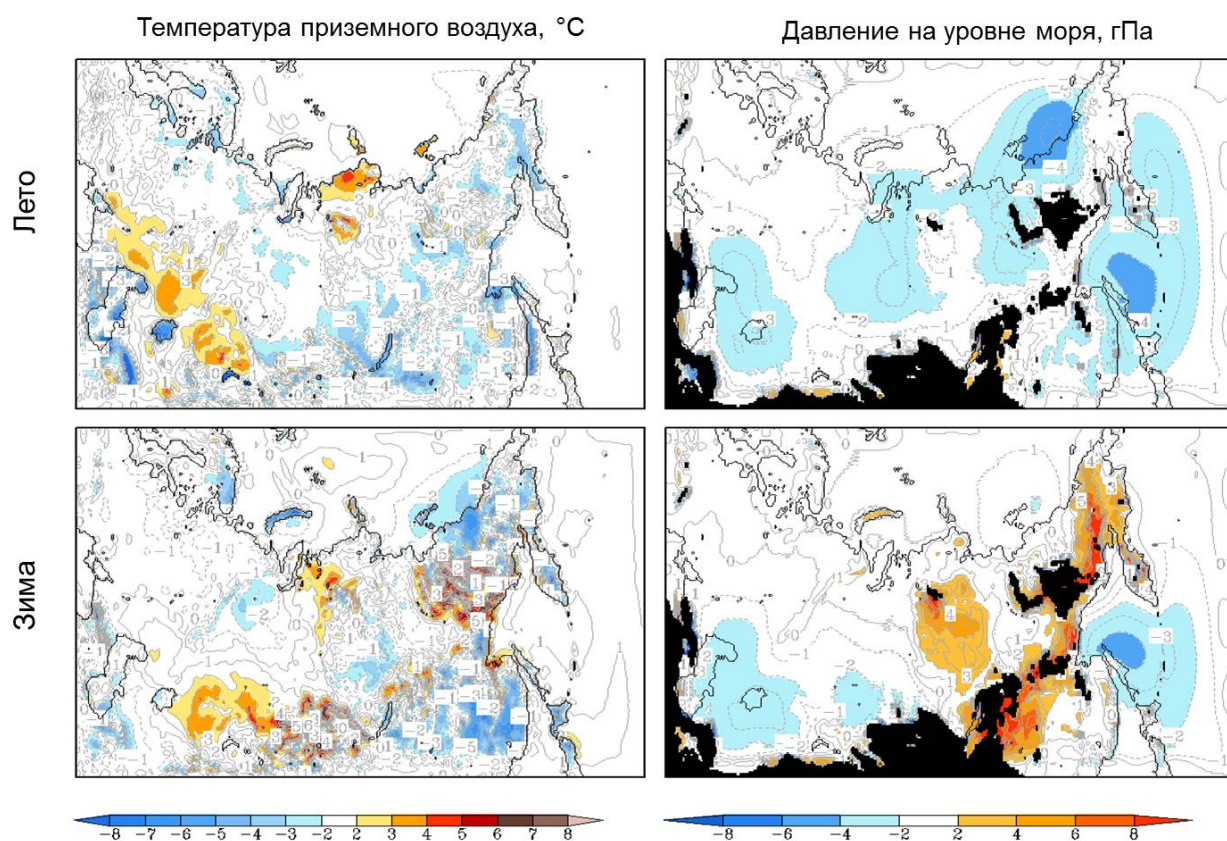


Рисунок 12. Разности между модельными расчетами РКМ и реанализом по температуре (°C) приземного воздуха и давлению (гПа) на уровне моря для летнего и зимнего сезонов за период 1990–1999 гг. [Школьник, Ефимов, 2015].

Таким образом, для каждого периода ансамбль охватывает по 300 расчетных лет, что позволяет описать с его помощью широкий спектр климатической изменчивости для прогнозного интервала. Заметим, что 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 климатических индексов для базового и будущего периодов. Изменения индексов на прогнозный период 2050–2059 гг. рассчитаны относительно базового периода 1990–1999 гг. В качестве модельных точек были выбраны локации 10 метеостанций, по которым проводился анализ наблюдаемых климатических изменений, во всех 7 исследуемых районах. Отдельно для 10 выбранных метеостанции вычислены средние значения климатических индексов по наблюдаемым данным для периода 1990–1999 гг. Такой подход позволил сопоставить данные климатического моделирования с наблюдаемыми показателями для верификации прогнозных оценок (таблица 4).

Таблица 4.

Изменения значений индексов CDD, HWD, 5TX5TN к 2050–2059 гг.
по сравнению с 1990–1999 гг. по оценкам региональной модели ГГО
(сценарий RCP 8.5)

Регион	CDD			HWD			5TX5TN		
	<i>I</i>	ΔI	σ	<i>I</i>	ΔI	σ	<i>I</i>	ΔI	σ
Калининградская область	23.3	-1.4	6.0	7.4	8.9	6.3	0.2	1.9	1.2
Санкт-Петербург и Ленинградская область	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 область	31.1	3.3	27.6	8.8	11.8	9.3	0.3	2.3	1.3
Свердловская область	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

Примечания: *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. Жирным шрифтом отмечены значения изменений индексов, превышающие или равные стандартному отклонению (отношение сигнала к шуму превышает единицу).

2.6. Выявление районов с наибольшими погодно-климатическими рисками для производства электроэнергии на АЭС и ТЭС

На основании анализа климатических индексов определены районы с наибольшими погодно-климатическими рисками для производства электроэнергии на АЭС и ТЭС.

Полученные результаты (таблица 4) фиксируют тенденцию по увеличению засушливых периодов только в Ростовской области и Центрально-Черноземном регионе. Однако, учитывая, что величина стандартного отклонения изменений этого индекса во всех случаях превышает величину самих изменений, неопределенность этих оценок представляется значительной.

Прогноз изменения продолжительности самой длинной волны тепла (индекс HWD) положительный для всех районов исследования. Максимального роста следует ожидать в Ростовской области – 11.8 дней, для остальных районов европейской части России на 8.0–9.0, а для Свердловской области и Южно-Сибирского региона – не более 6.0 дней. Отношение сигнала к шуму (отношение

среднего по ансамблю изменения к стандартному отклонению изменений в ансамбле) для прогнозов по изменению индекса HWD оказывается больше единицы во всех рассматриваемых районах. Следовательно, такой прогноз является статистически достоверным.

Прогнозные значения числа жарких периодов (индекс 5TX5TN) во всех исследуемых районах значительно превышают величины, наблюдаемые в конце XX в. Если в 1990–1999 гг. экстремально жаркие периоды наблюдались в среднем один раз в 5–10 лет, то к середине XXI в. они могут отмечаться практически ежегодно.

Таким образом, на основании совместного анализа наблюдаемых и ожидаемых изменений анализируемых климатических параметров можно сделать вывод о том, что 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 область. Надо отметить, что в этих районах риски бесперебойной работы систем охлаждения энергоблоков электростанций, связанные с высокими температурами воздуха и охлаждающей воды, становятся еще более значимыми из-за увеличения потребления энергии на кондиционирование в летний период.

2.6.1. Оценки воздействия климатических изменений на энергетический сектор на уровне субъекта РФ (на примере Ростовской области)

В качестве примера оценки воздействия климатических изменений на функционирование энергетических систем рассмотрим энергетический сектор Ростовской области. Основным производителем электрической энергии в Ростовской области является Ростовская АЭС, в промышленной эксплуатации которой находятся 3 энергоблока установленной мощностью по 1000 МВт

каждый. Четвертый энергоблок планируется ввести в эксплуатацию в ближайшие годы. Крупными источниками электрической энергии являются также угольная электростанция «Новочеркасская ГРЭС», Цимлянская ГЭС и несколько ТЭС. Климат играет очень важную роль в обеспечении надежного функционирования всех этих источников электроэнергии. Однако в каждом случае воздействие климатических условий происходит по-разному. Для Ростовской АЭС особенно важным фактором является достаточность водных ресурсов для водяного охлаждения. Оценка объемов воды, необходимых для подпитки водоема-охладителя к середине XXI в., была проведена на основе анализа связей между забором воды и средней температурой воздуха за теплый период (рисунок 13, 14).

Установленные связи с достаточно высоким коэффициентом корреляции ($r=0.84$) позволили примерно оценить необходимые для охлаждения АЭС объемы воды в будущем.

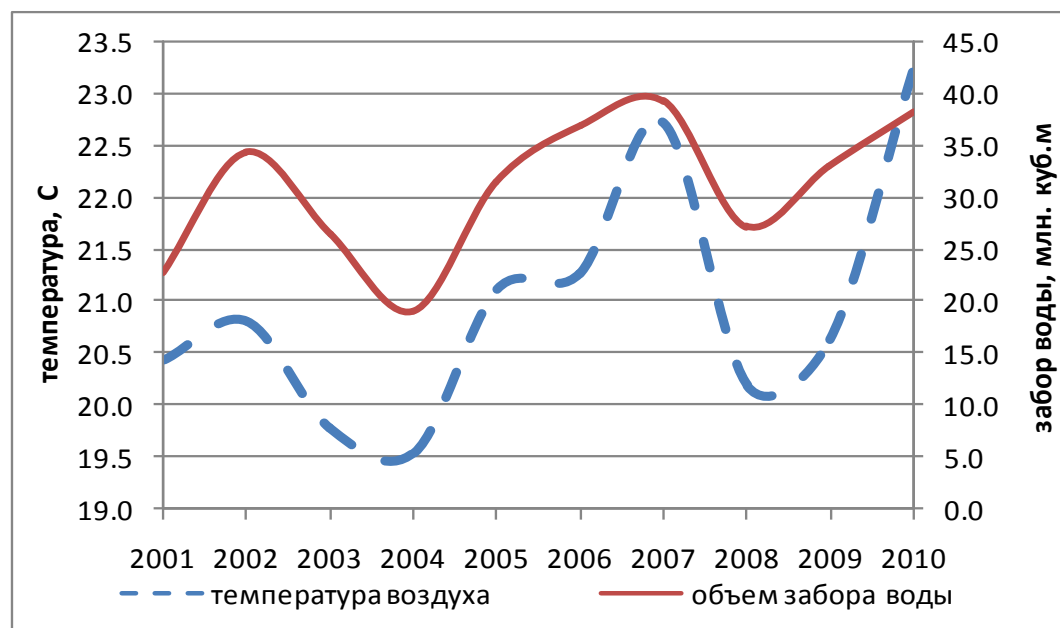


Рисунок 13. Динамика заборов воды для охлаждения АЭС и средней температуры воздуха за теплый период.

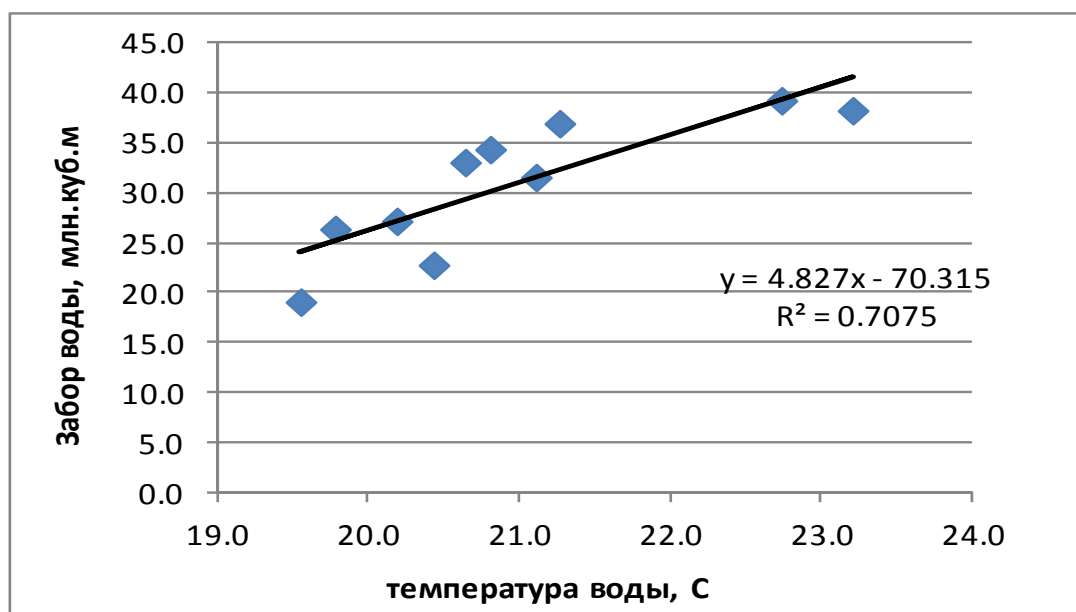


Рисунок 14. Корреляционная зависимость между забором воды для охлаждения АЭС и средней температурой воздуха за теплый период.

В период 2001–2010 гг. средний годовой водозабор для пополнения водоема-охладителя АЭС по данным Ростовского ГМЦ составлял около 30 млн. куб. м. при эксплуатации двух энергоблоков. Учитывая, что в 2015 г. был введен в строй еще 1 энергоблок, и ожидается введение в строй еще одного энергоблока, указанные значения возрастут примерно вдвое, т.е. составят около 60 млн. м³ воды в год. В среднесрочной перспективе температура воздуха теплого периода возрастет примерно на 1°C, а к середине XXI в. – от 2 до 3°C в зависимости от климатического сценария. Следовательно, в течение 2011–2030 гг. из-за роста температуры воздуха водозабор увеличится примерно на 10 млн. м³/год и при работе 4-х энергоблоков составит 70 млн. м³/год. К середине XXI в. дополнительный расход воды из-за увеличения температуры достигнет 20–30 млн. м³/год и в итоге составит 80–90 млн. м³/год.

Учитывая, что общий водозабор на территории Ростовской области в настоящее время оценивается в 3500–4000 млн. м³/год, ожидаемые объемы воды, используемой для подпитки водоема-охладителя АЭС составят примерно 2–3 % от этих значений. Таким образом, выполненные оценки показывают, что к середине XXI в. и тем более в среднесрочной перспективе среднегодовые затраты воды на охлаждение 4-х энергоблоков Ростовской АЭС не должны

существенно увеличить нагрузку на водные ресурсы области. Тем не менее, очевидно, что в отдельные жаркие и сухие периоды (как указано выше, в будущем возможен рост их повторяемости) доля водных ресурсов, затрачиваемая на пополнение водоема-охладителя, может существенно увеличиться. Поэтому в этом районе необходимо предпринимать дополнительные меры для повышения надежности систем охлаждения энергоблоков, в частности подготовить резервные системы охлаждения (градирни и т.д.).

Другим важным климатическим фактором, влияющим на безопасное функционирование АЭС, являются смерчи. Территория Ростовской области, на которой расположена АЭС, является одним из смерчопасных районов. Применительно к атомным станциям, как объектам повышенной опасности, методика оценки угрозы от смерчей разработана Госатомнадзором. Расчеты, проведенные по этой методике, показали, что вероятность прохождения смерча через площадку АЭС равна 3^{10-11} при допустимом значении 10^{-6} . На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что существующая в настоящее время защита от смерчей является достаточной для безопасного функционирования АЭС при современных климатических условиях. Однако, учитывая существующую тенденцию к росту частоты опасных явлений, необходимо организовать мониторинг смерчей, который мог бы фиксировать изменение их повторяемости и интенсивности.

Влияние климатических условий на нормальное функционирование ТЭС, также как и АЭС, заключается, прежде всего, в изменении температурного и влажностного режимов и, особенно, в повторяемости высоких температур воздуха, при которых затрудняется охлаждение агрегатов электростанции. По данным региональной климатической модели ГГО рост числа дней с температурой воздуха выше 30°C составит от 13–15 дней на побережье Таганрогского залива и на севере области до 18–20 дней на юге и юго-востоке. Учитывая высокую вероятность роста повторяемости высоких температур воздуха, необходимо повысить надежность систем охлаждения ТЭС (создавать дополнительные резервуары воды для охлаждения агрегатов станции и т.д.).

Глава 3. Анализ воздействия климатических изменений на безопасность и эффективность работы крупных ГЭС

Гидроэлектростанции являются одними из наиболее климатозависимых источников электроэнергии. При изменении климатических условий на водосборе производство электроэнергии на ГЭС, а так же условия эксплуатации станций могут измениться в зависимости от комплекса факторов. При изменении сумм осадков и испарения следует изменение объема стока и его внутригодовое перераспределение (период и продолжительность половодья, паводков). [Безруких, Стребков, 2005] Перемены интенсивности и частоты экстремальных погодных явлений (наводнений, засух), ледового режима рек могут увеличить стоимость гидроэнергетических проектов и условия эксплуатации ГЭС. Изменения в режимах перемещения взвешенных наносов могут негативно повлиять на изнашиваемость турбин и выработку электроэнергии. Как уже говорилось выше, наибольшее значение для гидроэнергетики имеет климатообусловленное изменение стока рек. Изменение выработки гидроэлектроэнергии на конкретных ГЭС в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу (при неизменности технических условий функционирования оборудования и экономической ситуации). При снижении притока производство гидроэлектроэнергии сократится, а при его увеличении возрастет.

Для анализа воздействия изменения климата на выработку энергии на крупных ГЭС были выбраны крупные ГЭС Волжско-Камского каскада (ВКК) (Угличская, Рыбинская, Нижегородская, Чебоксарская, Жигулевская, Саратовская, Волжская, Камская, Воткинская), а также Саяно-Шушенская, Зейская и Бурейская ГЭС. Расчёт и анализ климатической информации проводился по гидрологическим сезонам.

Большинство ГЭС Волжско-Камского каскада имеют сезонный тип регулирования, Рыбинская – многолетний, а Саратовская и Чебоксарская – недельный и суточный соответственно [Елистратов и др., 2014]. Все станции

оснащены поворотно-лопастными гидротурбинами, создание напора плотинно-русловое. На долю 9 рассматриваемых в данной работе ГЭС ВКК приходится 92 % стока Волги и 37.3 ТВт*ч (93 % от всех ГЭС ВКК) выработки электроэнергии.

ГЭС азиатской части России, рассматриваемые в данной работе, не образуют столь многосоставных каскадов как на Волге. Они представляют собой капитальные бетонные сооружения, образующие крупные плотины с небольшими площадями затопления. Саяно-Шушенская ГЭС имеет арочно-гравитационную плотину, Зейская – массивно-контрфорсную, а Бурейская – гравитационную. Среднегодовая выработка электроэнергии составляет 24.0 ТВт*ч для Саяно-Шушенской, 4.9 ТВт*ч для Зейской и 7.1 ТВт*ч для Бурейской ГЭС.

Несмотря на различия в режимах работы гидроэлектростанций, конструктивные особенности, установленную мощность и выработку электроэнергии, для всех ГЭС использовался общий подход в оценках влияния наблюдаемых и ожидаемых климатических изменениях. Однако применение полученных результатов потребителями климатической информации требует дифференцированного подхода в каждом конкретном случае.

3.1. Анализ изменений климатических и гидрологических параметров, значимых для работы ГЭС, на основе данных метеонаблюдений и результатов климатического моделирования

3.1.1. Наблюдаемые изменения климатического и гидрологического режима на водосборах ГЭС

Волжско-Камский каскад ГЭС

Волжско-Камский каскад (ВКК) ГЭС имеет огромное значение для электроэнергетики европейской части России, вырабатывая 35–40 ТВт*ч электричества [Федоров и др., 2017]. Суммарная установленная мощность ГЭС

ВКК 11.7 ГВт, из которых почти 90 % приходится на рассматриваемые в данной работе ГЭС.

Исходными данными для анализа современного климата в бассейне р. Волги послужили суточные данные по температуре воздуха и осадкам за 1966–2012 гг. по метеостанциям: Черныдь (23914), Бабаево (27008), Максатиха (27208), Рыбинск (27225), Ветлуга (27277), Кострома (27333), Переславль-Залесский (27425), Казань (27595), Рязань (27730), Пермь (28224), Уфа (28722), Саратов (34172) и Сорочинск (35011). Гидрологический год для европейской части России принято подразделять три сезона: зимний – с декабря по март, весенний – с апреля по июнь и летне-осенний – с июля по ноябрь.

Анализ климатических данных показал, что, начиная с 1970-х гг. отмечался значительный рост температуры воздуха в январе – марте (на 1.5–3.0°C) на всей территории бассейна Волги. Кроме того, в эти месяцы существенно увеличилась сумма положительных температур и возросла частота оттепелей. Температура воздуха в весенний и летне-осенний периоды имела тенденцию к незначительному росту на всей территории бассейна за исключением южной части. Так же следует отметить, что наибольшие климатические изменения произошли в течение относительно небольшого промежутка времени в конце 1970-х–начале 1980 гг.

Изменение сумм осадков на территории бассейна Волги не столь заметны. Разнонаправленные тренды отмечаются на фоне интенсивных колебаний сумм осадков и объясняют менее 12 % суммарной межгодовой изменчивости. В целом прослеживается тенденция небольшого увеличения осадков на территории ВКК, особенно заметная в северной части водосбора р. Кама, что подтверждено другими исследованиями [Лепихин, 2005].

Среди показателей экстремальности осадков наибольший интерес представляют два индекса, характеризующие противоположные по характеру явления: повторяемость интенсивных осадков (число дней в году с осадками не менее 10 мм) и максимальная за год продолжительность сухих периодов (максимальное число последовательных дней в году с осадками менее 1 мм),

рассчитанные за период 1976–2006 гг. На большей части рассматриваемой территории наблюдается некоторое уменьшение повторяемости интенсивных осадков и увеличение продолжительности сухих периодов. Однако, учитывая большую межгодовую изменчивость годовых экстремумов, трудно говорить о каких-то определенных тенденциях их изменения в последние десятилетия.

Изменения температуры и характера увлажнения на территории ВКК в последние десятилетия повлекли за собой трансформацию водного режима. Сток весеннего половодья уменьшился по объему и максимальному расходу, половодье стало более сглаженным и растянутым по времени. Существенно увеличился как зимний, так и летне-осенний меженный сток [Георгиевский, Шалыгин, 2012]. Таким образом, на преобладающей части бассейна Волги в последние 30 лет произошло значимое увеличение зимнего стока по отношению к предыдущему периоду, в связи с чем, его многолетнюю динамику нельзя рассматривать в рамках гипотезы стационарности межгодовых колебаний стока.

ГЭС Азиатской территории России

Саяно-Шушенская ГЭС. В качестве исходных данных для анализа климатических условий на территории водосбора Саяно-Шушенской ГЭС взяты метеорологические ряды 4 метеостанций: Оленья речка (29974), Кызыл (36096), Сосновка (36099), Тоора-Хем (36103). Анализ температуры воздуха и осадков проводился за период с 1960 по 2015 гг. Гидрологический год на данной территории состоит из 4 сезонов: зимний (декабрь–март), весенний (апрель–июнь), летне-осенний (июль–сентябрь), позднеосенний (октябрь–ноябрь). Рост средней годовой температуры воздуха за весь анализируемый период составил 2–3°C. Температура воздуха, осредненная по гидрологическим сезонам, также имела положительный тренд во все сезоны. Наибольшее увеличение температуры наблюдалось в период с октября по март 3–4°C. С апреля по сентябрь рост составил 1–2°C. Такое изменение температурного режима, привело к увеличению доли жидких осадков в годовой сумме и уменьшению периода снегонакопления. В свою очередь эти факторы вызвали изменения характеристик гидрологического

режима. Происходил переход части твёрдых осадков в жидкие, уменьшение периода снегонакопления и, как следствие, сглаживание осенне-весенних экстремумов стока.

При анализе изменения сумм осадков за последнее 50-летие значимые тренды на водосборе Саяно-Шушенского водохранилища не отмечаются. При этом чётко выделяется их высокая межгодовая изменчивость в тёплый период года, когда в регионе выпадает наибольшее количество осадков. Особенно заметно увеличение межгодовых флуктуаций сумм осадков летне-осеннего сезона с начала 1980-х гг.

По данным наблюдений в верхней части бассейна р. Енисей в течение последних 50 лет отмечалось незначительное ($\approx 5\%$) уменьшение годового стока. Весенний сток так же уменьшился примерно на 5% , а увеличение стока в зимний период составило $10\text{--}20\%$ [Оценка..., 2013]. При этом в последнее 20-летие значимых изменений годового стока на рассматриваемой территории не наблюдалось.

Бурейская и Зейская ГЭС. За период 1966–2015 гг. увеличение среднегодовой температуры воздуха в бассейне рек Зеи и Буреи по данным метеостанций Бомнак (31253), Софийский прииск (31478), Чекунда (31532), Сутур (31538) составило около 2°C и имело положительный тренд во все сезоны. Гидрологический год в этом регионе состоит из 3 сезонов: зимний (декабрь–март), весенне-летний (апрель–сентябрь) и позднеосенний (октябрь–ноябрь). Максимальный рост температуры наблюдался с декабря по март – около 4°C за 50 лет; в октябре–ноябре он составил 2°C , а в тёплый период года значимый тренд отсутствовал.

Анализ изменения годовых сумм осадков, обобщенный по территории рассматриваемого района, выявил отрицательный тренд за последнее 50-летие. Однако учитывая большую межгодовую изменчивость количества осадков, значимость этого тренда невелика. Основное уменьшение количества осадков происходило в период с положительными температурами. В период

отрицательных температур с октября по март, когда суммы осадков малы, их изменение выраженного тренда не имело.

В последнее 20-летие наблюдается положительный тренд сумм осадков. В этот период на территории водосбора водохранилища Зейской ГЭС отмечалась тенденция к увеличению годового объема стока. Такое увеличение можно считать статистически значимым, т.к. на трендовую составляющую в этом регионе приходится около 20 % межгодовой изменчивости. Кроме того, изменение стока в этом районе, как и изменение сумм осадков, подвержено циклическим колебаниям с периодом около 11 лет. Положительный тренд объема стока был обусловлен в основном увеличением стока в весенне-летний период, когда формируется основная часть годового стока.

3.1.2. Ожидаемые изменения климатического и гидрологического режима на водосборах ГЭС

Анализ ожидаемых изменений климатического и гидрологического режима проводился по данным климатического моделирования на середину XXI в. Использовался ансамбль из 10 МОЦАО CMIP5 (моделей общей циркуляции атмосферы и океана) и РКМ ГГО в соответствии с двумя сценариями радиационного внешнего воздействия на глобальный климат: RCP 4.5 (слабое потепление) и RCP8.5 (сильное потепление). Обе модели включали единый блок параметризации основных климатообразующих процессов: перенос солнечной и длинноволновой радиации в облачной атмосфере, крупномасштабную конденсацию водяного пара и конвекцию, турбулентные процессы в пограничном слое и свободной атмосфере, перенос тепла и влаги в деятельном слое почвы на континентах, процессы таяния/накопления снега и др. Таким образом, расчеты по РКМ и глобальной модели различались только степенью детализации свойств подстилающей поверхности и описанием внутренней изменчивости атмосферы.

Целесообразность использования результатов климатического моделирования, ансамблевых подходов и их пригодности для расчетов будущих

изменений климата России неоднократно подтверждалась различными исследованиями [Мелешко и др., 1979, 2008; Школьник и др., 2000, 2006, 2007, 2015; Taylor et. al., 2007; Говоркова и др., 2008; Катцов и др., 2004, 2013; Kattsov et al., 2008; Генихович и др., 2010; Мелешко, Байдин, 2013; Мелешко, Говоркова, 2013; Байдин, Мелешко, 2014].

Достоверность расчетов будущего климата определяется способностью модели воспроизводить современное его состояние, а также различные состояния в прошлом, в соответствии с имеющимися данными наблюдений. Способность моделей воспроизводить среднее состояние климатической системы является важным, но отнюдь не достаточным условием достоверности оценок будущих изменений климата. Если модель воспроизводит различные его состояния, наблюдавшиеся в далеком прошлом (когда внешние воздействия сильно отличались от современных), а также связанные с внешним воздействием тренды и собственную изменчивость, можно считать, что полученные с помощью этой модели оценки будущих изменений климата в результате реализации того или иного сценария внешнего воздействия заслуживают доверия.

Наибольшую успешность при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по мультимодельному ансамблю. Это связано с тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении взаимно компенсируются. Кроме того, такой подход позволяет оценить изменения функций распределения вероятности для разных климатических параметров, т. е. получить намного более полную и достоверную картину климатических изменений по сравнению с одиночным расчетом.

Использование результатов расчетов МОЦАО при изучении регионального климата, его изменчивости и экстремальных явлений часто ограничено пространственной сглаженностью модельных решений. Сглаженность полей основных климатических характеристик обусловлена недостаточным разрешением глобальных моделей и, как следствие, неполным учетом влияния локальных особенностей подстилающей поверхности на расчет региональной

атмосферной циркуляции и приземного климата. Альтернативным источником детализированной информации о региональном климате служат специально разрабатываемые региональные климатические модели (РКМ), основанные на тех же принципах, что и глобальные модели, но имеющие более высокое пространственное разрешение. Региональные модели применяются для ограниченных территорий субконтинентального масштаба с использованием данных об эволюции глобального климата, получаемых из МОЦАО (или МОЦА). Если большинство современных МОЦАО имеют разрешения в диапазоне 100–300 км, то региональные климатические модели 10–50 км. На таких масштабах удастся учесть при моделировании влияние на эволюцию климата большого комплекса мезомасштабных климатических факторов. Все региональные особенности играют положительную роль в модели (с точки зрения уменьшения погрешностей), поскольку они участвуют в формировании местного термического и гидрологического режима на водосборах крупных рек.

В данной работе используются результаты климатического моделирования специально отобранных МОЦАО CMIP5, которые наиболее достоверно воспроизводят гидрологические режимы исследуемых водосборов (по 10 моделей для каждого) в условиях современного климата (период 1980–1999 гг.) (таблица 5).

Оценки стока на двух рассматриваемых водосборах (Волги и Амура), проведенные с помощью РКМ показали, что значения среднегодового стока по единственной для территории России РКМ оказываются сопоставимыми для этих водосборов с оценками ансамбля лучших моделей CMIP5 и данными наблюдений. Так на водосборе Волги среднегодовой сток за период 1980–1999 гг. по модельным расчетам РКМ равен $253 \text{ км}^3/\text{год}$, а на водосборе Амура – $339 \text{ км}^3/\text{год}$, при наблюдаемом стоке $255 \text{ км}^3/\text{год}$ и $312 \text{ км}^3/\text{год}$ соответственно. Что касается водосбора Енисея, то его большая часть расположена на границе двух областей, где оценки обычно подвержены шумовым эффектам и их сопоставление с данными наблюдений обычно не проводится.

Таблица 5.

Модели CMIP5, ранжированные по величине
рассчитанного и наблюдаемого среднегодового стока (км³/год)
на водосборах рек Амур, Волга, Енисей за период 1980–1999 гг.

р. Амур			р. Волга			р. Енисей		
МОЦАО	<i>I</i>	σ	МОЦАО	<i>I</i>	σ	МОЦАО	<i>I</i>	σ
access1-0	256	53	ipsl-cm5b-lr	188	76	noresm1-me	516	28
hadgem2-es	289	260	cnrm-cm5	204	24	hadgem2-cc	528	157
gfdl-esm2g	299	138	miroc5	245	17	hadgem2-es	544	21
Наблюдаемое	312		Наблюдаемое	255		cnrm-cm5	546	36
giss-e2-h	330	8	gfdl-cm3	266	43	noresm1-m	557	65
csiro-mk3-6	331	60	fgoals-s2	269	75	access1-0	568	85
giss-e2-r	337	43	inmcm4	269	74	Наблюдаемое	577	
bcc-csm1-1	338	68	mri-cgcm3	271	27	mri-cgcm3	587	49
gfdl-esm2m	363	39	mpi-esm-lr	277	49	miroc-esm	588	24
mri-cgcm3	377	164	ccsm4	278	87	miroc-esm-chem	587	219
noresm1-me	388	137	ipsl-cm5a-mr	297	92	ccsm4	594	31

Примечания: *I* – среднегодовое значение стока; σ – среднеквадратическое отклонение изменений в ансамбле.

По данным ансамбля из 10 МОЦАО CMIP5 были получены ожидаемые изменения температуры воздуха, осадков и слоя стока на территории России в узлах регулярной сетки 2.5° x 2.5°. Полученные результаты детализировались на основе РКМ ГГО с разрешением 25 x 25 км. Данные в узлах были осреднены по площадям водосборов рассматриваемых ГЭС и рассчитаны годовые и сезонные изменения. Мерой разброса результатов расчетов по моделям, входящим в ансамбль, являются межмодельные стандартные отклонения.

Волжско-Камский каскад ГЭС

Результаты моделирования показали, что наибольший рост среднемесячной температуры воздуха к середине XXI в. ожидается в зимний период (декабрь–март), он может достигнуть 3–4°C. Увеличение температуры в весенний (апрель–июнь) и летне-осенний (июль–ноябрь) периоды несколько меньше – 2.5–3.0°C (таблица 6).

Межмодельные стандартные отклонения изменений температуры воздуха на территории ВКК составляют около 1°C. Так как ожидаемое увеличение

температуры в бассейне Волги превосходит эту величину, их значения можно считать статистически значимыми.

Таблица 6.

Изменение температуры воздуха на водосборах водохранилищ ГЭС
Волжско-Камского каскада к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., (°C)

Водосборы водохранилищ ГЭС ВКК	Гидрологический сезон						Год	
	Зимний (декабрь–март)		Весенний (апрель–июнь)		Летне-осенний (июль–ноябрь)			
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)
Иваньковская	2.9	3.7	2.3	2.9	2.3	3.2	2.6	3.3
Угличская	3.0	3.7	2.4	2.9	2.3	3.2	2.6	3.3
Рыбинская	3.0	3.8	2.4	3.0	2.4	3.2	2.6	3.3
Нижегородская	3.0	3.8	2.5	3.0	2.4	3.2	2.6	3.4
Чебоксарская	3.0	3.8	2.4	3.0	2.4	3.2	2.6	3.3
Жигулевская	3.1	3.8	2.5	3.1	2.4	3.3	2.7	3.4
Саратовская	3.1	3.8	2.5	3.1	2.4	3.2	2.7	3.4
Волгоградская	3.1	3.8	2.5	3.1	2.4	3.2	2.7	3.4
Камская	3.0	3.8	2.6	3.3	2.5	3.3	2.7	3.4
Воткинская	3.0	3.8	2.6	3.3	2.5	3.3	2.7	3.4
Нижекамская	3.1	3.8	2.6	3.2	2.5	3.2	2.7	3.4

Прогнозные оценки изменений количества осадков имеют бóльшую неопределенность, нежели изменения температуры. Межмодельные стандартные отклонения изменения сумм осадков составляют от 5–6 % в зимний и весенний периоды до 8–9 % летом и осенью. Значительная неопределенность изменений осадков на водосборе Волги обусловлена тем, что северная часть рассматриваемой территории находится в зоне относительного увеличения осадков, а южная часть – в зоне уменьшения.

По расчетным данным наибольший рост осадков ожидается зимой (таблица 7). 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 %.

В теплый период года на фоне повышения количества осадков высока вероятность возрастания доли конвективных осадков. Это будет способствовать увеличению повторяемости гроз и ливней. Надо отметить, что большой межмодельный разброс снижает значимость оценок изменения осадков в теплый период года. Наибольшую значимость в этой ситуации заслуживают характеристики за зимний период.

Таблица 7.

Изменение сумм осадков на водосборах водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., (%)

Водосборы водохранилищ ГЭС ВКК	Гидрологический сезон						Год	
	Зимний (декабрь–март)		Весенний (апрель–июнь)		Летне-осенний (июль–ноябрь)			
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)
Иваньковская	13	13	5	6	5	1	7	6
Угличская	13	13	5	7	5	2	7	6
Рыбинская	13	13	5	7	5	2	7	7
Нижегородская	12	13	5	7	5	3	7	7
Чебоксарская	12	13	6	7	5	1	7	6
Жигулевская	13	14	7	8	5	2	8	7
Саратовская	13	14	7	8	5	2	8	7
Волгоградская	13	14	7	8	5	2	8	7
Камская	14	17	8	8	7	6	9	9
Воткинская	14	17	8	9	7	6	9	9
Нижнекамская	14	17	8	9	6	4	9	9

Прогнозные оценки изменений как слоя стока, так и сумм осадков характеризуются значительной неопределенностью. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока к 2041–2060 гг. 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. Как показывают данные

таблицы 5, эта тенденция наиболее выражена на водосборе р. Кама, где увеличение зимнего стока может достигнуть 100 % (таблица 8).

Уменьшение слоя стока в период весеннего половодья к середине XXI в. составит 10–20 %. Изменения слоя стока в летне-осенний период, как и изменения сумм осадков, обладают наибольшей неопределенностью. Они колеблются от увеличения на 1–2 % на водосборе р. Кама до уменьшения на 6–8 % на верхней Волге. Ожидаемые годовые изменения слоя стока, осредненные по площадям водосборов водохранилищ ГЭС ВКК, в основном положительны (таблица 8, рисунок 15). Наибольшее увеличение к середине XXI в. ожидается в бассейне р. Кама (6–7 %). На остальной территории ВКК изменения не значительны (0–2 %).

Здесь и далее картосхемы прогнозов изменения слоя стока составлены по данным ансамбля климатических моделей в узлах регулярной сетки 2.5° x 2.5° методом кригинга.

Таблица 8.

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

Водосбор водохранилища	Гидрологический сезон						Год	
	Зима (декабрь–март)		Весна (апрель–июнь)		Лето-осень (июль–ноябрь)			
	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	Слабое потепление (RCP4.5)	Сильное потепление (RCP8.5)	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
Нижекамская	84	105	-16	-20	-2	-2	4	3

Климатические изменения влияют на изменение не только среди значений метеорологических и гидрологических величин, но и повторяемости, а также интенсивности работы ГЭС и безопасности их функционирования, представляется интересным провести анализ возможных изменений расчётных значений экстремальных расходов воды на ГЭС. С этой целью были выполнены расчеты вероятного изменения объема стока в период весеннего половодья 1 % и 0.01 % обеспеченности на водосборах ГЭС ВКК к середине XXI в. Значения этих изменений, выраженные в процентах по отношению к периоду 1980–1999 гг., представлены в таблице 9. Здесь и далее при расчетах использовались статистические распределения Крицкого-Менкеля, Пирсона III типа, а также в ряде случаев нормальное распределение.

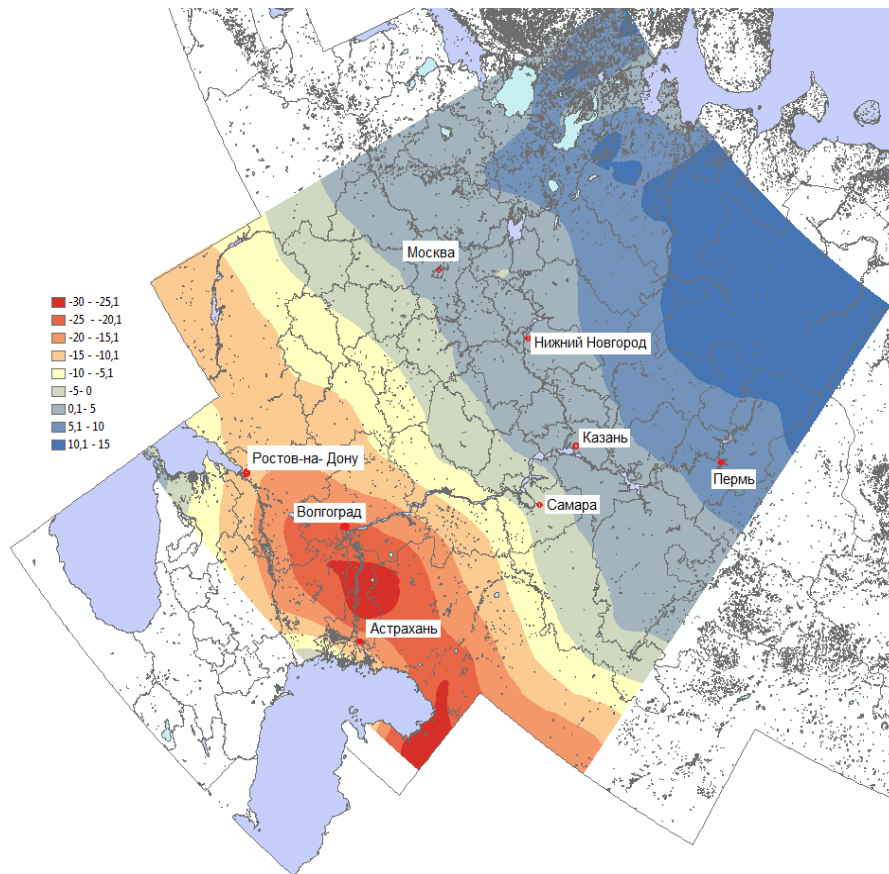


Рисунок 15. Изменение слоя стока на ЕТР к 2041–2060 гг. по сравнению с 1980–1999 гг. по сценарию сильного потепления (RCP 8.5), %.

Таблица 9.

Изменение объема стока в период весеннего половодья (апрель–июнь) 1 % и 0.01 % обеспеченности к середине XXI в. на территории ВКК по отношению к периоду 1980–1999 гг., (%)

Сценарии изменения климата	Обеспеченность	ГЭС								
		Угличская	Рыбинская	Нижегородская	Чебоксарская	Жигулевская	Саратовская	Волгоградская	Камская	Воткинская
Слабое потепление (RCP4.5)	1 %	5	4	7	8	7	-2	-4	2	2
	0.01 %	4	3	8	8	6	-3	-5	4	5
Сильное потепление (RCP8.5)	1 %	5	3	5	4	4	-4	-5	3	4
	0.01 %	6	4	6	4	3	-5	-6	2	3

Следует отметить, что оценки объема стока, полученные по результатам моделирования, имеют несколько меньшую межгодовую изменчивость, чем наблюдаемые данные. Поэтому представленные значения можно рассматривать как ориентировочную нижнюю границу возможных изменений объемов весеннего половодья редкой повторяемости. Из полученных результатов (таблица 9) следует, что почти для всех водосборных бассейнов ГЭС ВКК, за исключением Саратовской и Волгоградской, прогнозируется увеличение объема стока редкой повторяемости в период весеннего половодья. Этот вывод не противоречит данным таблицы 7, которые демонстрируют уменьшение среднего объема стока в весенний период. Наблюдаемое сейчас и ожидаемое в будущем изменение климата приводит к увеличению межгодовой изменчивости метеорологических величин даже при наличии трендов уменьшения средних значений.

ГЭС Азиатской территории России

Саяно-Шушенская ГЭС. По данным ансамбля климатических моделей в бассейне верхнего течения р. Енисей ожидается увеличение температуры воздуха практически во все сезоны года. К середине XXI в. оно может составить в среднем 2.5–3.0°C по отношению к 1980–1999 гг. Наибольшее увеличение сумм

осадков ожидается в зимний и поздне-осенний сезоны и может достигнуть 17–20 %, весной – 9–12 %, а 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. (таблица 10). Весной эта характеристика практически не изменится, а летом ожидается уменьшение (≈ 8 %); суммарно за год вероятно возрастание на 5–8 %.

Таблица 10.
Изменение слоя стока на водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС
по гидрологическим сезонам к середине XXI в.
по отношению к 1980–1999 гг., (%)

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

Пространственное распределение данного показателя характеризуется чередованием областей повышения и понижения стока (рисунок 16). Однако в целом можно ожидать некоторого возрастания притока воды к водохранилищу Саяно-Шушенской ГЭС.

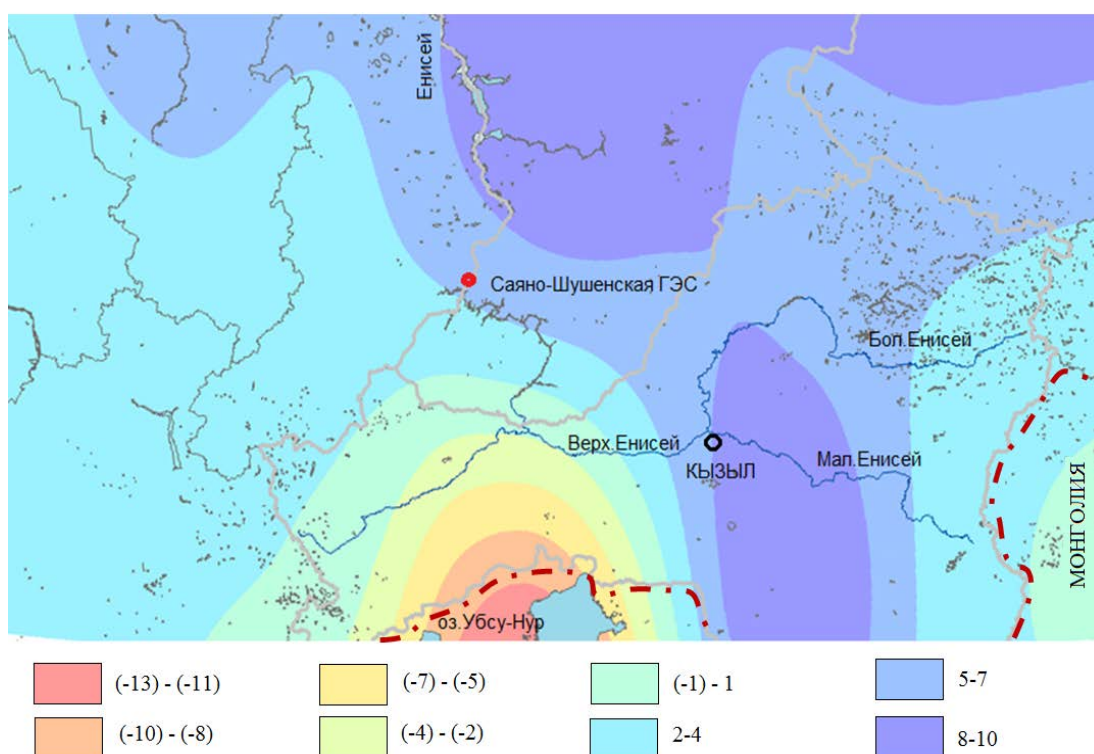


Рисунок 16. Изменения годового слоя стока в верхнем течении Енисея по сценарию сильного потепления (RCP8.5) к середине XXI в. по отношению к 1980–1999 гг., (%).

К середине XXI в. в верхнем течении р. Енисей ожидается увеличение стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в период половодья (таблица 11). Возрастание этого показателя возможно на 20–30 %.

Таблица 11.
Изменения объема стока в период весеннего половодья (апрель–июнь) 1 % и 0.01 % обеспеченности к середине XXI в. на территории водосбора водохранилища СШ ГЭС. по отношению к периоду 1980–1999 гг., (%)

Обеспеченность, %	Сценарий радиационного воздействия	
	слабое потепление (RCP4.5)	сильное потепление (RCP8.5)
1	30	26
0.01	27	22

На основе полученных данных можно сделать вывод об ожидаемом росте межгодовой изменчивости слоя стока на водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС.

Бурейская и Зейская ГЭС. Наибольший рост среднемесячных температур воздуха к середине XXI в. в бассейне р. Амур ожидается в зимний и осенний периоды, он может составить около 3–4°C. Увеличение среднемесячных температур в весенне-летний период несколько меньше – 2–3°C. Прогнозные оценки изменения количества осадков имеют бóльшую неопределенность, чем изменения температуры. Межмодельные стандартные отклонения изменения сумм осадков в этом регионе составляют от 5–6 % в зимний и весенний периоды до 8–9 % летом и осенью. По расчетным данным наибольший рост осадков ожидается зимой и осенью. К середине XXI в. по сценарию сильного потепления он может достигнуть 18 % на водосборе р. Буря и 25 % – на р. Зей. В весенний и летний период эти значения составят соответственно 9 % и 11 %. В теплый период года на фоне возрастания количества осадков будет возрастать доля конвективных осадков. Это означает, что вероятно увеличение повторяемости гроз и ливней.

Прогнозные оценки изменений слоя стока, так же характеризуются значительной неопределенностью. Межмодельные стандартные отклонения годового слоя стока в этом районе составляют 10 %.

Прогнозируемое по всем климатическим сценариям дальнейшее повышение зимних температур воздуха, вероятно, обеспечит увеличение зимнего притока воды в водохранилища Бурейской и Зейской ГЭС. По результатам моделирования прогнозируется увеличение слоя стока в зимний и особенно осенний периоды к середине XXI в. (таблица 12). На водосборе р. Буря увеличение стока может достигнуть 40 %, а на водосборе р. Зей – более 50 %. В весенне-летний период увеличение стока не столь значительно, оно составит 3–5 % и 11–15 % соответственно. Среднегодовое увеличение слоя стока к середине XXI в., вероятно, составит 9–10 % на водосборе р. Буря и 9–13 % на водосборе р. Зей.

Таблица 12.

Изменение слоя стока на водосборах водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС по гидрологическим сезонам к середине XXI в. по отношению к 1980–1999 гг., (%)

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

При пространственном анализе данного показателя видно, что в области ожидаемого повышения годового слоя стока находится практически вся территория бассейнов рек Зеи и Буреи (рисунок 17).

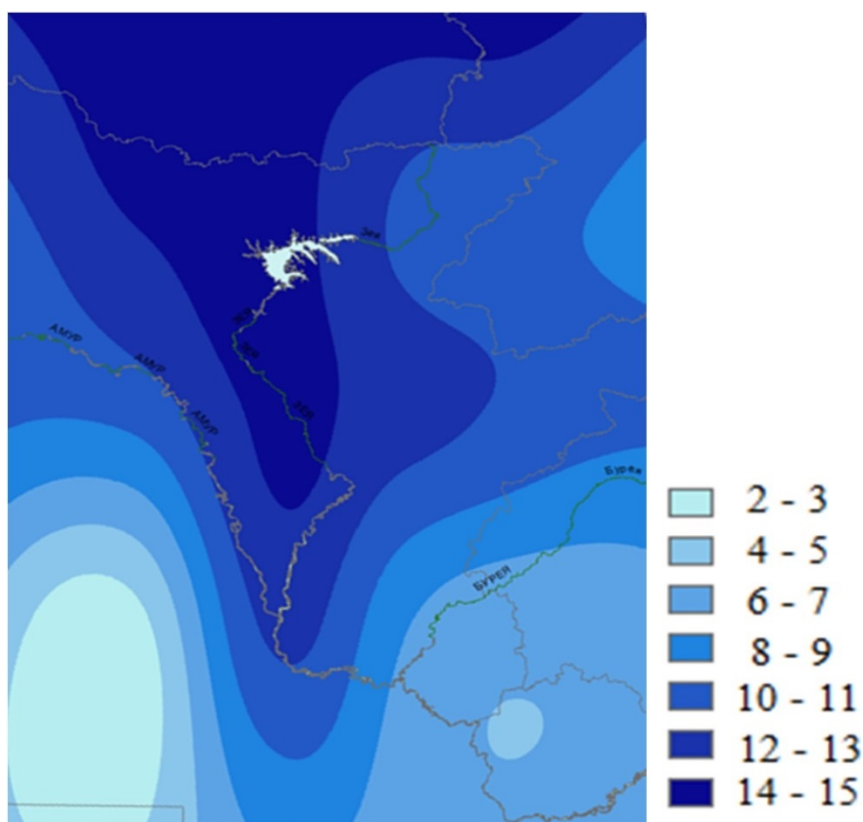


Рисунок 17. Изменения годового слоя стока в бассейнах рек Зеи и Буреи по сценарию сильного потепления (RCP 8.5) к середине XXI в. по отношению к 1980–1999 гг. (%).

Для бассейна р. Амур наибольший практический интерес представляют оценки изменений слоя стока в многоводный период года. В этой связи были построены карты-схемы изменения среднего слоя стока в период весенне-летнего половодья (с апреля по сентябрь) на середину XXI в. по сценариям слабого и сильного потепления (рисунок 18, 19).

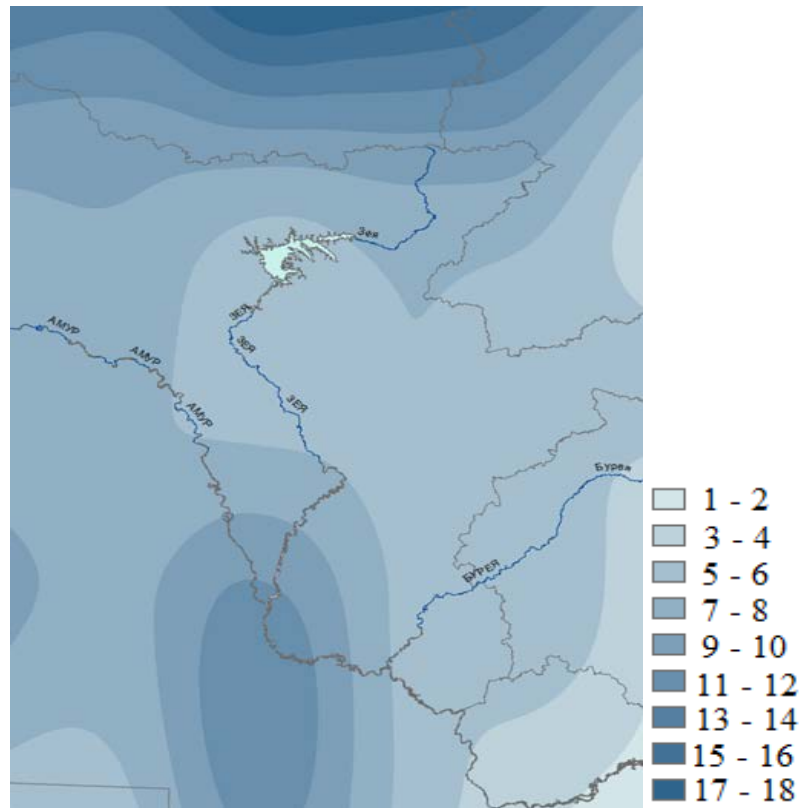


Рисунок 18. Изменение слоя стока (%) в бассейнах рек Зеи и Буреи в период весенне-летнего половодья (апрель–сентябрь) к середине XXI в. по сценарию слабого потепления (RCP4.5) по отношению к периоду 1980–1999 гг.

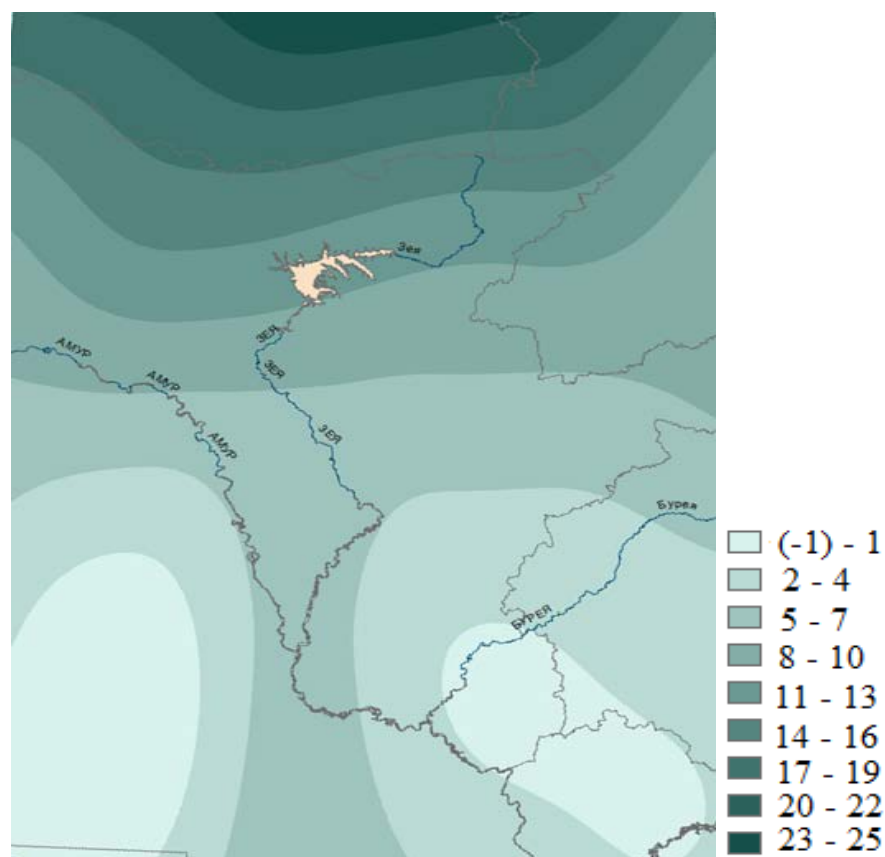


Рисунок 19. Изменение слоя стока (%) в бассейнах рек Зеи и Буреи в период весенне-летнего половодья (апрель–сентябрь) к середине XXI в. по сценарию сильного потепления (RCP8.5) по отношению к периоду 1980–1999 гг.

Полученные данные по изменению слоя стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в период весенне-летнего половодья свидетельствуют о возможном значительном увеличении слоя стока на водосборах водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС к середине XXI в. (таблица 13).

Таблица 13.

Изменение слоя стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в период весенне-летнего половодья на водосборах водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС к 2041–2060 гг. по отношению к 1980–1999 гг., (%)

ГЭС	Слабое потепление (RCP4.5)		Сильное потепление (RCP8.5)	
	1 %	0.01 %	1 %	0.01 %
Зейская	125	138	145	152
Бурейская	94	103	132	149

Полученные расчёты говорят о возможном значительном возрастании межгодовой изменчивости гидрологических характеристик в бассейне р. Амур

к середине XXI в. При этом, наряду с увеличением максимального объема стока, вероятно и уменьшение минимального.

Для уточнения воздействия ожидаемых климатических изменений на функционирование ГЭС следующим этапом работы стал расчёт стока в створах всех исследуемых электростанций. Прогнозные оценки основаны на данных суточного моделирования РКМ ГГО по сценарию сильно потепления (RCP8.5). Для расчёта речного стока использовалась гидрологическая модель маршрутизации стока на речной сети CaMa-Flood [Yamazaki et al., 2011, 2014; Hirabayashi et al., 2013], входной информацией для которой служит избыток влаги, рассчитанный в каждой ячейке сетки региональной модели за каждые сутки [Shkolnik et. al., 2018]. По данным о расходе воды в речных руслах было получено относительное изменение годового объема стока в нижних бьефах исследуемых ГЭС для периода 2050–2059 гг. по отношению к базовому периоду 1990-1999 гг. (таблица 14).

Таблица 14.

Изменение (%) годового объема стока в нижнем бьефе ГЭС для периода 2050–2059 гг. по отношению к периоду 1990–1999 гг. по сценарию RCP8.5

ГЭС	Угличская	Рыбинская	Нижегородская	Чебоксарская	Жигулевская	Саратовская	Волжская	Камская	Воткинская	Саяно-Шушенская	Зейская
Среднее изменение годового объема стока	10.5	14.2	12.8	11.3	3.5	3.6	3.7	5.1	4.1	23.2	14.6
Стандартное отклонение	12.9	13.8	13.5	12.3	10.0	9.9	9.8	9.5	10.1	15.7	14.4

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения изменений индексов, превышающие или равные стандартному отклонению (отношение сигнала к шуму превышает 1).

Из полученных расчетов следует, что на всех рассматриваемых ГЭС ожидается возрастание годового объема стока, наиболее значимое на азиатской территории России. Однако, как показывает величина стандартного отклонения оценок в ансамбле, характеризующего степень неопределенности климатического прогноза на территории водосбора водохранилища конкретной ГЭС,

неопределенность этих изменений достаточно высока. Отношение сигнала к шуму для изменения объема стока оказываются большими единицы только для Саяно-Шушенской, Зейской и Рыбинской ГЭС.

Значительный практический интерес для функционирования объектов гидроэнергетики представляет оценка возможных изменений объема стока редкой повторяемости. По аналогии с исследованием [Shkolnik et al., 2018] проведена оценка ожидаемого к середине XXI в. изменения месячных расходов воды 1 % обеспеченности на рассматриваемых ГЭС (таблица 15).

Таблица 15.

Изменение (%) расходов воды 1 % обеспеченности на ГЭС для периода 2050–2059 гг. по отношению к периоду 1990–1999 гг. по сценарию RCP8.5

ГЭС	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Угличская	197	208	48	15	-10	-16	9	-4	6	5	12	40
Рыбинская	36	106	45	5	-1	-6	-1	-12	1	3	3	28
Нижегородская	25	66	93	14	4	1	-1	-15	-1	4	11	27
Чебоксарская	52	139	98	8	-13	-1	11	-13	-7	11	19	47
Жигулевская	33	37	128	17	1	-11	-7	-10	-13	3	21	49
Саратовская	37	31	120	22	1	-10	-8	-10	-14	1	19	45
Волжская	37	28	76	36	3	-10	-8	-9	-13	-3	14	38
Камская	36	24	107	35	9	1	-4	-6	-10	1	16	42
Воткинская	39	21	83	38	17	10	-4	-6	-13	-4	13	35
Саяно-Шушенская	67	80	70	10	12	8	0	14	21	27	59	63
Зейская	11	10	15	41	9	21	8	0	19	20	15	11

Результаты моделирования показывают, что на водосборах ГЭС Волжско-Камского каскада можно ожидать наиболее заметного увеличения экстремальных расходов воды в осенне-зимний период. На водосборах ГЭС, расположенных в Азиатской части страны, вероятно возрастание расходов воды 1 % обеспеченности практически во все месяцы года. Заметим, что на одном и том же каскаде ГЭС (Волжском) прогнозируемые изменения экстремальных расходов могут существенно различаться (до 2 раз).

В силу взаимного влияния нескольких ГЭС в рамках одного каскада из-за сглаживающего влияния водохранилищ на колебания расходов, оценка ожидаемого воздействия изменений гидрологических экстремумов на

функционирование каждой отдельной станции представляется затруднительной. Для оценки такого воздействия, по-видимому, целесообразно подключение модельных систем, позволяющих выполнить количественную оценку влияния водохранилищ на динамику речного стока.

Для выбора оптимального режима работы гидроэлектростанции необходима информация о внутригодовом распределении объема стока. Наблюдаемые и ожидаемые в будущем изменения климатических параметров могут оказать ощутимое влияние на распределение стока в гидрологические сезоны (таблица 16).

Полученные расчёты прогнозируют значимый рост зимнего стока к середине XXI в. на водосборах водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада. На водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС оказывается значимым увеличение как зимнего, так и осеннего стока. Ожидаемые изменения объема стока в другие сезоны года, а также во все гидрологические сезоны на водосборе водохранилища Зейской ГЭС характеризуются значительной степенью неопределенности, т.к. величина стандартного отклонения превышает величину самих изменений.

Выполненный анализ наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI в. климатических изменений на водосборах водохранилищ крупных ГЭС России показал, что практически для всех рассматриваемых ГЭС ожидается увеличение притока воды к водохранилищам к середине XXI в., что теоретически может способствовать увеличению выработки электроэнергии. Кроме того, наблюдаемая тенденция к увеличению стока в холодный период года, обусловленная возрастанием доли жидких осадков и частоты оттепелей в связи с ростом температуры воздуха, приводит к выравниванию годового хода слоя стока. Этот фактор также способствует оптимизации режима работы ГЭС. К негативным последствиям климатических изменений для гидроэнергетики можно отнести рост межгодовой изменчивости гидрологических характеристик. Следовательно, вероятно значительное увеличение слоя стока редкой обеспеченности особенно

в дальневосточном регионе. Уточнение таких оценок требует привлечения информации высокого пространственного и временного разрешения, которое может быть обеспечено следующими поколениями глобальных и региональных климатических моделей.

Таблица 16.

Среднее изменение (%) объема стока за гидрологические сезоны на период 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг., по сценарию RCP 8.5

Гидрологи- ческий сезон	Волжско-Камский каскад ГЭС									
	Характерис- тика	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								

Примечания: ΔI – средние по ансамблю изменения объема стока к 2050–2059 гг. по сравнению с 1990–1999 гг.; σ – среднеквадратическое отклонение. Жирным шрифтом отмечены значения изменений индексов, превышающие или равные стандартному отклонению изменений (отношение сигнала к шуму превышает 1).

3.2. Прогнозные оценки эффективности работы ГЭС с учетом климатических изменений

На основе полученных прогнозных данных по изменению стока для рассматриваемых территорий проведена оценка потенциальных изменений выработки электроэнергии.

Расчёты по прогнозу выработки выполнены на основе полученных с участием автора статистических зависимостей за 30 летний период (1982-2011 гг.) по выработке электроэнергии (Э) на ГЭС от объема стока (W) (таблица 17) [Сидоренко, Алимйрзоев, 2014; Тюсов и др., 2017]. Эти расчёты 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 (коэффициент корреляции 0.66–0.96). Наиболее слабая корреляционная связь зафиксирована для Чебоксарской ГЭС (коэффициент корреляции равен 0.66), которая работает на пониженных отметках. Необходимо отметить, что представленные зависимости имеют смысл только в пределах существующих эксплуатационных режимов конкретных ГЭС [Масликов, Сидоренко, 2013]. Бурейская ГЭС еще не вышла на проектный уровень выработки и использование для прогноза статистических зависимостей не является корректным. Ориентировочные оценки будущей возможной выработки энергии были сделаны для проектной выработки.

Таблица 17.

Статистические зависимости выработки электроэнергии на рассматриваемых ГЭС и объема стока в нижнем бьефе станции

ГЭС	Среднегодовая выработка ЭЭ за 1982–2011 гг., ГВт*ч	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Угличская	267.6	$\text{Э} = 16.92 \cdot W + 60.7$	0.915

Рыбинская	1027.0	$\Theta = 30.58*W+34.4$	0.973
Нижегородская	1682.8	$\Theta = 22.91*W+477.4$	0.945
Чебоксарская	2215.2	$\Theta = 8.69*W+1245$	0.655
Жигулевская	10588.0	$\Theta = 29.09*W+3126$	0.866
Саратовская	5830.0	$\Theta = 11.74*W+2818.4$	0.874
Волжская	12124.0	$\Theta = 28.97*W+4643.3$	0.931
Камская	1937.7	$\Theta = 22.48*W+671$	0.777
Воткинская	2632.8	$\Theta = 36.85*W+515$	0.957
Саяно-Шушенская	21041.0	$\Theta = 351.4*W+5223$	0.914
Зейская	4851.0	$\Theta = 78.46*W+2882$	0.690
Бурейская	7100.0	$\Theta = 7100*W/W_0$	-

Наличие зависимости между выработкой электроэнергии на ГЭС и характеристиками стока позволило использовать регрессионные математические модели для прогнозных оценок выработки электроэнергии ГЭС в зависимости от водности, определяемой сценариями возможных климатических изменений [Акентьева и др., 2014].

На основе статистических зависимостей выработки (таблица 17), проведен расчёт относительного изменения выработки электроэнергии на рассматриваемых ГЭС к середине XXI в. (таблица 18).

Таблица 18.

Изменение (%) годовой выработки электроэнергии на ГЭС для периода 2050–2059 гг. по отношению к периоду 1990–1999 гг. по сценарию RCP 8.5

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

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения изменений индексов, превышающие или равные стандартному отклонению (отношение сигнала к шуму превышает 1).

На основании полученных расчётов 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. На ГЭС Волжко-Камского каскада прогнозируемое изменение выработки в среднем по ансамблю оказывается меньше величины стандартного отклонения, по крайней мере, на рассматриваемую перспективу (до середины века) вследствие сильного влияния климатической изменчивости на разброс оценок в ансамбле. По-видимому, в более отдаленной перспективе (к концу XXI в.), когда эффект глобального потепления (сигнал) в силу увеличения радиационного воздействия должен быть большим, чем в середине века, можно ожидать роста отношения сигнала к шуму для большинства регионов.

Таким образом, ожидаемые к середине XXI в. изменения потенциала гидроэнергетических ресурсов в целом благоприятны для дальнейшего развития гидроэнергетики на большей части территории страны. Однако надо отметить, что представленные оценки получены только с учетом ожидаемого изменения годового притока речных вод в водохранилища. При этом на выработку электроэнергии ГЭС, наряду с общей водностью воздействуют и другие факторы. Так, отмечаемая в настоящее время тенденция к увеличению стока в холодный период года, обусловленная возрастанием доли жидких осадков и частоты оттепелей в связи с ростом температуры воздуха, приводит к выравниванию внутригодового распределения стока. Например, на водосборе Волжской ГЭС к середине XXI в. ожидается увеличение стока в зимний период (декабрь–март) почти на 50 %. При этом весенний сток (апрель–июнь) уменьшится примерно на 20 %, а годовой сток практически не изменится. Выравнивание годового хода стока способствует оптимизации режимов работы ГЭС, так как в зимнее время возрастают бытовые нагрузки на энергетические системы страны. Однако возрастание зимнего стока требует пересмотра режимов работы отдельных водохранилищ и каскадов для минимизации возможных неблагоприятных экологических и социальных последствий (затопление и подтопление населенных пунктов, увеличение длины полыньи в нижних бьефах, что вызовет ухудшение климатических условий в береговой зоне – увеличение влажности воздуха

и гололедных отложений, повторяемости туманов, ухудшение видимости и т.п.) [Малик, 2005].

Одним из основных негативных последствий климатических изменений для гидроэнергетики является рост межгодовой изменчивости гидрологических характеристик. Следовательно, вероятно увеличение объема стока редкой обеспеченности. Так, например, почти для всех ГЭС ВКК к середине XXI в. ожидается увеличение объема стока редкой обеспеченности (1 % и 0.01 %) в период весеннего половодья на 5–9 %. Эта тенденция не противоречит данным, демонстрирующим уменьшение среднего объема стока в весенний период. Наблюдаемое сейчас и ожидаемое в будущем изменение климата приводит к увеличению значений редкой обеспеченности метеорологических и гидрологических величин даже при наличии трендов уменьшения средних величин. На водосборе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС увеличение объема стока редкой обеспеченности может достигнуть 20–30 %, а на водосборах водохранилищ Бурейской и Зейской ГЭС – порядка 100 %.

В связи с этим необходимо учесть полученные данные 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.

Глава 4. Предложения по адаптации атомной, тепловой и гидроэнергетики к наблюдаемым и ожидаемым в будущем климатическим изменениям

Высокая уязвимость энергетической инфраструктуры к изменениям окружающей среды обусловлена, главным образом, ее длительным сроком службы, особенно в случаях, когда на этапе проектирования не учитывались воздействия, связанные с возможными климатическими изменениями. Долгосрочная инфраструктура, такая как АЭС и ГЭС, как правило, сложнее адаптируется к изменениям климата, тогда как объекты с более коротким сроком службы (например, многие агрегаты ВИЭ) могут быть заменены с меньшими затратами в связи с изменившимися условиями среды.

Рекомендации по разработке адаптации энергетической отрасли к изменению и изменчивости климата рассматриваются во многих работах [Клименко, Терёшин, 2010; Методы..., 2012; Второй..., 2014; МГЭИК, 2014; Экстремальные..., 2014]. Однако они в основном имеют общий характер и не касаются конкретных особенностей производства энергии на электростанциях различных типов и расположенных в разных регионах страны. В этой главе детально сформулированы разработанные различными авторами предложения по адаптации для широкого спектра систем производства электроэнергии. Эти предложения основаны на результатах анализа нормативно-правовой базы и климатической информации, полученных в ходе данного диссертационного исследования. И могут быть применены для исследованных в данной работе объектов электроэнергетики России в условиях меняющегося климата.

4.1. Предложения по адаптации атомной и тепловой энергетики

Наблюдаемые и ожидаемые в будущем изменения климатических характеристик создают риски для устойчивого функционирования 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 включает модернизацию и замену существующих систем электроснабжения, интеграцию энергоэффективных инфраструктур и технологий. Такой адаптационный подход детально разработан и предложен лишь для Москвы [Как разработать..., 2017]. На основе данной методики и полученных в данном диссертационном исследовании результатов сформулированы ключевые направления по снижению уязвимости систем электроснабжения в тепловой и атомной электроэнергетике (таблица 19).

Таблица 19.

Основные меры по адаптации системы энергоснабжения
и обеспечению ее надежности

Основные направления	Мероприятия 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 (smartgrid)
	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 конструирования сетей для повышения их пропускной способности	Выполнение низковольтных линий изолированными проводами, более устойчивыми к природным катаклизмам
	Применение сверхпроводящих кабелей
	Применение высокотемпературных проводов для воздушных линий

Таблица 19. Продолжение

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

К технологической адаптации можно также отнести оптимальный выбор технологий для снижения уязвимости энергетических объектов. Так, например, уязвимость электростанций к изменению и изменчивости климата может быть значительно уменьшена при правильно выбранном типе используемой системы охлаждения АЭС и ТЭС. [Маркович, Кох, 2014] моделировали прогнозы спроса и обеспеченности электроэнергетической отрасли водными ресурсами для бассейна р. Эльба, в центральной Европе. Их результаты показывают, что электростанции с замкнутыми системами охлаждения менее чувствительны к изменениям температуры подаваемой воды, чем прямоточные системы, т.к. увеличение температуры окружающей среды на несколько градусов не оказывает существенного влияния на объем воды, требуемый для замкнутых систем охлаждения. При этом в летний период объем воды, необходимый для прямоточных систем, может возрасти на 30 %. Для повышения устойчивости АЭС

в наиболее потенциально опасных районах следует также подготовить резервные системы охлаждения (например, дополнительные резервуары воды и т.п.).

При выборе систем охлаждения важно избегать стандартных решений, которые не всегда экономически оправданны. Примером могут послужить «сухие» градирни [Калатузов, 2012]. Массовое применение этой внешне привлекательной технологии имеет свои скрытые угрозы, достаточно сказать, что для испарительных градирен теоретическим пределом охлаждения является температура мокрого термометра, для сухих градирен – сухого. Разница в значениях теоретических пределов превышает 7°C с соответствующими негативными последствиями недобора мощности, увеличенных выбросов газов. Основным аргументом по их массовому применению является отсутствие видимого факела пара, который, безусловно, не украшает пейзаж, но является результатом самого эффективного способа охлаждения технической воды в атмосферных условиях.

Необходимо также отметить, что функциональная уязвимость систем энергоснабжения от погодно-климатических воздействий является причиной и экономической уязвимости (таблица 20) [Как разработать..., 2017].

Таблица 20.

Функциональная и экономическая уязвимость систем энергоснабжения от
погодно-климатических воздействий

Функциональная уязвимость	Экономическая уязвимость
Угроза перерывов в энергоснабжении и снижение его надежности вследствие аварийных ситуаций при производстве и транспортировке	Повышение потерь энергии при транспортировке и распределении свыше нормативного уровня
Угроза снижения энергетической без-опасности ТЭК в условиях аномального температурного режима	Снижение энергетической эффективности производителей энергии, в том числе за счет нерасчетных режимов работы
Рост потерь и аварийных ситуаций с ростом электрических (тепловых) нагрузок	Убыточность производства энергии вследствие повышения себестоимости
Угроза неспособности поставить энергоресурсы в необходимом потребителю объеме, в соответствии с его графиком потребления	Угроза снижения выручки из-за оплаты отклонений от торгового графика на оптовом рынке электроэнергии

Учитывая эту зависимость, при внедрении новых технологий необходимо проводить детальные экономические оценки затрат и получаемых выгод от инноваций.

При разработке методов технологической адаптации необходимо принимать во внимание структуру и динамику потребления энергоносителей, учитывая, что ТЭС и АЭС предоставляют потребителям как тепловую, так и электрическую энергию. Суммарный отпуск тепла от ТЭС за последние 20 лет сократился в России в 1.5 раза [Гашо и др., 2015], а отпуск электроэнергии при этом постоянно возрастает. Прежде жилищный фонд потреблял около 6–7 Гкал тепла и 550–600 кВт*ч электричества на человека в год. В целом сегодня ЖКХ городов и городских поселений потребляет меньше тепла (4.5–5.5 Гкал на человека в год) и больше электричества (850–950 кВт*ч на человека в год) [Гашо и др., 2015]. Учитывая ожидаемые климатические изменения, можно предполагать, что теплопотребление еще упадет примерно до уровня 4 Гкал, а электропотребление значительно вырастет. При этом суммарное потребление топлива населением в быту почти не растет и держится на уровне 1.0–1.1 т у.т. (в средней полосе страны) на человека в год (на эту цифру влияют климат, наличие ТЭЦ и т.п.), а вот структура потребления изменяется. Кроме того, в последнее время существенно меняются параметры наружного воздуха в течение отопительного периода, растет амплитуда их колебаний. Анализ фактических климатических параметров наружного воздуха за последние 15 лет показывает, число градусо-суток отопительного периода, например, для Москвы уменьшилось на 785 (16 %), а для Екатеринбурга на 517 по сравнению с действующими нормами (10 %).

Довольно существенно растут нормативы тепловой защиты, определяемые как общими рамочными нормами актуализированной версии СНиП «Тепловая защита зданий» [СП 50.13330.2012], так и утверждаемыми на региональном уровне территориальными строительными нормами. Таким образом, совокупно, климат и современная тепловая защита дают сокращение потребности в тепловой энергии примерно на 26–37 %.

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 потребления электроэнергии конечными пользователями. Адаптация конечных пользователей может значительно повлиять на уязвимость энергосистем в период тепловых волн, т.к. многие системы электроснабжения сталкиваются с отключением электроэнергии именно из-за повышенного спроса. Так, например, смарт-счетчики могут отмечать потребление энергии ежечасно и позволять пользователю отслеживать его. Эта информация может стимулировать пользователей экономить электроэнергию и снижать собственные затраты, а также обнаруживать неисправное оборудование, которое потребляет значительное количество электроэнергии и исправлять или заменять его.

В настоящее время во многих городах России довольно активно идет работа по капитальному ремонту жилого фонда, в ходе которой реализуется комплекс энергосберегающих мероприятий: модернизация инженерных систем и освещения, реконструкция ограждающих конструкций и замена окон на энергосберегающие, установка систем регулирования теплопотребления. Так, например, в комплексной целевой программе энергосбережения Москвы на 2009–2013 гг. и на перспективу до 2020 г. был заложен комплекс мер на источниках, в сетях и у потребителей, который именно при совместной реализации мер позволяет обеспечить поступательный рост экономики города без существенного наращивания мощности энергоисточников и потребляемого газа [Как разработать..., 2017]. Важно, чтобы политика энергосбережения была целостной и последовательной: от узлов учета к системам мониторинга и оплате по факту, от первичного регулирования к возможности управления спросом и суммарному

радикальному сокращению потерь энергии на всех стадиях технологической цепочки от источника к потребителям.

Институциональная адаптация относится к действиям, предпринимаемым руководителями всех уровней, и развитию межсекторального сотрудничества. Правительства и учреждения на международном, национальном, региональном и местном уровнях анализируют социально-экономические условия при принятии конкретных стратегий и в итоге определяют успех или неудачу адаптации.

На национальном уровне правительства могут устанавливать стандарты эффективности для сектора электроэнергетики, изменять строительные нормы, предоставлять качественную климатическую информацию, разрабатывать планы по управлению чрезвычайными ситуациями.

На региональном и местном уровнях правительства контролируют планы землепользования, которые дают им возможность изменять существующую инфраструктуру, заменять уязвимые системы и выбирать области для новых объектов по выработке электроэнергии.

Одна из важнейших институциональных мер – это диверсификация энергетических систем. Наличие альтернативных способов производства энергии может снизить уязвимость сектора в целом к определенному климатическому воздействию. Поэтому вопросы энергетической безопасности (не только в контексте изменения климата) тесно связаны с уровнем диверсификации энергетической системы. Расширение спектра типов и видов электростанций в составе региональной энергосистемы и использование централизованных и децентрализованных энергоресурсов поможет увеличить доступность системы и ее устойчивость к более изменчивым климатическим условиям.

При подготовке качественной климатической информации с целью обеспечения надежного функционирования АЭС и ТЭС очень важна роль гидрометслужбы. В условиях климатических изменений необходимо также проведение дополнительных гидрометеорологических исследований в районе расположения электростанций. Так, например, в случае регистрации в районе размещения АЭС рекордных значений гидрометеорологических параметров,

входящих в проектные основы, необходимо проводить проверки не превышения проектных значений этих параметров. При выявлении превышений, принятых в проекте значений, следует проанализировать необходимость принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности АЭС. Кроме того, целесообразны следующие мероприятия:

- 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 явлений погоды, прежде всего смерчей, как одного из самых опасных метеорологических ОЯ для генераторов энергии, 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 (например, создание независимых энергоносителей, в том числе на базе ВИЭ).

4.2. Предложения по адаптации гидроэнергетики

В целях адаптации гидроэнергетики к происходящим и ожидаемым в перспективе климатическим изменениям необходимо выполнить количественную оценку влияния климатических изменений на краткосрочные и среднесрочные водно-энергетические режимы работы ГЭС и рекомендуется проведение следующих мероприятий:

- 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 в СНиПы и СТО строительства гидротехнических сооружений изменений, предусматривающих повышение их устойчивости к росту нагрузок при более частых режимах форсировки.

– Действующие правила по использованию водных ресурсов не учитывают происходящие и ожидаемые в будущем перераспределения стока рек между гидрологическими сезонами, в частности, смещение максимума половодья на более ранние сроки. Из-за этого потенциальные возможности по увеличению выработки электроэнергии не могут быть использованы. Кроме того, возникают риски по возникновению опасных чрезвычайных ситуаций. Это делает задачу по актуализации правил использования водными ресурсами особо необходимой.

– Рекомендуются пересмотреть сложившиеся графики работ по техническому обслуживанию узлов и агрегатов из-за сокращения сроков зимней межени и увеличением зимнего стока.

– Так как для большинства ГЭС Волжско-Камского каскада применяется сезонное регулирование стока, то его прогнозируемое внутригодовое перераспределение сильно повлияет на функционирование всего каскада электростанций. С целью создания дополнительной регулирующей емкости ВКК в связи с возможным увеличением стока рек Волга и Кама рекомендуется проведение работ по повышению отметки НПУ водохранилищ Чебоксарской и Нижне-Камской ГЭС до проектных.

– В связи с прогнозируемым увеличением частоты и интенсивности экстремальных паводковых расходов для повышения надежности и безопасности ГЭС Дальнего Востока и защиты территории от наводнения необходима разработка комплексных мероприятий для регулирования паводковых вод за счет строительства дополнительных водосборных сооружений, противопаводковых гидроузлов энергетического и неэнергетического назначения, обвалования территорий, проведения берегозащитных мероприятий, выправления и расчистка русел и т.д.

– Целесообразно проведение подробных исследований влияния на водно-энергетические режимы работы ГЭС происходящих изменений водного режима путем моделирования многолетних рядов составляющих водохозяйственного баланса конкретных водохранилищ при различных климатических сценариях и соответствующих водно-энергетических расчетах по этим рядам.

– Эффективность функционирования гидроэнергетики в условиях климатических изменений определяется не только изменением годового стока в водохранилища ГЭС, но и другими факторами, которые воздействуют как положительно, так и отрицательно, поэтому прогнозирование энергоотдачи ГЭС целесообразно проводить с учетом разработанных климатических и статистических моделей «сток – выработка» на основе ретроспективного анализа фактических режимов работы ГЭС.

В целях экономии водных ресурсов целесообразно:

- максимально возможное распространение систем оборотного водоснабжения в энергетике и промышленности;
- модернизация устаревшей системы орошения, которая подразумевает поступление воды на орошаемые участки по каналам и лоткам открытым способом;
- модернизация систем транспортировки воды в ЖКХ;
- увеличение количества средств учета объемов забираемой воды.

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

Практика показывает, что качественное и своевременное климатическое обслуживание ведет к повышению эффективности и результативности использования водных ресурсов. Свободный доступ к точной и достоверной климатической информации способствует правильному и полноценному проектированию и строительству водных сооружений, обеспечивая, таким образом, сохранность инвестиций.

Заключение

Итогом исследования особенностей функционирования АЭС, ТЭС и крупных ГЭС в условиях меняющегося климата, выполненного в диссертации, являются следующие выводы и результаты:

1. Впервые протестирован и апробирован для анализа влияния изменения климата на безопасность и эффективность работы тепловой и атомной энергетики программный продукт ClimPACT 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.

На основании использования программного продукта ClimPACT выполнен совместный анализ наблюдаемых и ожидаемых к середине XXI в. изменений климатических параметров, отражающих частоту и длительность тепловых волн и засушливых периодов. Полученные результаты говорят о том, что к середине XXI в. в зоне наибольших рисков для бесперебойной и эффективной работы АЭС и ТЭС оказываются Центрально-Черноземный регион и Ростовская область.

Следует отметить, что на юге европейской части России риски для тепловой и атомной энергетики, связанные с высокими температурами воздуха и охлаждающей воды, становятся еще более значимыми из-за увеличения потребления энергии на кондиционирование в летний период.

Усиление этой тенденции к середине XXI в. может привести к уменьшению доступности воды для охлаждения энергоблоков, понижению порогового уровня отключения и увеличению риска возникновения критических ситуаций с энергоснабжением. Актуальным в плане адаптации является модернизация систем охлаждения энергоблоков, эффективно функционирующих в условиях экстремально высокой температуры. Для полноценного извлечения выгод, связанных с потеплением, требуется переход к широкому использованию современных технологий производства энергии в сочетании с комплексной модернизацией системы теплоснабжения и тепловых сетей. Однако при проведении модернизации следует проводить детальные экономические оценки затрат на внедрение инновационного оборудования и получаемых от него выгод. Необходимо также повышение уровня инженерного обеспечения зданий и развитие региональных энергетических систем с учетом увеличения энергопотребления в летний период.

Ожидаемые к середине XXI в. изменения объема стока в целом благоприятны для дальнейшего развития гидроэнергетики на большей части страны. Однако надо отметить, что на выработку электроэнергии ГЭС, наряду с общей водностью воздействуют и другие факторы. Так, существующая в настоящее время тенденция к увеличению стока в холодный период года, обусловленная возрастанием доли жидких осадков и частоты оттепелей в связи

с ростом температуры воздуха, приводит к выравниванию внутригодового распределения стока. Этот процесс также способствует оптимизации режимов работы ГЭС, так как в зимнее время возрастают нагрузки на энергетические системы страны. Отрицательным фактором является увеличение расходов воды 1 % обеспеченности, что может вызвать нештатные ситуации в работе ГЭС и привести к катастрофическим последствиям для населения и инфраструктуры прилегающих районов.

Увеличение максимальных расходов наблюдается в регионах, где максимальный сток определяется дождевыми паводками, прежде всего, на Северном Кавказе, на побережье Черного моря и на Дальнем Востоке. В связи с этим необходимо учесть полученные данные 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.

Водные ресурсы подвергаются многочисленным и взаимосвязанным факторам нагрузки, таким как увеличение численности населения, глобализация сельскохозяйственных рынков, изменение структуры потребления, растущий спрос на энергию и ресурсы и колебание цен на энергоносители и пищевые продукты, которые варьируются в зависимости от региона. В этой связи воздействие изменения климата на водные ресурсы необходимо рассматривать в комплексе, а работа по адаптации должна координироваться с другими водохозяйственными мероприятиями и включаться в общую стратегию.

В настоящее время, несмотря на обширные научные исследования, сохраняется значительная неопределенность в отношении прогнозируемых климатических изменений. Одной из целей Климатической доктрины Российской Федерации является учет и снижение этой неопределенности [Климатическая..., 2009]. Поэтому климатические стратегии и планы должны совершенствоваться по мере уточнения климатических прогнозов, а также по мере изменения тенденций

в экономическом и технологическом развитии систем жизнеобеспечения и отраслей экономики. Потенциал адаптации энергетической отрасли необходимо рассматривать как динамичный показатель, требующий постоянного мониторинга и актуализации с учетом научных, технологических, экономических, социальных и других значимых факторов.

Адаптация должна сочетать подходы «сверху вниз» и «снизу вверх», которые дополняют друг друга и эффективно разрешают противоречия. Для достижения этого важны каналы коммуникации, диалога, обмена информацией и коллективных действий. Общей проблемой при разработке адаптационных стратегий для производства электроэнергии является акцент на краткосрочные меры. Средне- и долгосрочное планирование часто затруднительно из-за ограниченности финансирования и высокой степени неопределенности, связанной со среднесрочными и долгосрочными прогнозами. Тем не менее, необходимо увязывать кратко-, средне- и долгосрочное планирование для гарантии того, что, например, краткосрочные меры не будут противоречить более долгосрочным мерам.

Энергетика одна из немногих отраслей, функционирование и эффективность которой в каждый момент времени зависит от поведения и взаимодействия обеих сторон – источника и потребителя энергии. Поэтому меры по ее адаптации должны совместно разрабатывать сектора, тесно связанные с потреблением энергии и воды. Так, сектора экономики, зависящие от водных ресурсов, такие как сельское хозяйство, ЖКХ, промышленность, должны работать согласованно с электроэнергетическим сектором при использовании воды, особенно во время волн жары. Отрасли, зависящие от электроэнергии, должны сотрудничать с электроэнергетическим сектором в целях повышения энергоэффективности и снижения пикового спроса, чтобы облегчить работу сети в целом и искать возможности для экономического развития без дальнейшего расширения электрических систем.

Литература

1. Акентьева Е.М., Иванова Е.В. Оценка влияния, ожидаемого к середине XXI века изменения климата на потенциал малой гидроэнергетики (на примере Архангельской области) // Труды ГГО, 2010. Вып. 561. С. 115–123.
2. Акентьева Е.М., Сидоренко Г.И., Тюсов Г.А. К оценке влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на гидроэнергетический потенциал регионов России // Труды ГГО, 2014. Вып. 570. С. 95–106.
3. Байдин А.В., Мелешко В.П. Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и рост температуры поверхности океанов // Метеорология и гидрология, 2014. № 6. С. 5–18.
4. Бедняков В.Г., Бугаев Е.Г., Гусельцев А.С., Силаева Л.Ф., Фихиева Л.М. Учёт внешних природных и техногенных воздействий на площадках размещения объектов использования атомной энергии. М.: НТЦ ЯРБ, 2018. 18 с.
5. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / под ред. Д.С. Стребкова – М: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 263 с.
6. Брюхань Ф.Ф., Виноградов А.Ю., Лаврусевич А.А. Мониторинговые гидрометеорологические наблюдения в районе площадок строящихся атомных электростанций // Метеорология и гидрология, 2017. № 11. С. 37–42.
7. Брюхань Ф.Ф., Потапов А.Д. О критериях учета природных воздействий при проектировании объектов использования атомной энергии // Промышленное и гражданское строительство, 2014. №10. С. 86–88.
8. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме – М. 2014. 58 с.

9. Гашо Е.Г., Пузаков В.С., Степанова М.В. Резервы и приоритеты теплоэнергоснабжения российских городов в современных условиях // Материалы открытого семинара Экономика энергетики 26 мая 2015 г. – М.: ИНП РАН. 2015. С. 3–92.
10. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. О комплексировании ансамбля климатических моделей // Труды ГГО, 2010. Вып. 561. С. 28–47.
11. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы. /Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет. 2012. С. 53–86.
12. Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т. В., Школьник И.М. Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология, 2008. №8.С. 5–19.
13. Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Водноэнергетические режимы ГЭС Волжско-Камского каскада // Гидротехническое строительство, 2014. № 11. С. 11–15.
14. Знания о климате как основа для действий: Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания – укрепление возможностей наиболее уязвимых стран // Доклад целевой группы высокого уровня Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания. ВМО №1065, 2011.
15. Инженерные изыскания для проектирования тепловых электрических станций. ВСН 34.72.111-92. Актуализирован 12.02.2016.
16. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС (в 2-х частях) СП 151.13330.2012.
17. Как разработать климатический план города? Опыт Москвы. Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. Климатический форум городов России. М. 2017. 44 с.
18. Калатузов В.А. Натурные исследования градирен и систем технического водоснабжения // Промышленная энергетика, 2014. № 10. С. 25–31.

19. Калатузов В.А. Основные проблемы повышения энергоэффективности ТЭС и АЭС / Доклад на IV Международном энергетическом форуме «Инновации. Инфраструктура. Безопасность». 19 декабря 2012 г., Москва.
20. Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО, 2013. Вып. 569. С. 28–47.
21. Катцов В.М., Мелешко В.П. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенных для оценки будущих изменений климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2004. Т. 40, № 6. С. 647–658.
22. Климатическая доктрина Российской Федерации. 2009.
23. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / под ред. В.В. Елистратова [и др.] – СПб.: Наука, 2010. 235 с.
24. Клименко В.В., Терёшин А.Г. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 г. // Теплоэнергетика, 2010. № 12. С. 38–44.
25. Лепихин А.П. Структура временной изменчивости годового стока рек бассейна р. Камы // Водное хозяйство России, 2005. Т. 7. № 3. С. 277–295.
26. Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности, М.: Наука, 2005. 354 с.
27. Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Анализ водно-энергетических режимов Жигулевской ГЭС и связь выработки электроэнергии со стоком // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура, 2015. № 2 (19). С. 73–80.
28. Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Анализ водно-энергетических режимов работы ГЭС ВолжскоКамского каскада // Пятое Всероссийское совещание гидроэнергетиков. Сильной России – мощную обновленную гидроэнергетику. М., 2013. Расширенные тезисы докладов. СПб., 28–29 ноября 2013. С.411–416.

29. МГЭИК. Изменение климата 2014 г. Воздействия, адаптация и уязвимость. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. 2014. 40 с.
30. Мелешко В.П., Байдин А. В. Реакция климата атмосферы на сокращение площади льда в Арктике и другие внешние воздействия за последние десятилетия // Труды ГГО, 2013. Вып. 568. С. 80–117.
31. Мелешко В.П., Говоркова В.А. Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей CMIP3 и CMIP5 // Труды ГГО, 2013. Вып. 568. С. 26–51.
32. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. Изменения климата России в XXI в. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации – М.: Росгидромет, 2008 г. Т. 1. С. 174–213.
33. Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Школьник И.М., Байдин А.В. Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // Труды ГГО, 2014. Вып. 571. С. 5–87.
34. Мелешко В.П., Шнееров Б.Е., Дмитриева-Арраго Л.Р., Швеиц М.Е. Гидродинамическая трехуровневая модель общей циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология, 1979. № 6. С. 21–32.
35. Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство. Транспорт. СПб.: Росгидромет, 2017. 159 с.
36. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем – М.: Планета, 2012. 512 с.
37. Ницис В.Э. Способ расчета статистических характеристик непрерывной продолжительности температурно-влажностных комплексов // Труды ГГО, 1979. Вып. 425. С. 47–50.

38. Нормы проектирования технологической части ГЭС и ГАЭС. РД 34.20.161. 2013.
39. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций. ВНТП81 М., 1981.
40. Основные требования по составу и объему изысканий и исследований при выборе пункта и площадки. М., Министерство РФ по атомной энергетике, 2000. 121 с.
41. Оценка и прогнозы изменений климата на отдаленную перспективу в зоне водохранилищ ГЭС ОАО «РусГидро» с целью уточнения режимов работы / под ред. Е.М. Акентьевой. Отчёт НИР. СПб, 2013. 74 с.
42. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу / под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева – М.: Д'АРТ: Главная геофизическая обсерватория, 2011. 252 с.
43. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2008. Т. 1–2.
44. Пособие к СНиП 2.04.02-84 Пособие по проектированию градирен. Определение расчетных параметров атмосферного воздуха – М.: Центральный институт типового проектирования, 1989.
45. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. СО 153-34.20.501-2003. М., 2003. 218 с.
46. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7 – М., 2015.
47. Резниковский А.М., Рубинштейн М.И. Оценка влияния глобального потепления климата на гидроэнергетику / Водные ресурсы – М.: Наука, 1995. Т. 22. №5. С. 535–543.
48. Рекомендации по проектированию организации эксплуатации ГЭС и ГАЭС – М., 1990.
49. Рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик / под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 1997.

50. Руководство по водным ресурсам и адаптации к изменению климата – Нью-Йорк, Женева, 2009 С. 129.
51. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики / под ред. д. геогр. н., проф. Н.В. Кобышевой. СПб., 2008. 336 с.
52. Сидоренко Г.И., Алимурзоев А.С. Методика обоснования схемы размещения и параметров гидроэлектростанций с учетом региональных особенностей // Альтернативная энергетика и экология, 2014. № 11 (151). С. 109–115.
53. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2003.
54. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.
55. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
56. СП 90.13330.2012. Электростанции тепловые. Актуализированная редакция СНиП II-58-75.
57. СП 80.13330.2016. Гидротехнические сооружения речные. Актуализированная редакция СНиП 3.07.01-85.
58. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия.
59. СП ТЭС-2007. Свод правил по проектированию тепловых электрических станций. РАО «ЕЭС РОССИИ».
60. СТО 17330282.27.140.003-2008. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. 2008.
61. СТО РусГидро 01.01.78-2012. Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования – М., 2012.
62. Тюсов Г.А., Акентьева Е.М., Павлова Т.В., Школьник И.М. Оценки возможного влияния будущих изменений климата России на функционирование объектов энергетики // Метеорология и гидрология, 2017. № 12. С. 47–57.

63. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005. 148 с.
64. Федоров М.П., Огороков В.Р, Огороков Р.В. Энергетические технологии и мировое экономическое развитие: прошлое, настоящее, будущее – СПб.: Наука, 2010. 412 с.
65. Федоров М.П., Акентьева Е.М., Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Водно-энергетические режимы гидроэлектростанций в условиях климатических изменений / под ред. Ю.С. Васильева – СПб.: СПбГПУ. 2017. 274 с. <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id17-5>.
66. Хайруллин К.Ш. Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации – М., 1997. 587 с.
67. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л., Георгиевский М.В., Голованов О.Ф., Шикломанов А.И. Прогнозные оценки изменений стока на основе климатических сценариев // Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова – СПб: ГГИ, 2008. С. 442–464.
68. Шикломанов И.А., Линз Г. Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство // Метеорология и гидрология, 1991. Вып. 4, С. 51–64.
69. Школьник И.М., Ефимов С.В. Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО, 2015. Вып. 576. С. 201-211.
70. Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине 20 века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология, 2012. № 2. С. 5-23.
71. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Возможные изменения климата на европейской части России к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО // Метеорология и гидрология, 2006. № 3. С. 5–16.
72. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири // Метеорология и гидрология, 2007. № 6. С. 5–17.

73. Школьник И.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. Региональная гидродинамическая модель для исследования климата на территории России // Метеорология и гидрология, 2000. № 4. С. 32–49.
74. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Вавулин С.В., Школьник И.М., Зубов В.А., Гаврилина В.М., Говоркова В.А. Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (Версия MGO-2) // Труды ГГО, 2001. Вып. 550. С. 3-43.
75. Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации: Сб. докл. – М.: Изд-во НИЦ «Планета», 2014. 207 с.
76. Энергетика России: взгляд в будущее (Обосновывающие материалы к Энергетической стратегии России на период до 2030 года). М.: Издательский дом «Энергия», 2010. 616 с.
77. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf.
78. Aivalioti S. Electricity Sector adaptation to heat waves. Sabin Center for Climate Change Law / Columbia Law School Research Paper, 2015. № 14-439. 44 p.
79. Alexander L., Yang H., Perkins S. ClimPact. Indices and software. World Climate Programme. New South Wales University of Technology. 2013.
80. Cleveland W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots // Journal of the American Statistical Association, 1979. Vol. 74, № 368. Pp. 829–836.
81. Ebinger J., W.Vergara. Climate Impacts on Energy Systems. Key Issues for Energy Sector Adaptation. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. 2011. 224 p.
82. Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States // U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.5. 2008.
83. Extreme meteorological events in nuclear power plant siting, excluding tropical cyclones. A Safety Guide. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. 2011.

84. Feeley T.J., Skone T.J., Stiegel G.J., McNemar A., Nemeth M., Schimmoller B., Murphy J.T., Manfredo L. Water: A critical resource in the thermoelectric power industry. *Energy* 33. 2008. Pp. 3–11.
85. Forster H, Lilliestam J. Modeling thermoelectric power generation in view of climate change // *Reg. Environ. Change*, 2010. Vol. 10 (4) Pp. 327–338.
86. Hirabayashi Y., Mahendran R., Koirala S., Konoshima L., Yamazaki D., Watanabe S., Kim H., Kanae S. Global flood risk under climate change // *Nature Climate Change*, 2013. Vol. 3, Is. 9. Pp. 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>.
87. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 2007 (AR4).
88. IPCC: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014. Pp. 1–32.
89. Kattsov V., Govorkova V., Pavlola T., Sporishev P. Arctic river runoff in the context of global warming-projections with state-of-the-art global climate models // *Climate and Cryosphere Newsletter*, 2008. № 11. Pp. 3–15.
90. Klein D.R., Olonscheck M, Walther C, Kropp J.P. Susceptibility of the European electricity sector to climate change // *Energy*, 2013. Vol. 59. Pp. 183–193.
91. Linnerud K., Mideksa T.K., Eskeland G.S. The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply // *The Energy Journal*, 2011. Vol. 32, № 1. Pp. 149–168.
92. Markovic D., Koch M. Long-term variations and temporal scaling of hydroclimatic time series from the German part of the Elbe River basin // *Hydrological Processes*, 2014. Vol. 28, Is. 4. Pp. 2202–2211. <https://doi.org/10.1002/hyp.9783>.
93. Meteorological and Hydrological Aspects of Siting and Operation Nuclear Power Plants // *WMO Technical note*, 1985. № 170. Vol. 1. 160 p.
94. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. *Specific Safety Guide*. No. SSG-18. Vienna, 2011. 172 p.

95. Peterson T.C., Manton M.J. Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2008. № 89. Pp. 1266–1271.
96. Rademaekers K., van der Laan J., Boeve S., Wietze L. Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change. Final Report, Commission of the European Communities – Rotterdam, 2010. 85 p.
97. Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S. Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Climate Dynamics*, 2018. Vol. 50, Is. 1–2. Pp. 215–230. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6>.
98. Steininger K.W., König M., Bednar-Friedl B., Kranzl L., Loibl W., Prettenhaler F. Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 473 p.
99. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. A summary of CMIP5 Experiment design. 2007. Режим доступа: http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_22Jan11_marked.pdf.
100. Totschnig G., Müller A., Hummel M., Hirner R., Nachtnebel H.P., Stanzel P., Schicker I., Formayer H. Climate change impact and resilience in the electricity sector: The example of Austria and Germany // *Energy policy*, 2017. Vol. 103. Pp. 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.019>.
101. Troccoli, A. Weather and climate predictions for the energy sector / *Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry*. NATO Science Series, Springer Academic Publishers. 2010.
102. Van Vliet O., Krey V., McCollum D., Pachauri S., Nagai Y., Rao S., Riahi K. Synergies in the Asian energy system: climate change, energy security, energy access and air pollution // *Energy Economics*, 2012. Vol. 34 (Supplement 3), S. 470–480. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.02.001>.

103. Van Vuuren D.P., Edmonds J.A., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J., Rose S.K. The representative concentration pathways: an overview // *Climate Change*, 2011. Vol. 109. Pp. 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
104. Yamazaki D., Kanae S., Kim H., Oki T. A physically-based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model // *Water Resources Research*, 2011. Vol. 47, Is. 4. W04501. <https://doi.org/10.1029/2010WR009726>.
105. Yamazaki D., Sato T., Kanae S., Hirabayashi Y., Bates P.D. Regional flood dynamics in a bifurcating mega delta simulated in a global river model // *Geophysical Research Letters*, 2014. Vol. 41, Is. 9. Pp. 3127–3135. <https://doi.org/10.1002/2014GL059744>.
106. Zhang X., Hegerl G., Zwiers F. W., Kenyon J. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes // *J. Climate*, 2005. Vol. 18. Pp. 1641–1651.
107. Zhang X., Yang F. *RClimDex (1.0). User Guide* // Climate Research Branch Environment Canada. Downsview, Ontario, Canada. 2004. 23 p.

Приложения

Приложение 1. Значения специализированных климатических индексов CDD, HWD, 5TX5TN, рассчитанные за 1950–2017 гг.

1.1.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Калининградской области.

Год	Метеостанции			
	Советск	Балтийск	Калинин-град	Железно-дорожный
1950	н/д	н/д	23	н/д
1951	н/д	н/д	28	н/д
1952	н/д	н/д	19	н/д
1953	н/д	н/д	27	н/д
1954	н/д	н/д	23	н/д
1955	н/д	н/д	22	н/д
1956	н/д	н/д	26	н/д
1957	н/д	н/д	23	н/д
1958	н/д	н/д	12	н/д
1959	н/д	н/д	21	н/д
1960	21	17	17	н/д
1961	15	26	23	23
1962	23	15	12	18
1963	16	17	16	19
1964	23	н/д	27	19
1965	21	17	22	22
1966	н/д	н/д	18	н/д
1967	13	11	11	14
1968	23	19	18	18
1969	25	30	26	26
1970	20	15	13	16
1971	14	20	15	н/д
1972	31	н/д	31	38
1973	н/д	н/д	22	н/д
1974	29	н/д	31	32
1975	20	26	25	19
1976	н/д	н/д	22	н/д
1977	29	28	28	25
1978	26	26	30	27
1979	19	20	21	19
1980	17	18	17	16
1981	18	20	24	24
1982	25	23	27	23

1983	23	20	19	16
1984	23	24	25	28
1985	15	15	15	11
1986	21	15	20	19
1987	21	14	19	14
1988	15	14	12	29
1989	14	16	15	16
1990	н/д	14	22	20
1991	22	15	15	16
1992	29	28	30	31
1993	18	16	15	16
1994	40	34	35	22
1995	21	35	33	21
1996	15	22	25	16
1997	24	17	21	н/д
1998	21	16	21	17
1999	20	20	20	20
2000	35	32	33	39
2001	13	17	16	20
2002	38	25	21	22
2003	26	25	20	25
2004	11	11	10	15
2005	21	21	16	27
2006	24	18	18	29
2007	21	19	19	20
2008	15	19	17	21
2009	26	37	26	н/д
2010	19	18	19	14
2011	18	27	37	26
2012	18	12	14	18
2013	26	19	18	19
2014	21	20	21	23
2015	25	26	17	23
2016	18	18	17	18
2017	16	н/д	н/д	17

1.1.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Калининградской области.

Год	Метеостанции			
	Советск	Балтийск	Калининград	Железнодорожный
1950	н/д	н/д	4	н/д
1951	н/д	н/д	6	н/д
1952	н/д	н/д	-	н/д
1953	н/д	н/д	4	н/д
1954	н/д	н/д	6	н/д
1955	н/д	н/д	10	н/д
1956	н/д	н/д	5	н/д
1957	н/д	н/д	-	н/д
1958	н/д	н/д	4	н/д
1959	7	5	5	3
1960	-	3	3	3
1961	-	5	3	3
1962	-	-	-	-
1963	7	5	5	7
1964	3	5	4	3
1965	-	4	3	4
1966	4	10	4	6
1967	7	7	11	12
1968	16	16	16	16
1969	6	10	8	6
1970	3	-	3	3
1971	9	3	10	10
1972	6	3	7	6
1973	6	-	-	-
1974	-	-	-	3
1975	6	5	5	4
1976	4	3	4	3
1977	9	8	9	9
1978	4	6	-	-
1979	4	4	4	4
1980	-	3	-	-
1981	3	4	3	3
1982	5	4	5	6

1983	3	3	3	4
1984	-	3	-	-
1985	5	3	4	4
1986	3	4	4	4
1987	-	-	4	3
1988	3	4	3	4
1989	3	7	4	4
1990	-	-	-	3
1991	-	-	3	3
1992	4	3	5	5
1993	4	9	4	3
1994	13	10	13	13
1995	6	3	5	6
1996	4	4	4	7
1997	8	14	14	9
1998	4	5	5	5
1999	5	7	8	9
2000	3	4	3	3
2001	7	7	7	7
2002	8	11	9	9
2003	8	8	9	7
2004	3	5	4	4
2005	6	9	7	7
2006	9	11	7	9
2007	8	5	5	5
2008	4	3	3	5
2009	4	4	3	4
2010	9	15	10	9
2011	5	4	4	4
2012	4	4	4	5
2013	6	6	6	4
2014	13	13	14	12
2015	9	6	6	10
2016	6	10	7	6
2017	н/д	н/д	н/д	3

1.1.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Калининградской области.

Год	Метеостанции			
	Советск	Балтийск	Калининград	Железнодорожный
1950	н/д	н/д	0	н/д
1951	н/д	н/д	0	н/д
1952	н/д	н/д	0	н/д
1953	н/д	н/д	0	н/д
1954	н/д	н/д	0	н/д
1955	н/д	н/д	0	н/д
1956	н/д	н/д	0	н/д
1957	н/д	н/д	0	н/д
1958	н/д	н/д	0	н/д
1959	н/д	н/д	0	н/д
1960	0	0	0	н/д
1961	0	0	0	0
1962	0	0	0	0
1963	0	0	0	0
1964	0	н/д	0	0
1965	0	0	0	0
1966	н/д	н/д	0	н/д
1967	0	0	0	0
1968	0	1	1	1
1969	0	0	0	0
1970	0	0	0	0
1971	0	0	0	0
1972	0	н/д	0	0
1973	н/д	н/д	0	н/д
1974	0	н/д	0	0
1975	0	0	0	0
1976	н/д	н/д	0	н/д
1977	0	0	0	0
1978	0	0	0	0
1979	0	0	0	0
1980	0	0	0	0
1981	0	0	0	0
1982	0	0	0	0

1983	0	0	0	0
1984	0	0	0	0
1985	0	0	0	0
1986	0	0	0	0
1987	0	0	0	0
1988	0	0	0	0
1989	1	0	0	0
1990	н/д	1	1	0
1991	0	0	0	0
1992	0	0	0	0
1993	1	0	0	0
1994	0	0	0	0
1995	1	0	0	0
1996	1	0	0	0
1997	0	0	0	н/д
1998	2	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	1	0	0	0
2001	0	0	0	0
2002	1	2	1	1
2003	1	0	0	0
2004	0	0	0	0
2005	0	0	0	0
2006	1	2	0	1
2007	1	0	0	0
2008	1	0	0	0
2009	0	0	0	0
2010	1	0	0	0
2011	0	0	0	0
2012	0	0	0	0
2013	0	0	0	0
2014	1	1	0	0
2015	1	1	0	0
2016	1	0	0	0
2017	0	н/д	н/д	0

1.2. Специализированные климатические индексы (CDD, HWD, 5TX5TN) по данным метеостанции Санкт-Петербург.

год	CDD	HWD	5TX5TN
1950	14	6	0
1951	19	4	0
1952	13	-	0
1953	20	4	0
1954	17	-	0
1955	25	12	0
1956	24	-	0
1957	15	5	0
1958	25	3	0
1959	19	6	0
1960	17	4	0
1961	21	7	0
1962	21	-	0
1963	42	8	0
1964	22	-	0
1965	23	7	0
1966	14	3	0
1967	19	7	0
1968	20	5	0
1969	19	-	0
1970	17	4	0
1971	15	-	0
1972	24	22	2
1973	24	5	0
1974	21	4	0
1975	15	13	0
1976	25	-	0
1977	16	8	0
1978	24	-	0
1979	20	4	0
1980	28	5	0
1981	18	-	0
1982	13	4	0
1983	15	7	0

1984	22	4	0
1985	14	5	0
1986	18	3	1
1987	22	5	0
1988	18	14	1
1989	15	6	1
1990	19	-	1
1991	20	3	0
1992	28	3	0
1993	33	5	0
1994	25	6	0
1995	21	10	1
1996	30	3	0
1997	23	6	0
1998	21	6	1
1999	24	13	1
2000	16	-	1
2001	17	9	0
2002	14	6	0
2003	14	10	0
2004	18	7	0
2005	14	9	1
2006	27	8	1
2007	14	11	1
2008	22	5	1
2009	20	4	1
2010	19	43	2
2011	22	11	0
2012	28	5	0
2013	20	9	0
2014	23	20	2
2015	20	10	1
2016	19	7	1
2017	14	3	0

1.3.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Центрального района.

Год	Метеостанции			
	Бологое	Максатиха	Переславль-Залесский	Москва (ВДНХ)
1950	н/д	н/д	н/д	23
1951	н/д	н/д	н/д	21
1952	н/д	н/д	н/д	20
1953	н/д	н/д	н/д	25
1954	н/д	н/д	н/д	23
1955	н/д	н/д	н/д	23
1956	н/д	н/д	н/д	23
1957	н/д	н/д	н/д	16
1958	н/д	н/д	н/д	27
1959	н/д	н/д	н/д	17
1960	н/д	19	21	30
1961	н/д	37	25	19
1962	н/д	12	н/д	16
1963	н/д	18	17	23
1964	н/д	16	16	29
1965	н/д	15	16	18
1966	20	17	н/д	13
1967	19	20	н/д	18
1968	12	14	н/д	13
1969	21	22	33	23
1970	14	17	15	12
1971	18	19	18	13
1972	24	38	27	28
1973	21	24	16	19
1974	26	25	24	18
1975	25	18	24	28
1976	13	16	н/д	20
1977	16	19	24	20
1978	17	15	18	25
1979	15	25	н/д	29
1980	21	21	15	21
1981	20	15	29	20
1982	16	18	20	17

1983	14	13	15	15
1984	24	23	24	40
1985	18	10	20	21
1986	27	21	25	25
1987	37	36	27	43
1988	16	13	20	20
1989	12	12	15	10
1990	26	14	22	15
1991	15	13	15	14
1992	15	23	24	22
1993	32	34	26	17
1994	19	19	13	13
1995	17	18	22	16
1996	32	24	35	26
1997	20	20	21	20
1998	15	17	20	15
1999	24	36	33	26
2000	29	20	19	16
2001	15	25	14	16
2002	15	45	32	21
2003	18	19	н/д	23
2004	13	12	13	13
2005	27	27	27	27
2006	22	24	23	22
2007	16	17	17	18
2008	22	16	18	28
2009	18	17	20	23
2010	24	22	24	22
2011	17	16	18	18
2012	10	13	21	18
2013	14	20	22	17
2014	29	29	23	35
2015	16	15	16	15
2016	13	22	19	14
2017	14	16	н/д	16

1.3.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Центрального района.

Год	Метеостанции			
	Бологое	Максатиха	Переславль-Залесский	Москва (ВДНХ)
1950	н/д	н/д	н/д	-
1951	н/д	н/д	н/д	7
1952	н/д	н/д	н/д	4
1953	н/д	н/д	н/д	5
1954	н/д	н/д	н/д	8
1955	н/д	н/д	н/д	9
1956	н/д	н/д	н/д	6
1957	н/д	н/д	н/д	9
1958	н/д	н/д	н/д	4
1959	н/д	3	-	-
1960	н/д	7	6	9
1961	н/д	-	6	6
1962	н/д	-	-	-
1963	н/д	10	-	9
1964	н/д	6	-	3
1965	н/д	4	3	3
1966	н/д	-	3	4
1967	6	6	-	8
1968	12	11	4	13
1969	5	5	5	6
1970	3	4	6	7
1971	-	-	-	3
1972	10	11	9	12
1973	3	-	-	-
1974	4	3	-	4
1975	11	9	4	6
1976	5	5	-	-
1977	6	7	15	15
1978	-	-	-	-
1979	3	3	7	7
1980	3	-	4	3
1981	7	8	11	9
1982	4	3	-	-

1983	3	4	5	4
1984	4	6	4	4
1985	6	5	4	6
1986	-	-	5	4
1987	4	4	-	-
1988	9	10	10	9
1989	4	4	5	3
1990	-	-	-	-
1991	3	3	8	5
1992	5	5	5	4
1993	3	-	-	-
1994	4	4	5	4
1995	11	11	10	15
1996	4	5	5	8
1997	8	8	6	6
1998	6	8	9	8
1999	13	12	7	6
2000	-	-	3	-
2001	9	9	9	10
2002	5	5	7	5
2003	9	7	-	4
2004	3	7	4	6
2005	4	3	3	3
2006	6	6	5	4
2007	8	6	13	15
2008	9	9	6	7
2009	-	-	3	3
2010	43	43	36	45
2011	12	11	9	17
2012	5	4	-	5
2013	10	9	7	11
2014	8	8	6	12
2015	5	5	11	11
2016	8	8	5	11
2017	5	5	н/д	9

1.3.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Центрального района.

Год	Метеостанции			
	Бологое	Максатиха	Переславль-Залесский	Москва (ВДНХ)
1950	н/д	н/д	н/д	0
1951	н/д	н/д	н/д	0
1952	н/д	н/д	н/д	0
1953	н/д	н/д	н/д	0
1954	н/д	н/д	н/д	0
1955	н/д	н/д	н/д	0
1956	н/д	н/д	н/д	0
1957	н/д	н/д	н/д	0
1958	н/д	н/д	н/д	0
1959	н/д	н/д	н/д	0
1960	н/д	0	0	0
1961	н/д	0	0	0
1962	н/д	0	н/д	0
1963	н/д	0	0	0
1964	н/д	0	0	0
1965	н/д	0	0	0
1966	0	0	н/д	0
1967	0	0	н/д	1
1968	0	0	н/д	1
1969	0	0	0	0
1970	0	0	0	0
1971	0	0	0	0
1972	1	0	1	0
1973	0	0	0	0
1974	0	0	0	0
1975	0	0	0	0
1976	0	0	н/д	0
1977	0	0	0	0
1978	0	0	0	0
1979	0	0	0	0
1980	0	0	0	0
1981	0	0	0	0
1982	0	0	0	0

1983	0	0	0	0
1984	0	0	0	0
1985	0	0	0	0
1986	0	0	0	0
1987	0	0	0	0
1988	0	0	0	0
1989	0	0	0	0
1990	0	0	1	0
1991	0	0	0	0
1992	0	0	0	0
1993	0	0	0	0
1994	0	0	0	0
1995	0	0	1	1
1996	0	0	0	1
1997	0	0	0	0
1998	0	0	1	1
1999	0	0	1	0
2000	0	0	1	1
2001	0	0	0	1
2002	0	0	2	0
2003	0	0	н/д	0
2004	0	0	0	0
2005	0	0	0	0
2006	1	1	1	0
2007	1	1	1	2
2008	0	0	0	1
2009	0	0	0	0
2010	1	1	2	2
2011	0	0	0	0
2012	0	0	0	0
2013	1	0	0	1
2014	0	0	2	0
2015	1	1	1	1
2016	0	0	0	0
2017	0	0	н/д	1

1.4.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Центрально-Черноземного района.

Год	Метеостанции						
	Рыльск	Поньри	Курск	Богородицкое	Воронеж	Каменная Степь	Готня
1950	н/д	н/д	26	24	31	31	25
1951	н/д	н/д	27	30	42	47	29
1952	н/д	н/д	14	17	24	23	18
1953	н/д	н/д	26	38	24	21	39
1954	н/д	н/д	18	28	30	58	28
1955	н/д	н/д	30	29	28	29	25
1956	н/д	н/д	24	24	26	24	23
1957	н/д	н/д	20	24	25	26	22
1958	н/д	н/д	26	21	19	29	21
1959	н/д	21	23	19	21	45	19
1960	27	24	22	28	21	21	27
1961	17	16	24	21	24	16	35
1962	19	17	17	20	24	24	20
1963	16	23	25	37	32	34	30
1964	20	17	26	28	18	20	21
1965	23	19	25	20	25	30	25
1966	24	н/д	23	17	17	27	31
1967	19	24	24	27	29	28	22
1968	17	21	21	20	30	28	19
1969	22	26	26	17	19	30	17
1970	16	19	23	17	19	20	17
1971	20	32	27	н/д	27	27	26
1972	45	25	43	21	31	32	36
1973	24	20	20	25	29	19	20
1974	31	27	26	34	26	39	30
1975	28	н/д	26	40	24	29	31
1976	н/д	н/д	25	31	21	19	н/д
1977	13	14	17	19	19	18	15
1978	18	13	18	20	16	16	19
1979	19	31	20	32	26	25	25
1980	19	15	15	15	21	21	16
1981	22	28	31	17	23	19	31
1982	26	18	21	30	21	20	29

1983	22	19	26	28	29	26	28
1984	23	30	20	36	40	32	28
1985	24	20	21	21	18	19	24
1986	28	30	29	30	31	46	30
1987	38	37	37	34	37	39	34
1988	17	19	14	19	24	24	15
1989	28	22	14	17	20	28	23
1990	16	14	17	20	18	16	13
1991	23	13	17	22	29	26	22
1992	28	19	20	20	23	19	20
1993	25	20	25	25	34	35	25
1994	14	22	12	33	15	21	19
1995	18	19	19	20	20	15	17
1996	23	29	23	24	24	38	23
1997	23	14	38	27	27	28	27
1998	17	16	23	17	21	16	15
1999	18	29	18	21	18	24	32
2000	19	23	24	19	26	24	28
2001	25	25	24	26	21	15	28
2002	30	33	25	34	39	32	23
2003	21	24	20	24	24	26	25
2004	20	19	19	19	20	20	19
2005	24	21	35	23	24	20	25
2006	20	20	23	23	23	23	23
2007	22	22	22	25	22	30	22
2008	28	45	33	27	29	31	28
2009	25	42	35	19	32	38	17
2010	29	17	17	22	23	22	16
2011	25	25	26	25	25	28	26
2012	20	18	20	19	33	30	20
2013	18	18	17	24	25	30	19
2014	39	27	35	24	39	37	38
2015	48	31	31	44	33	34	47
2016	48	17	21	19	18	18	25
2017	20	28	н/д	29	21	22	27

1.4.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Центрально-Черноземного района.

Год	Метеостанции						
	Рыльск	Поныри	Курск	Богородицкое	Воронеж	Каменная Степь	Готня
1950	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
1951	н/д	н/д	9	9	7	5	8
1952	н/д	н/д	5	9	8	8	6
1953	н/д	н/д	6	7	-	5	7
1954	н/д	н/д	19	19	18	5	21
1955	н/д	н/д	8	7	7	8	7
1956	н/д	н/д	8	5	3	5	7
1957	н/д	н/д	-	7	10	11	3
1958	н/д	н/д	6	6	5	3	7
1959	н/д	5	5	5	4	5	6
1960	11	12	10	10	9	12	9
1961	5	6	5	6	5	6	6
1962	3	3	3	3	-	3	4
1963	8	14	12	15	9	9	9
1964	-	3	-	-	-	-	-
1965	-	-	3	3	3	5	-
1966	6	5	5	7	7	6	8
1967	4	6	6	8	8	8	5
1968	4	9	11	9	4	-	4
1969	6	5	6	6	5	6	6
1970	4	6	6	6	6	5	3
1971	-	-	3	4	4	10	3
1972	10	7	11	23	11	12	5
1973	-	-	-	-	-	-	-
1974	5	-	5	-	4	3	4
1975	8	3	6	6	6	7	4
1976	-	-	-	-	-	-	-
1977	6	6	4	7	3	3	4
1978	-	-	-	-	-	-	-
1979	7	7	8	5	3	3	6
1980	-	-	-	-	-	3	-
1981	10	11	10	10	6	6	11

1982	-	-	-	7	7	6	4
1983	11	9	4	6	7	4	10
1984	3	6	6	6	9	8	6
1985	-	3	4	7	5	3	6
1986	6	7	7	6	10	9	5
1987	3	4	-	-	-	7	5
1988	7	7	7	3	-	-	-
1989	5	6	6	3	-	6	6
1990	-	-	-	-	-	-	3
1991	6	16	7	7	9	16	7
1992	7	4	7	3	-	5	5
1993	3	3	3	-	-	-	3
1994	15	15	15	13	15	15	15
1995	9	12	12	12	14	13	13
1996	8	7	8	7	8	11	7
1997	4	4	4	4	3	4	4
1998	7	7	8	14	8	13	9
1999	10	16	10	8	5	7	12
2000	5	-	-	-	-	3	3
2001	20	18	15	18	13	11	19
2002	14	11	10	11	10	9	9
2003	6	4	5	3	4	4	5
2004	6	5	-	3	3	4	6
2005	8	7	7	8	9	8	7
2006	7	5	5	4	4	4	6
2007	15	14	15	12	14	14	14
2008	8	7	8	7	8	9	7
2009	9	10	10	9	8	11	8
2010	42	42	42	34	41	35	42
2011	11	5	11	6	15	14	8
2012	14	9	10	7	7	11	14
2013	13	10	11	4	10	8	10
2014	12	7	12	6	8	5	13
2015	12	12	12	11	12	11	10
2016	12	8	7	6	7	7	6
2017	14	5	11	6	10	10	9

1.4.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Центрально-Черноземного региона.

Год	Метеостанции						
	Рыльск	Поныри	Курск	Богородицкое	Воронеж	Каменная Степь	Гогня
1950	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1951	н/д	н/д	0	0	0	0	1
1952	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1953	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1954	н/д	н/д	2	1	1	1	2
1955	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1956	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1957	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1958	н/д	н/д	0	0	0	0	0
1959	н/д	0	0	0	0	0	0
1960	0	0	1	0	0	0	1
1961	0	0	0	0	0	0	0
1962	0	0	0	0	0	0	0
1963	0	0	0	0	0	0	0
1964	0	0	0	0	0	0	0
1965	0	0	0	0	0	0	0
1966	0		0	0	0	0	0
1967	0	0	0	0	0	0	0
1968	0	0	0	0	0	0	0
1969	0	0	0	0	0	1	0
1970	0	0	0	0	0	0	0
1971	0	0	0		0	0	0
1972	0	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0	0
1975	0	н/д	0	0	0	1	0
1976	н/д	н/д	0	0	0	0	н/д
1977	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	0	0	1

1982	0	0	0	0	0	0	0
1983	0	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	0	0	0	0	0
1985	0	0	0	0	0	0	0
1986	0	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	0	0	0	0	0
1989	0	0	0	0	0	0	0
1990	0	0	1	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	1	0
1992	0	0	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0
1995	1	0	1	0	0	1	0
1996	1	0	1	1	1	1	1
1997	0	0	1	0	0	1	0
1998	0	1	1	0	0	1	0
1999	1	0	1	0	0	1	1
2000	0	0	1	0	0	0	0
2001	0	0	1	1	1	1	0
2002	1	0	1	1	1	1	1
2003	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	1	0	0	0	0
2005	1	0	0	0	0	1	1
2006	0	0	0	0	0	0	0
2007	1	1	3	1	1	2	1
2008	1	1	2	1	1	1	1
2009	0	0	1	1	1	2	1
2010	2	3	3	3	2	2	2
2011	0	0	0	0	0	0	0
2012	1	0	1	1	1	0	1
2013	1	1	0	0	1	1	0
2014	1	1	2	0	0	0	0
2015	1	1	1	1	1	1	1
2016	1	0	1	0	1	1	0
2017	1	1	н/д	1	1	0	1

1.5.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Ростовской области.

Год	Метеостанции	
	Цимлянск	Ростов-на-Дону
1950	н/д	32
1951	н/д	25
1952	н/д	26
1953	24	25
1954	43	26
1955	37	46
1956	42	27
1957	66	25
1958	25	47
1959	34	24
1960	29	28
1961	30	34
1962	30	30
1963	31	32
1964	39	38
1965	26	39
1966	26	23
1967	41	33
1968	31	37
1969	28	16
1970	25	25
1971	29	29
1972	40	35
1973	25	24
1974	33	33
1975	36	24
1976	18	26
1977	18	23
1978	27	23
1979	29	26
1980	25	18
1981	49	28
1982	22	44

1983	29	55
1984	36	32
1985	21	24
1986	43	52
1987	34	27
1988	34	н/д
1989	17	н/д
1990	23	н/д
1991	44	н/д
1992	30	21
1993	22	22
1994	46	46
1995	34	32
1996	24	39
1997	н/д	20
1998	28	30
1999	29	27
2000	22	23
2001	28	19
2002	28	35
2003	30	39
2004	21	22
2005	24	50
2006	26	24
2007	44	29
2008	45	32
2009	27	30
2010	43	27
2011	38	23
2012	33	45
2013	23	н/д
2014	37	34
2015	30	52
2016	20	19
2017	35	28

1.5.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Ростовской области.

Год	Метеостанции	
	Цимлянск	Ростов-на-Дону
1950	н/д	4
1951	н/д	4
1952	10	8
1953	6	7
1954	15	4
1955	5	5
1956	5	4
1957	9	9
1958	-	-
1959	3	4
1960	-	5
1961	5	5
1962	3	3
1963	6	9
1964	-	-
1965	3	-
1966	11	5
1967	8	5
1968	7	6
1969	7	7
1970	7	9
1971	7	5
1972	13	12
1973	-	-
1974	-	-
1975	8	8
1976	-	-
1977	4	4
1978	-	-
1979	5	6
1980	-	3
1981	4	8
1982	5	4

1983	4	4
1984	4	5
1985	5	6
1986	4	9
1987	-	-
1988	-	-
1989	-	-
1990	3	-
1991	16	-
1992	-	-
1993	-	-
1994	13	15
1995	4	3
1996	12	13
1997	-	3
1998	14	14
1999	4	7
2000	4	4
2001	8	9
2002	10	9
2003	4	5
2004	3	3
2005	12	11
2006	10	7
2007	16	13
2008	14	12
2009	12	11
2010	24	22
2011	7	7
2012	15	8
2013	7	7
2014	7	4
2015	9	9
2016	7	5
2017	11	12

1.5.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Ростовской области.

Год	Метеостанции	
	Цимлянск	Ростов-на-Дону
1950	н/д	0
1951	н/д	0
1952	н/д	0
1953	0	0
1954	1	0
1955	1	1
1956	0	0
1957	0	0
1958	0	0
1959	0	0
1960	0	0
1961	0	0
1962	0	0
1963	0	0
1964	0	0
1965	0	0
1966	0	0
1967	0	0
1968	0	0
1969	0	0
1970	0	0
1971	0	0
1972	0	0
1973	0	0
1974	0	0
1975	0	1
1976	0	0
1977	0	0
1978	0	0
1979	0	0
1980	0	0
1981	0	0
1982	0	0

1983	0	0
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	0
1988	0	н/д
1989	0	н/д
1990	0	н/д
1991	1	н/д
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	1
1996	0	1
1997	н/д	0
1998	1	0
1999	1	1
2000	0	0
2001	0	0
2002	1	1
2003	0	0
2004	0	0
2005	0	0
2006	0	0
2007	2	1
2008	1	1
2009	0	0
2010	2	0
2011	0	0
2012	1	0
2013	1	н/д
2014	0	0
2015	1	0
2016	0	1
2017	1	0

1.6.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Свердловской области.

Год	Метеостанции	
	Екатеринбург	Верхнее Дуброво
1950	23	н/д
1951	41	н/д
1952	25	н/д
1953	33	н/д
1954	54	н/д
1955	29	н/д
1956	34	н/д
1957	33	н/д
1958	28	н/д
1959	42	25
1960	26	20
1961	44	23
1962	25	23
1963	27	25
1964	50	26
1965	23	22
1966	24	23
1967	40	37
1968	27	20
1969	31	40
1970	41	23
1971	34	22
1972	26	22
1973	33	22
1974	38	48
1975	19	14
1976	51	52
1977	н/д	29
1978	35	25
1979	24	22
1980	29	29
1981	29	22
1982	19	21

1983	19	18
1984	75	34
1985	42	42
1986	24	20
1987	38	35
1988	33	33
1989	40	40
1990	18	24
1991	25	24
1992	23	16
1993	40	39
1994	33	25
1995	26	30
1996	50	47
1997	16	17
1998	16	23
1999	29	28
2000	27	16
2001	27	26
2002	39	24
2003	32	33
2004	24	24
2005	43	30
2006	24	24
2007	28	20
2008	21	21
2009	23	24
2010	34	29
2011	39	27
2012	32	30
2013	18	16
2014	22	21
2015	21	29
2016	18	19
2017	н/д	27

1.6.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Свердловской области.

Год	Метеостанции	
	Екатеринбург	Верхнее Дуброво
1950	-	н/д
1951	6	н/д
1952	9	н/д
1953	9	н/д
1954	4	н/д
1955	4	н/д
1956	-	н/д
1957	8	н/д
1958	10	н/д
1959	-	н/д
1960	3	3
1961	-	-
1962	4	5
1963	3	3
1964	-	-
1965	4	4
1966	3	4
1967	3	4
1968	-	-
1969	4	-
1970	3	4
1971	5	3
1972	4	6
1973	-	-
1974	4	3
1975	3	4
1976	3	3
1977	6	4
1978	-	-
1979	-	-
1980	6	6
1981	14	12
1982	8	4

1983	4	4
1984	-	-
1985	5	3
1986	-	-
1987	8	10
1988	6	5
1989	9	8
1990	8	4
1991	6	5
1992	-	-
1993	-	-
1994	3	3
1995	6	6
1996	5	5
1997	3	5
1998	13	14
1999	-	8
2000	5	10
2001	3	5
2002	4	4
2003	13	12
2004	9	7
2005	8	8
2006	8	7
2007	7	5
2008	6	5
2009	5	4
2010	15	11
2011	7	7
2012	11	11
2013	5	5
2014	5	5
2015	8	7
2016	25	25
2017	5	5

1.6.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Свердловской области.

Год	Метеостанции	
	Екатеринбург	Верхнее Дуброво
1950	0	н/д
1951	0	н/д
1952	0	н/д
1953	0	н/д
1954	0	н/д
1955	0	н/д
1956	0	н/д
1957	0	н/д
1958	0	н/д
1959	0	0
1960	0	0
1961	0	0
1962	0	0
1963	0	0
1964	0	0
1965	0	0
1966	0	н/д
1967	0	н/д
1968	0	н/д
1969	0	н/д
1970	0	0
1971	0	0
1972	0	0
1973	0	0
1974	0	0
1975	0	0
1976	0	н/д
1977	н/д	н/д
1978	0	0
1979	0	0
1980	0	0
1981	0	0
1982	0	0

1983	0	0
1984	0	0
1985	0	0
1986	0	0
1987	0	1
1988	0	0
1989	0	0
1990	0	0
1991	0	0
1992	0	0
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	0
1996	0	0
1997	0	0
1998	1	1
1999	0	0
2000	0	0
2001	0	0
2002	1	2
2003	1	0
2004	0	0
2005	0	0
2006	1	1
2007	1	0
2008	1	0
2009	0	1
2010	0	1
2011	1	1
2012	0	0
2013	0	0
2014	0	0
2015	0	0
2016	0	0
2017	н/д	0

1.7.1.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

Год	Метеостанции		
	Ачинск	Красноярск	Солянка
1950	17	26	32
1951	18	34	66
1952	23	21	112
1953	21	35	32
1954	24	25	40
1955	33	31	27
1956	23	22	22
1957	41	28	28
1958	33	42	31
1959	20	44	23
1960	27	25	18
1961	26	20	33
1962	19	37	37
1963	19	34	35
1964	43	35	34
1965	56	28	н/д
1966	18	16	18
1967	23	18	33
1968	23	20	н/д
1969	23	20	23
1970	25	19	27
1971	30	26	27
1972	н/д	31	26
1973	н/д	н/д	26
1974	30	22	19
1975	22	23	22
1976	26	37	37
1977	н/д	23	н/д
1978	25	22	22
1979	18	16	25
1980	34	38	58
1981	16	18	17
1982	36	54	43
1983	18	32	21

1984	24	19	19
1985	37	22	17
1986	26	20	27
1987	21	22	22
1988	27	39	21
1989	24	21	26
1990	48	27	44
1991	17	13	22
1992	32	32	30
1993	44	49	67
1994	26	33	35
1995	20	29	37
1996	33	28	28
1997	33	30	н/д
1998	18	20	18
1999	42	30	39
2000	25	30	30
2001	21	28	18
2002	25	21	19
2003	21	25	18
2004	24	25	19
2005	26	35	29
2006	14	20	15
2007	21	19	16
2008	17	21	24
2009	18	27	19
2010	36	26	18
2011	22	26	39
2012	20	35	18
2013	13	15	18
2014	16	24	21
2015	18	29	23
2016	31	35	22
2017	34	32	34

1.7.1.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

Год	Метеостанции		
	Ачинск	Красноярск	Солянка
1950	н/д	н/д	3
1951	4	-	5
1952	4	5	3
1953	5	7	7
1954	7	4	3
1955	6	6	5
1956	-	3	3
1957	-	4	5
1958	-	3	4
1959	6	4	5
1960	-	-	-
1961	3	-	-
1962	7	6	8
1963	-	-	3
1964	5	5	3
1965	3	-	-
1966	9	8	8
1967	3	4	5
1968	3	5	6
1969	8	7	4
1970	-	-	-
1971	3	4	-
1972	3	-	-
1973	4	3	8
1974	5	12	7
1975	3	3	3
1976	4	3	4
1977	3	3	3
1978	3	3	3
1979	3	4	6
1980	5	4	3
1981	3	4	5
1982	-	3	3
1983	3	3	4

1984	4	4	4
1985	3	-	-
1986	3	-	-
1987	-	5	3
1988	5	5	5
1989	4	5	4
1990	4	3	7
1991	7	4	8
1992	8	8	9
1993	4	7	6
1994	5	5	6
1995	5	7	6
1996	9	9	11
1997	5	5	3
1998	10	6	3
1999	11	12	7
2000	5	5	5
2001	10	10	9
2002	3	3	6
2003	8	8	6
2004	7	7	7
2005	8	7	9
2006	15	10	9
2007	9	8	8
2008	6	-	-
2009	3	-	4
2010	4	4	5
2011	6	4	5
2012	11	6	6
2013	3	4	4
2014	6	8	6
2015	5	5	5
2016	9	7	5
2017	7	7	5

1.7.1.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

Год	Метеостанции		
	Ачинск	Красноярск	Солянка
1950	0	0	0
1951	0	0	0
1952	0	0	0
1953	0	0	0
1954	0	0	0
1955	0	0	0
1956	0	0	0
1957	0	0	0
1958	0	0	0
1959	0	0	0
1960	0	0	0
1961	0	0	0
1962	0	0	0
1963	0	0	0
1964	0	0	0
1965	0	0	н/д
1966	0	0	0
1967	1	0	0
1968	0	0	0
1969	0	0	0
1970	0	0	0
1971	0	0	0
1972	0	0	0
1973	0	0	0
1974	0	0	0
1975	0	0	0
1976	0	0	0
1977	н/д	0	н/д
1978	0	0	0
1979	0	0	0
1980	0	0	0
1981	0	0	0
1982	0	0	0
1983	0	0	1

1984	0	0	0
1985	0	0	0
1986	0	0	0
1987	0	0	0
1988	0	0	0
1989	0	0	0
1990	0	0	0
1991	0	0	0
1992	0	0	0
1993	0	0	0
1994	0	0	0
1995	0	0	2
1996	0	0	0
1997	0	0	0
1998	0	0	0
1999	1	0	0
2000	0	0	0
2001	1	1	1
2002	0	0	1
2003	0	0	0
2004	1	1	1
2005	0	0	0
2006	1	0	0
2007	0	0	0
2008	0	0	0
2009	0	0	0
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	0	0	0
2013	0	0	0
2014	0	0	1
2015	0	0	0
2016	0	0	0
2017	1	0	0

1.7.2.1. Максимальное годовое число последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Кузбасского региона.

Год	Метеостанции		
	Болотное	Огурцово	Кузедеево
1950	12	н/д	н/д
1951	20	н/д	н/д
1952	27	н/д	н/д
1953	32	н/д	н/д
1954	26	н/д	н/д
1955	29	н/д	23
1956	26	н/д	26
1957	30	н/д	26
1958	16	41	21
1959	24	27	17
1960	23	23	11
1961	24	40	26
1962	59	56	22
1963	16	25	18
1964	33	29	42
1965	24	31	25
1966	16	20	13
1967	34	28	33
1968	н/д	32	23
1969	30	30	18
1970	19	25	20
1971	27	24	12
1972	16	19	12
1973	19	29	18
1974	23	29	20
1975	19	22	22
1976	24	24	13
1977	19	19	16
1978	24	16	21
1979	13	17	24
1980	35	30	26
1981	18	21	21
1982	19	23	27
1983	27	22	18

1984	16	17	20
1985	23	36	30
1986	23	15	14
1987	22	29	16
1988	24	26	16
1989	36	35	16
1990	21	23	17
1991	22	16	13
1992	14	30	19
1993	16	38	13
1994	27	18	14
1995	29	26	20
1996	30	36	20
1997	20	46	20
1998	27	25	18
1999	16	32	16
2000	21	19	13
2001	12	13	12
2002	14	26	13
2003	22	38	18
2004	19	18	13
2005	17	21	18
2006	21	26	20
2007	14	15	13
2008	17	18	16
2009	18	24	16
2010	34	40	20
2011	20	22	20
2012	28	57	49
2013	16	17	15
2014	20	20	11
2015	17	26	14
2016	21	27	18
2017	22	16	16

1.7.2.2. Продолжительности самой длинной волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Кузбасского региона.

Год	Метеостанции		
	Болотное	Огурцово	Кузедеево
1950	н/д	н/д	н/д
1951	8	н/д	н/д
1952	9	н/д	н/д
1953	9	н/д	н/д
1954	6	н/д	н/д
1955	7	н/д	6
1956	3	н/д	-
1957	-	н/д	3
1958	-	н/д	3
1959	-	н/д	4
1960	-	н/д	-
1961	4	4	-
1962	5	3	9
1963	-	-	-
1964	3	-	3
1965	4	3	3
1966	11	11	5
1967	3	3	-
1968	3	3	3
1969	14	8	8
1970	-	-	-
1971	3	-	-
1972	-	-	3
1973	5	4	3
1974	-	3	3
1975	3	-	-
1976	-	4	4
1977	3	3	3
1978	4	4	3
1979	3	3	3
1980	4	3	-
1981	5	4	6
1982	5	4	3
1983	5	5	3

1984	3	4	-
1985	4	5	-
1986	-	-	3
1987	-	4	3
1988	4	5	4
1989	6	4	-
1990	-	-	3
1991	4	6	9
1992	7	7	6
1993	4	5	4
1994	6	6	4
1995	4	3	6
1996	-	8	5
1997	4	3	4
1998	9	9	10
1999	9	11	10
2000	4	4	5
2001	5	5	8
2002	4	3	4
2003	6	9	4
2004	6	7	6
2005	5	7	6
2006	5	5	8
2007	7	8	8
2008	4	5	5
2009	-	-	-
2010	4	5	4
2011	4	4	-
2012	6	15	4
2013	3	4	3
2014	5	5	5
2015	5	5	4
2016	5	6	9
2017	4	4	5

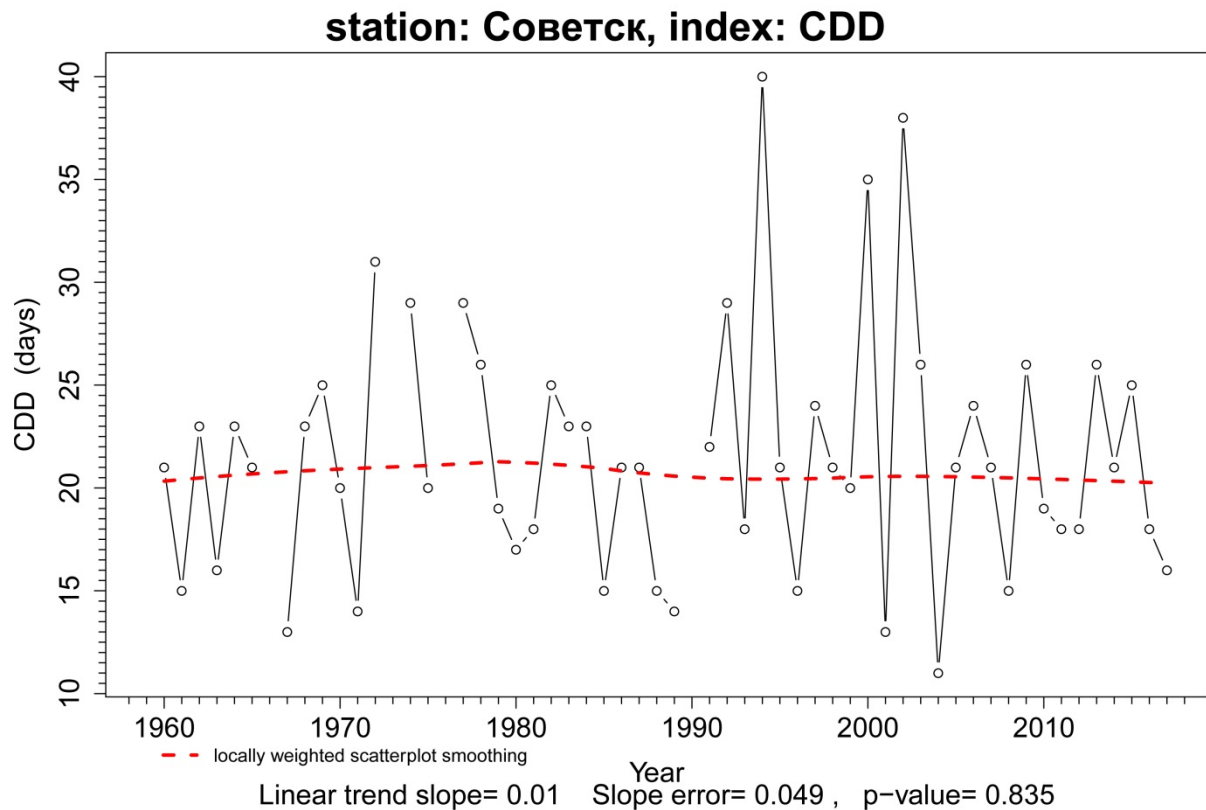
1.7.2.3. Число периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95% обеспеченности рассчитанной для наиболее жаркой пятидневки (5TX5TN) по данным метеостанций Кузбасского региона.

Год	Метеостанции		
	Болотное	Огурцово	Кузедеево
1950	0	н/д	н/д
1951	0	н/д	н/д
1952	0	н/д	н/д
1953	1	н/д	н/д
1954	0	н/д	н/д
1955	0	н/д	0
1956	0	н/д	0
1957	0	н/д	0
1958	0	0	0
1959	0	0	0
1960	0	н/д	0
1961	0	0	0
1962	0	0	0
1963	0	0	0
1964	0	0	0
1965	0	0	0
1966	0	0	0
1967	0	0	0
1968	0	0	0
1969	1	0	0
1970	0	0	0
1971	0	0	0
1972	0	0	0
1973	0	н/д	0
1974	0	н/д	0
1975	0	н/д	0
1976	0	0	0
1977	0	0	0
1978	0	0	0
1979	0	0	0
1980	0	0	0
1981	0	0	0
1982	0	0	0
1983	0	0	0

1984	0	0	0
1985	0	0	0
1986	0	0	0
1987	0	0	0
1988	0	0	0
1989	0	0	0
1990	0	0	0
1991	0	0	0
1992	0	0	0
1993	0	0	0
1994	0	0	0
1995	0	0	0
1996	0	0	0
1997	0	0	0
1998	0	0	1
1999	0	0	0
2000	0	0	0
2001	0	0	1
2002	1	1	0
2003	0	0	0
2004	0	1	1
2005	0	0	0
2006	1	0	0
2007	0	0	0
2008	0	0	0
2009	0	0	0
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	0	0	0
2013	0	1	0
2014	0	0	0
2015	0	0	0
2016	0	0	0
2017	0	0	0

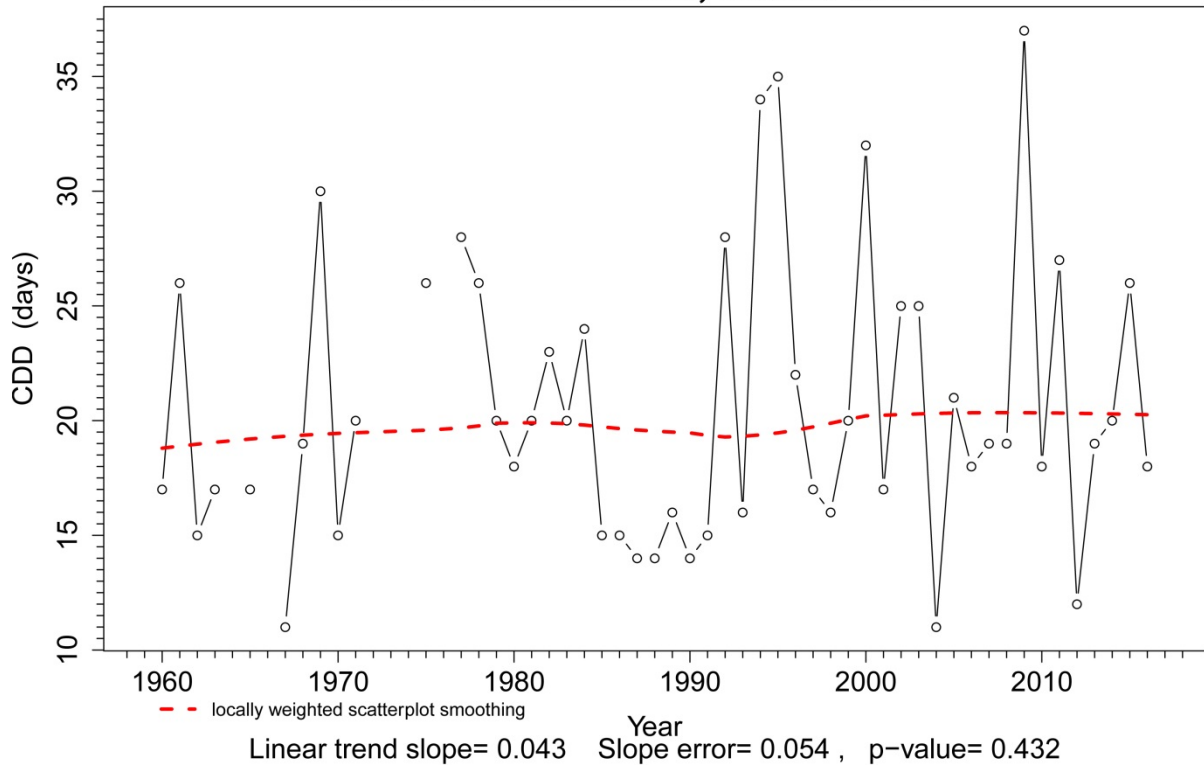
Приложение 2. Изменения значений специализированных климатических индексов CDD, HWD, 5TX5TN в период 1950–2017 гг.

2.1.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Калининградской области.

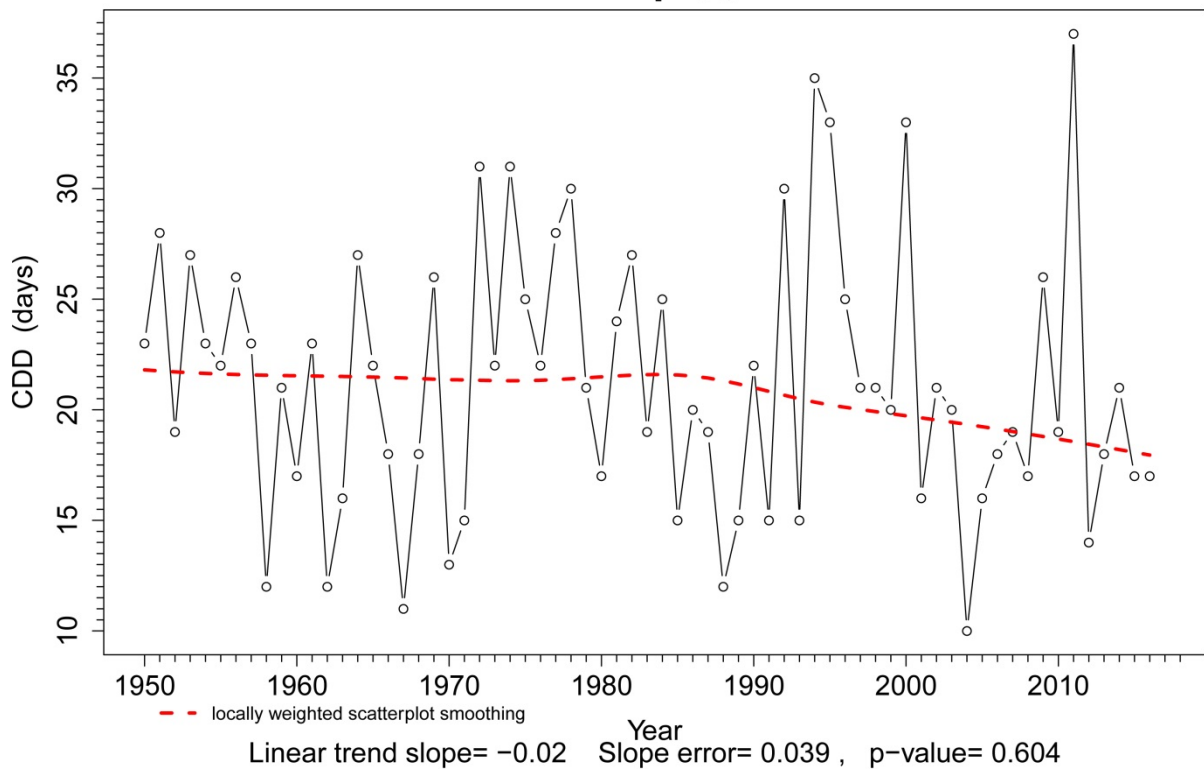


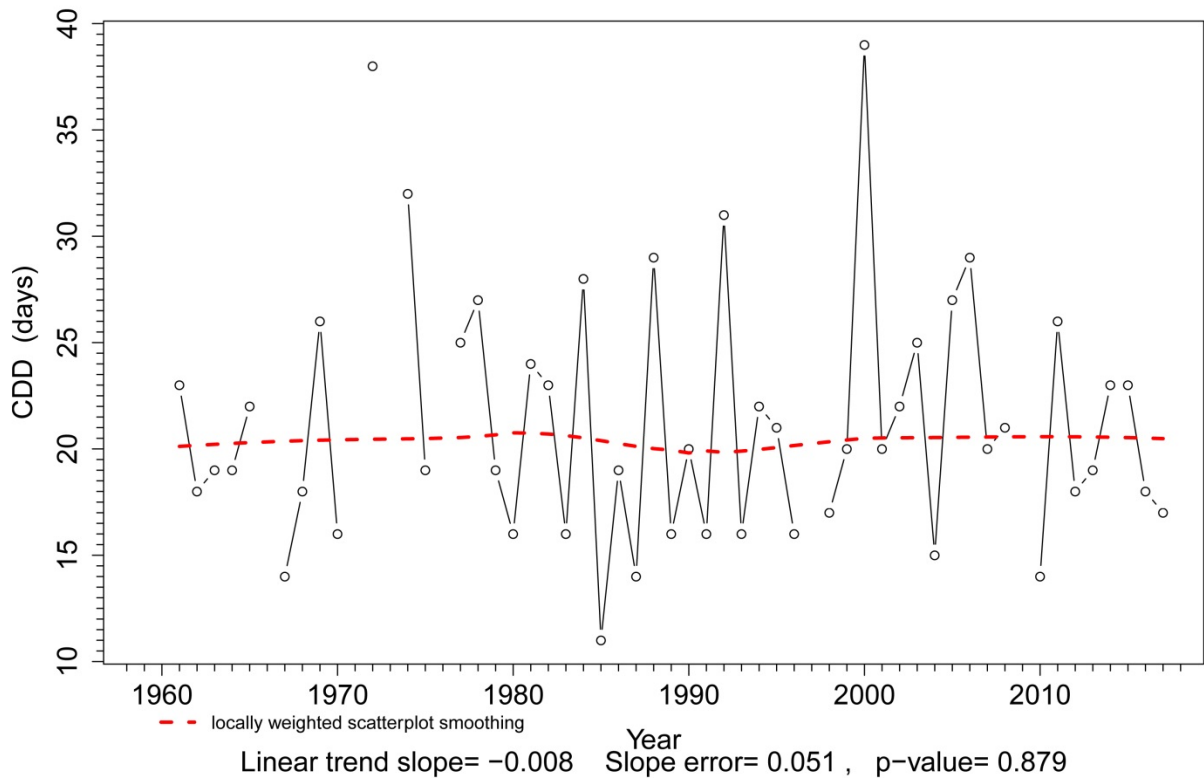
Здесь и далее: Linear trend slope – коэффициент линейного тренда, Slope error – ошибка коэффициента линейного тренда, locally weighted scatter plot smoothing – локально взвешенное сглаживание диаграммы рассеивания, station – название метеостанции, индекс – специализированные климатический индекс, days – дни.

station: Балтийск, index: CDD

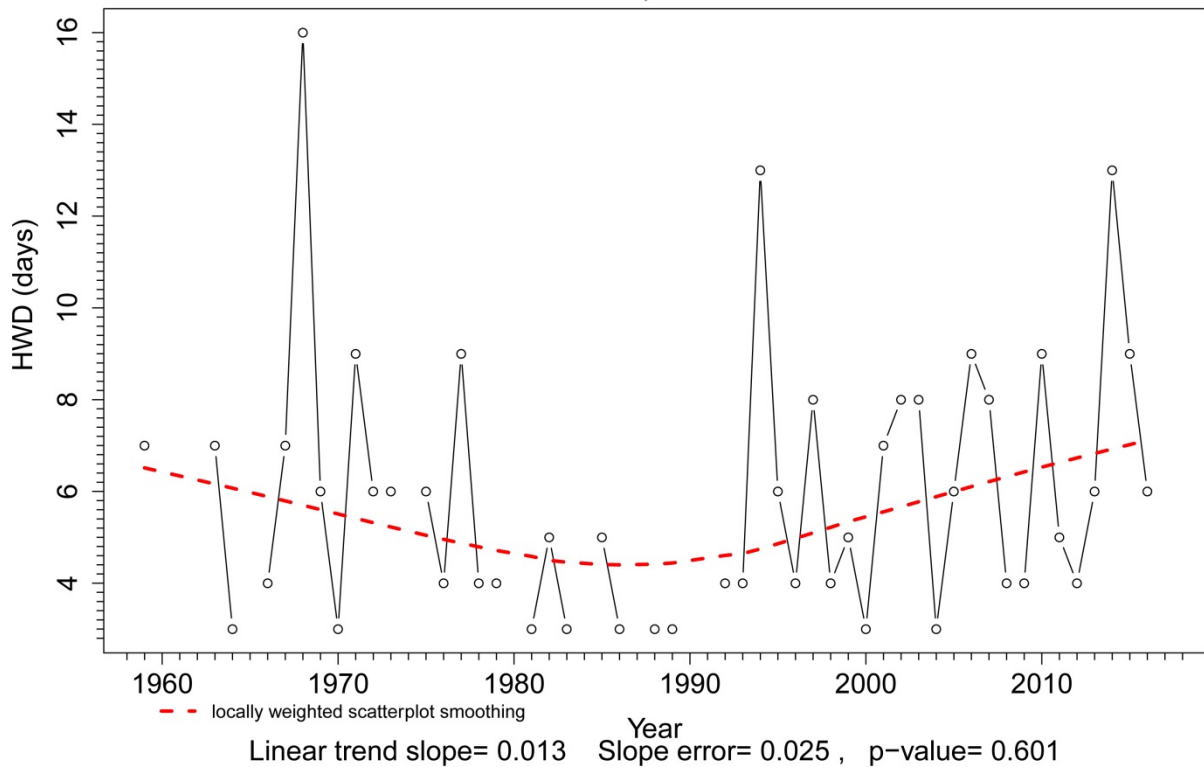


station: Калининград, index: CDD

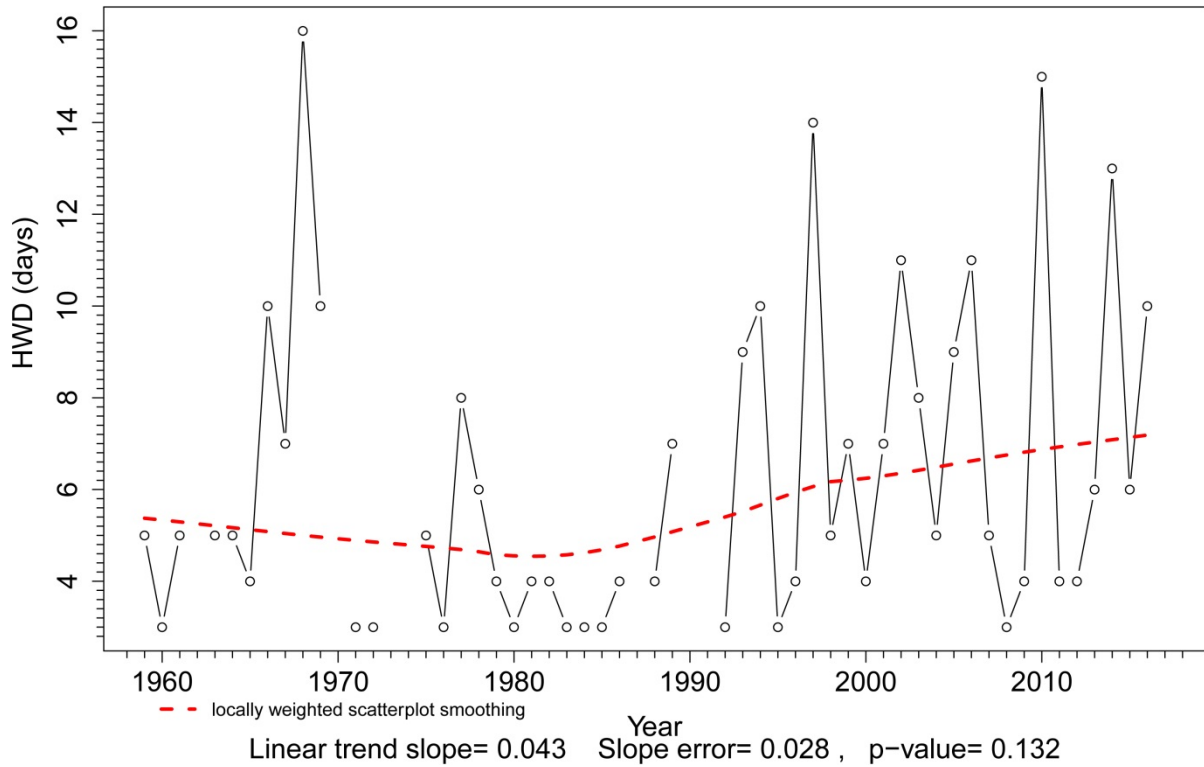


station: Железнодорожный, index: CDD

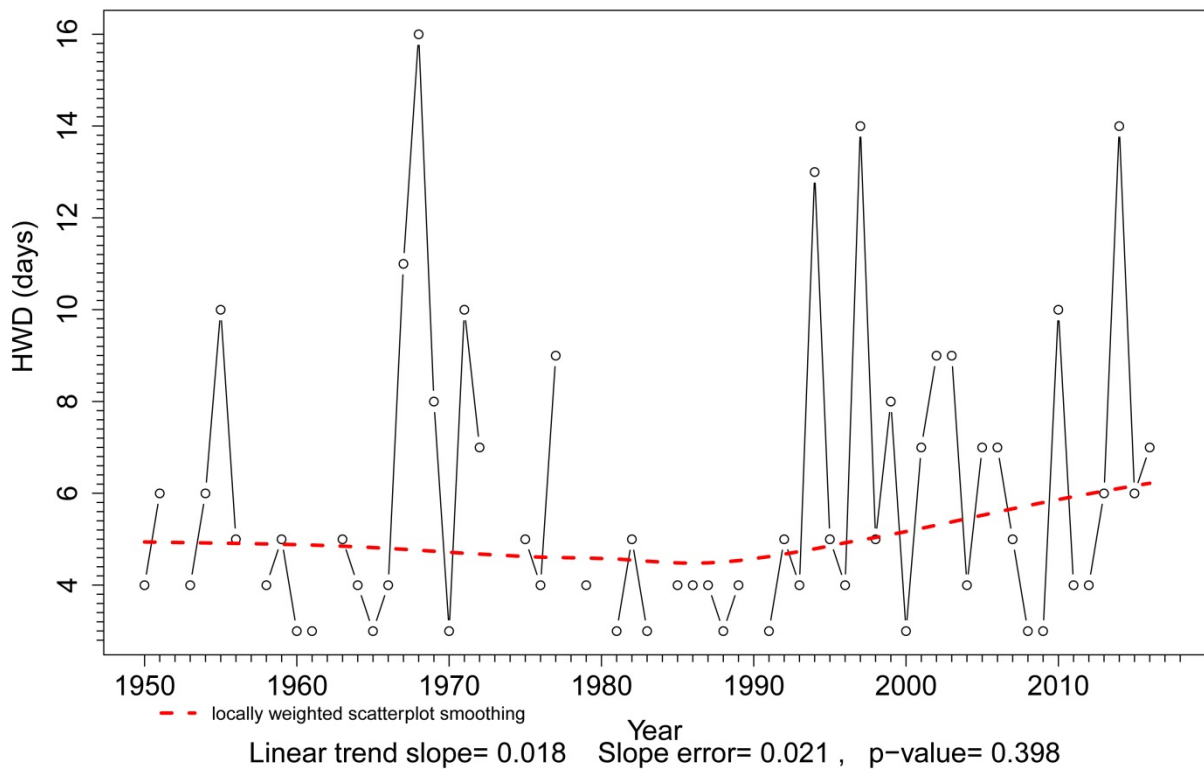
2.1.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Калининградской области.

station: Советск, index: HWD

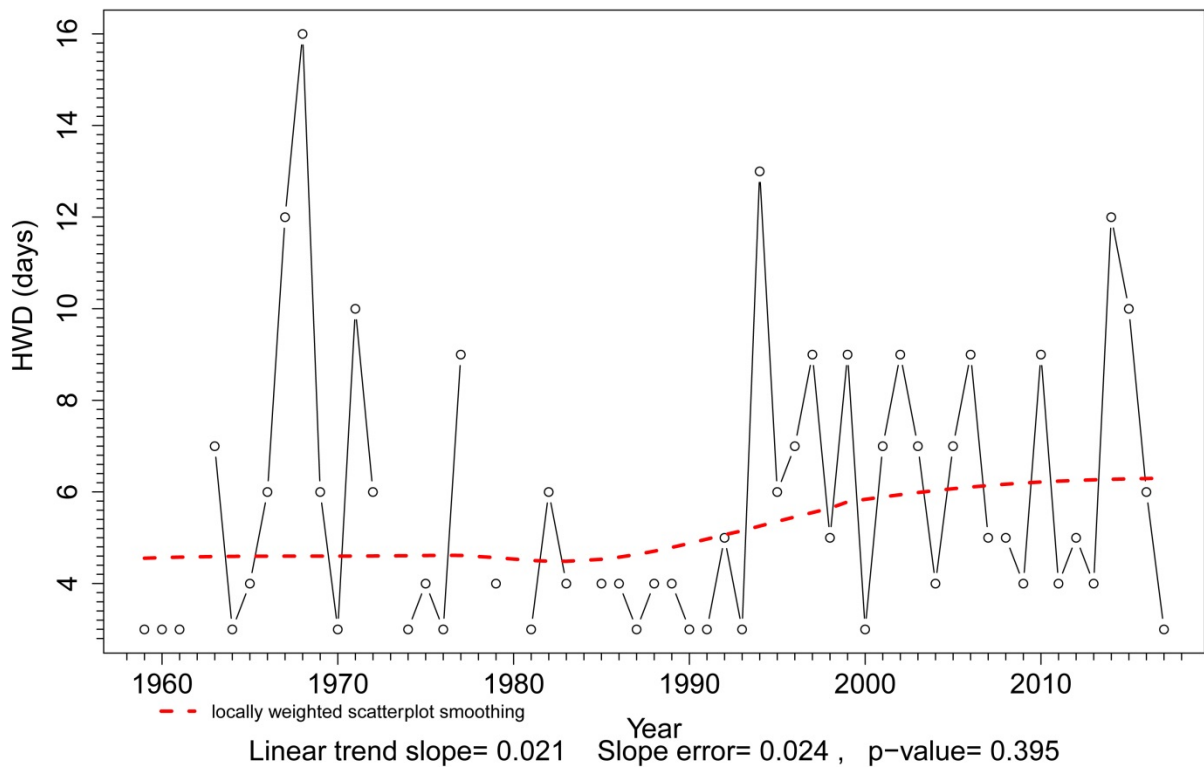
station: Балтийск, index: HWD



station: Калининград, index: HWD

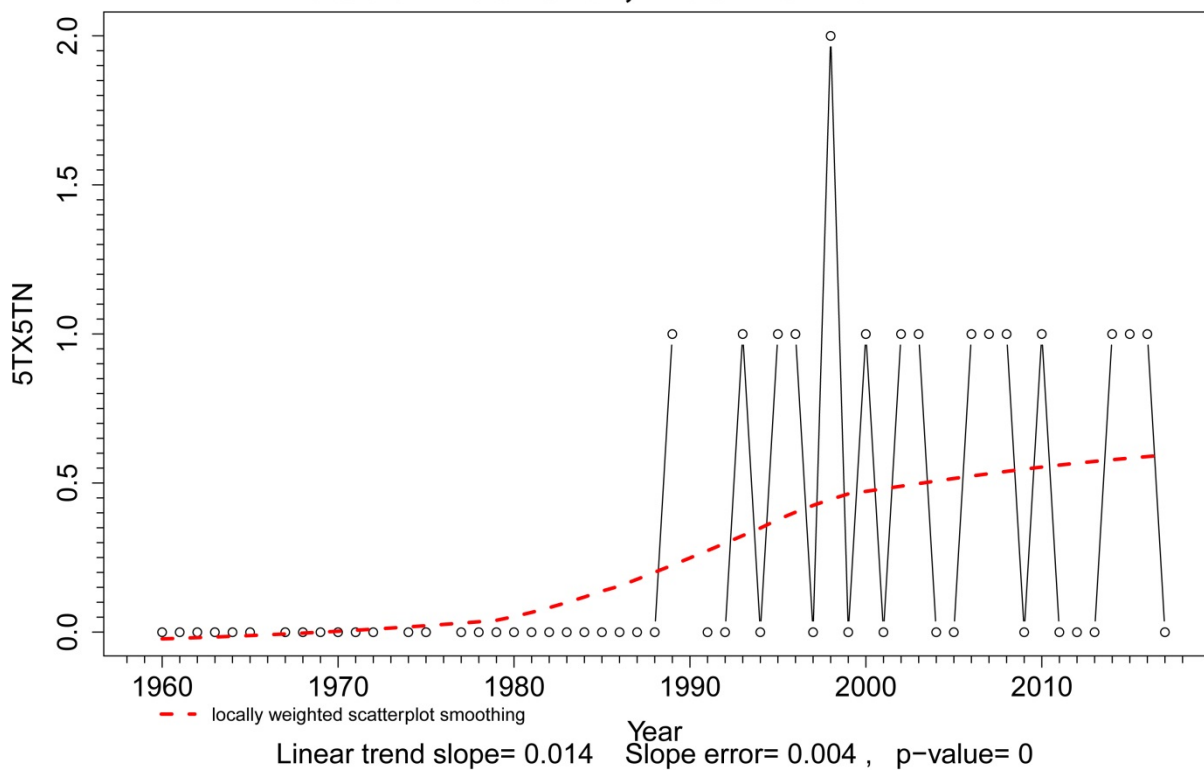


station: Железнодорожный, index: HWD

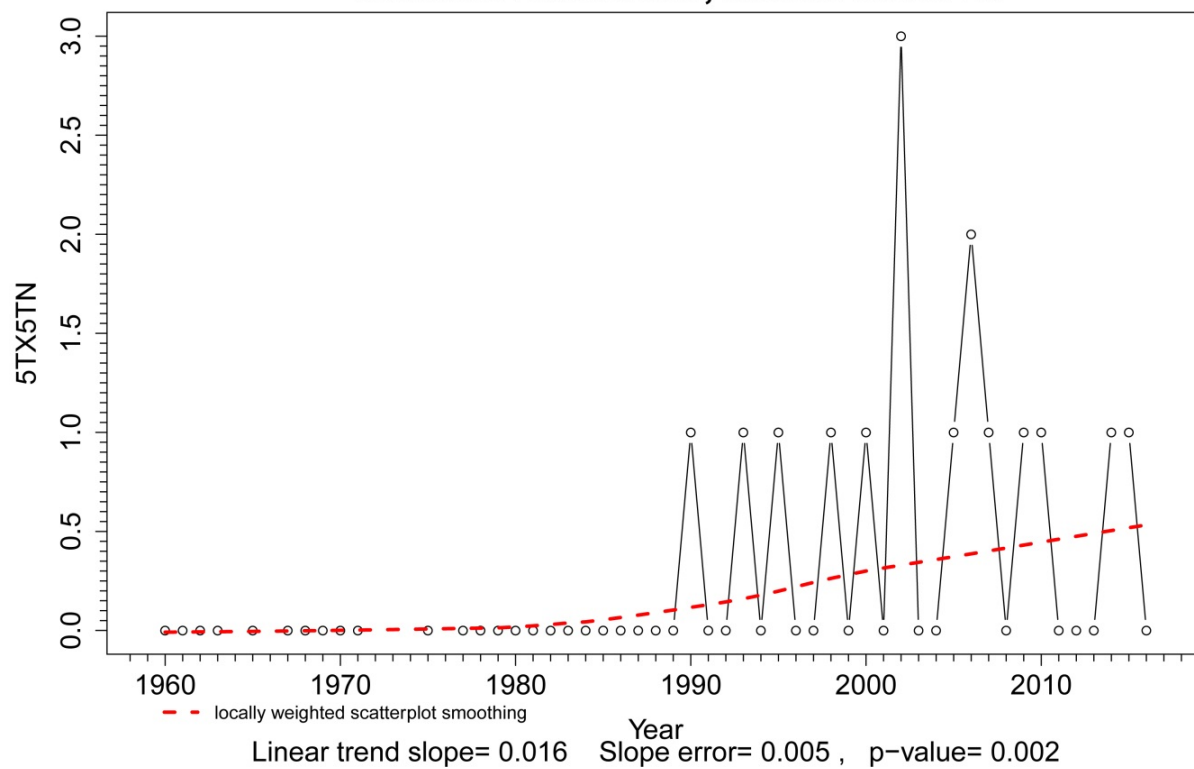


2.1.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Калининградской области.

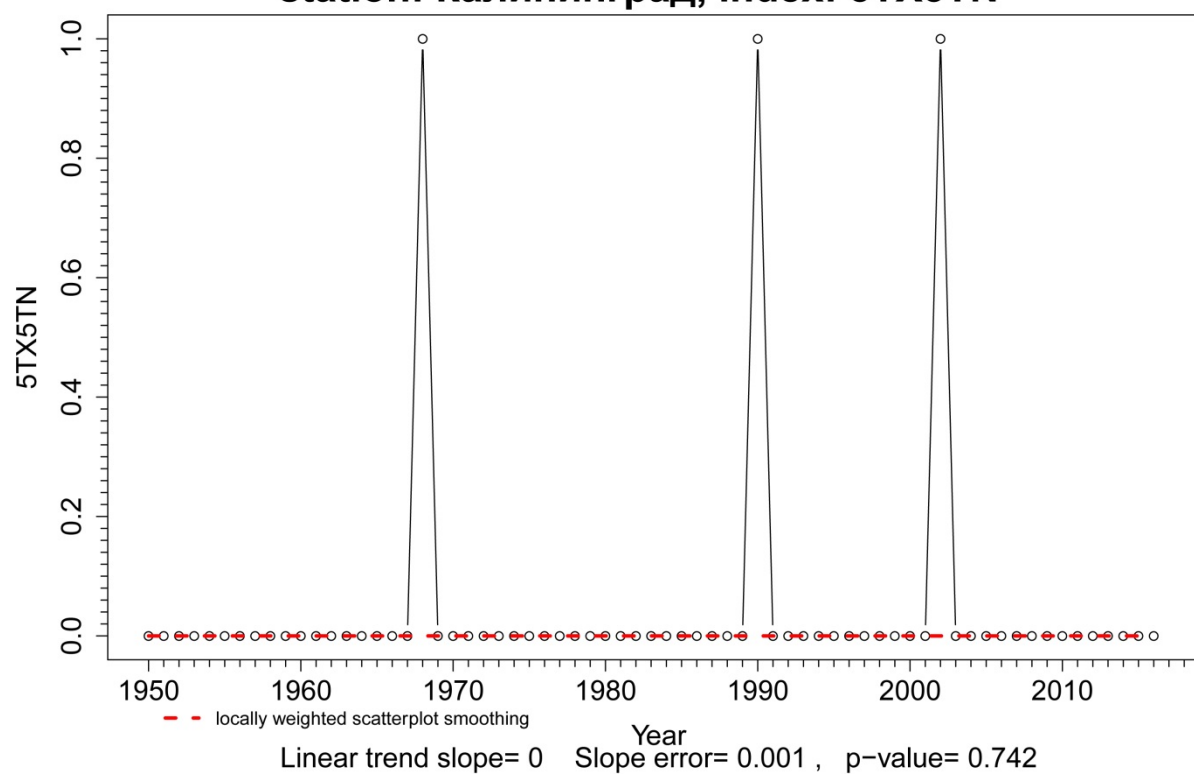
station: Советск, index: 5TX5TN



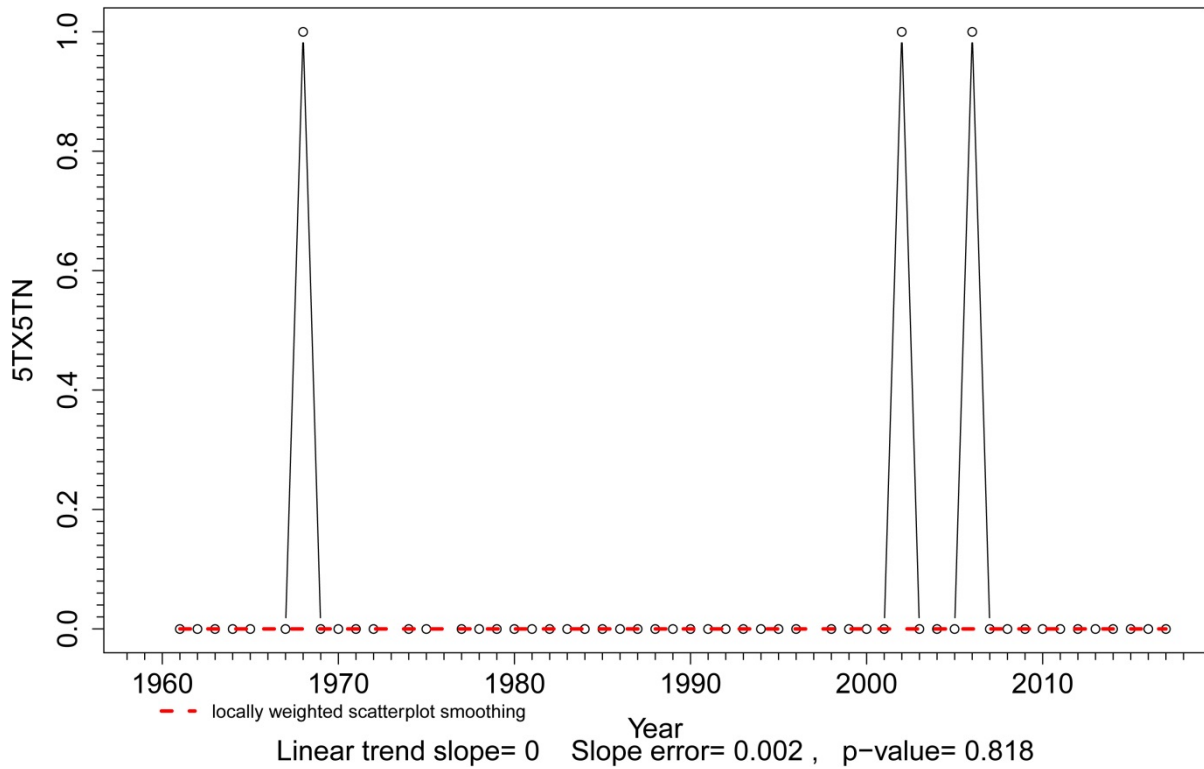
station: Балтийск, index: 5TX5TN



station: Калининград, index: 5TX5TN

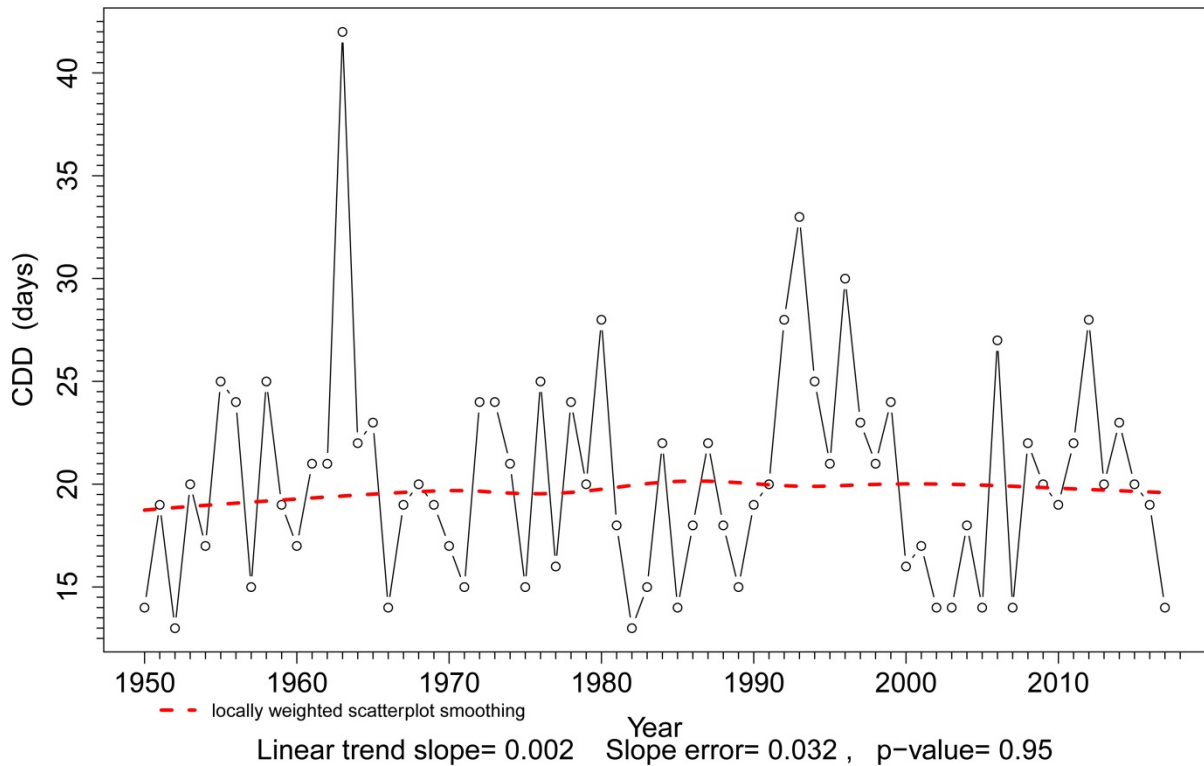


station: Железнодорожный, index: 5TX5TN



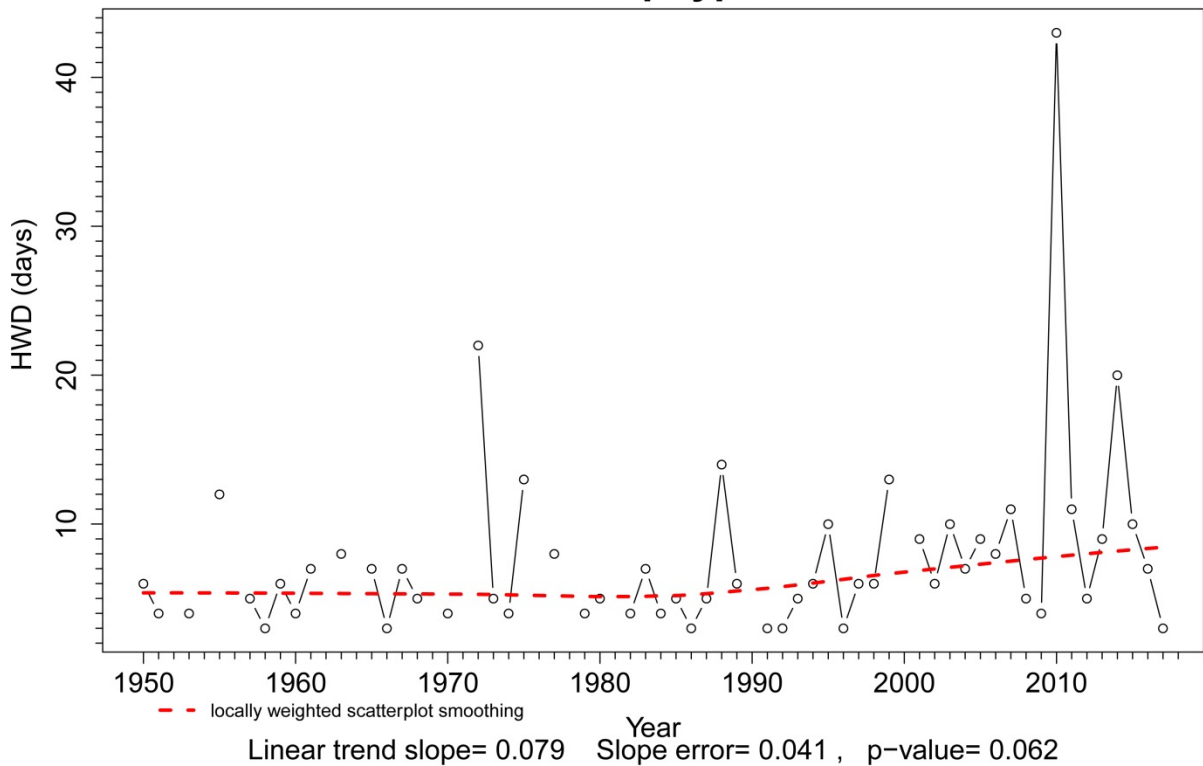
2.2.1. График изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанции Санкт-Петербург.

station: Санкт-Петербург, index: CDD



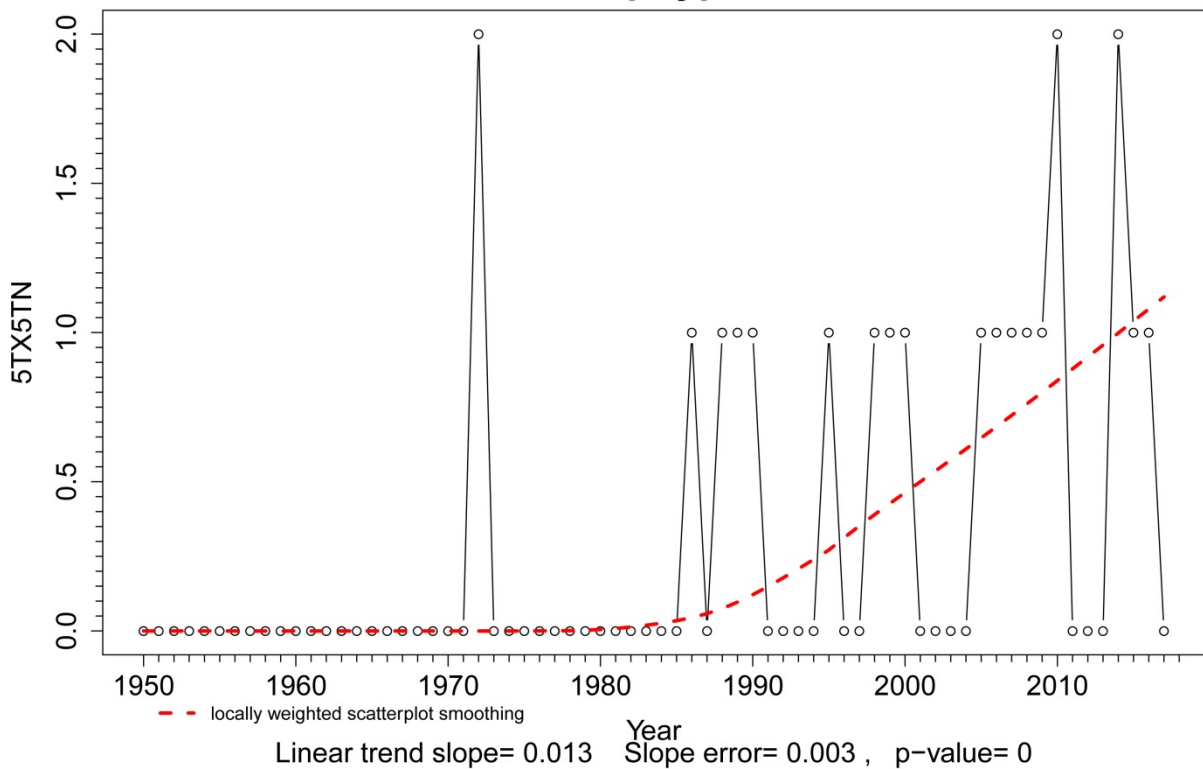
2.2.2. График изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанции Санкт-Петербург.

station: Санкт-Петербург, index: HWD



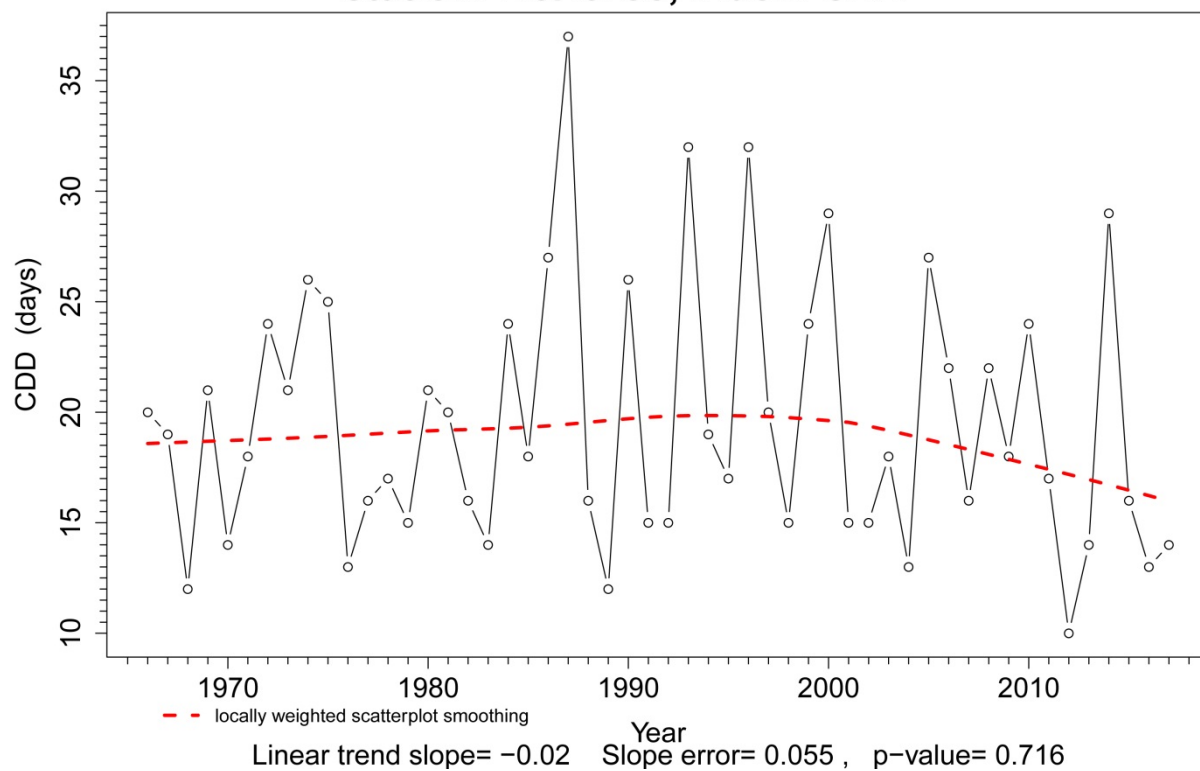
2.2.3. График изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальными температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанции Санкт-Петербург.

station: Санкт-Петербург, index: 5TX5TN

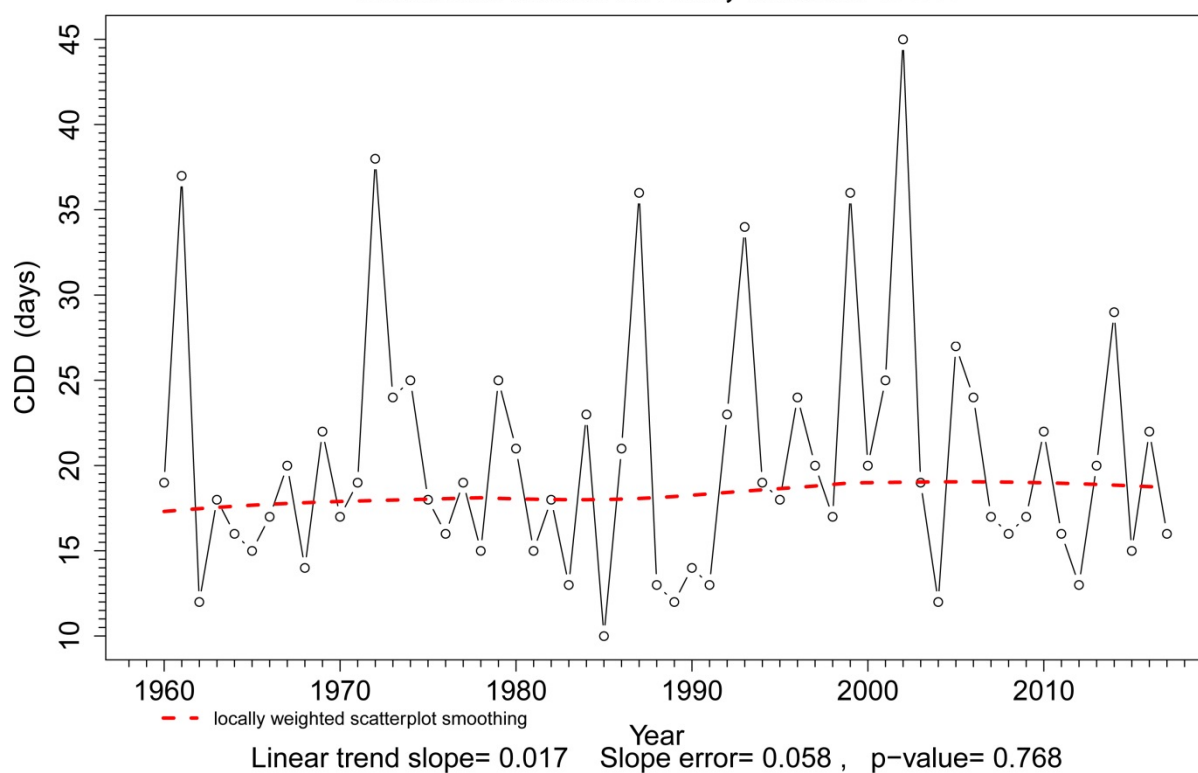


2.3.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Центрального региона.

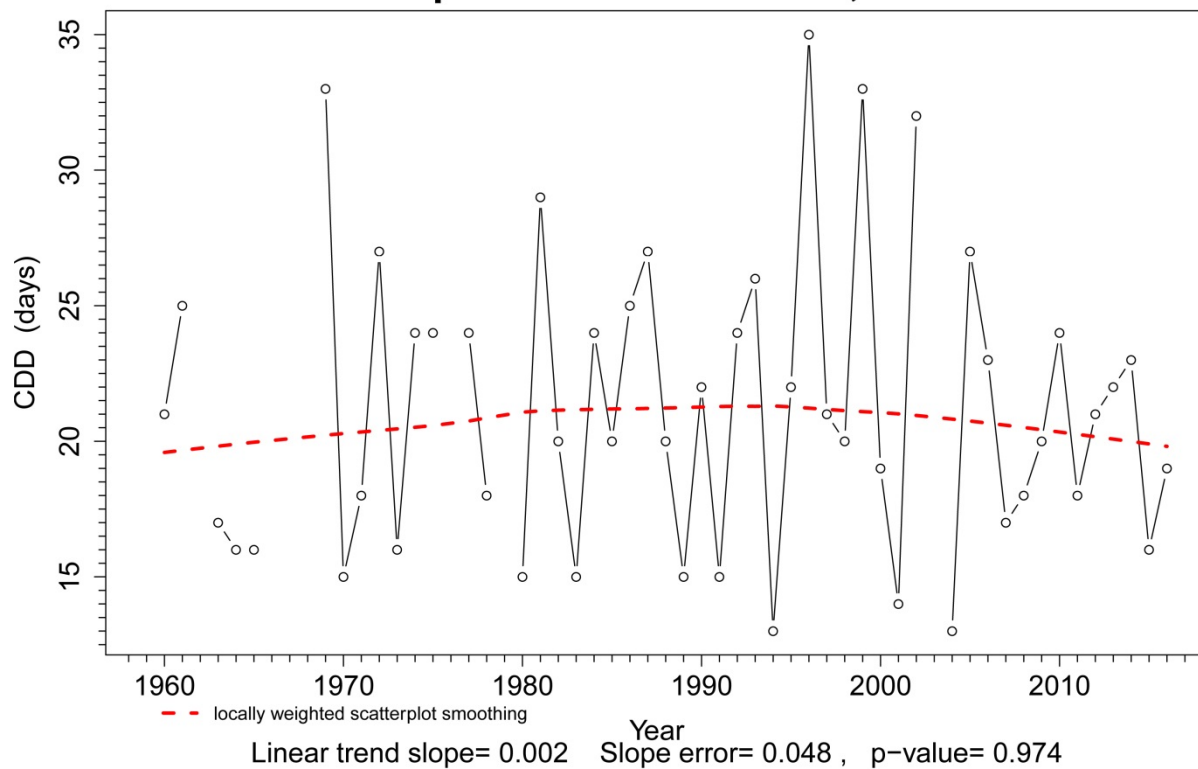
station: Бологое, index: CDD



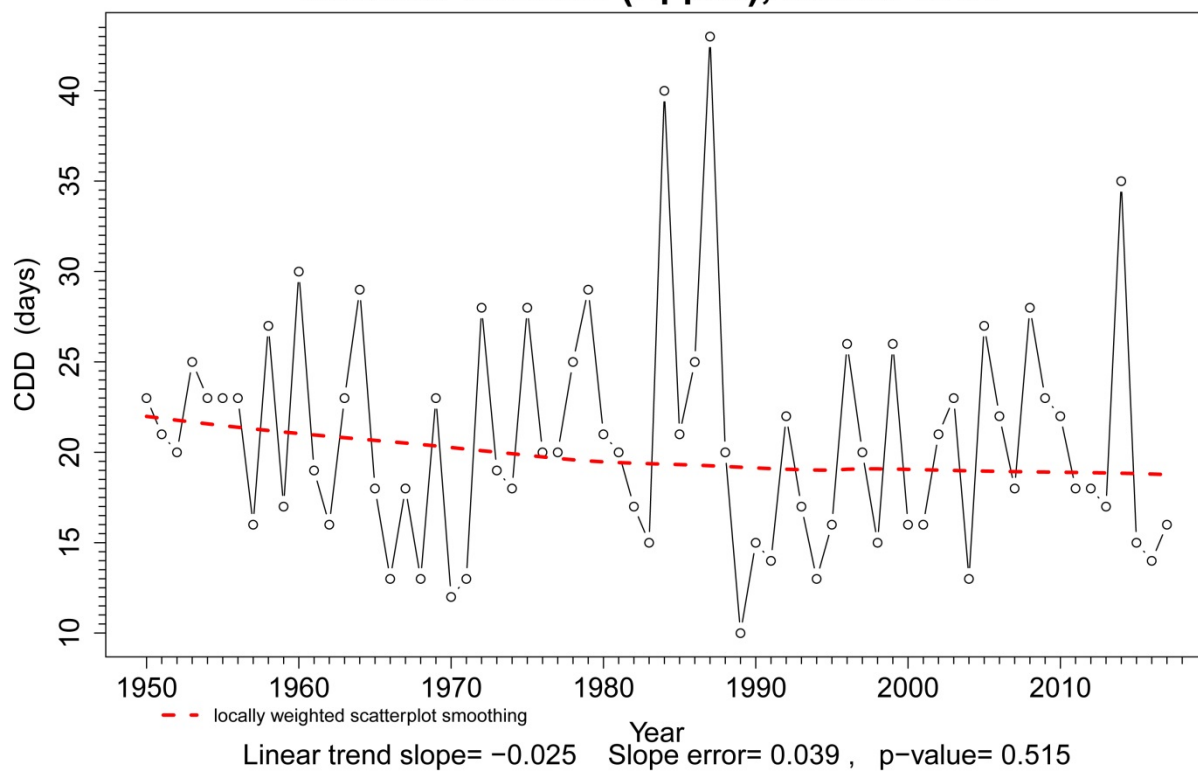
station: Максатиха, index: CDD



station: Переславль-Залесский, index: CDD

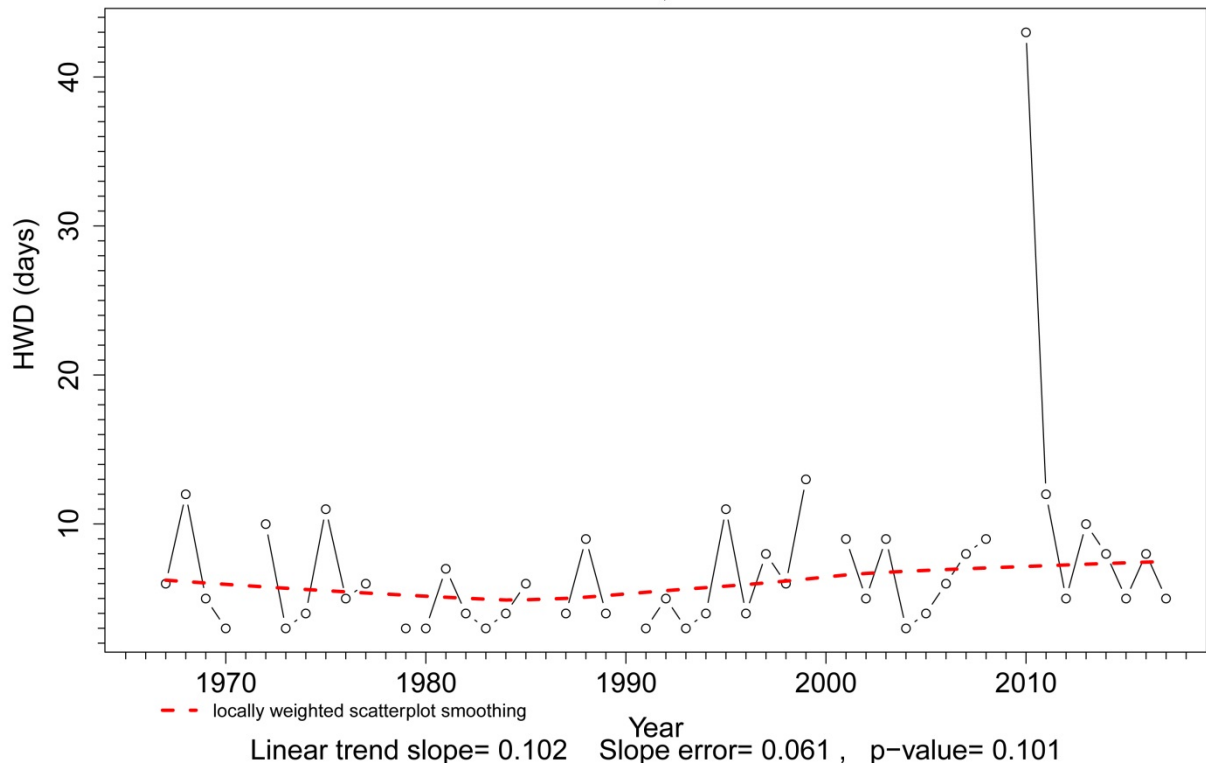


station: Москва (ВДНХ), index: CDD

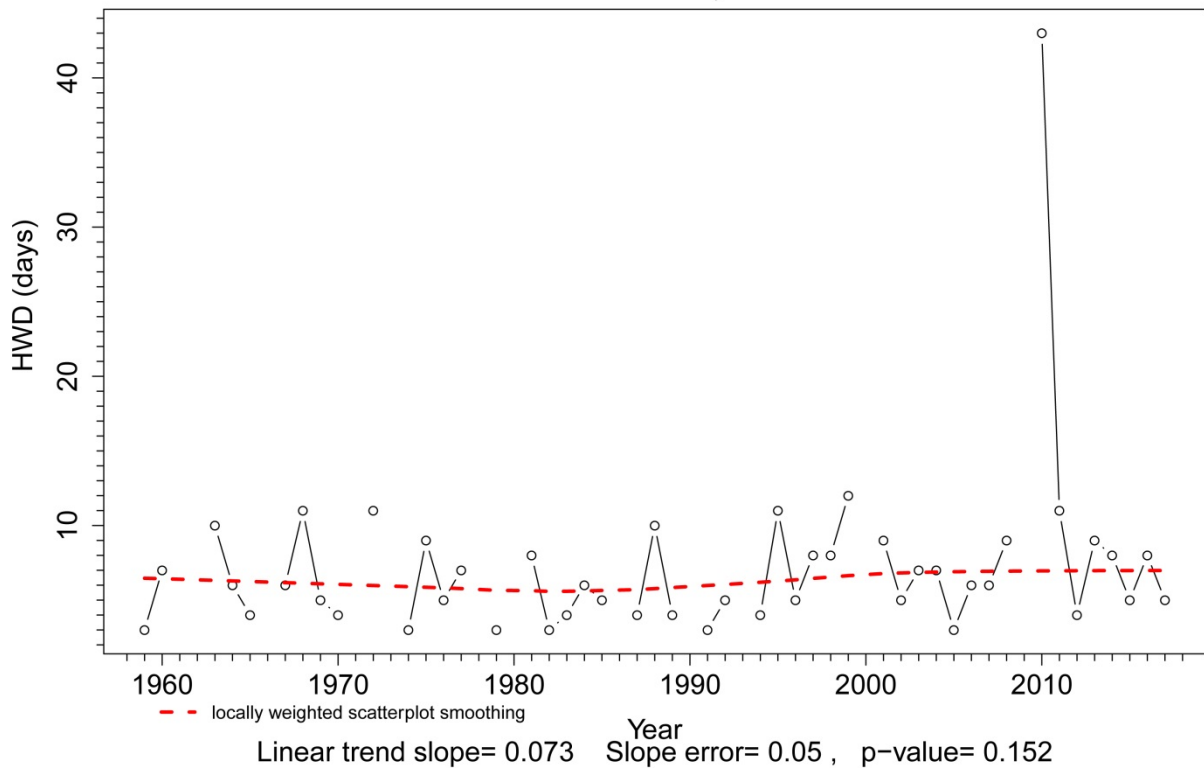


2.3.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Центрального региона.

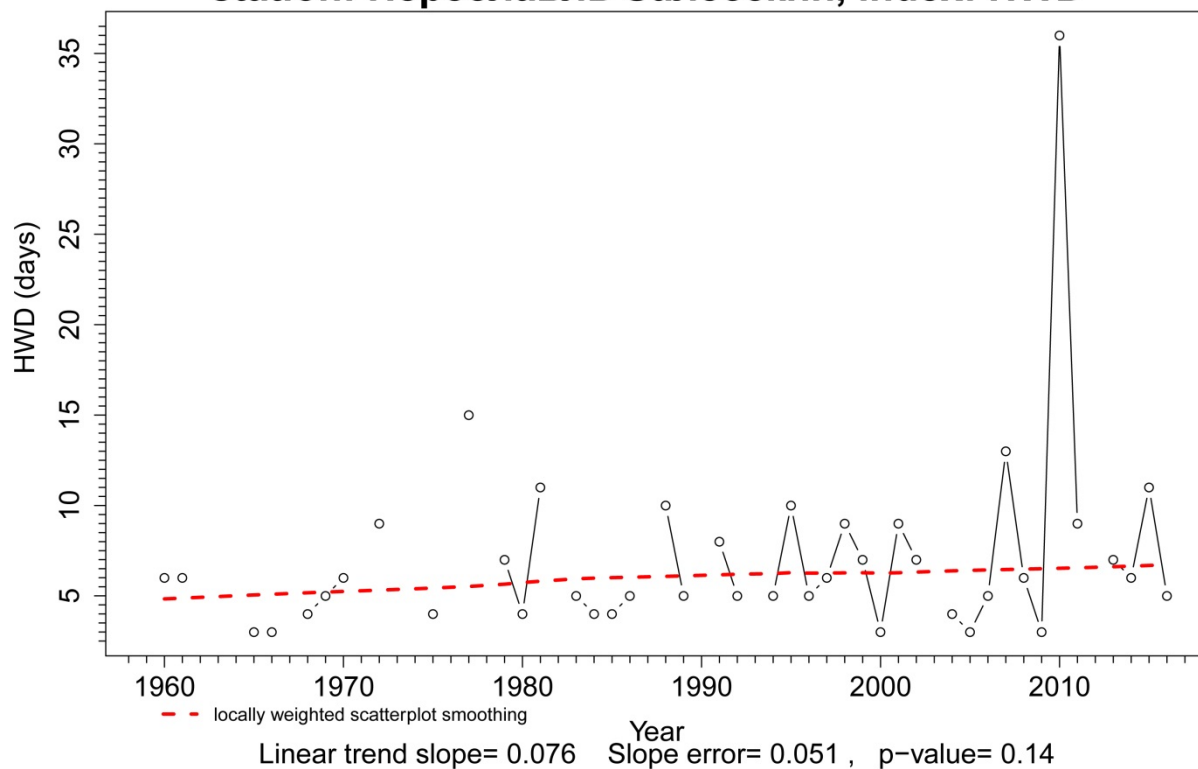
station: Бологое, index: HWD



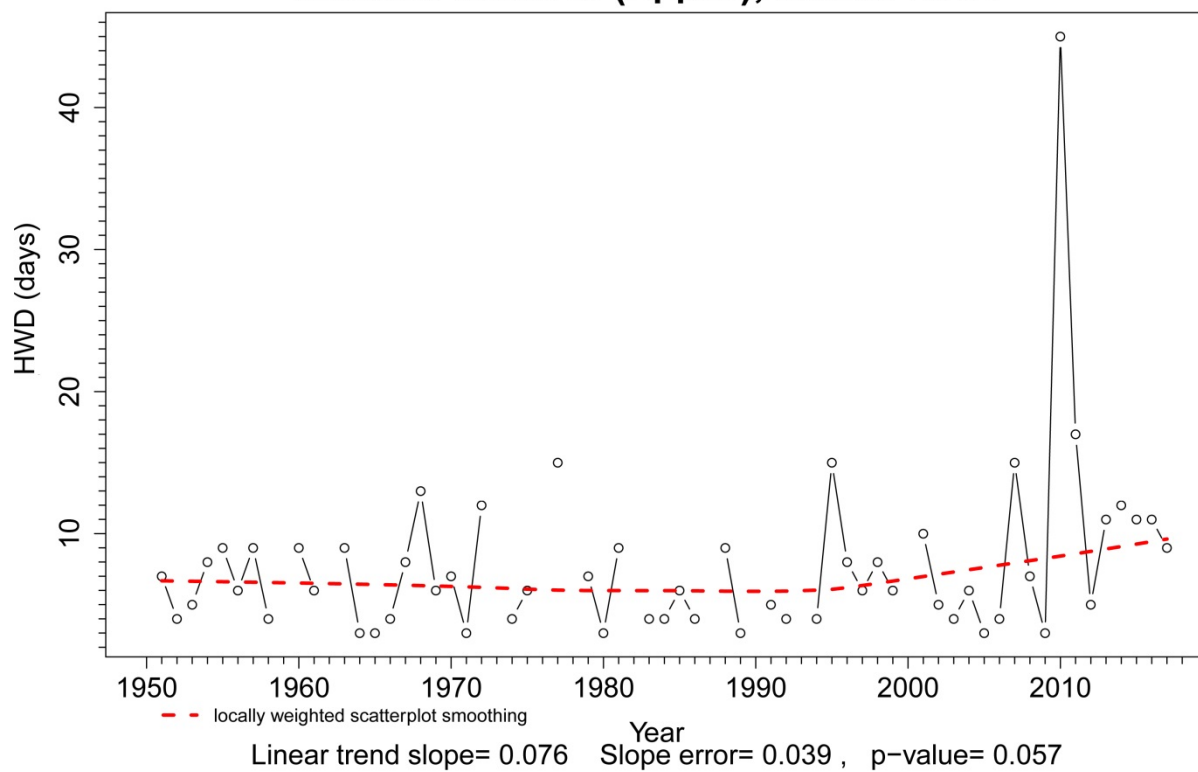
station: Максатиха, index: HWD



station: Переславль-Залесский, index: HWD

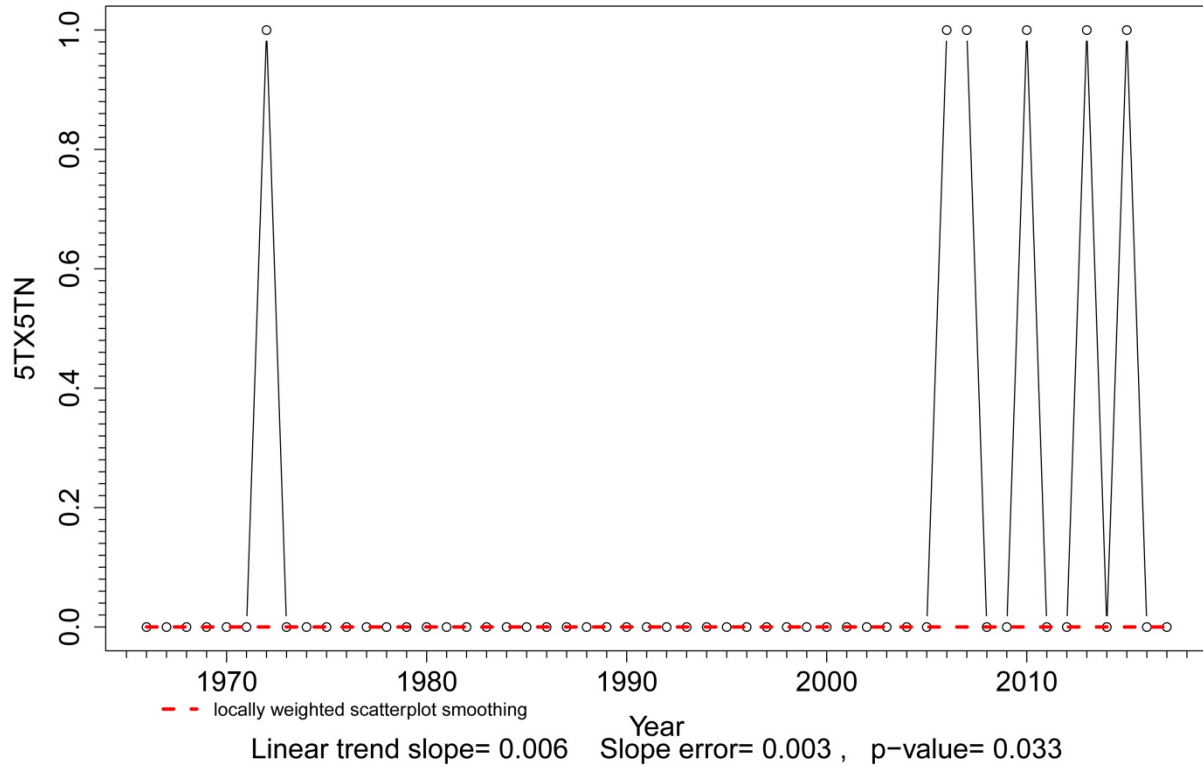


station: Москва (ВДНХ), index: HWD

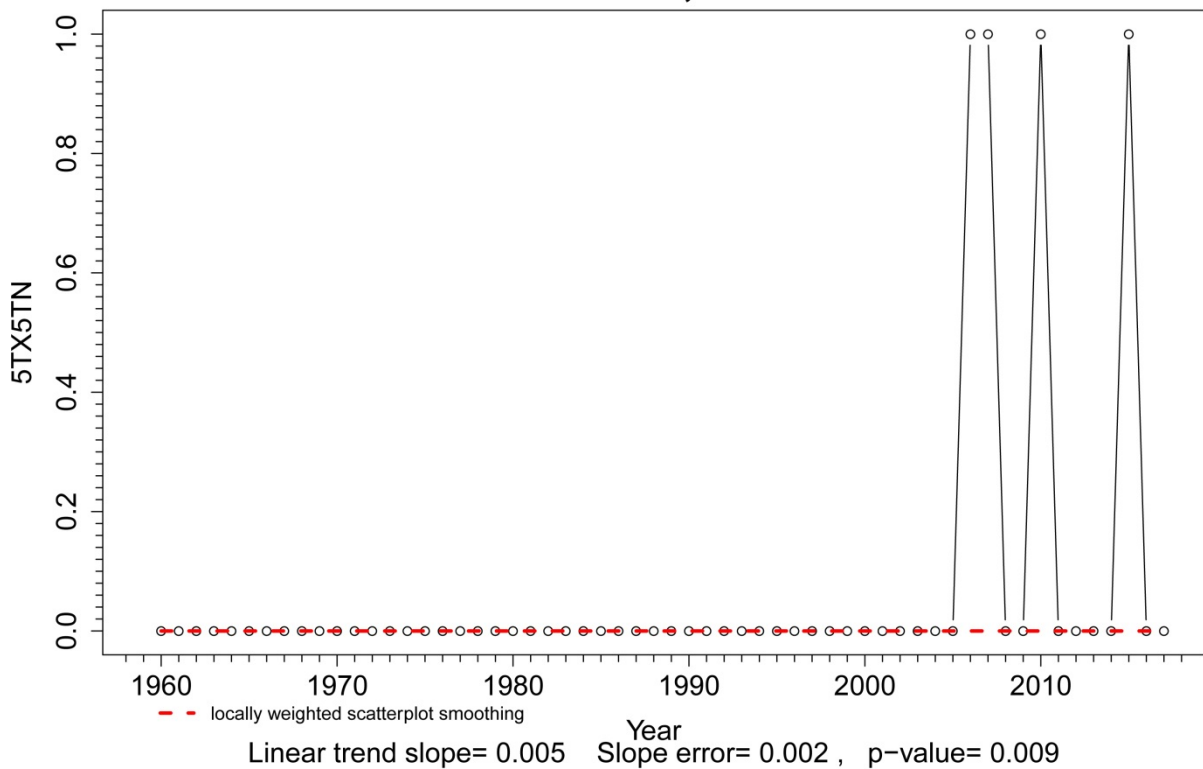


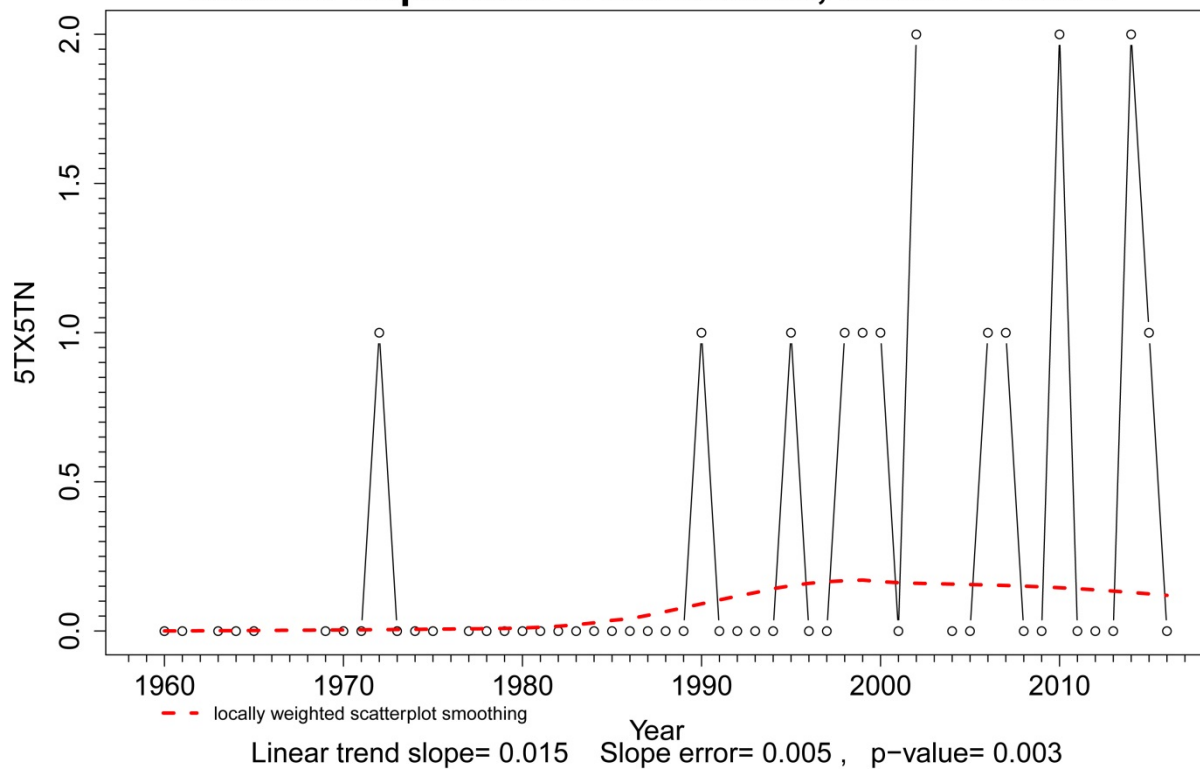
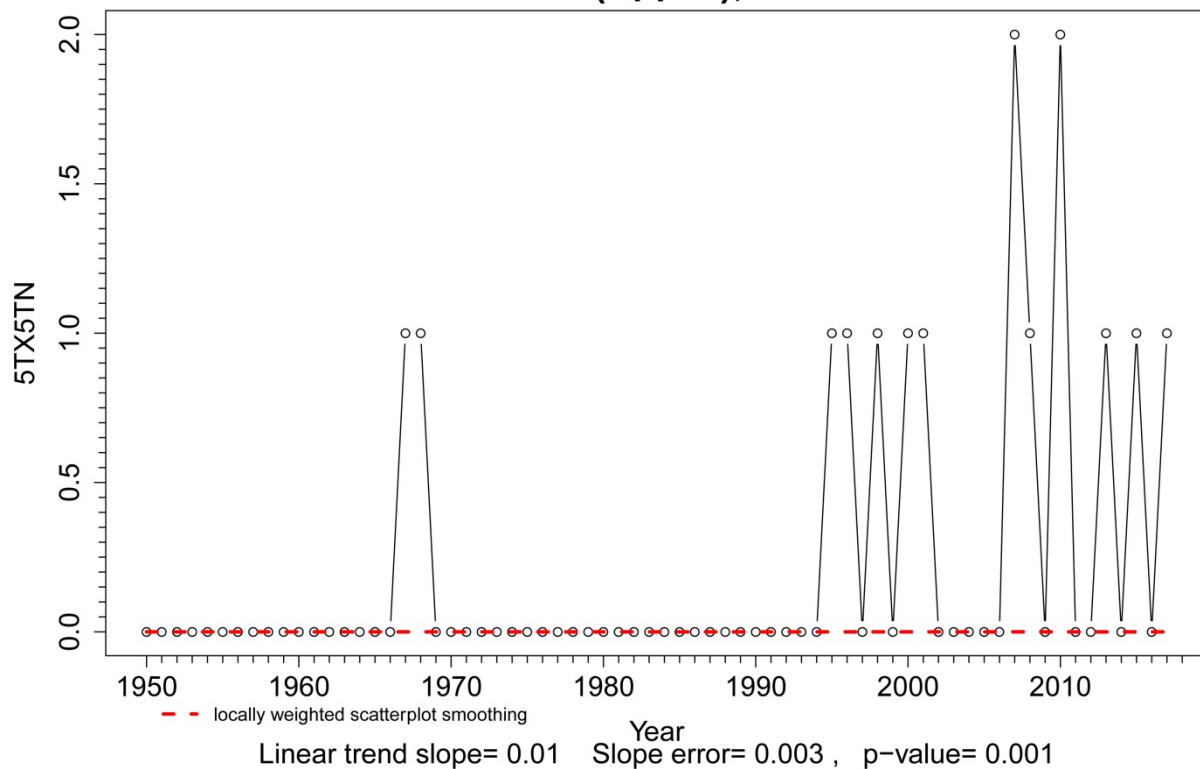
2.3.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Центрального региона.

station: Бологое, index: 5TX5TN

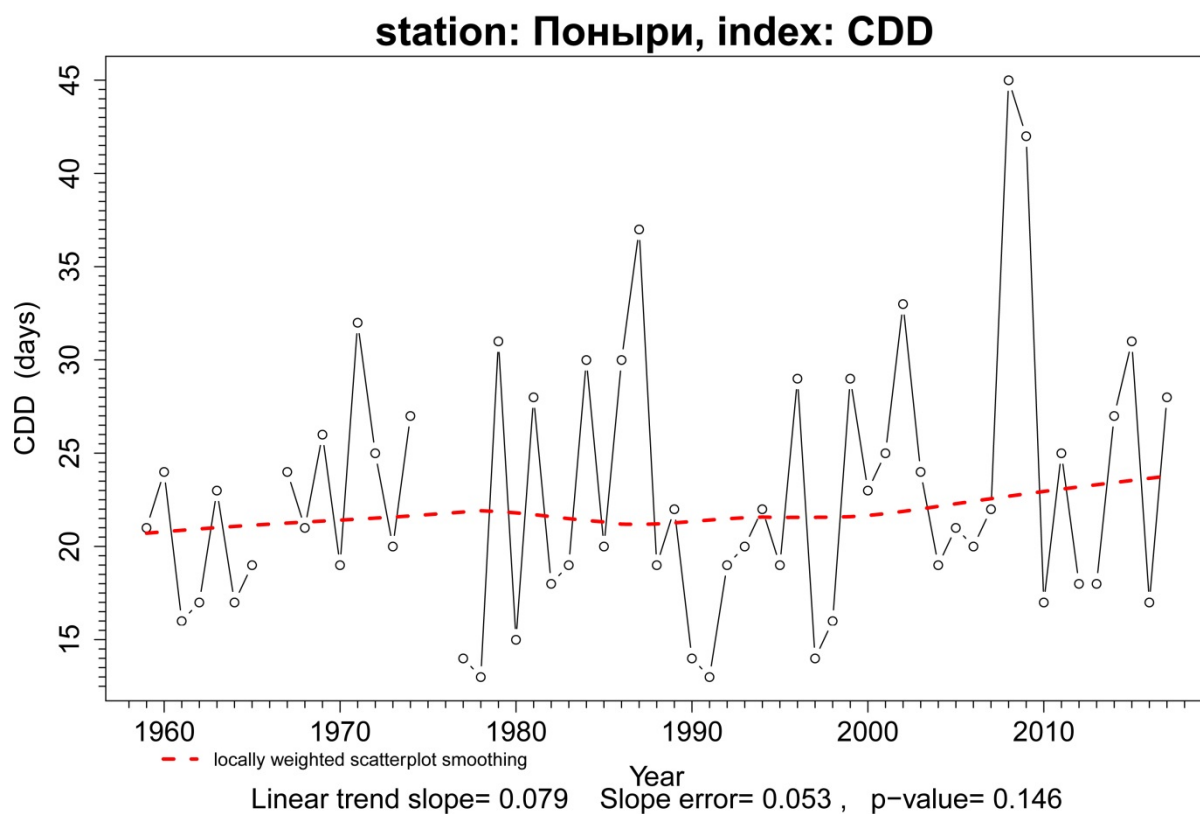
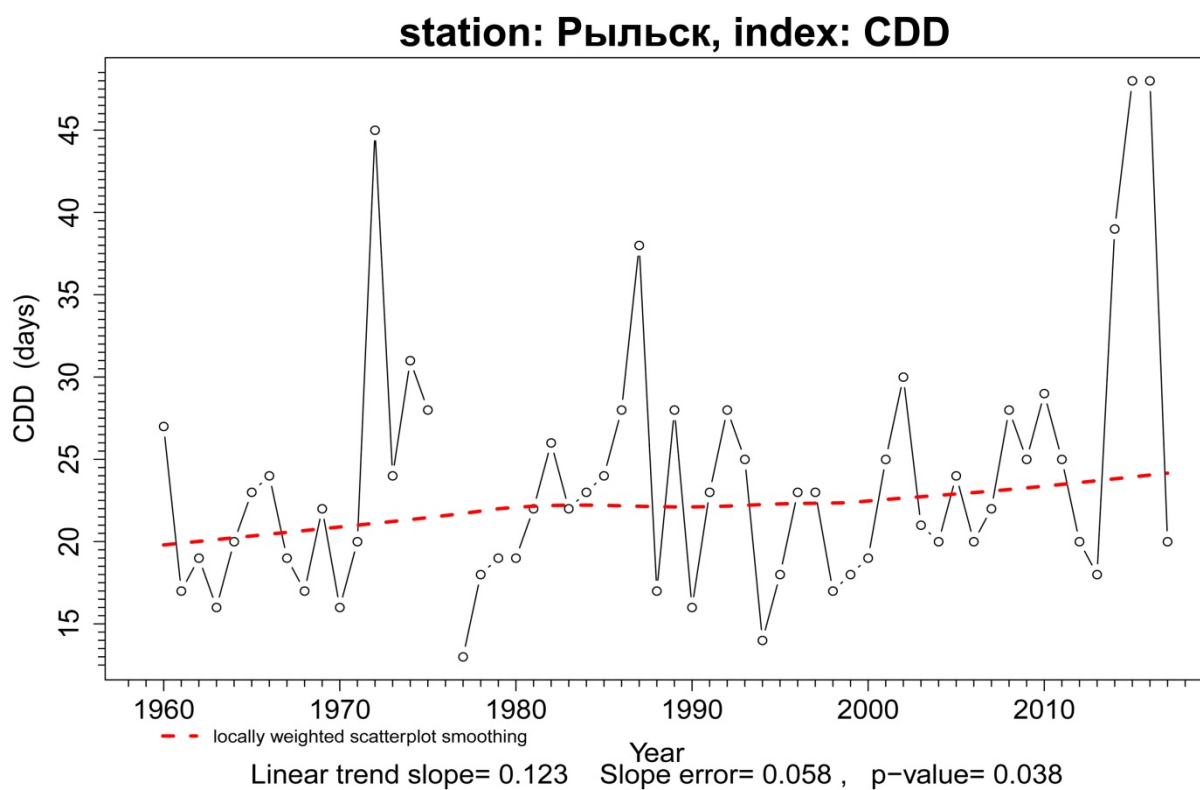


station: Максатиха, index: 5TX5TN

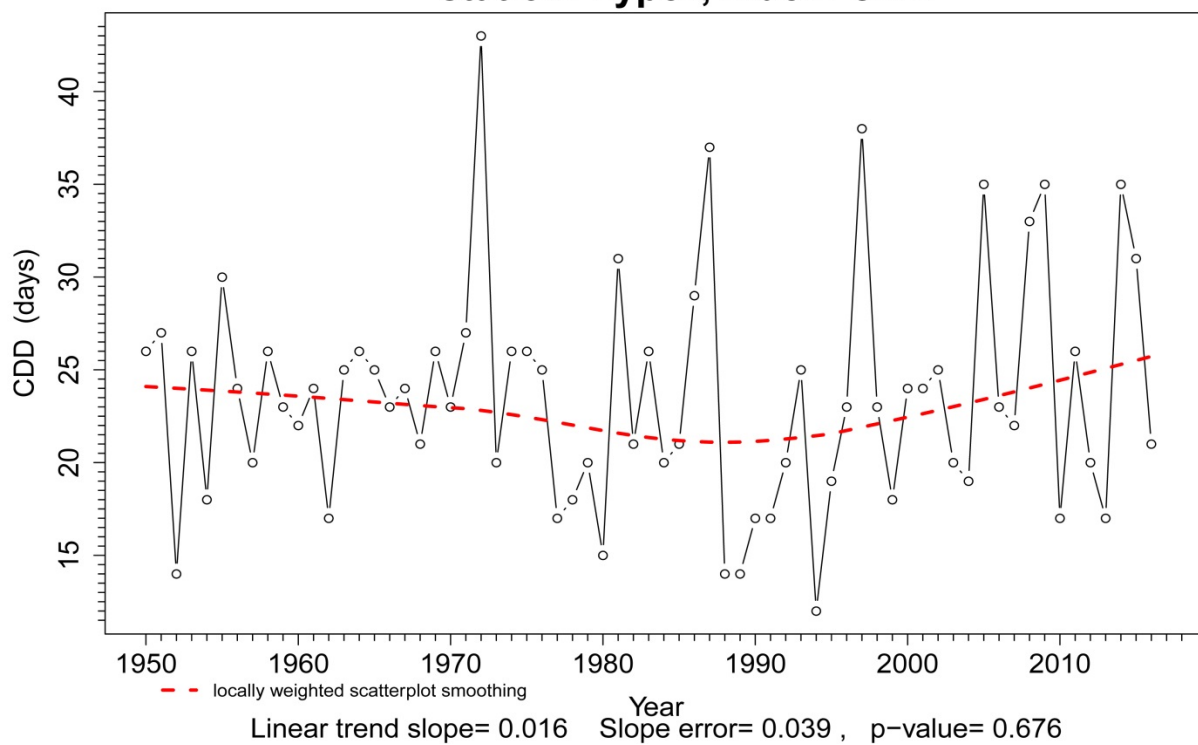


station: Переславль-Залесский, index: 5TX5TN

station: Москва (ВДНХ), index: 5TX5TN


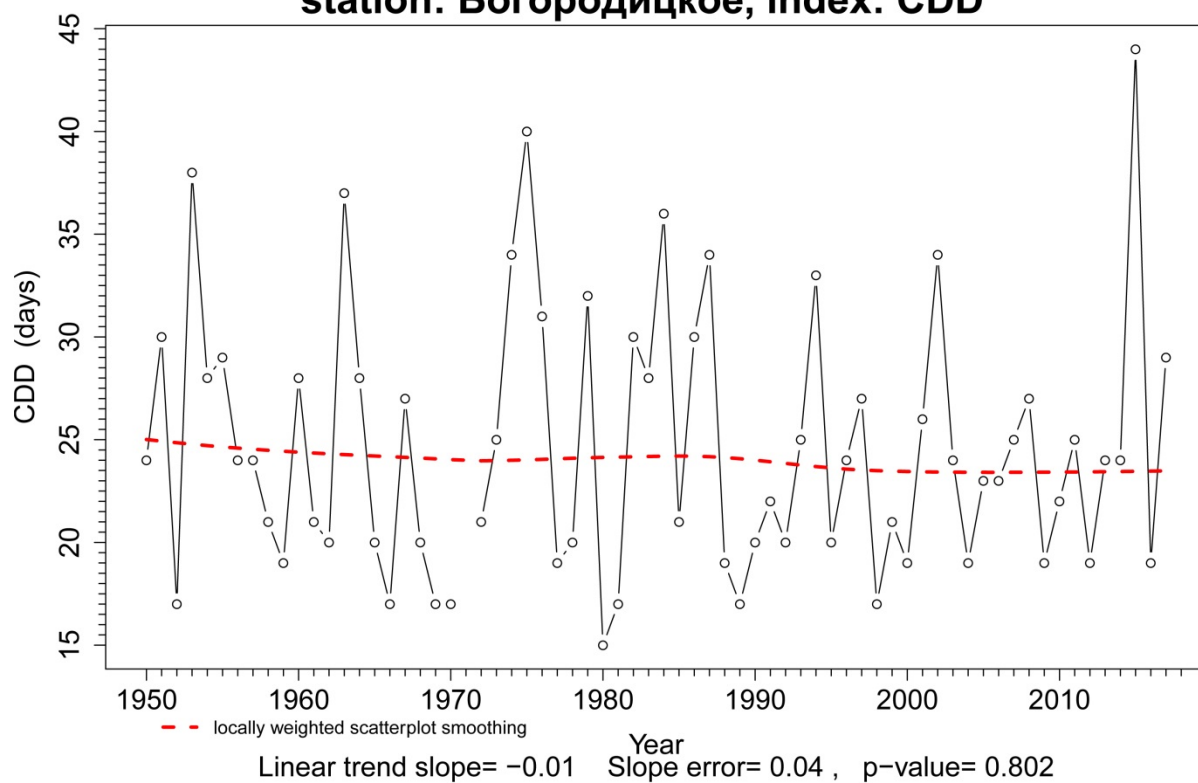
2.4.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Центрально-Черноземного региона.



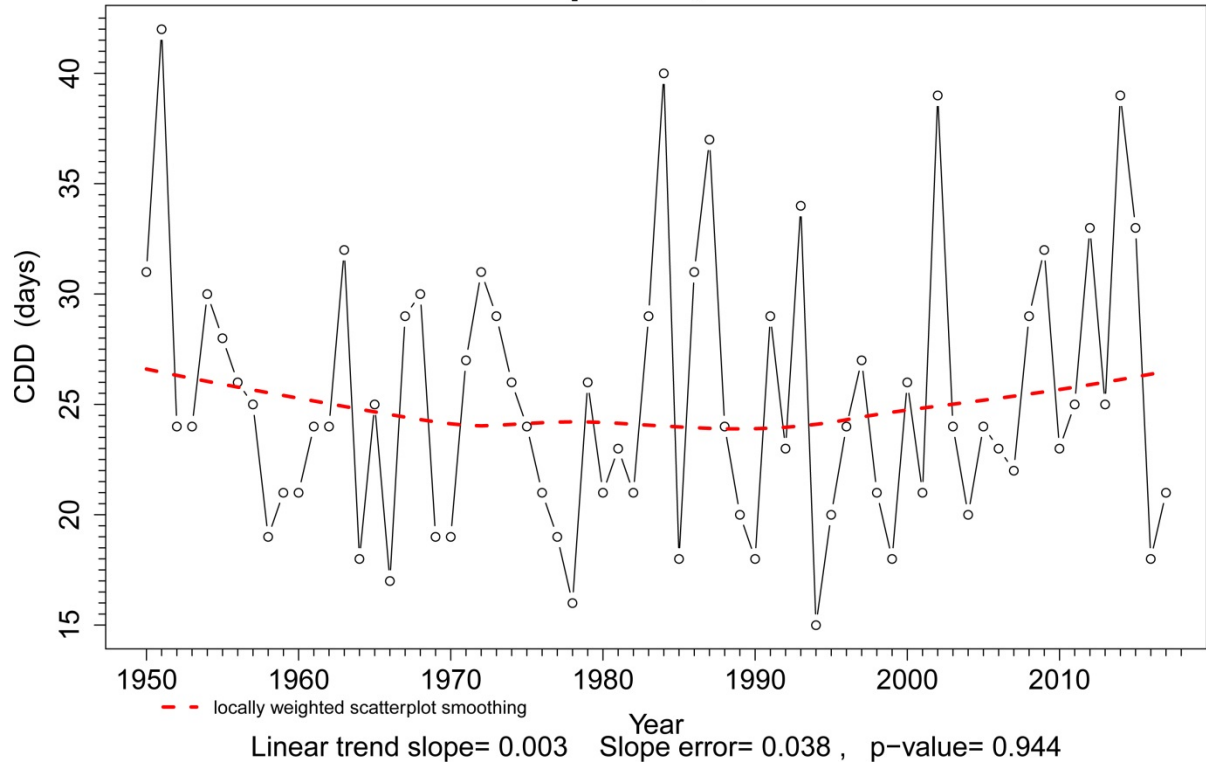
station: Купск, index: CDD



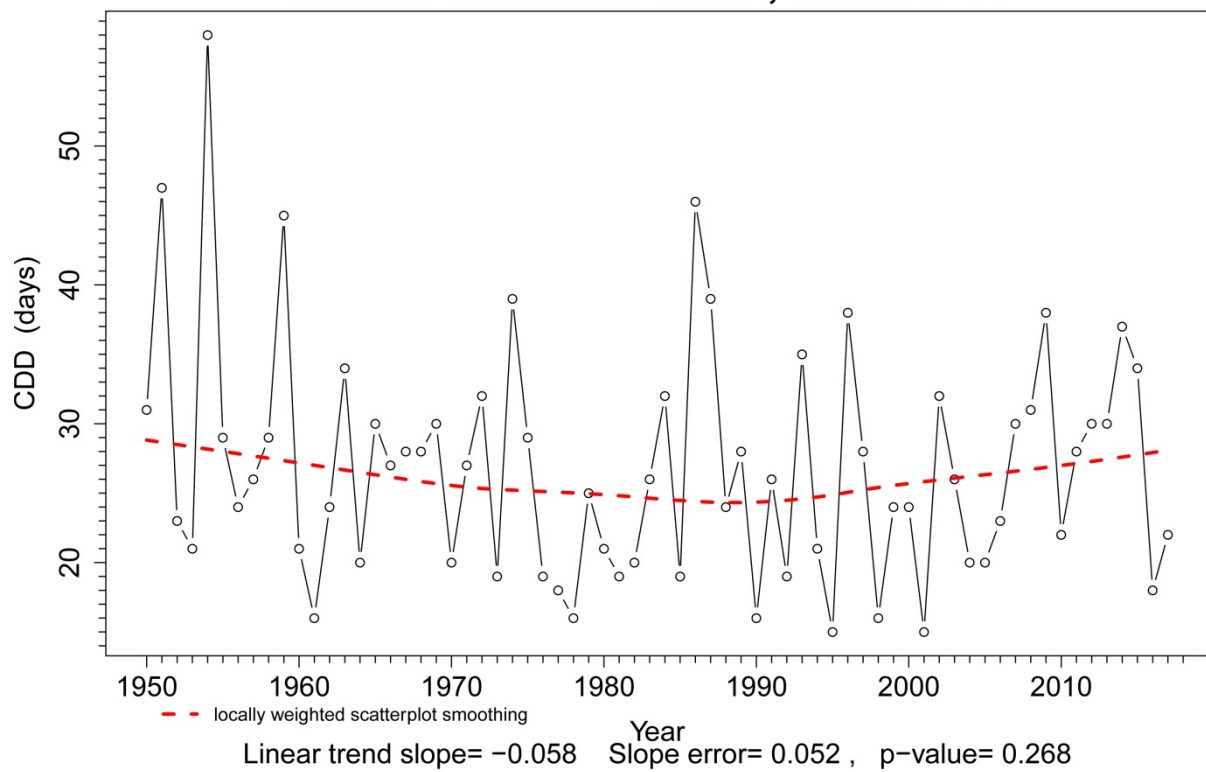
station: Богородицкое, index: CDD

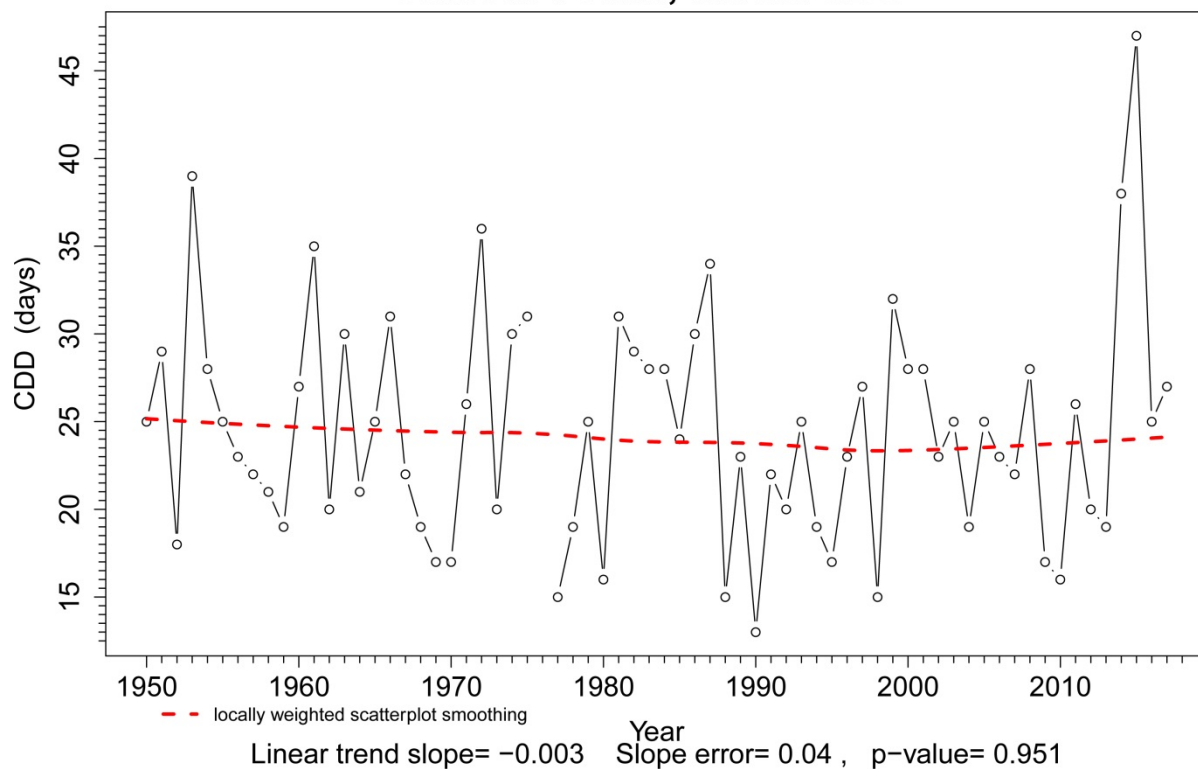


station: Воронеж, index: CDD

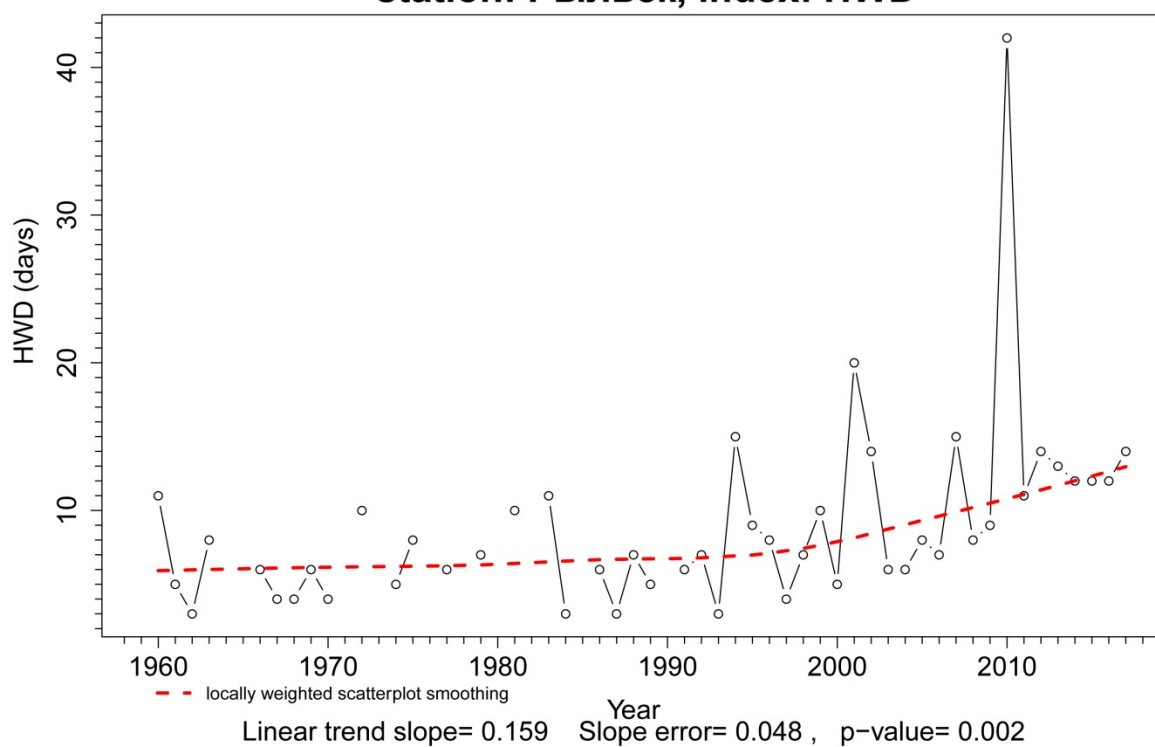


station: Каменная степь, index: CDD

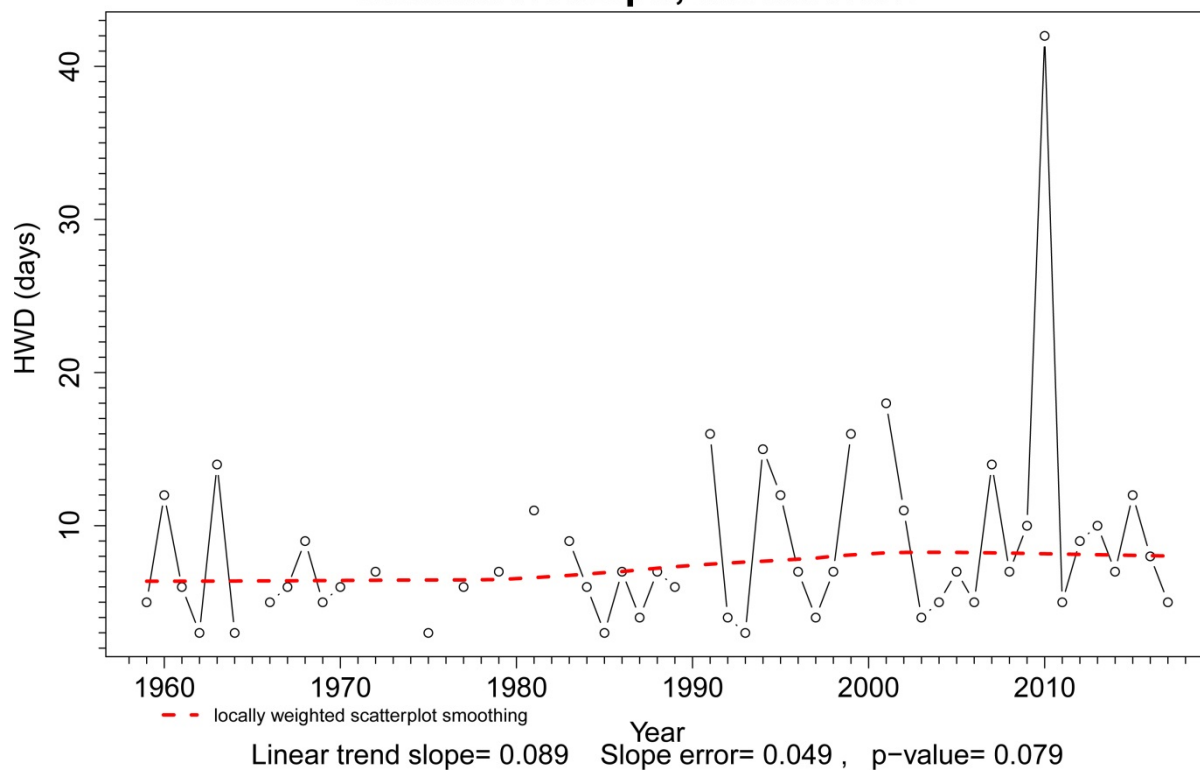


station: Готня, index: CDD

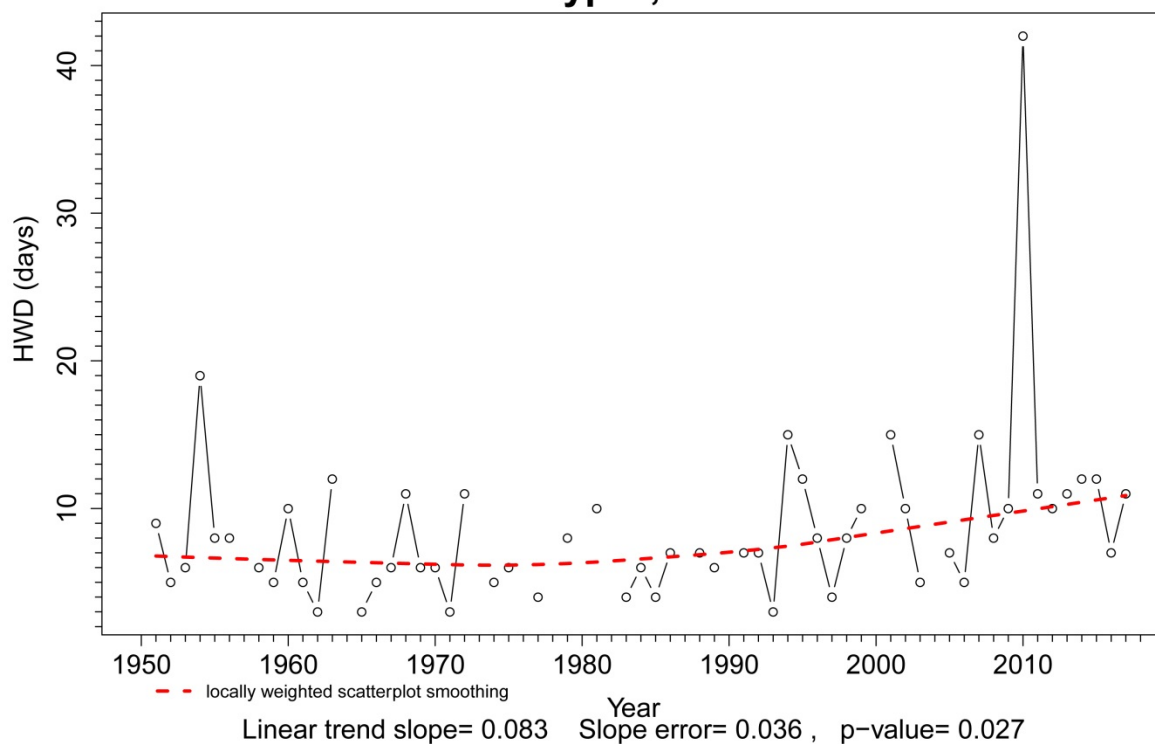
2.4.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Центрально-Черноземного региона.

station: Рыльск, index: HWD

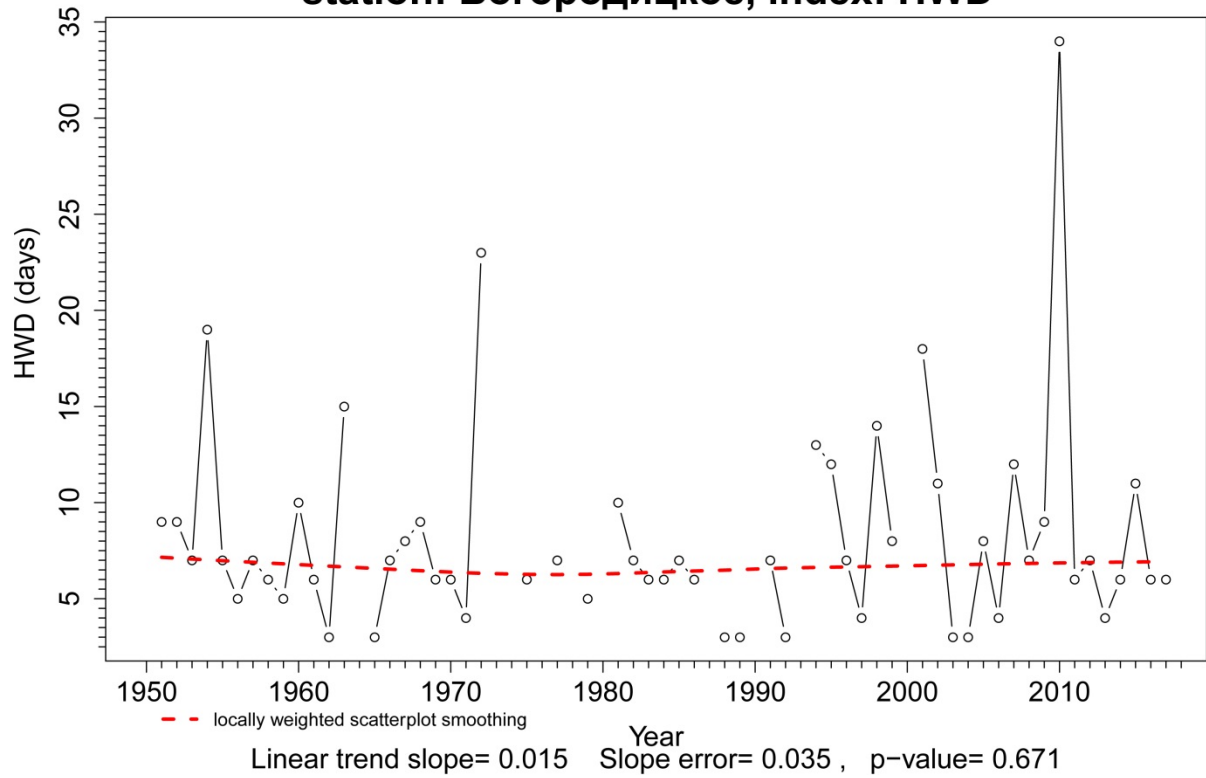
station: Поньри, index: HWD



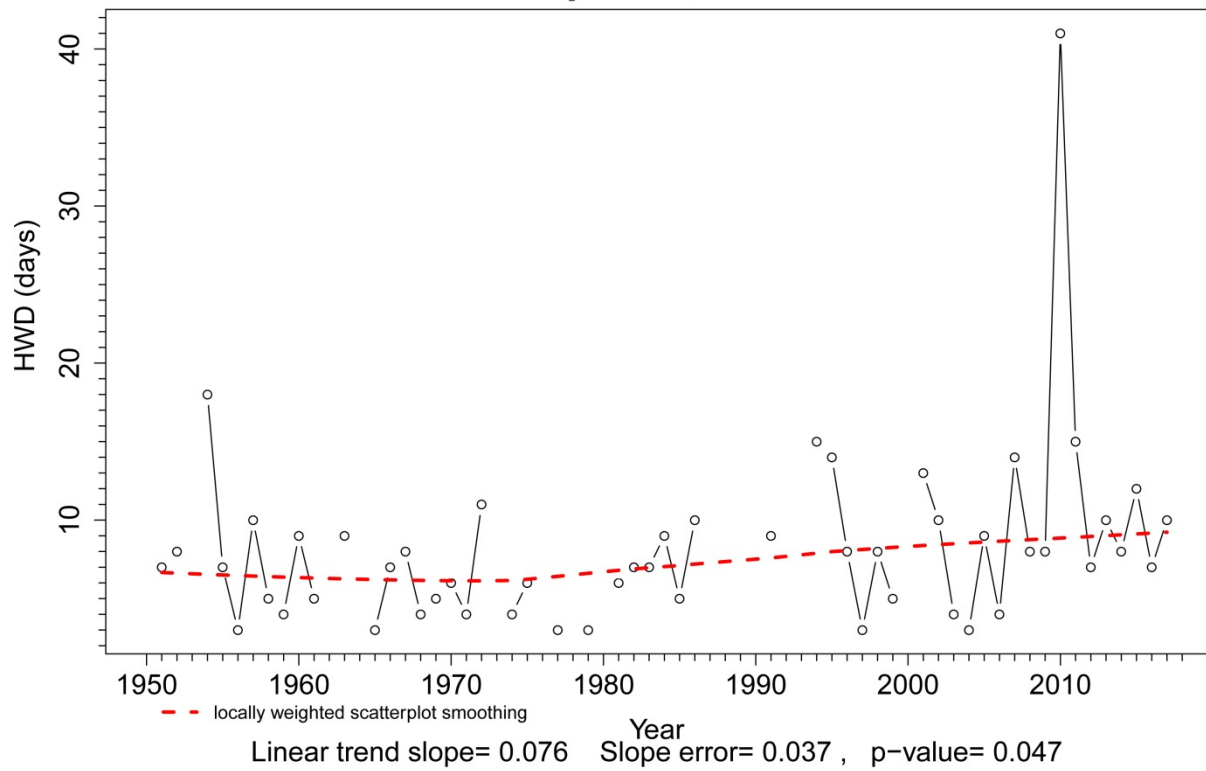
station: Купск, index: HWD



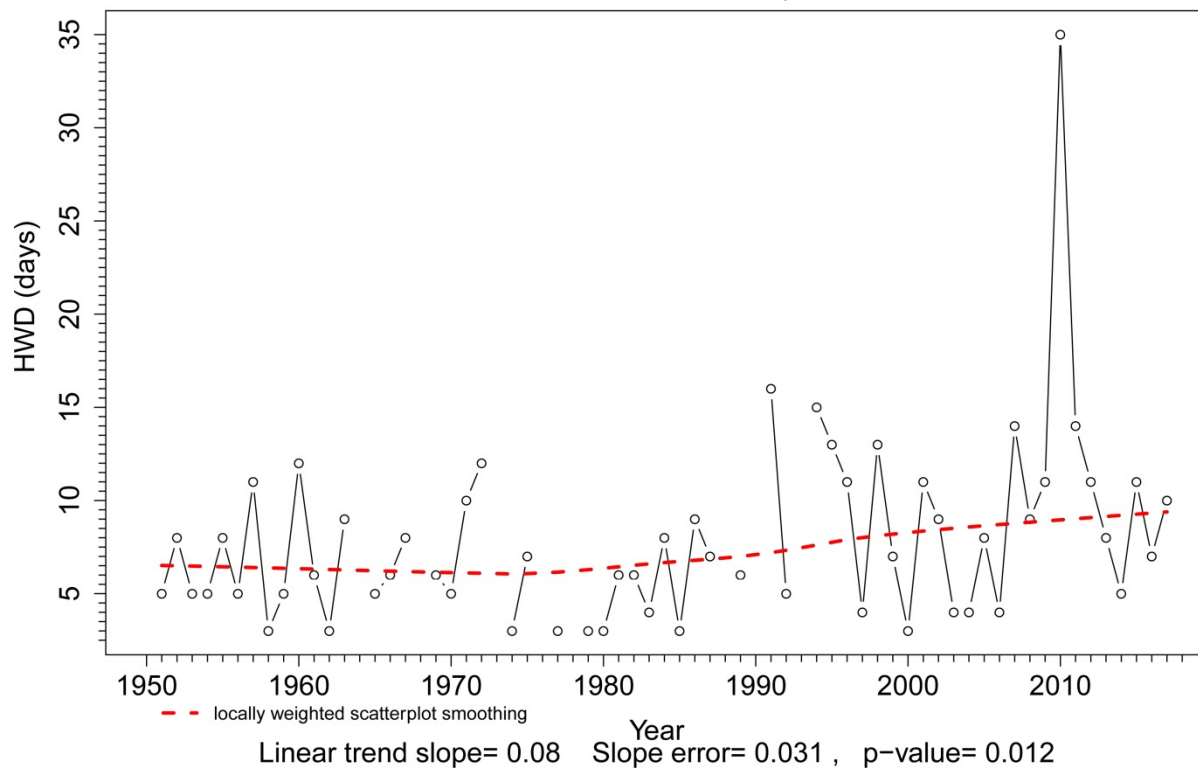
station: Богородицкое, index: HWD



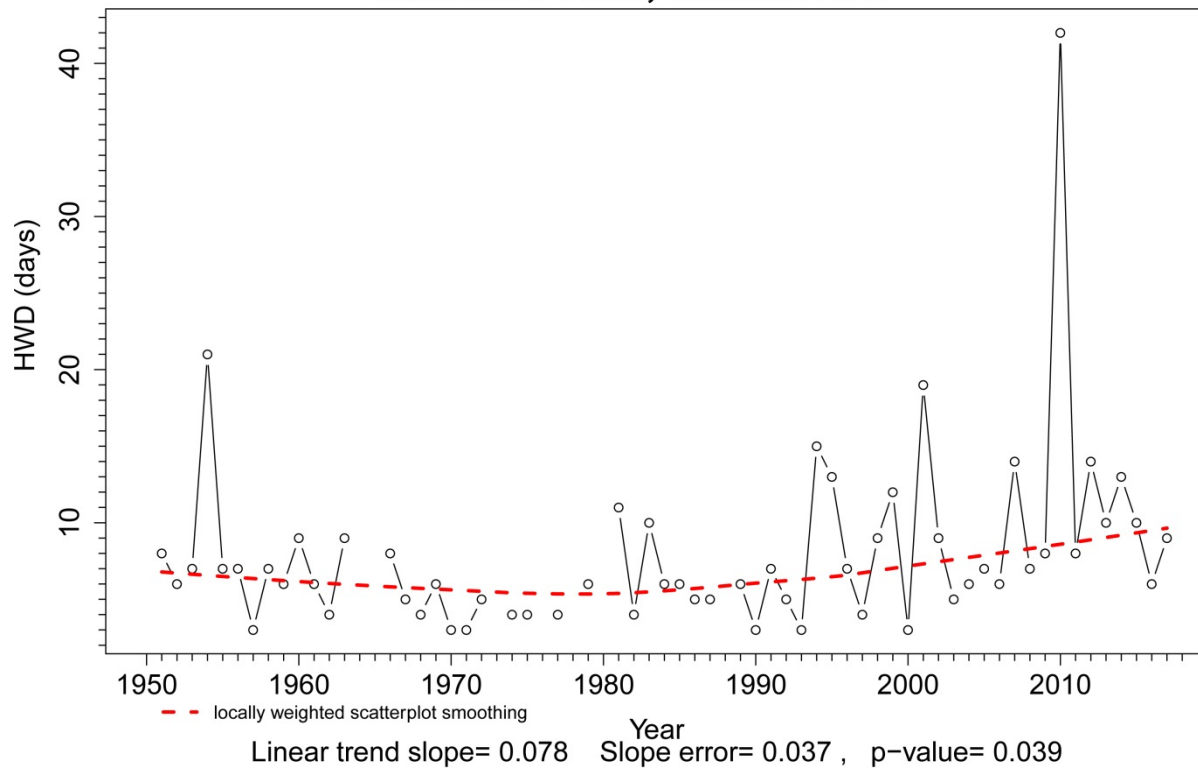
station: Воронеж, index: HWD



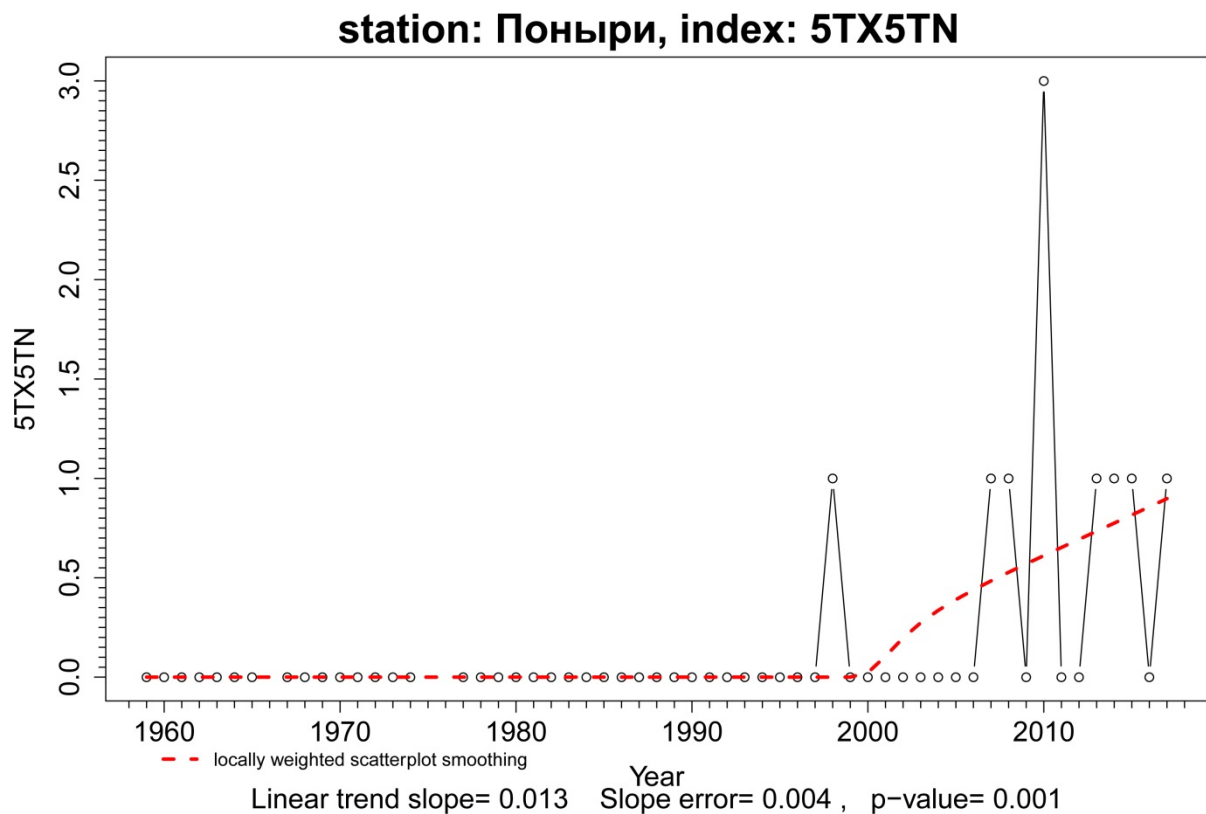
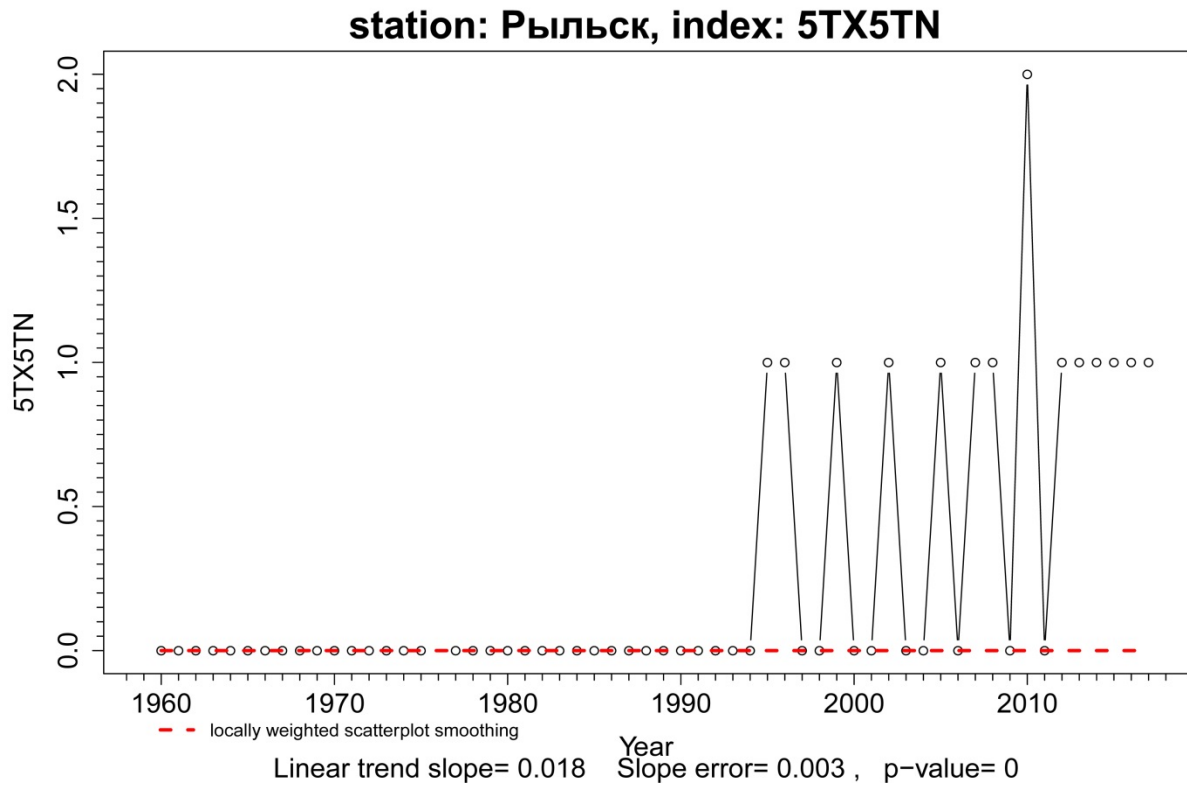
station: Каменная степь, index: HWD

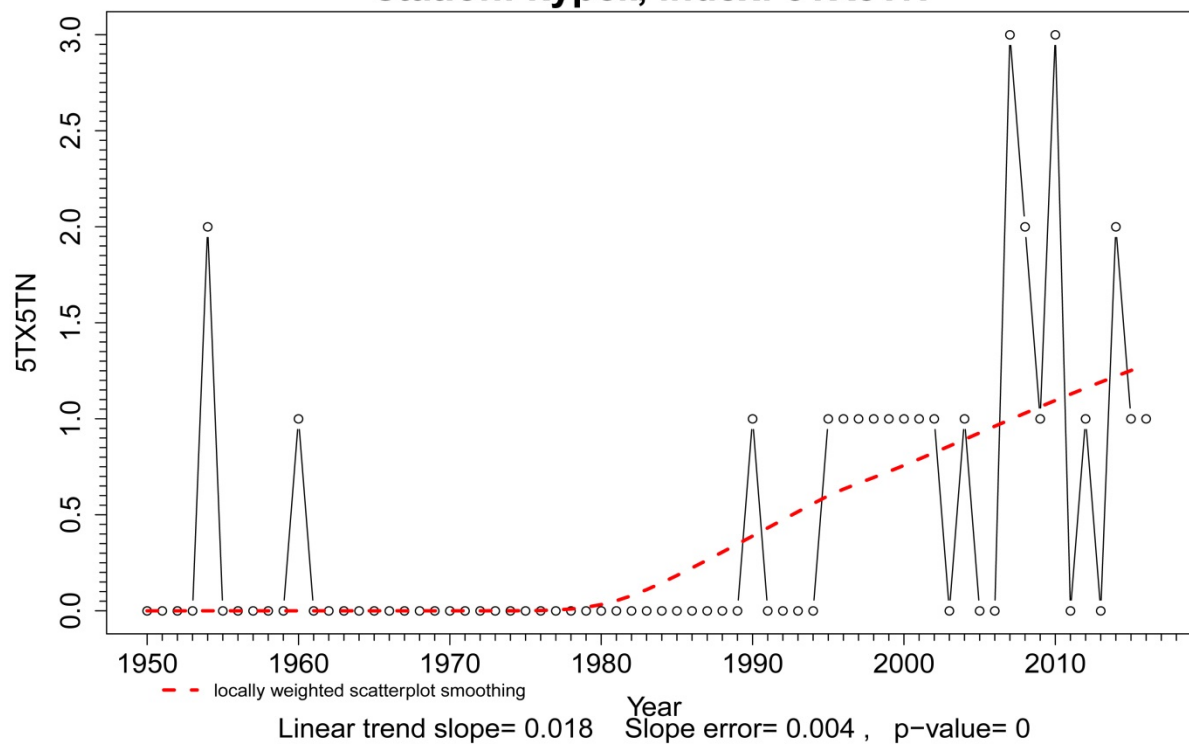
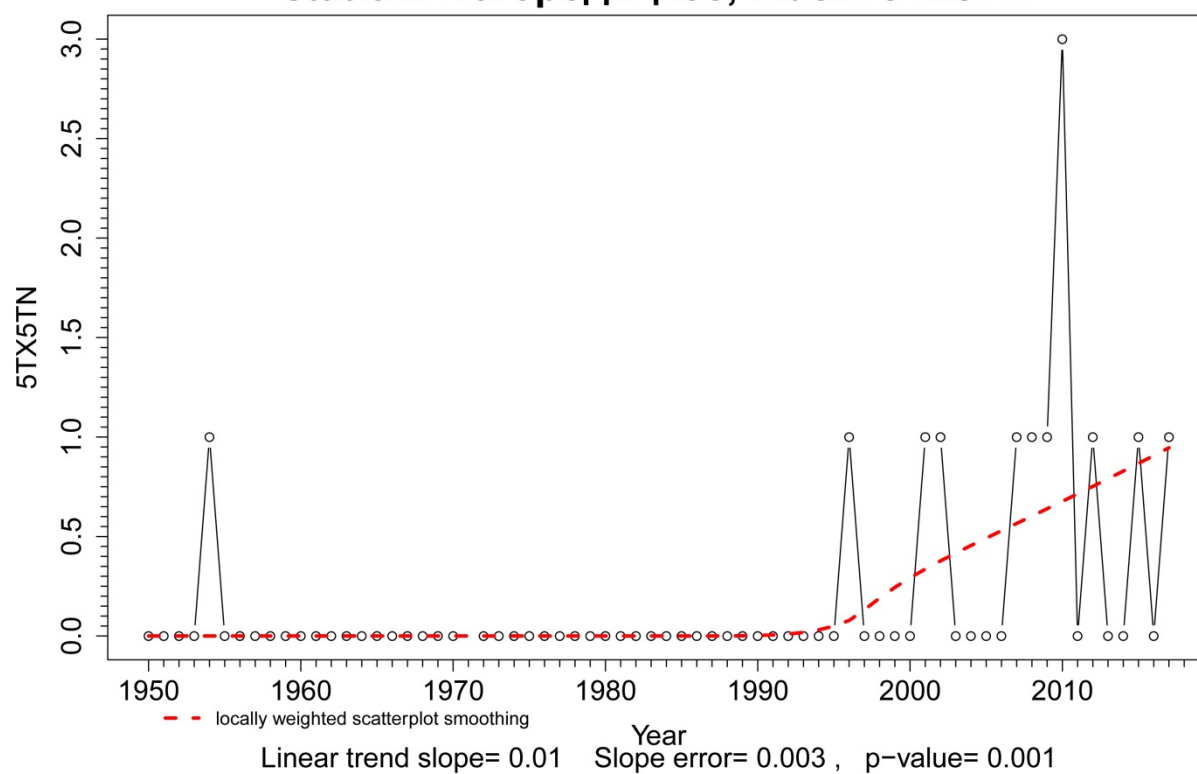


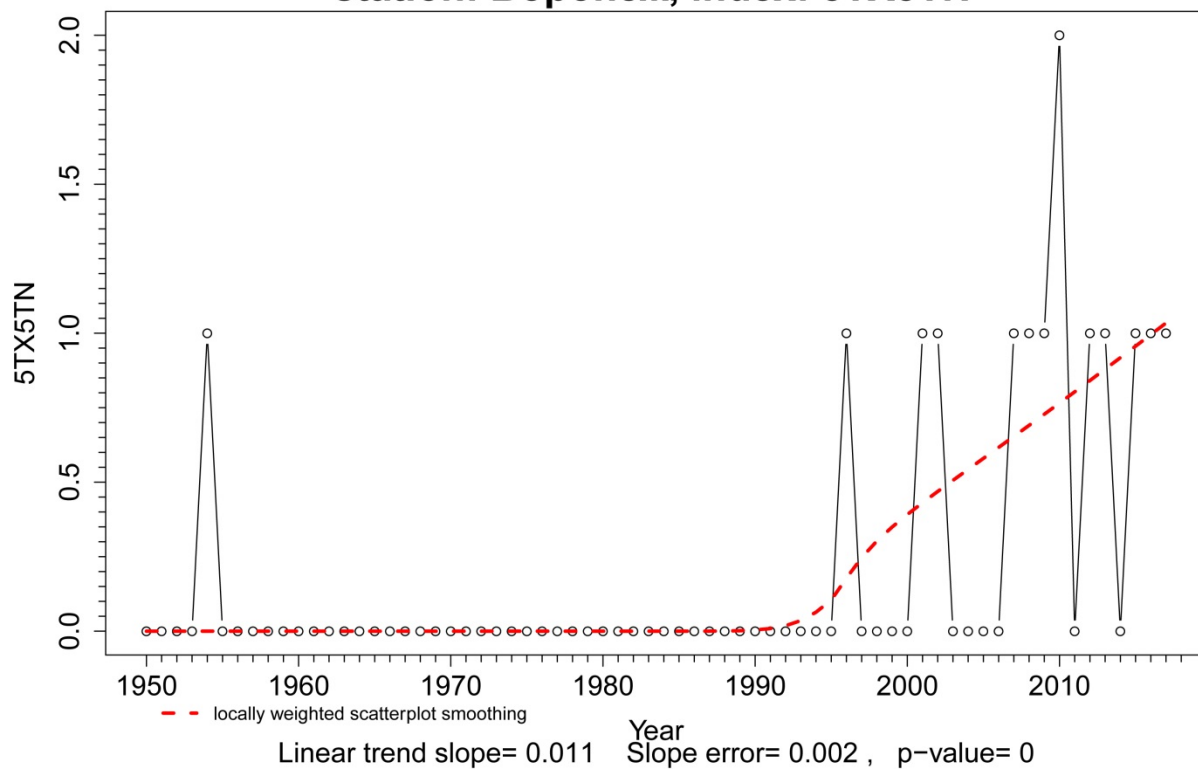
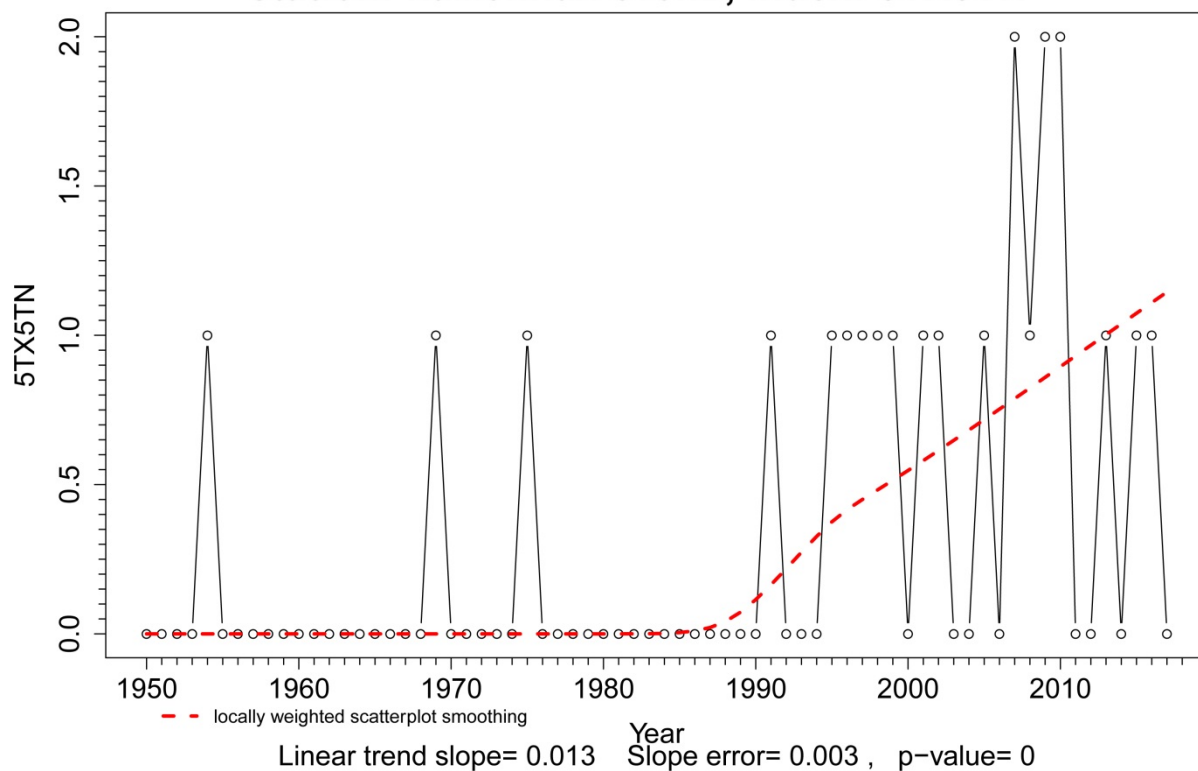
station: Готня, index: HWD

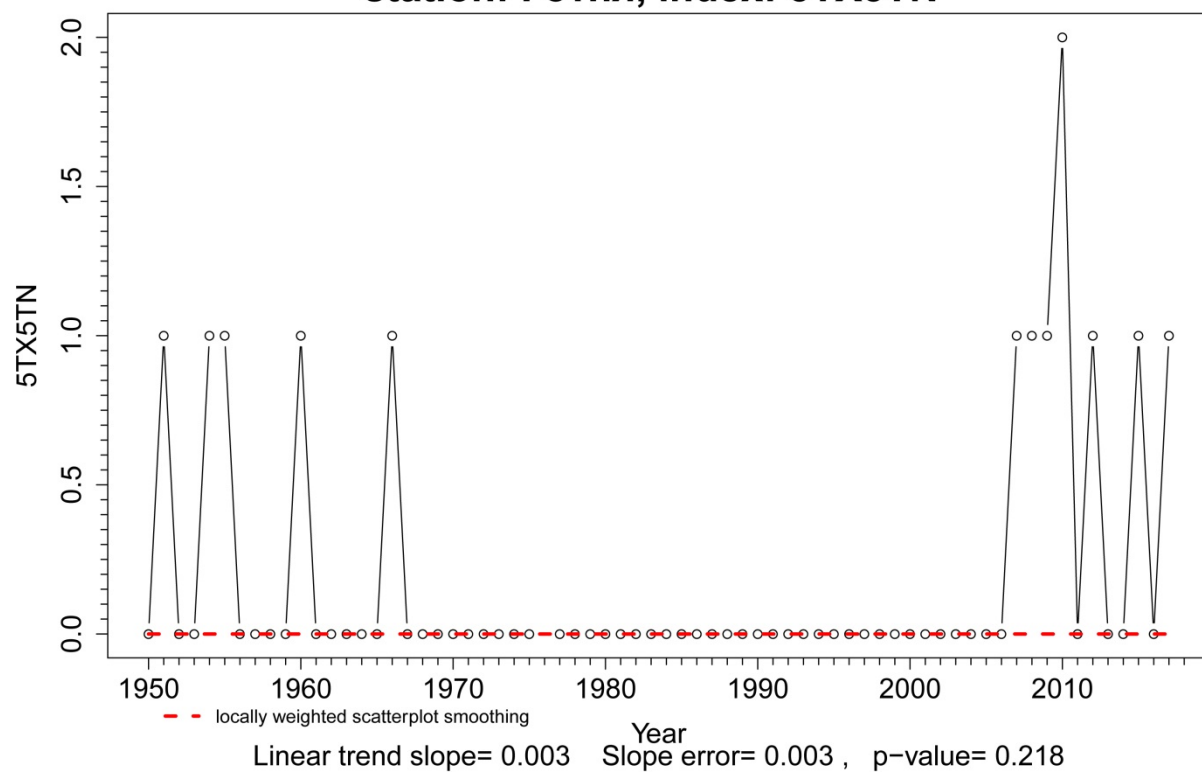


2.4.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальными температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Центрально-Черноземного региона.

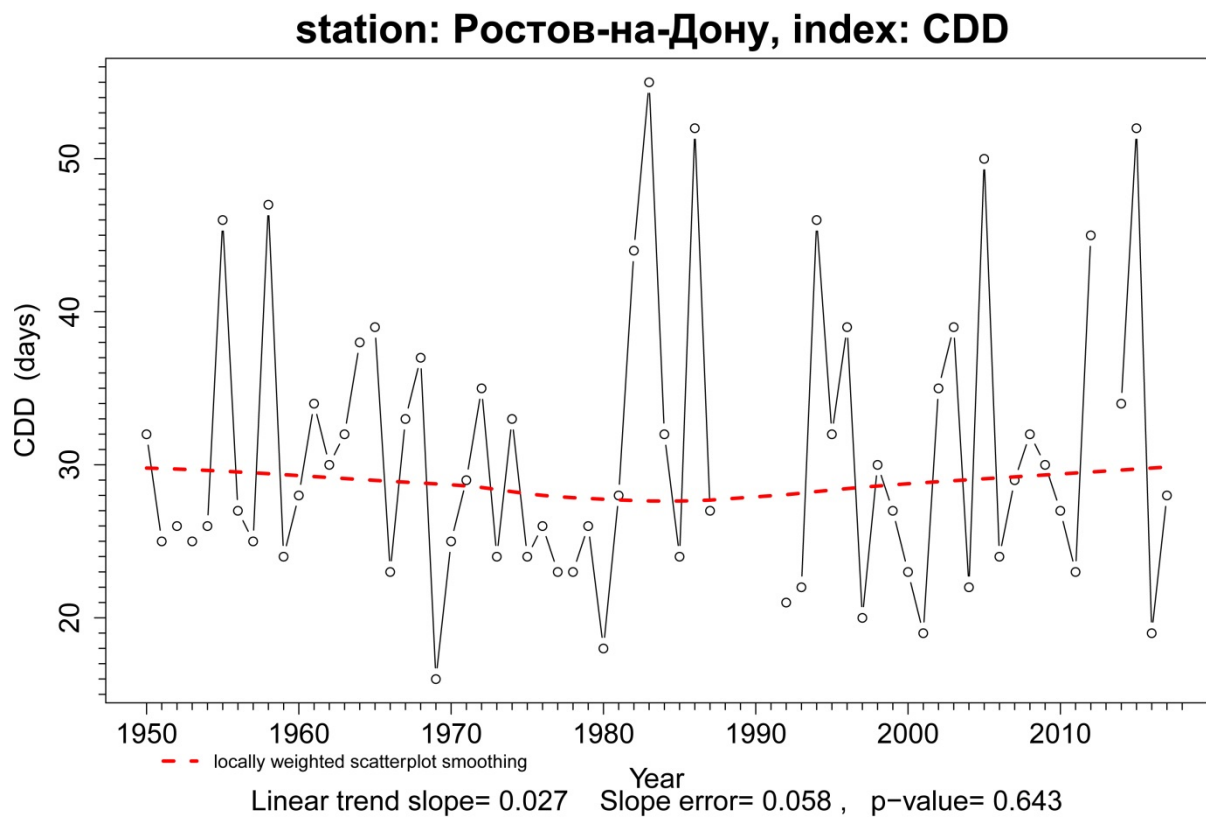
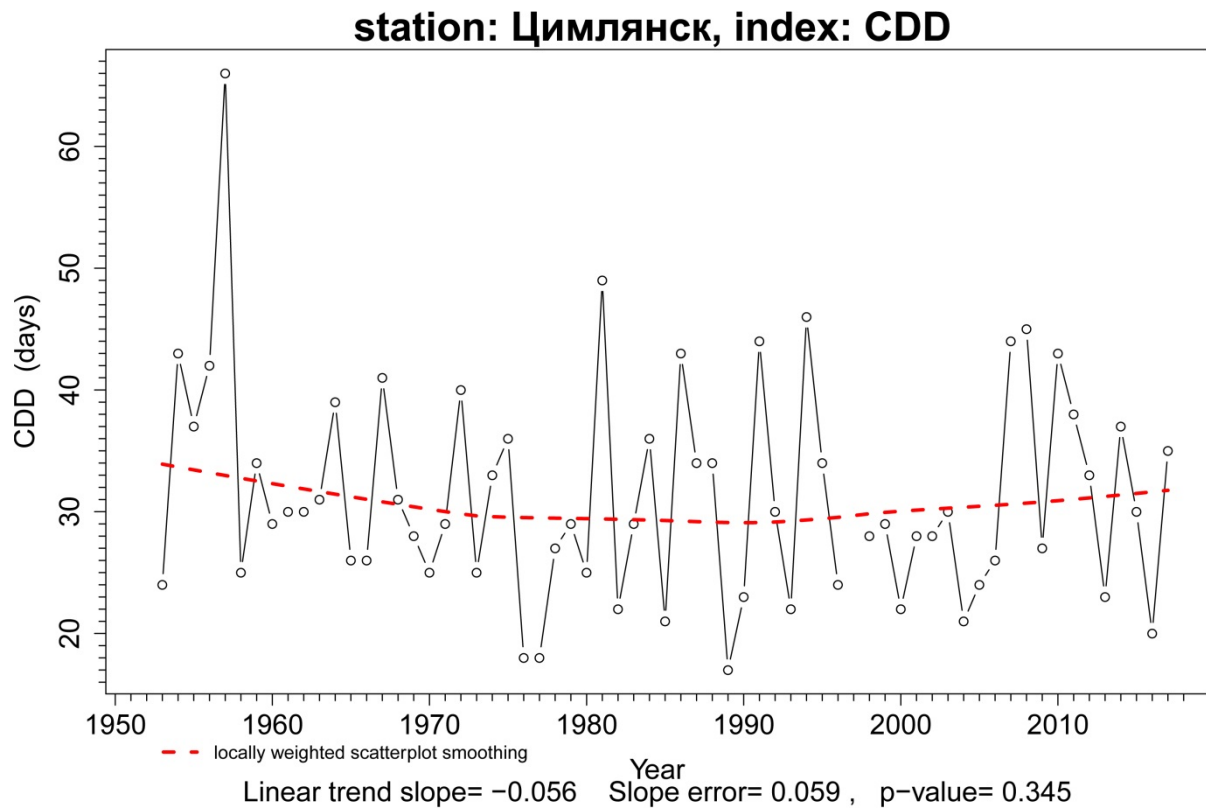


station: Купск, index: 5TX5TN**station: Богородицкое, index: 5TX5TN**

station: Воронеж, index: 5TX5TN**station: Каменная степь, index: 5TX5TN**

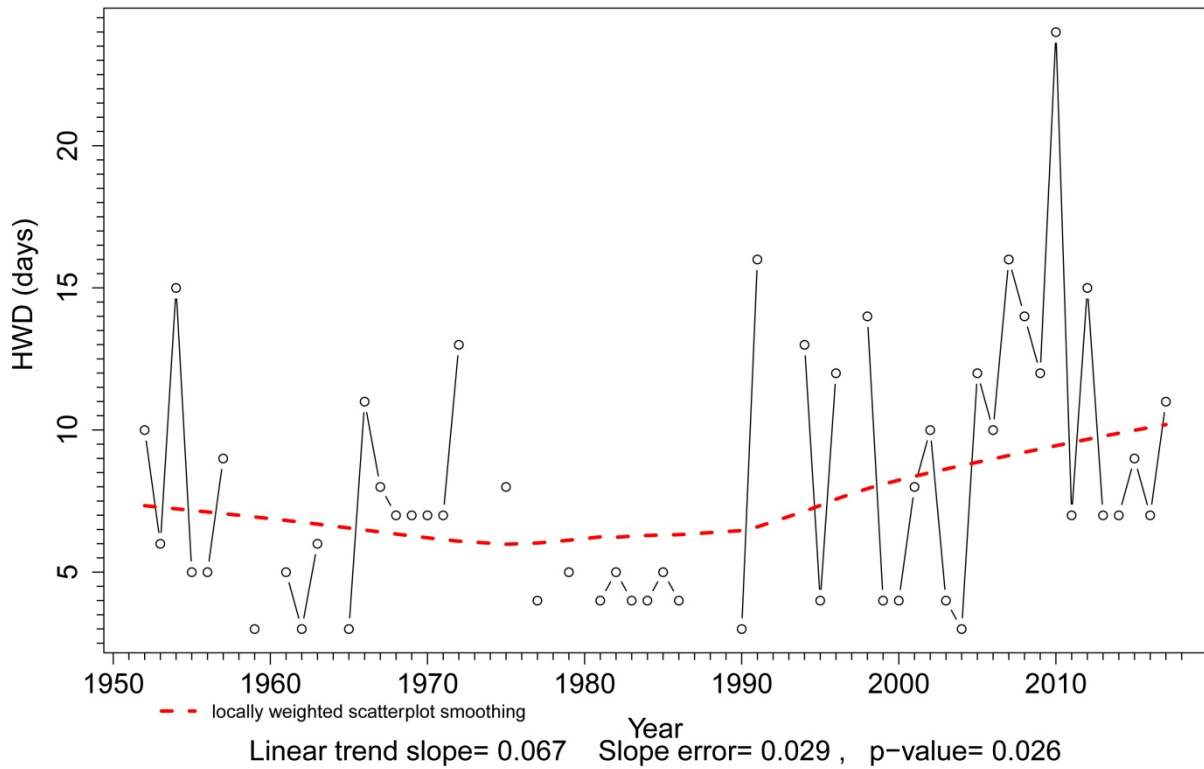
station: Готня, index: 5TX5TN

2.5.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Ростовской области.

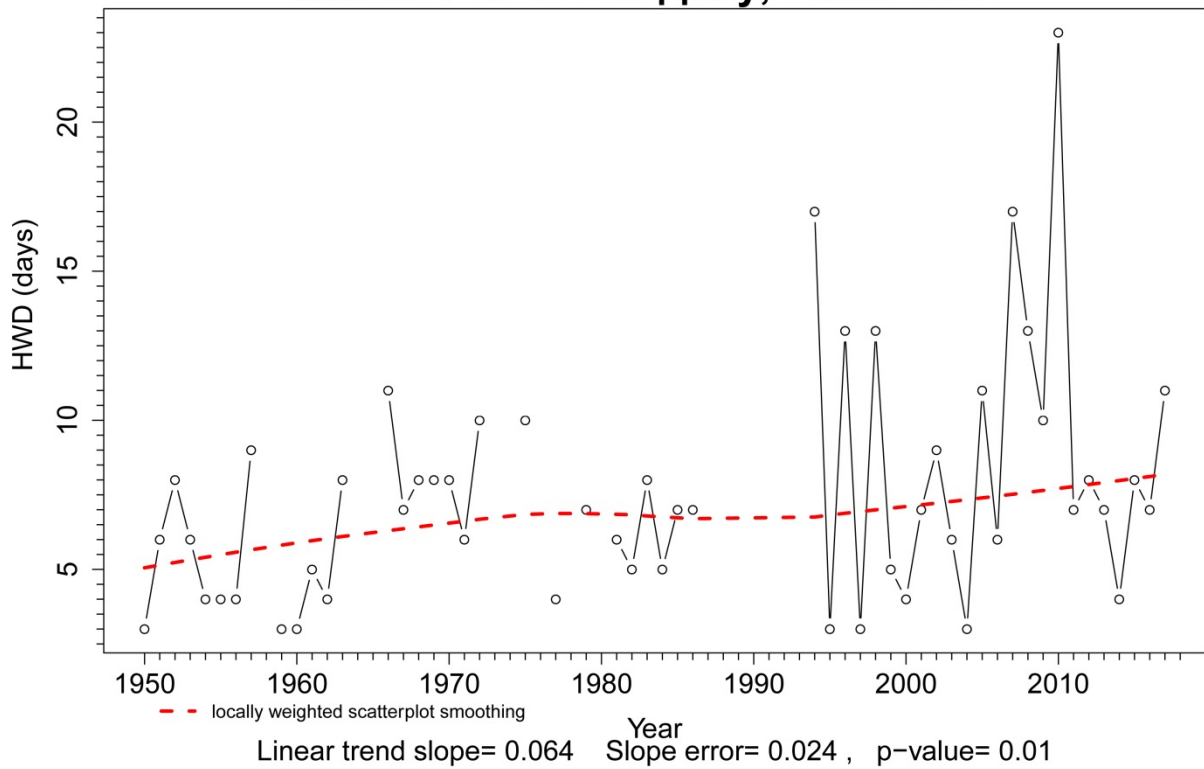


2.5.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Ростовской области.

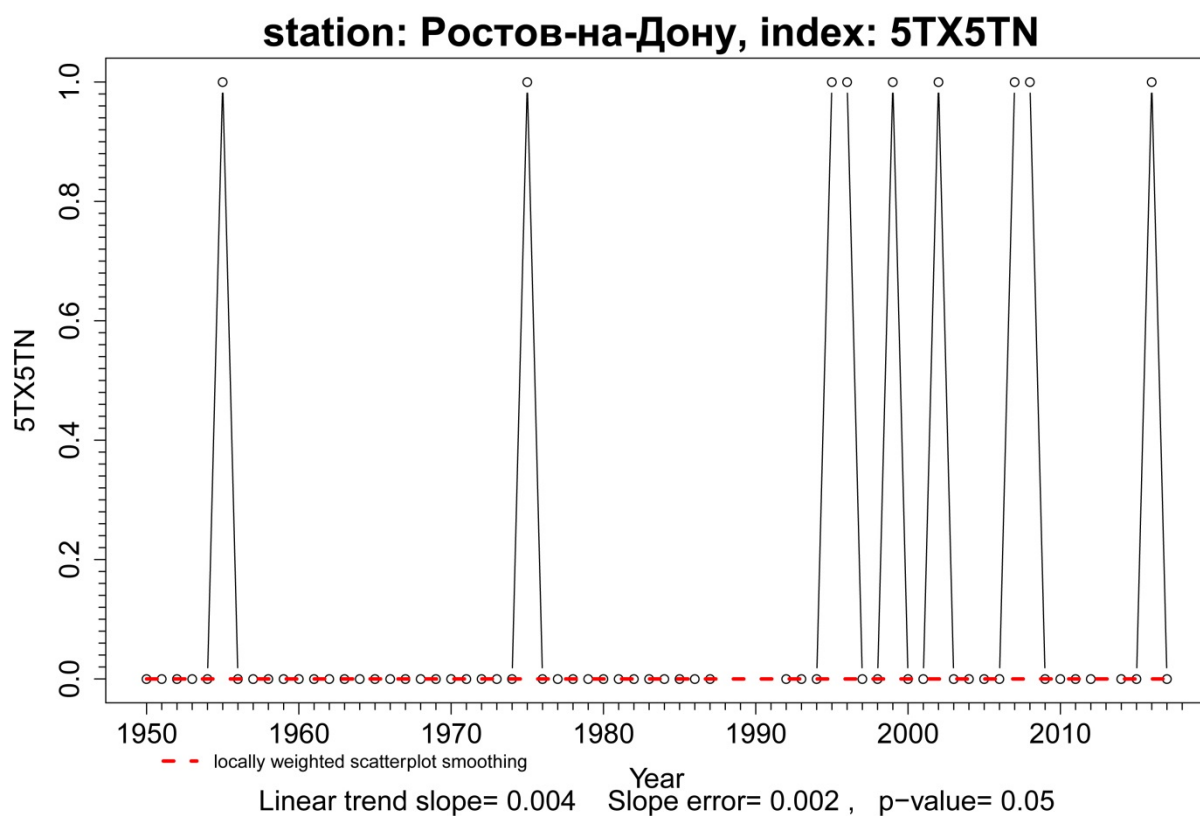
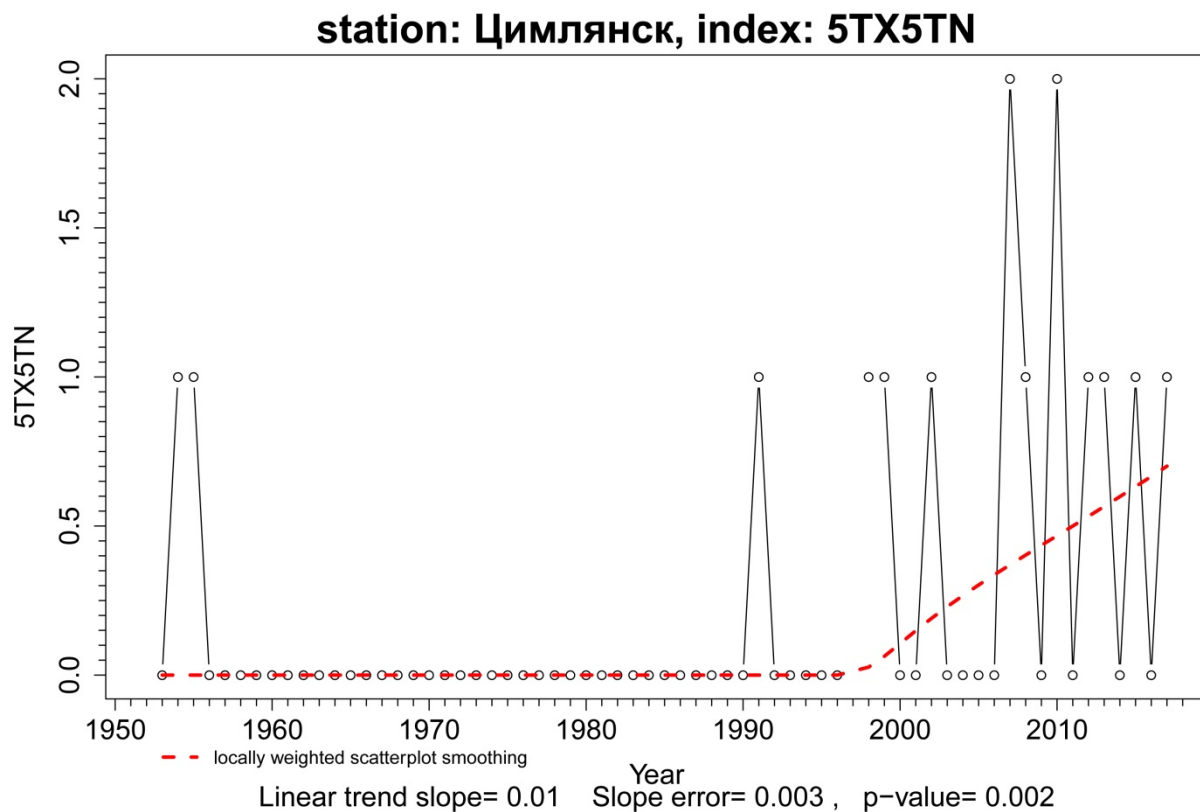
station: Цимлянск, index: HWD



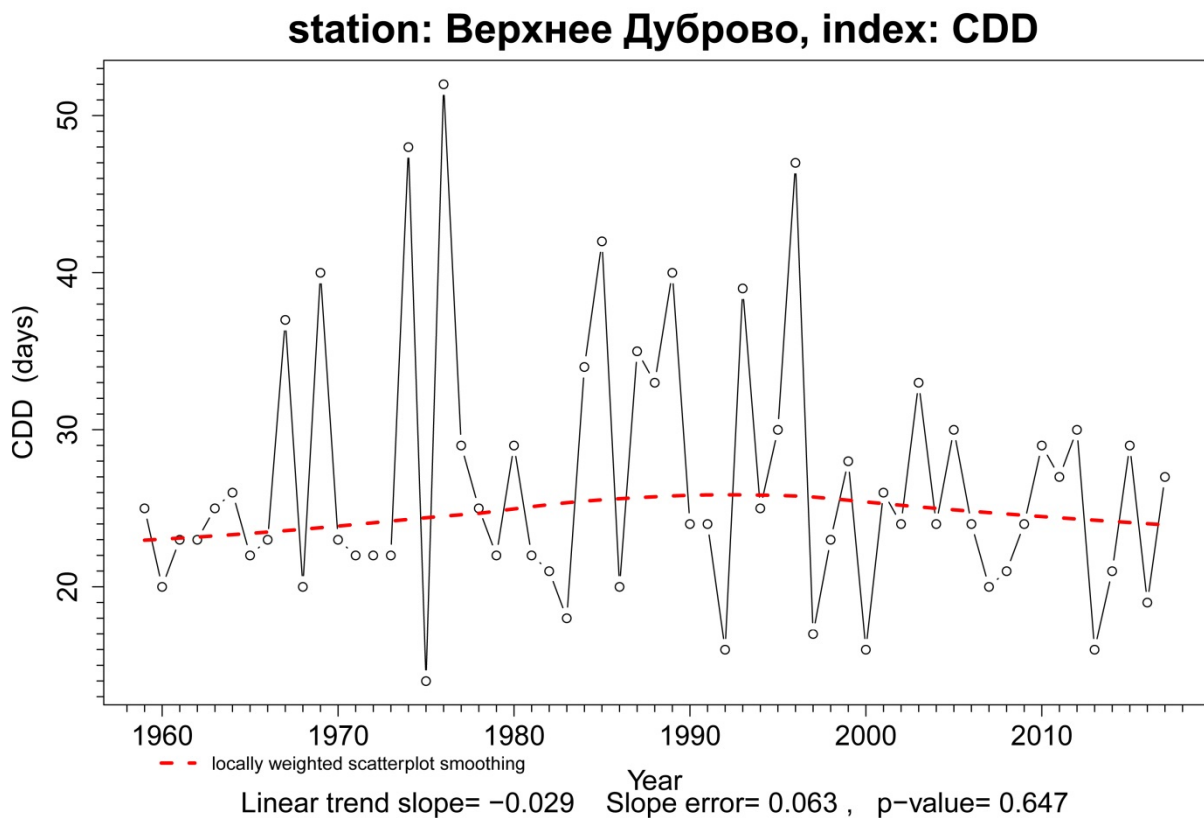
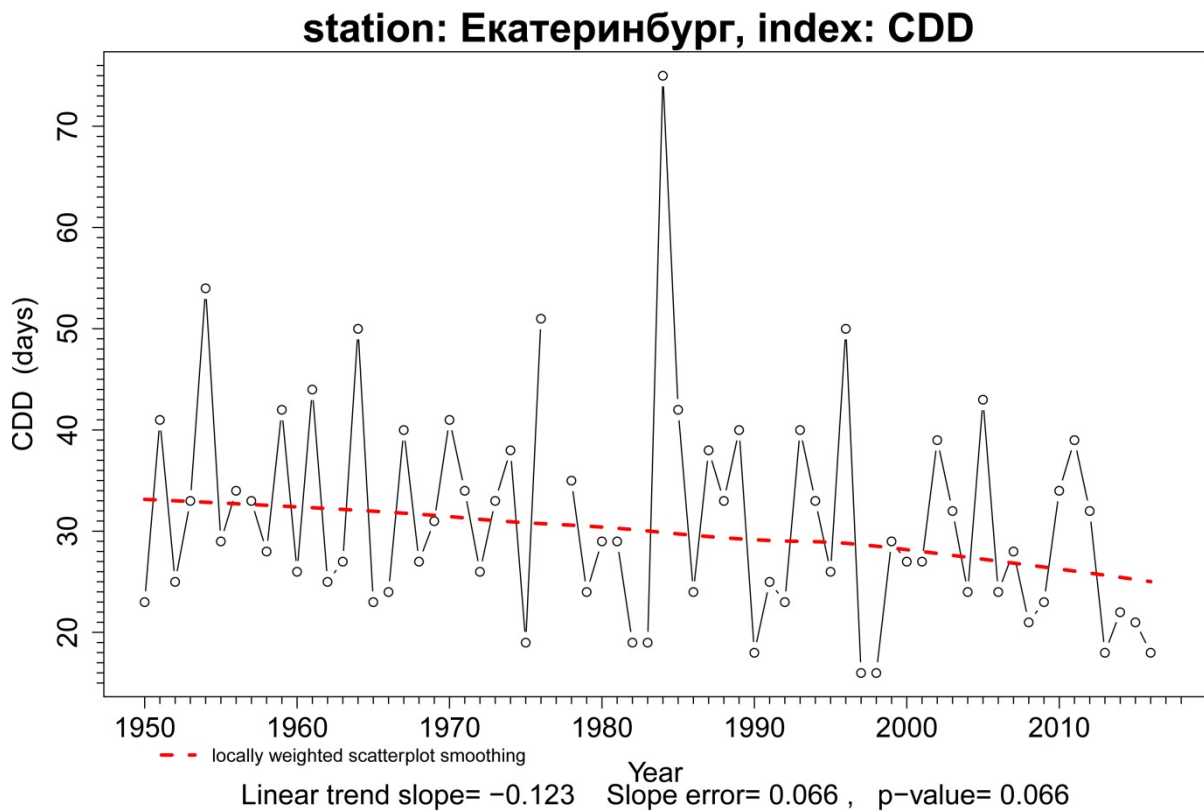
station: Ростов-на-Дону, index: HWD



2.5.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Ростовской области.

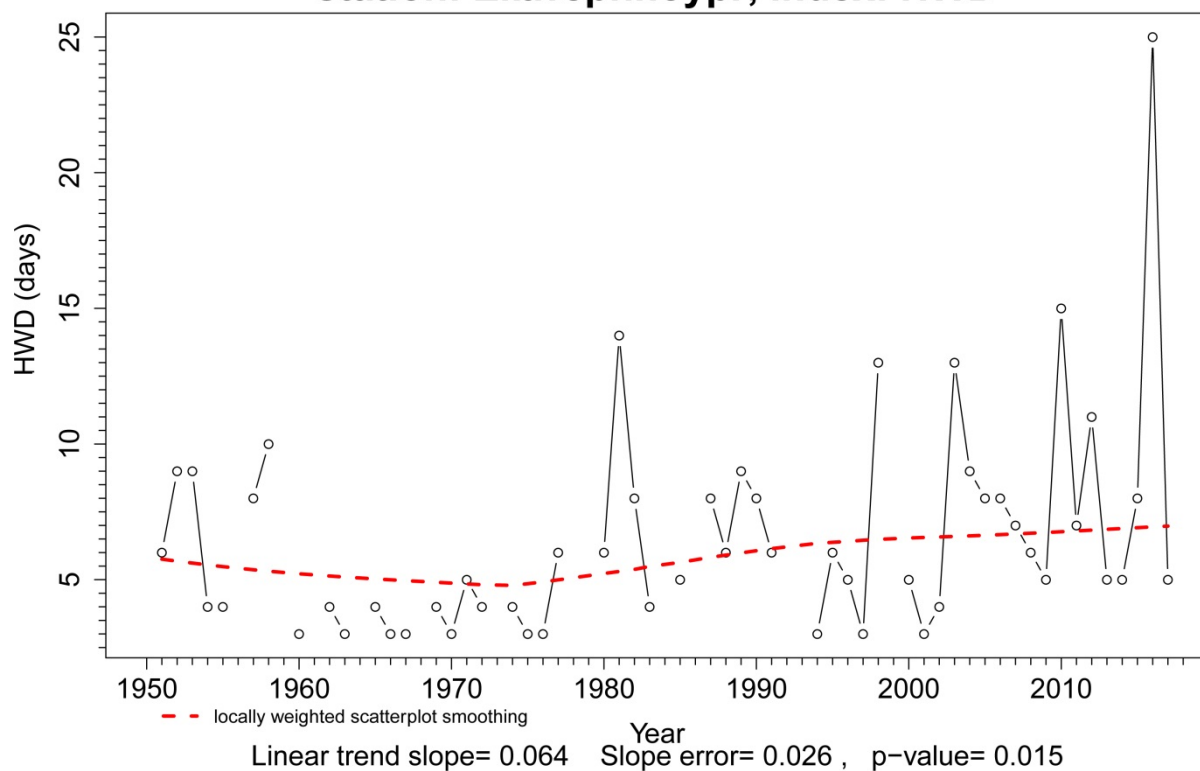


2.6.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Свердловской области.

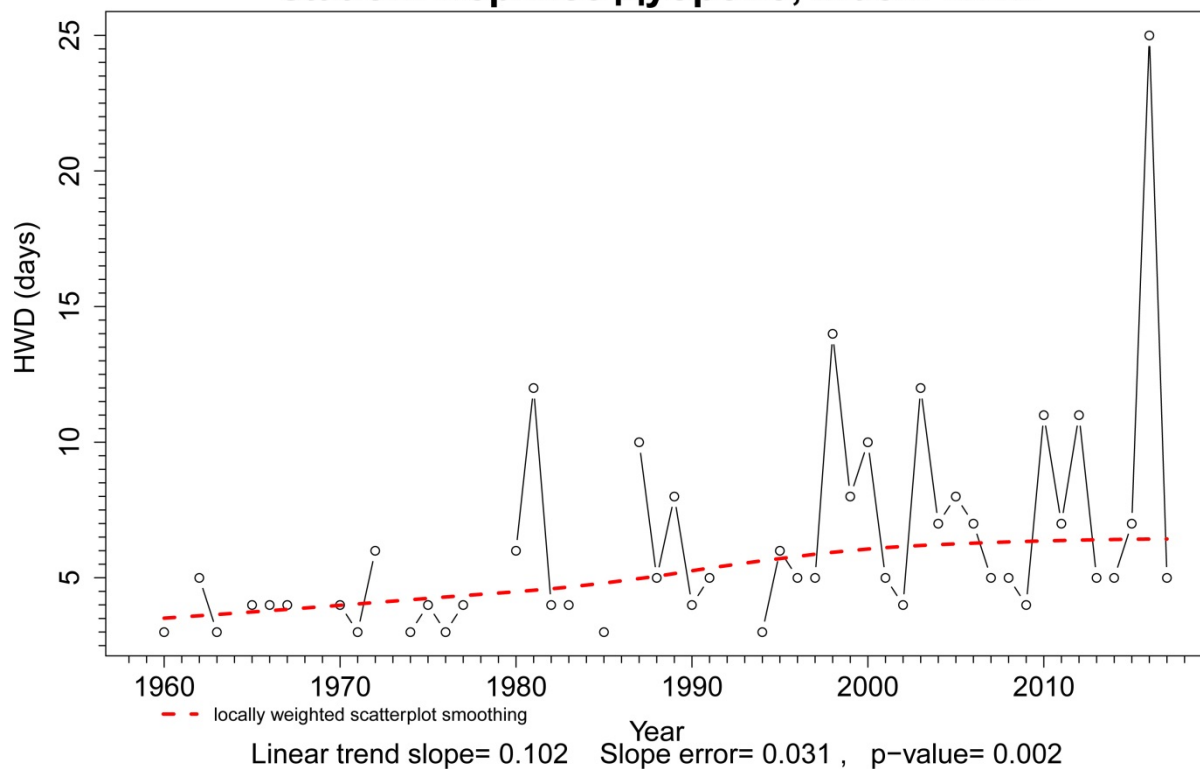


2.6.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Свердловской области.

station: Екатеринбург, index: HWD

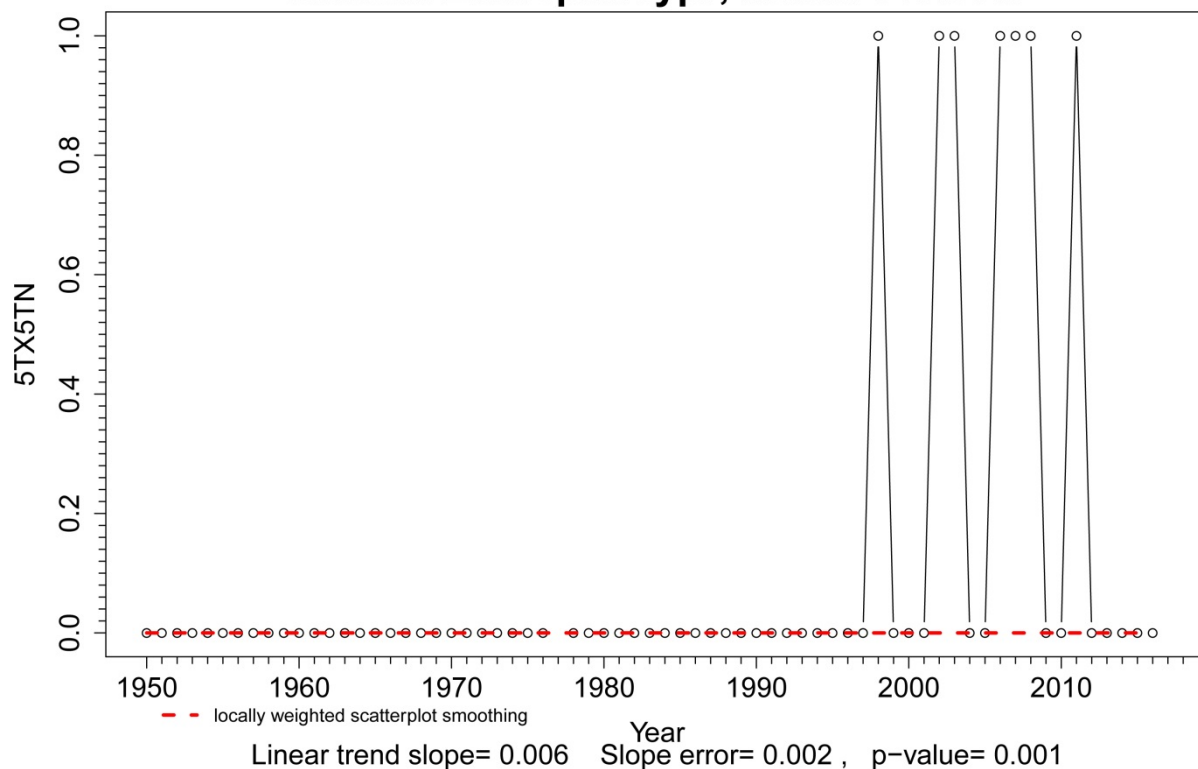


station: Верхнее Дуброво, index: HWD

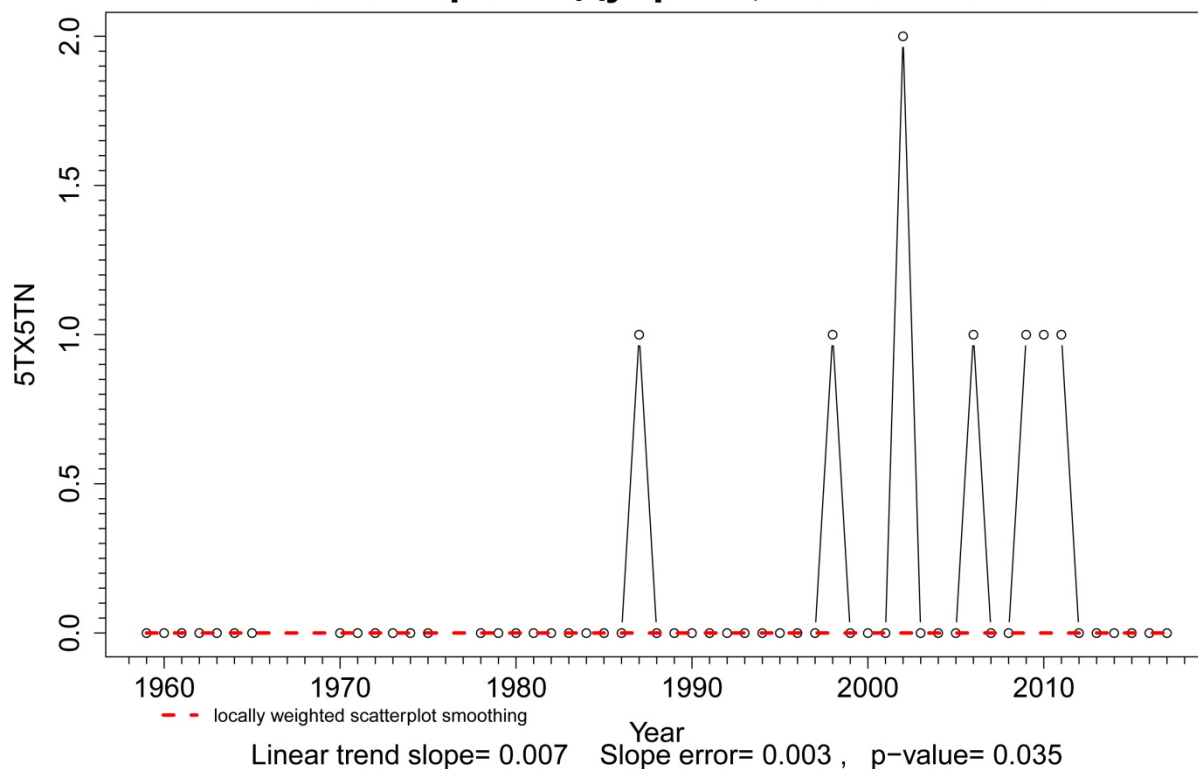


2.6.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Свердловской области.

station: Екатеринбург, index: 5TX5TN

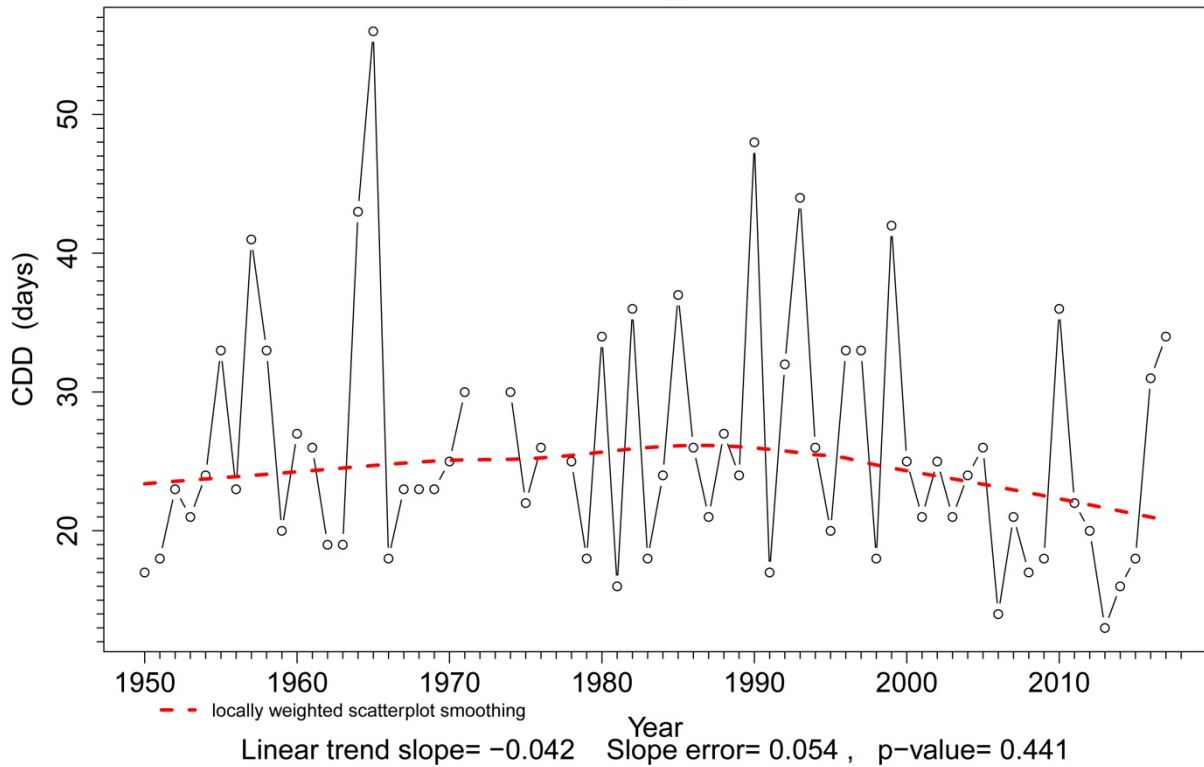


station: Верхнее Дуброво, index: 5TX5TN

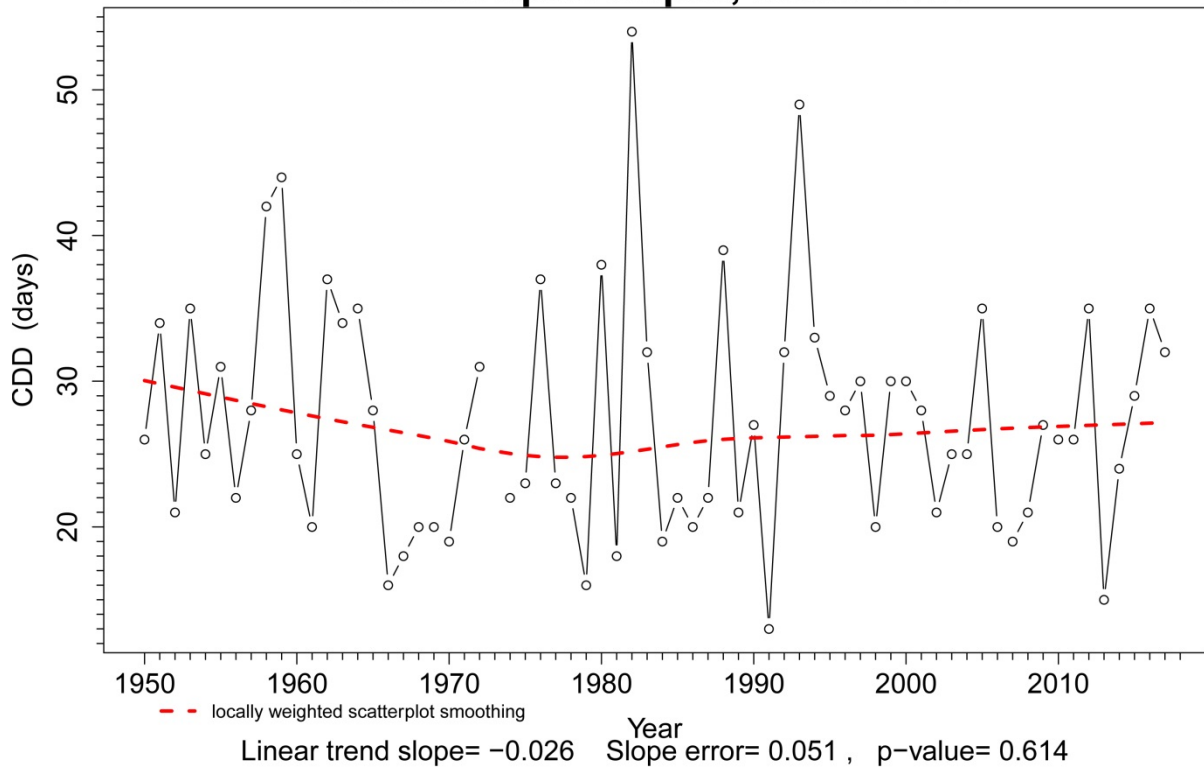


2.7.1.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

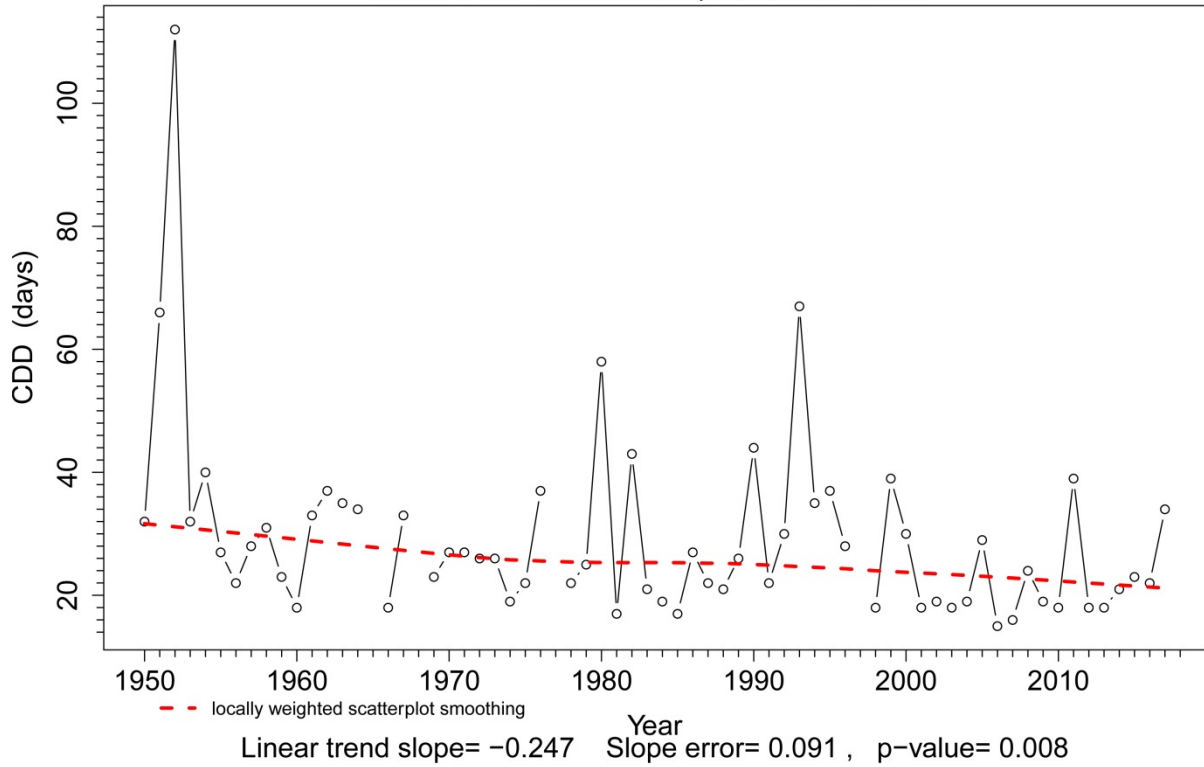
station: Ачинск, index: CDD



station: Красноярск, index: CDD

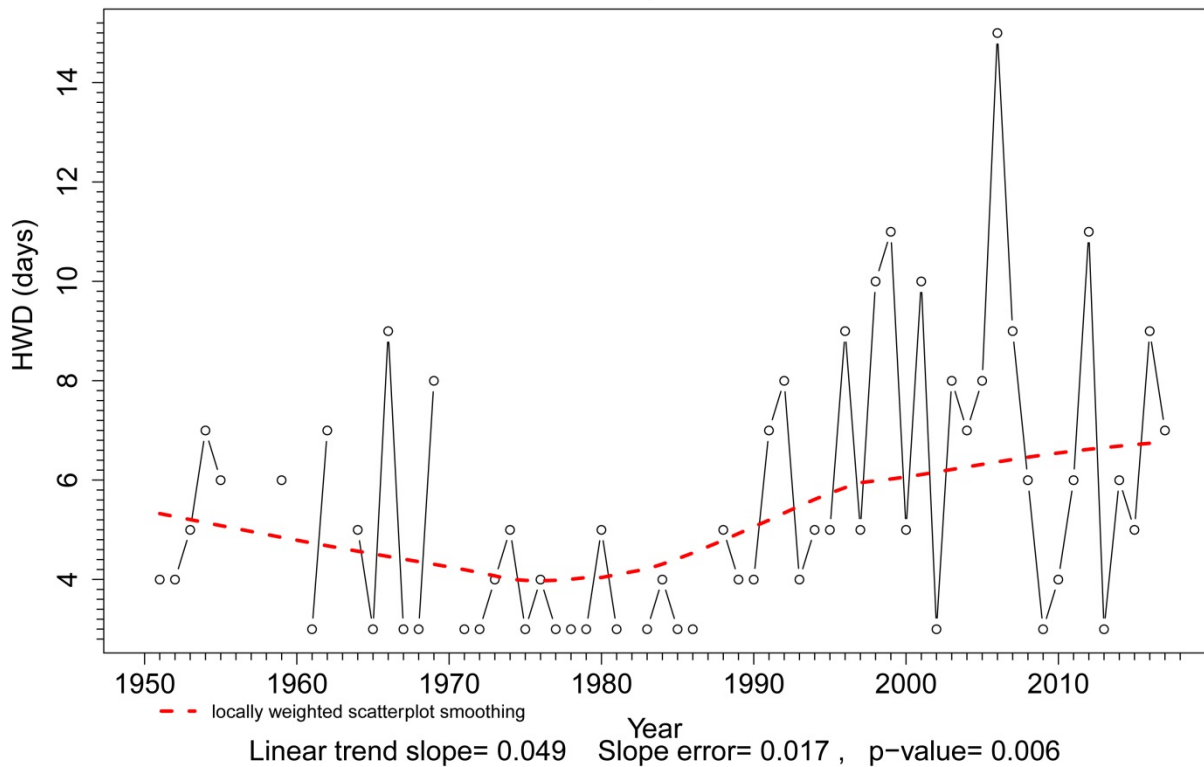


station: Солянка, index: CDD

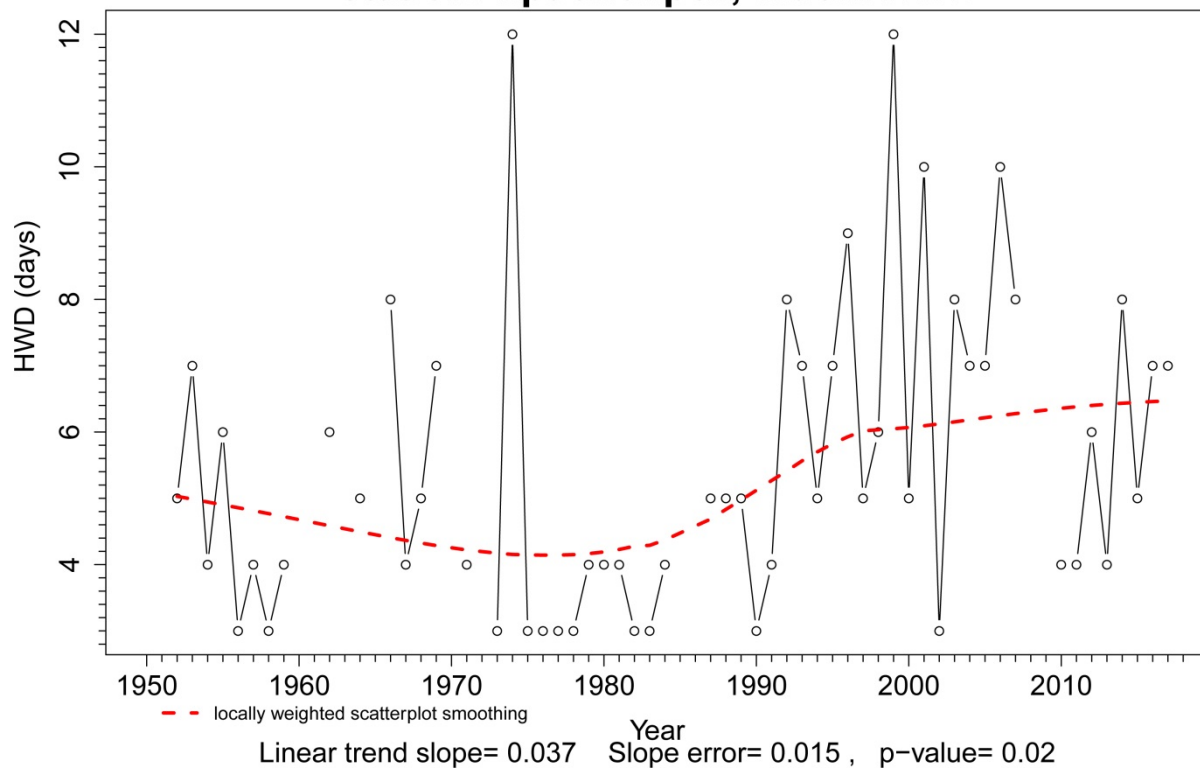


2.7.1.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

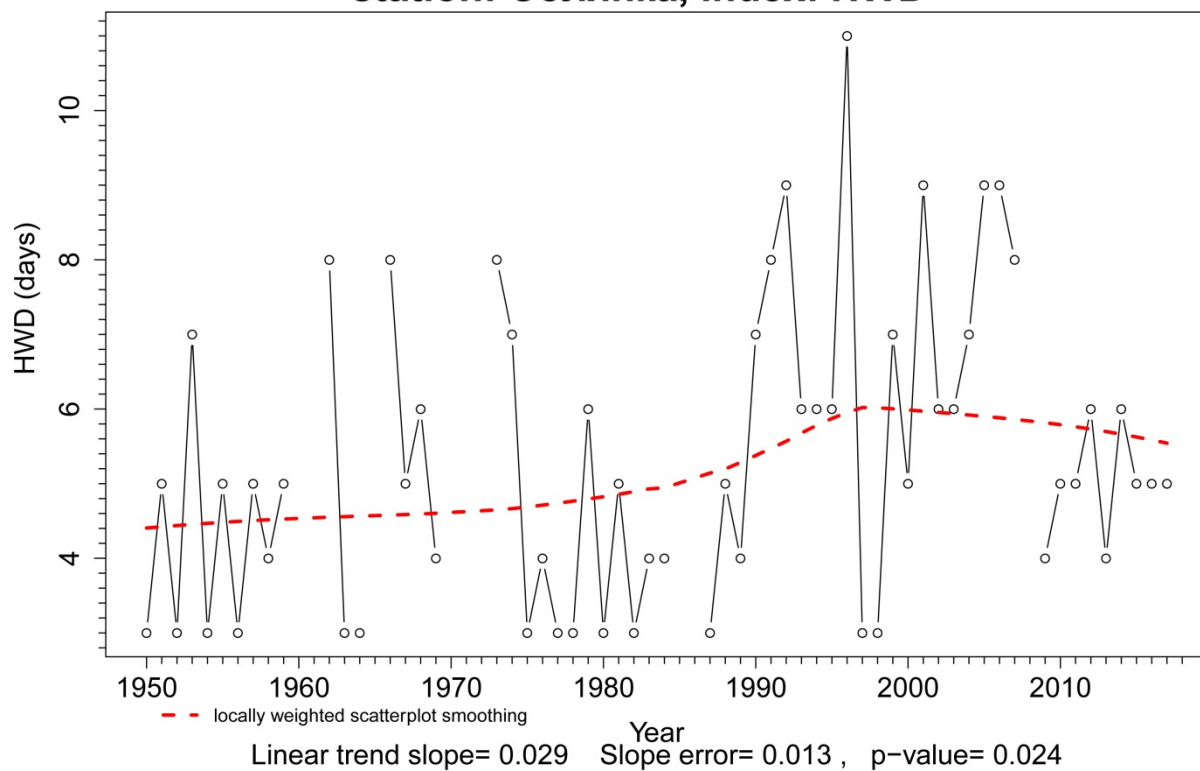
station: Ачинск, index: HWD



station: Красноярск, index: HWD

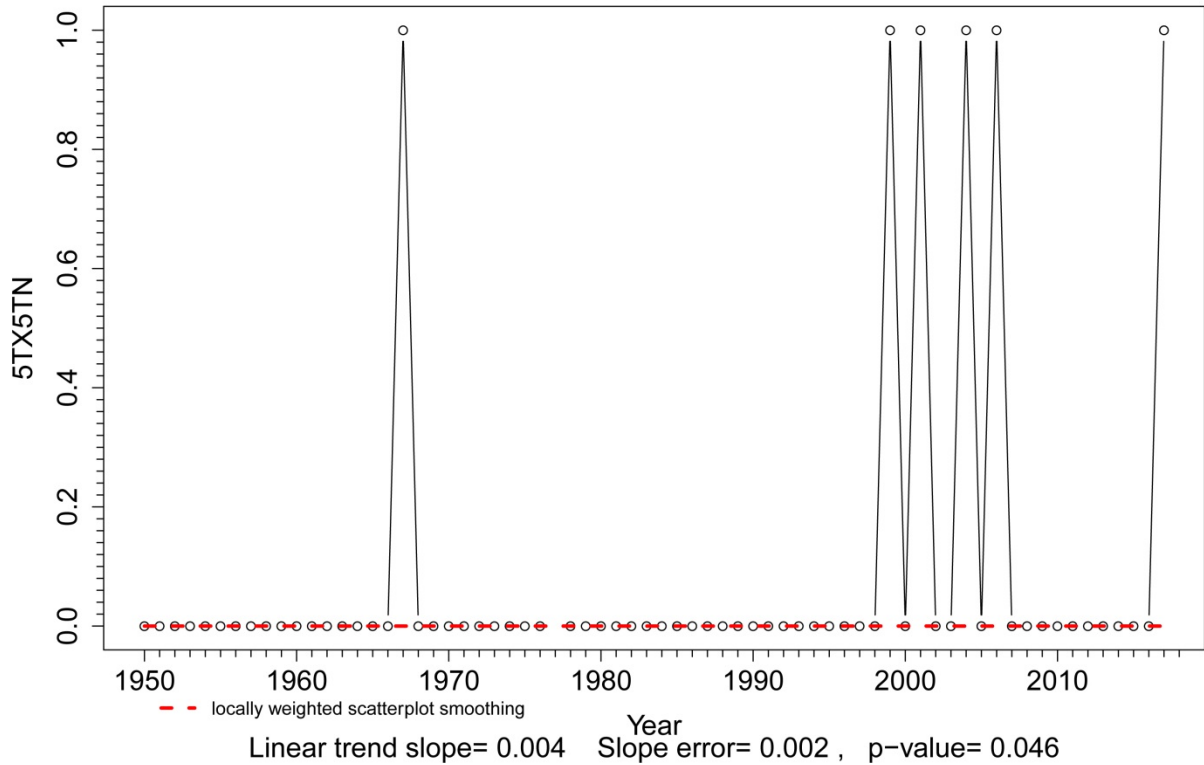


station: Солянка, index: HWD

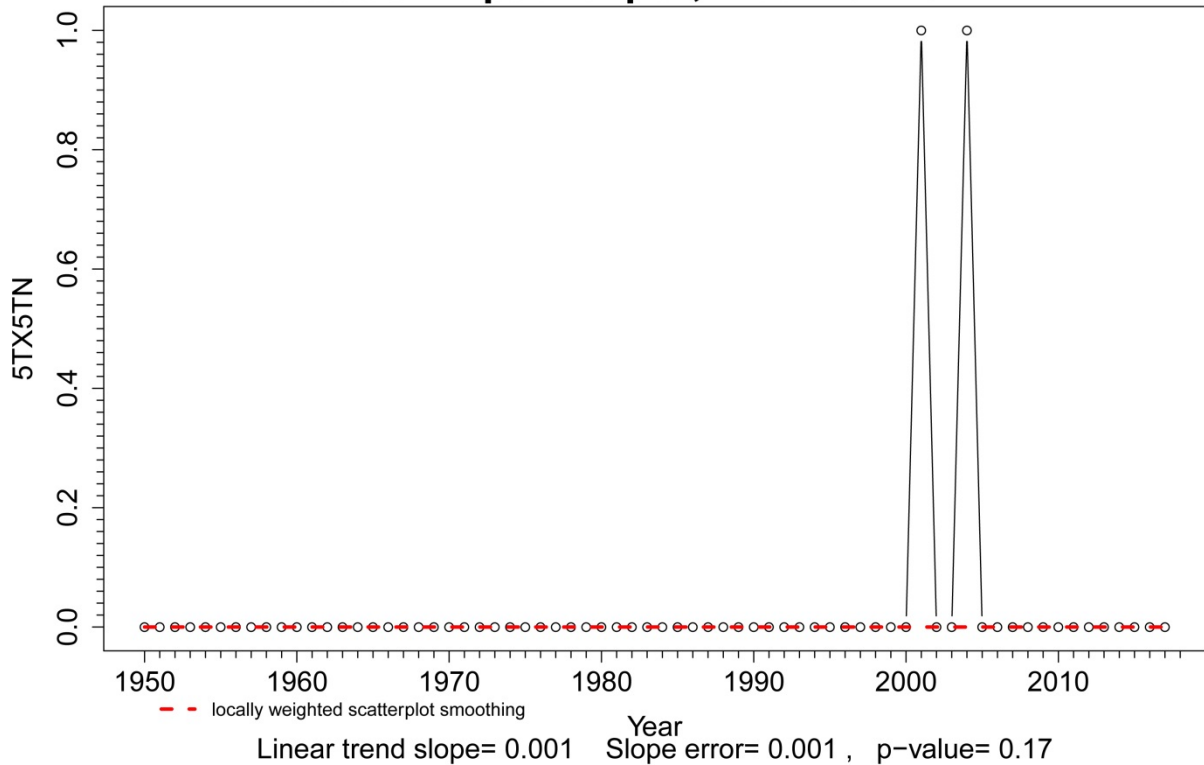


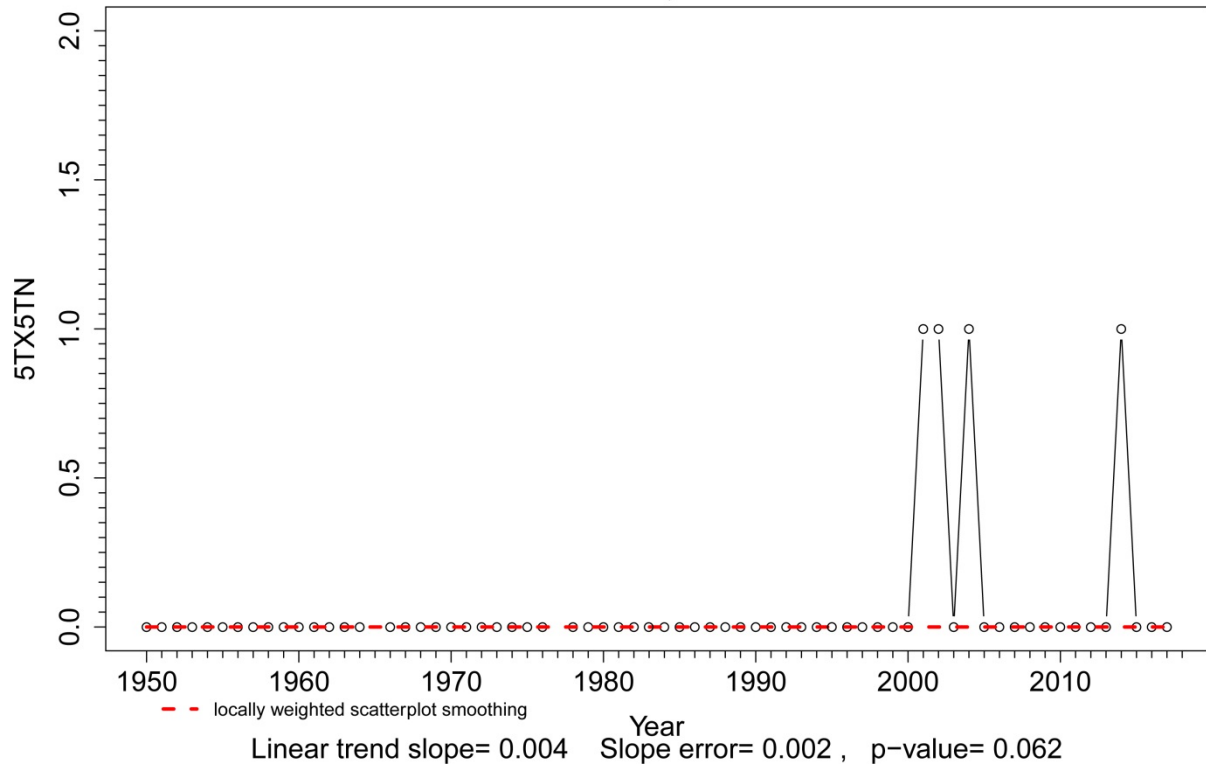
2.7.1.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Канско-Ачинского региона.

station: Ачинск, index: 5TX5TN

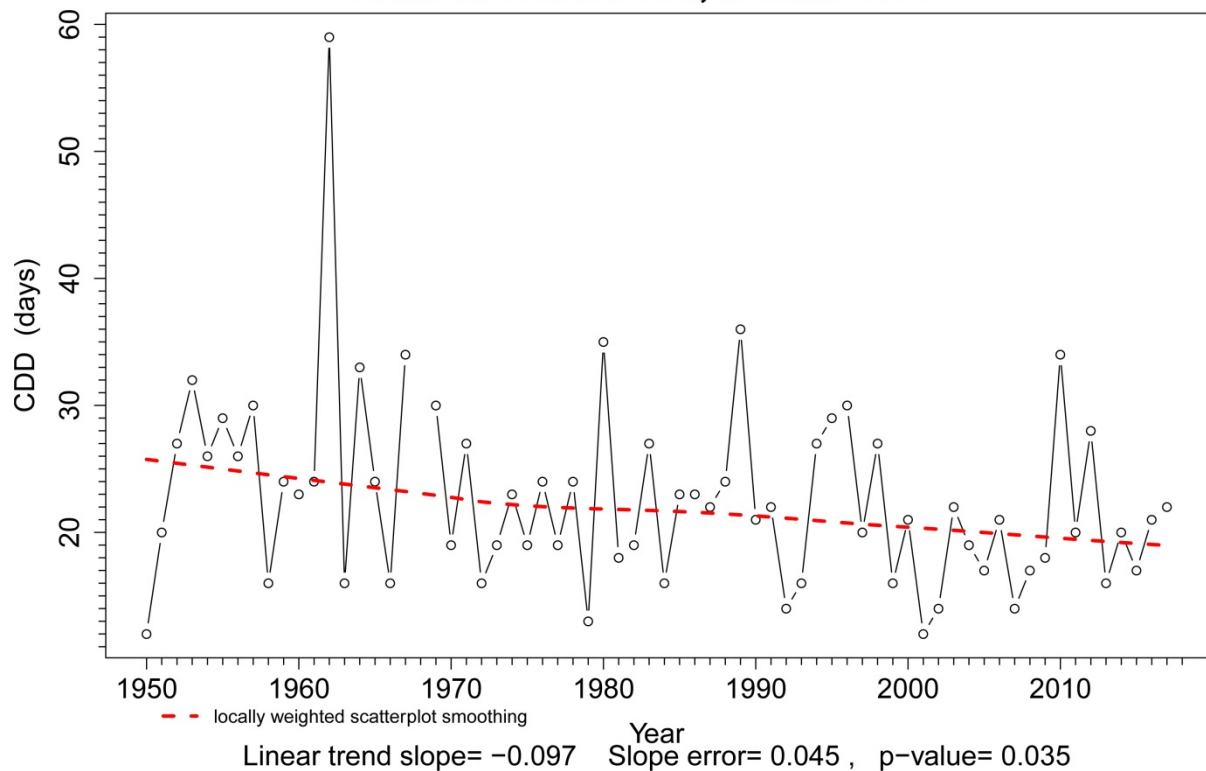


station: Красноярск, index: 5TX5TN

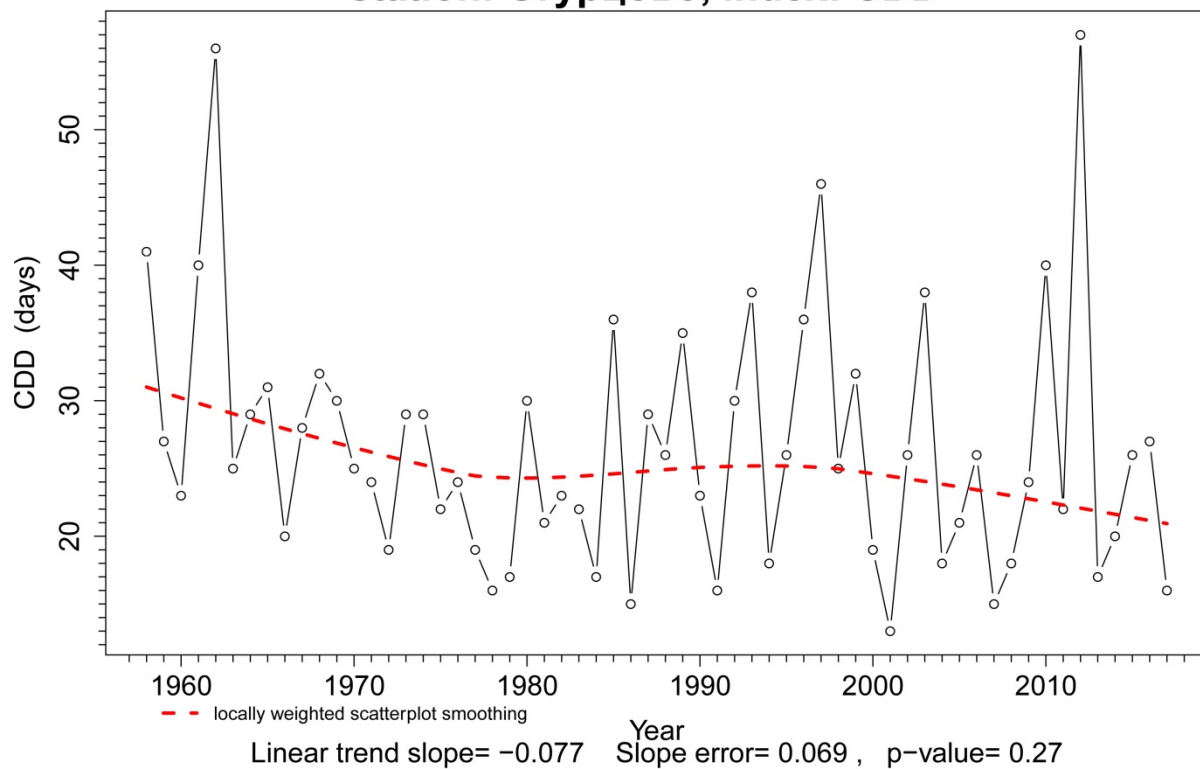


station: Солянка, index: 5TX5TN

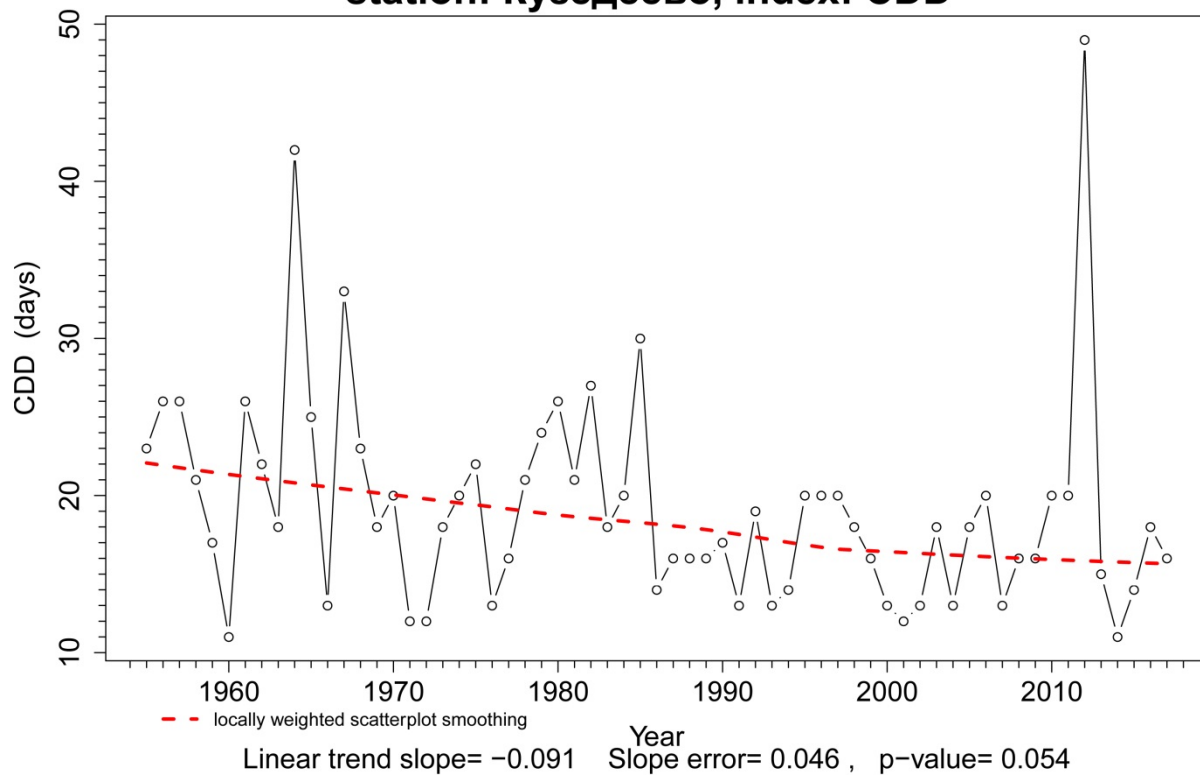
2.7.2.1. Графики изменения максимального годового числа последовательных сухих (с осадками менее 1 мм) дней (Consecutive dry days – CDD) по данным метеостанций Кузбасского региона.

station: Болотное, index: CDD

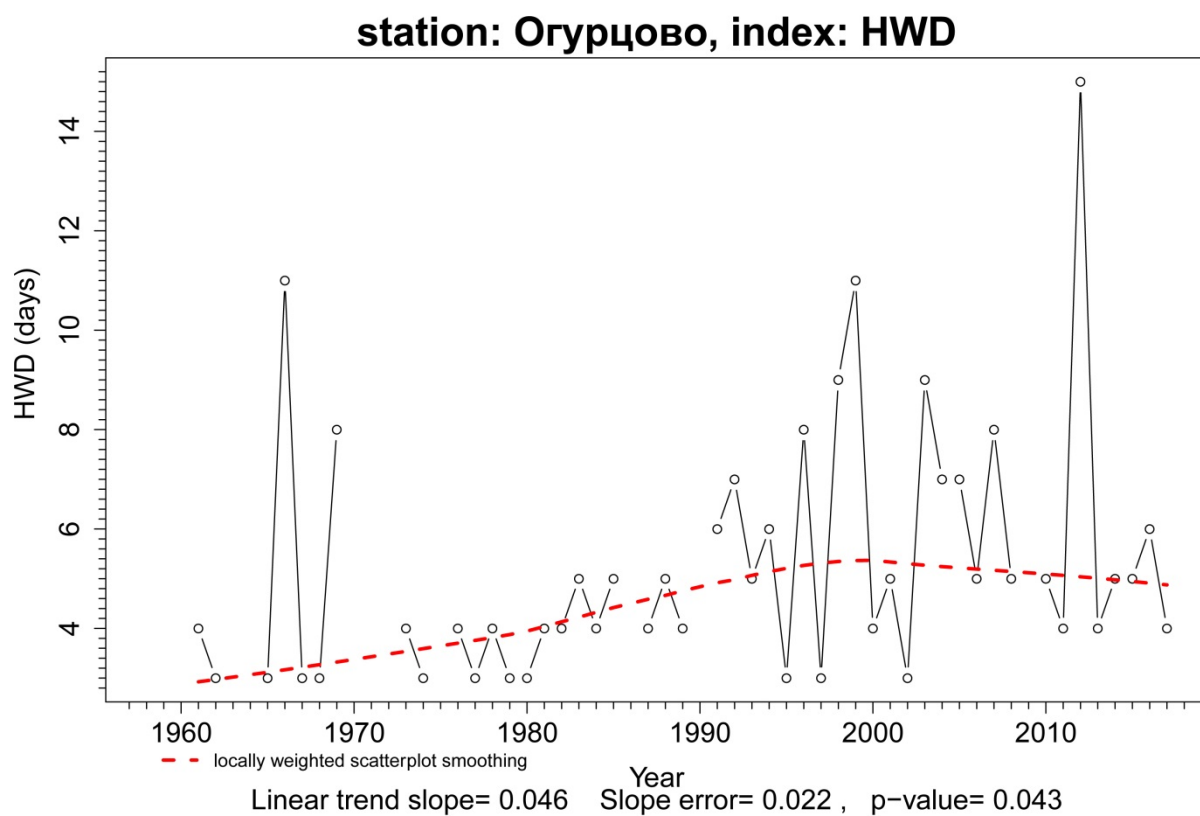
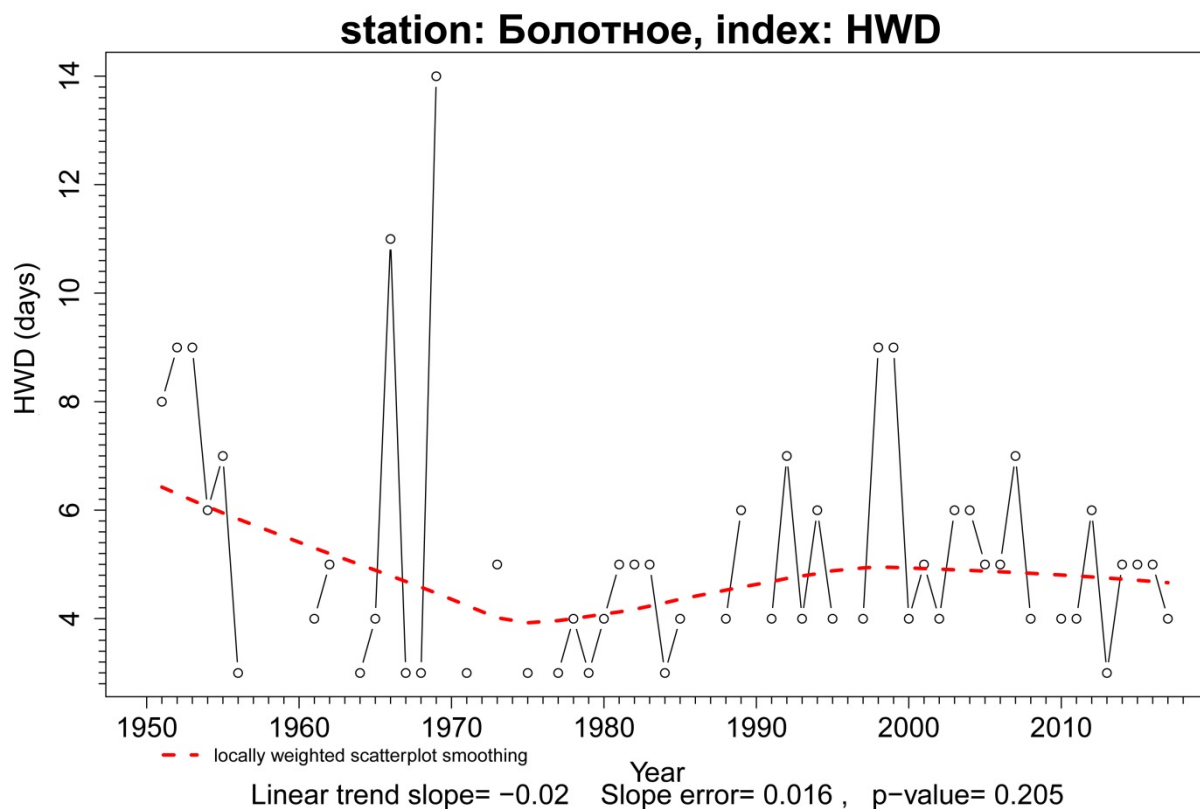
station: Огурцово, index: CDD

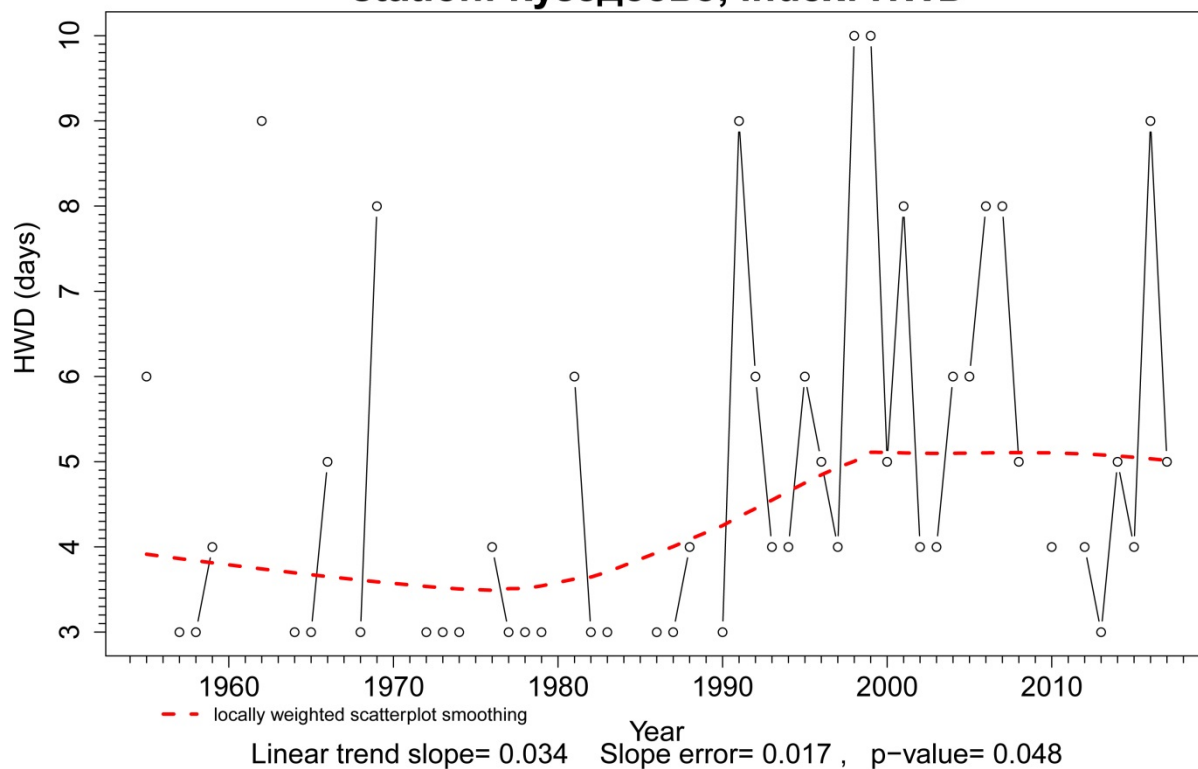


station: Кузедеево, index: CDD

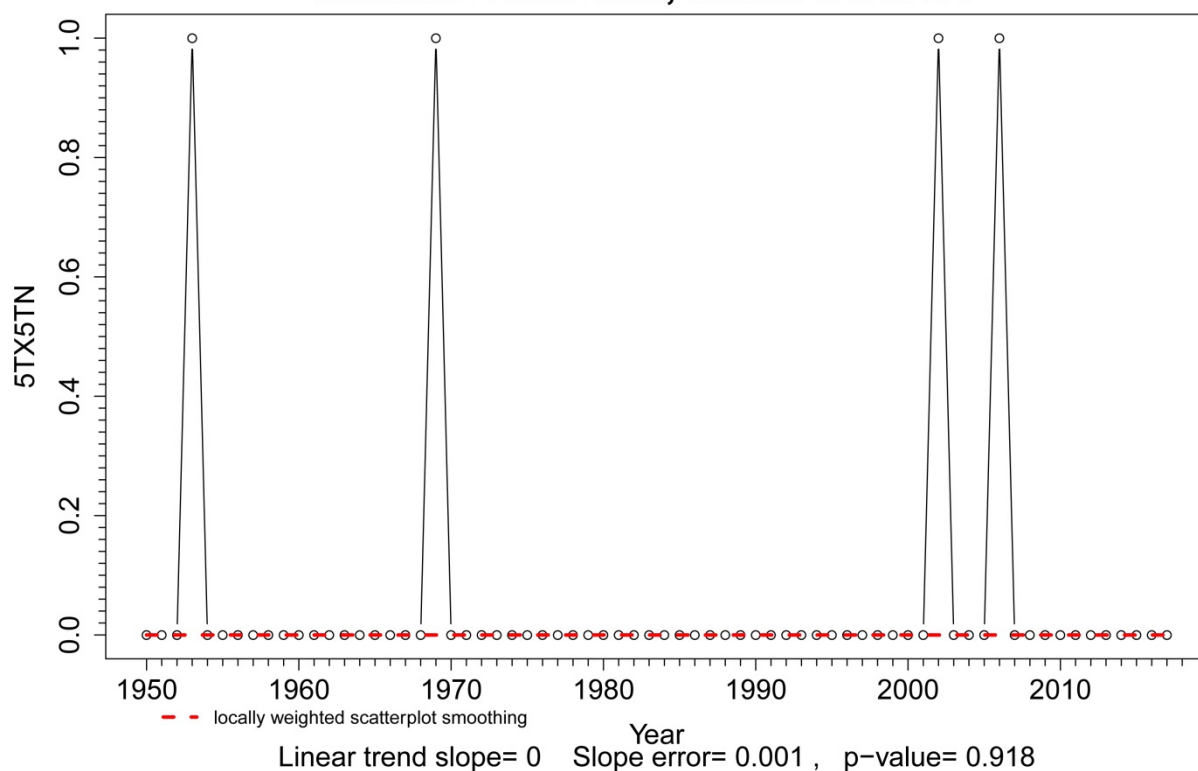


2.7.2.2. Графики изменения продолжительность самой долгой волны тепла в году (Heat wave duration – HWD) по данным метеостанций Кузбасского региона.

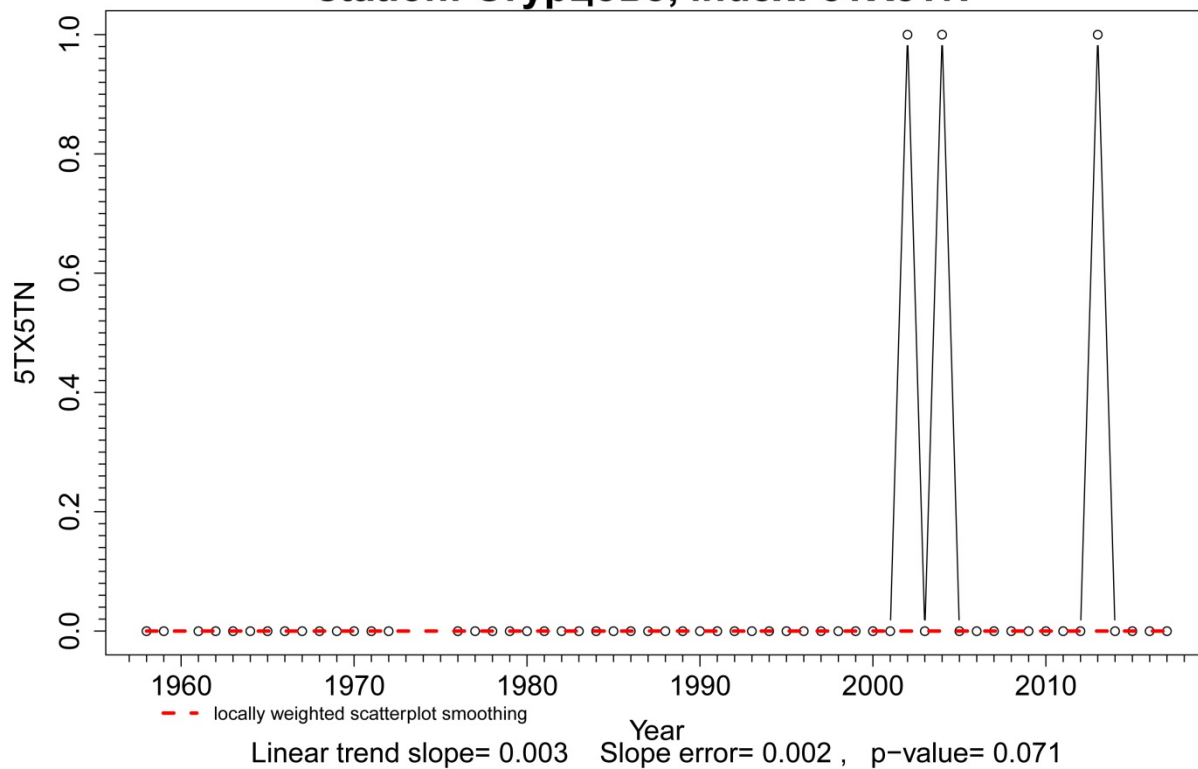


station: Кузедеево, index: HWD

2.7.2.3. Графики изменения числа периодов, когда последовательно отмечалось не менее 5 суток с максимальной и минимальной температурами воздуха выше 95 % обеспеченности (5TX5TN) по данным метеостанций Кузбасского региона.

station: Болотное, index: 5TX5TN

station: Огурцово, index: 5TX5TN



station: Кузедеево, index: 5TX5TN

