

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи

Шадурский Антон Евгеньевич

**Выявление зон нестабильности климатических характеристик
на территории России**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Санкт-Петербург 2013

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

Научный руководитель: доктор технических наук
Лобанов Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Угрюмов Александр Иванович
Российский государственный
гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург

доктор технических наук, профессор
Кулешов Юрий Владимирович
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 5 » декабря 2013 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д. 212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 5 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационный совет Д. 212.197.01

кандидат физико-математических наук, доцент

Л. В. Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Чем далее продвигается прогресс в исследованиях изменения климата, тем меньше сомнений в том, что климат Земли изменяется. Причем, если раньше в соответствии с Рамочной конвенцией ООН считалось, что изменение климата прямо или косвенно обусловлено деятельностью человека, вызывающей изменения в составе глобальной атмосферы, которая накладывается на естественные колебания климата, то в 4-ом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) уже принято, что климат изменяется во времени, как за счет естественных причин, так и за счет антропогенной деятельности. Поэтому понятие стабильности климата очень относительно и определяется в настоящее время ВМО для расчета климатических норм как условно стабильный период с 1961 по 1990 гг.

Наиболее существенным и наглядным фактором изменения климата является беспрецедентный рост CO_2 и других парниковых газов с начала индустриального периода, что объясняется только антропогенным воздействием. Именно это воздействие является особенностью современного резкого изменения климата, обуславливающего глобальное потепление, в отличие от предыдущих изменений, когда влияние человека на климатическую систему отсутствовало.

Однако современное изменение климата по-разному влияет как на различные метеорологические характеристики, так и на одни и те же характеристики в разных районах Земли. Исследованию стандартных климатических характеристик, таких как среднегодовая и среднемесячные температуры воздуха, суммы осадков за год и отдельные месяцы посвящены многочисленные научные исследования и их результаты включены в отчетные доклады МГЭИК. Эти же метеорологические характеристики широко представлены и в виде сценарных оценок будущего климата, полученных на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).

В области прикладной климатологии, например, строительной, сельскохозяйственной рассматриваются несколько другие климатические характеристики, которые необходимы для проектирования и эксплуатации зданий и сооружений, планирования и оценок риска урожайности. Среди них, например, такие как, максимальные в году суточные осадки, наименьшая в году среднепятидневная температура воздуха, осадки за холодный период года и т. д.. Эти характеристики определяют размер сливных отверстий для стекания дождевой воды, прочность крыш для удержания снеговой нагрузки, толщину стен и объемы бетонных работ с учетом внешних температурных воздействий, оптимальные сроки выращивания сельхозпродукции в данной местности и многое другое. Прикладные климатические характеристики также необходимы и при проектировании водохозяйственных объектов и гидротехнических сооружений. Так, расчетные максимальные расходы воды дождевого происхождения определяются по расчетным максимальным в году суточным осадкам, а максимальные снеговые расходы – через слой стока весеннего половодья, который представлен в основном осадками за холодный период года.

При строительном проектировании интерес представляют характеристики редкой повторяемости или расчетные климатические характеристики, которые наблюдаются 1 раз за достаточно продолжительный период времени, например, раз в 100 или 200 лет. Именно на такие расчетные климатические и гидрологические характеристики и опираются различные виды строительного проектирования с целью, чтобы сооружение гарантированно прослужило заданный период времени в будущем. При нестабильности же временного ряда прикладной климатической характеристики, нестационарными будут и параметры эмпирических распределений, и их квантили редкой повторяемости или обеспеченности. Поэтому, если изменение климата уже приводят к нестационарности

таких основных параметров временных рядов как среднее значение и дисперсия, или намечаются тенденции их изменений, то эту особенность следует учитывать. Причем учитывать необходимо как при проектировании новых сооружений, так и при эксплуатации уже существующих.

Цель и задачи. Главная цель диссертационной работы состоит в выявлении зон нестабильности климатических характеристик на территории страны, в которых нестабильность параметров распределений и, следовательно, расчетных климатических характеристик, уже имеет место или может наблюдаться в ближайшее будущее, так как к этому уже намечаются тенденции. Именно на эти зоны следует обратить внимание и учитывать установленную в них нестационарность при определении расчетных климатических характеристик для вновь проектируемых объектов или скорректировать расчетные характеристики для уже действующих объектов и принять меры для обеспечения их дальнейшей эксплуатационной безопасности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать методику моделирования временных рядов и определения зон нестабильности климатических характеристик на территории страны.

2. Выбрать прикладные климатические характеристики и сформировать базу данных их многолетних рядов.

3. Осуществить оценку надежности и однородности данных наблюдений и привести их к продолжительному и непрерывному периоду для эффективного моделирования.

4. Осуществить аппроксимацию многолетних рядов прикладных климатических характеристик стационарными и нестационарными моделями и выбрать наиболее эффективную из них для каждого пункта наблюдений и каждой прикладной климатической характеристики.

5. Получить пространственные интерполяции показателей эффективности нестационарных моделей и на их основе определить зоны нестабильности климатических характеристик для каждой прикладной климатической характеристики на территории России.

6. Осуществить пространственное моделирование в зонах нестабильности климатических характеристик и провести анализ динамики коэффициентов пространственных моделей с целью оценки вида и достоверности существующих или намечающихся климатических изменений.

Положения, выносимые на защиту:

– методика определения зон климатической нестабильности, в которых проявляется влияние современного изменения климата или намечается тенденция этого влияния;

– результаты анализа однородности, качества информации и приведения к многолетнему периоду рядов наблюдений по выбранным прикладным климатическим характеристикам в сформированных базах данных для России и прилегающих территорий;

– результаты моделирования временных рядов в виде показателей эффективности нестационарных моделей по отношению к модели стационарной выборки для всех выбранных прикладных климатических характеристик и метеостанций на территории России;

– результаты пространственного обобщения показателей эффективности нестационарных моделей временных рядов на территории России;

– установленные зоны климатической нестабильности на территории России и результаты оценки динамики коэффициентов пространственных моделей в этих зонах.

Методы исследования. Основными методами, которые применялись при выполнении работы, являлись методы статистического оценивания однородности и стационарности, методы регрессионного анализа, статистические методы оценки эффективности результатов моделирования, методы пространственной интерполяции, классификаций и статистические методы пространственного моделирования.

Научная новизна. Новизна работы заключается в том, что впервые предложена и реализована для территории России методика выявления зон нестабильности климатических характеристик, что позволяет не только определить зоны, но и оценить их эффективность во времени и по пространству. Впервые был разработан и внедрен подход по определению наиболее эффективной модели временных рядов при сравнении стационарной модели с двумя видами нестационарной: тренда и ступенчатых изменений.

В ходе выполнения работы был получен ряд новых результатов, из которых основными являются следующие:

- выбраны прикладные климатические характеристики и сформирована их база данных для России и сопредельных территорий с возможностью ее пополнения за последующие годы наблюдений;
- выполнен анализ однородности, качества информации в базе данных и осуществлено восстановление пропусков наблюдений и приведение рядов наблюдений к многолетнему периоду, включая всё 20-е и начало 21-го столетия;
- установлены эффективные модели временных рядов для каждой климатической характеристики и для каждой выбранной метеостанции на территории России;
- осуществлено пространственное обобщение результатов моделирования временных рядов климатических характеристик по территории России;
- выявлены зоны климатической нестабильности для каждой прикладной климатической характеристики на территории России;
- получены пространственные модели для зон климатической нестабильности и осуществлен анализ их коэффициентов во времени.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением проверенных методов обработки экспериментального материала, а также современных методов статистического моделирования. Надежность результатов определяется проверенной и проанализированной информацией и подтверждается большим объемом выполненных вычислений по нескольким тысячам рядов наблюдений.

Полученные результаты и сделанные на их основе выводы опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Практическая и научная значимость

Практическая и научная значимость работы заключается в том, что предложена новая методика определения зон климатической нестабильности, которая апробирована для некоторых прикладных климатических характеристик по территории России. Полученные результаты имеют большое практическое значение для проектных организаций и позволяют корректировать расчетные климатические характеристики для вновь сооружаемых и существующих строительных объектов в установленных зонах климатической нестабильности. На основе разработанной методики проектные организации имеют возможность оценить, насколько устойчивыми являются рассчитываемые ими и любые другие климатические характеристики в том или ином

районе страны и сделать соответствующую поправку в расчетные характеристики в связи с климатическими изменениями.

Научная и практическая значимость полученных результатов подтверждается также тем, что работы проводились при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации ГК – П852 (исполнитель) в рамках федеральной целевой программы Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по теме: «Определение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата». Автором работы получен грант Правительства Санкт-Петербурга в 2011 году в области научно-педагогической деятельности. Кроме того, автор является победителем конкурсного отбора на предоставление в 2013 году субсидий молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в рамках мероприятий «О Комплексной программе «Наука. Промышленность. Инновации» в Санкт-Петербурге на 2012-2015 годы».

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов. В опубликованных в соавторстве работах, автору принадлежит участие в постановке и реализации задачи, обработке и анализе результатов моделирования.

Апробация и публикация работы

Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2009 по 2013 гг. Тема диссертации включена в план работы кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы РГГМУ. Результаты работ докладывались и обсуждались на итоговых сессиях Ученого Совета РГГМУ в 2010-2013 гг. (Санкт-Петербург), конференции «Молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», НПО «Тайфун» (г. Обнинск 2013 г.), Международной конференции 11th International Meeting on Statistical Climatology (Эдинбург, Шотландия, 2010 г.), Международной конференции, Молодежный экологический конгресс «Северная Пальмира» (Санкт-Петербург, 2009 г.).

Основные результаты по теме диссертации представлены в 10 печатных изданиях, из них четыре статьи опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, два учебных пособия, одна монография, 3 доклада конференций, и одна статья находится в печати.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, содержащего 107 наименований. Общий объем диссертации составляет 165 страниц, в том числе 64 рисунка.

Благодарности.

Хочу выразить огромную благодарность научному руководителю, Лобанову Владимиру Алексеевичу, за помощь в работе на всех этапах написания диссертации, и заведующему кафедрой метеорологии, климатологии и охраны атмосферы профессору Гаврилову Александру Сергеевичу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, излагаются научная новизна, практическая и научная значимость диссертации, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и содержит сведения о проблеме современного изменения климата. В первом разделе рассмотрена история изучения современного изменения климата, а так же представлены результаты последних докладов (МГЭИК). Последним на сегодняшний день докладом является 4-й Доклад МГЭИК (IPCC), отличительной чертой, которого является описание прогресса в понимании антропогенных и естественных факторов изменения климата, наблюдаемого изменения климата, климатических процессов и их причин, а также в нем даны оценки проекций будущего изменения климата. Изменение климата в терминологии МГЭИК означает всякое изменение климата во времени, как вследствие естественной изменчивости, так и в результате деятельности человека. Вариант данного определения отличается от принятого ранее Рамочной конвенцией ООН об изменении климата, где его изменение прямо или косвенно обусловлено деятельностью человека, вызывающей изменения в составе глобальной атмосферы, и накладывается на естественные колебания климата, наблюдаемые на протяжении сопоставимых периодов времени.

Во втором разделе представлен обзор результатов исследований современного изменения климата на территории России и его будущих оценок, реализованных в виде Климатической Доктрины Российской Федерации и Стратегического прогноза изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. Установлено, что в Российской Федерации имеет место рост температуры воздуха и разнонаправленные изменения осадков. При этом полученные выводы и результаты в большей степени характерны для стандартных метеорологических характеристик, таких как среднегодовая и сезонная температура воздуха и суммы осадков за год или за отдельные сезоны. Вместе с тем существует целый набор прикладных климатических характеристик, которые широко применяются в различных отраслях экономики, но не были привлечены для исследования по оценке проявления в них влияния современного изменения климата. Стационарность этих характеристик имеет определяющее значение, например, при проектировании строительных сооружений и их эксплуатации в будущий период времени.

В третьем разделе предлагается методика исследований современных изменений климата и классификации климатических изменений. При этом рассматриваются прикладные климатические характеристики, которые используются при решении практических задач в различных отраслях экономики, таких как строительное проектирование, сельское хозяйство, транспорт и другие.

Во **второй главе** выполнен анализ однородности и осуществлено формирование многолетних рядов прикладных климатических характеристик. В качестве прикладных характеристик выбраны такие, которые применяются при строительном и других видах проектирования и представлены, например, в нормативных документах: СНиП 23-01-99 Строительная климатология (М., Госстрой России, 1999) и СП 33-101-2003 Свод правил по определению основных расчетных гидрологических характеристик (М., Госстрой России, 2003).

В качестве прикладных климатических характеристик рассматриваются следующие. Для температуры воздуха:

- максимальная в году среднесуточная температура воздуха;

- минимальная в году среднесуточная температура воздуха;
- средняя температура воздуха наиболее холодной в году пятидневки;
- средняя температура наиболее теплого месяца года, которая при достижении определенных пределов формирует опасное продолжительное метеорологическое явление, например засуху;
- средняя температура наиболее холодного месяца года, которая при достижении определенных пределов формирует опасное продолжительное метеорологическое явление, например сильное выхолаживание почвы;
- коэффициенты внутригодовой модели температуры воздуха, связанные со среднегодовой температурой, амплитудой годового хода и синоптической изменчивостью.

Для осадков в качестве рассматриваемых прикладных климатических показателей, которые могут привести к опасным ситуациям, относятся следующие.

- максимальные в году суточные осадки, которые являются основным фактором катастрофических дождевых паводков;
- сумма осадков за холодный период года (ноябрь – март), которая характеризует снеготопы и является фактором возможных катастрофических половодий;
- сумма осадков за теплый период года (апрель – октябрь), являющаяся фактором возможных катастрофических засух или продолжительных наводнений;
- наибольшая в году сумма месячных осадков, характеризующая возможные продолжительные наводнения от дождей;
- наименьшая в году сумма месячных осадков, характеризующая возможную катастрофическую межень и засуху.

Для формирования базы данных прикладных климатических характеристик на территории России за основу были взяты метеорологические архивы суточной и месячной дискретности. В связи с тем, что доступные версии архивов суточной и месячной дискретности содержат информацию по 2006 г. включительно, данные наблюдений после 2006 г. были получены в Интернете с сайта Королевского метеорологического института Нидерландов.

Новый архив прикладных климатических характеристик был сформирован на основе существующих архивов суточной и месячной дискретности и включает два вида данных: температура воздуха и осадки. Общее число метеорологических станций, как в архиве среднемесячных температур, так и осадков составляет 455 и станции расположены как на территории России, так и сопредельных государств. Для прикладных климатических характеристик, полученных на основе архива суточной дискретности, количество метеостанций составляло 223 метеостанции. Вместе с тем статистическое моделирование временных рядов осуществлялось только для станций, расположенных в пределах России. Поэтому была создана новая база данных только по российским станциям. Эта база данных содержит 327 метеостанций, причем часть БД, содержащая данные суточной дискретности, включает 147 станций, а часть БД, содержащая данные месячной дискретности, включает 310 станций.

Исходные ряды наблюдений в архиве имеют разную продолжительность. Так ряды характеристик суточной дискретности имеют продолжительность от 40 до 125 лет, и средний период наблюдений составляет 82 года. Самое раннее начало наблюдений относится к 1881 году, а окончание датируется 2005 годом. В части архива месячной дискретности ряды имеют продолжительность от 42 до 125 лет, и средний период наблюдений составляет 85 лет. Самое раннее начало наблюдений относится к 1886 году, а окончание датируется 2010 годом.

Оценка качества данных прикладных климатических характеристик термического режима включала анализ однородности резко отклоняющихся от эмпирического распределения экстремумов, которые в основном могли быть обусловлены наличием редких событий в коротком ряду наблюдений при полученной эмпирической обеспеченности существенно больше той, которая им соответствует в действительности.

Для оценки однородности резко отклоняющихся экстремумов применялись критерии Диксона и Смирнова-Граббса, обобщенные на такие особенности гидрометеорологической информации как автокорреляция и асимметрия. Для прикладных климатических характеристик режима осадков дополнительно был проведен анализ их однородности во времени или стационарности, в связи с тем, что в 1950х годах проводилась смена регистрирующих приборов (дождемера на осадкомер с защитой от ветрового выдувания). Для оценки стационарности применялись статистические критерии Фишера и Стьюдента, учитывающие наличие автокорреляции и асимметрии во временных рядах и дата разбиения ряда определялась оптимизацией за период с 1950 г. по 1964 г.

Основной вывод по результатам оценки однородности максимальных в году температур состоит в том, что их эмпирические распределения являются практически однородными. Общее число неоднородных распределений составляет 5,1 %. Неоднородные экстремумы имеют место или при недостаточно продолжительных рядах наблюдений, или в случае пропусков наблюдений, в которые также вполне могли быть температуры близкие к экстремуму. В любом случае неоднородные экстремумы не были исключены из рядов наблюдений, но полученные выводы учитывались при моделировании временных рядов. Для остальных характеристик термического режима получены следующее относительное число неоднородных экстремумов: для минимальных в году среднесуточных температур воздуха 7-10 % от общего числа случаев, для средних температур за самую холодную пятидневку 5 % случаев, для среднемесячных наибольших и наименьших температур воздуха всего 2-3 % и для параметров модели внутригодовых колебаний – 3-4 %.

Основной вывод по результатам оценки однородности максимальных в году суточных осадков состоит в том, что их эмпирические распределения являются практически однородными. Для максимальных экстремумов только в 1 случае гипотеза об однородности отклоняется. Для минимальных экстремумов гипотеза однородности принимается всегда. Из результатов анализа однородности других характеристик осадков следует, что ряды минимальных в году месячных осадков являются более нестационарными (почти в 2 раза больше), чем максимальных месячных. Общее число случаев нестационарности – 89, из которых для 84 случаев имеет место нестационарность средних значений, а для 49 – нестационарность дисперсий. При этом из 84 случаев нестационарности средних, отрицательное значение расчетной t -статистики Стьюдента, которое соответствует неоднородности за счет смены приборов, наблюдается в большинстве случаев (70 случаев или 83 % от общего их числа). Поэтому можно сделать вывод, что неоднородность в рядах минимальных в году месячных осадков обусловлена, скорее всего, сменой регистрирующих приборов, а сами минимальные месячные осадки относятся к холодным месяцам года. Типичный пример установленной нестационарности показан на Рисунке 1 для метеостанции Диксон. Из рисунка видно, что с 1952 г. произошло резкое увеличение, как среднего значения, так и дисперсии осадков, что может быть обусловлено только изменением способа регистрации.

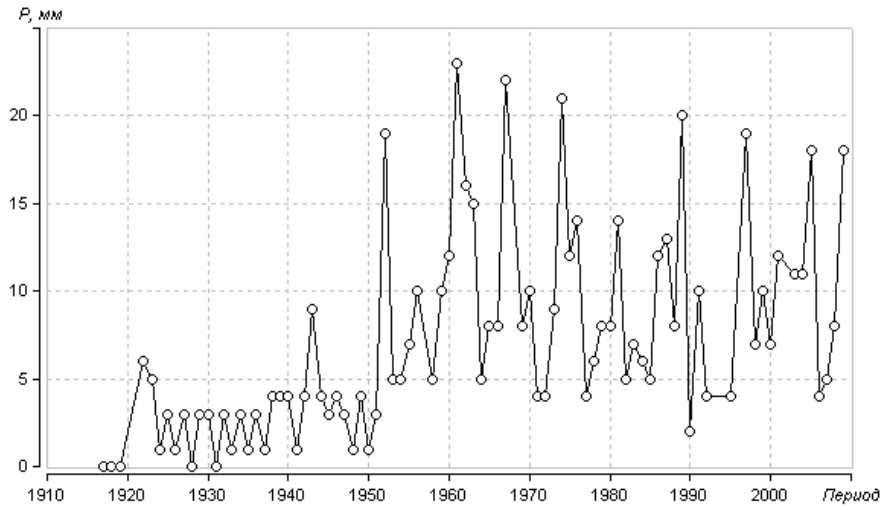


Рисунок 1 – Нестационарный по средним значениям ряд наименьших годовых месячных осадков по метеостанции Диксон.

Вторая задача, которая решалась при оценке качества и надежности исходной информации состояла в формировании продолжительных рядов без пропусков наблюдений, для того, чтобы полученные параметры моделей временных рядов были эффективны, надежны и сопоставимы для разных метеостанций. Для целей восстановления пропусков и приведения рядов наблюдений к многолетнему периоду применялась методика, основанная на построении уравнений множественной линейной регрессии, связывающих ряд наблюдений в рассматриваемом пункте с более продолжительными рядами в пунктах-аналогах:

$$Y = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + \dots + b_j Y_j + \dots + b_l Y_l, \quad (1)$$

где Y - значения прикладной климатической характеристики в приводимом пункте, Y_j - значения характеристики в пунктах-аналогах, b_0 - свободный член, b_j - коэффициенты уравнения регрессии при $j = 1, 2, \dots, l$, l - число пунктов-аналогов.

При выборе эффективного уравнения, на основе которого осуществлялось восстановление данных характеристик термического режима, соблюдались следующие условия:

$$Rad \geq Rad_{кр}, n' \geq 10, R \geq R_{кр} = 0.8, b/\sigma_b \geq 2, \sigma_\epsilon/\sigma_Y \leq \Delta_{кр} (20\%), \quad (2)$$

а для характеристик осадков:

$$Rad \geq Rad_{кр}, n' \geq 10, R \geq R_{кр} = 0.7-0.8, b/\sigma_b \geq 2, \quad (3)$$

где Rad , $Rad_{кр}$ – фактическое и задаваемое наибольшее расстояние между станциями; n' – период совместных наблюдений; $R_{кр}$ – минимальное предельно допустимое значение коэффициента корреляции; σ_b – стандартная погрешность коэффициента уравнения регрессии (задается соответствующей 95 %-ному доверительному интервалу случайных погрешностей коэффициента); σ_ϵ – стандартная случайная погрешность восстановления по уравнению регрессии; σ_Y – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений.

В результате, для максимальных в году суточных температур на территории севера и центра ЕТР средняя продолжительность исходных рядов наблюдений, которая

составляла 86 лет, за счет процедуры восстановления была увеличена на 30,6 года в результате чего продолжительность достигла в среднем 116-117 лет. Эффект восстановления, характеризующий процент увеличения продолжительности наблюдений по отношению к исходной, был разным в разных районах и, как правило, уменьшается при перемещении от ЕТР к Дальнему Востоку. Так, для центра и юга ЕТР эффект восстановления составляет 48 %, для Западной Сибири – 39 %, для Восточной Сибири и Дальнего Востока эффект восстановления 37 %, что видимо связано с более редкой сетью станций на востоке страны. Результаты оценки эффективности восстановления для минимальной в году температуры и температуры самой холодной в году пятидневки свидетельствуют, что минимальные температуры восстанавливаются даже лучше, чем максимальные в году. Так количество рядов, которые удалось восстановить составляет 133 для минимальной суточной и 136 для минимальной пентадной. Эффект восстановления составляет 51,3 % для минимальной суточной и 52,9 % для средней пятидневной температуры. Эффект восстановления для максимальных среднемесячных температур составляет 41,4 %, для минимальных среднемесячных температур – 35,2 %. Продолжительность рядов параметров линейной модели внутригодовых колебаний была увеличена на 30-45 % в зависимости от рассматриваемой характеристики.

При приведении к многолетнему периоду характеристик осадков даже при таком достаточно низком пороговом значении коэффициента корреляции как $R = 0,7$ к многолетнему периоду по всей территории России удалось привести всего 2 ряда максимальных в году суточных осадков, для которых продолжительность исходных рядов наблюдений увеличилась всего на 7 лет и 22 года. Из результатов обработки других характеристик осадков следует, что привести к многолетнему периоду удалось 94 ряда максимальных в году месячных осадков и 190 рядов минимальных в году месячных осадков. Это связано с тем, что пространственная связанность минимальных осадков выше, чем максимальных и минимальные осадки приходятся на зимний период, когда синоптические процессы для большей части России более однородны. Средний эффект восстановления для месячных максимумов составил 14,8 %, а для месячных минимумов – 19,4 %. При этом средняя продолжительность рядов максимальных осадков увеличилась на 8,6 лет, а минимальных – на 11,7 года и в результате стала 80,1 года и 85,9 года соответственно для максимальных и минимальных осадков.

В третьей главе осуществлено статистическое моделирование временных рядов прикладных климатических характеристик.

К общему виду модели временных рядов климатических характеристик применимы три возможные интерпретации: стационарный временной ряд, монотонные изменения в виде линейного тренда и ступенчатые переходы от одного стационарного состояния к другому.

Механизм монотонных изменений имеет место в равновесной системе, которая практически сразу же откликается на направленные внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая определенное время может нейтрализовать внешние воздействия или сопротивляться им до тех пор пока их суммарный эффект не переведет систему на новый уровень. Стационарный временной ряд, поэтому может быть частным, случаем существования как равновесной, так и неравновесной систем. В первой – это проявление случайных внешних воздействий, во второй – период стабильного существования, когда система еще достаточно инерционна, чтобы противостоять внешнему воздействию.

Выбор наиболее эффективной модели аппроксимации временного ряда осуществляется на основе сравнения остаточных дисперсий или стандартных отклонений относительно рассматриваемой модели. Так, для модели стационарной выборки остаточная дисперсия (или стандартное отклонение) представляет собой дисперсию или среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений, приведенного к многолетнему

периоду. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков вычисляется по формуле:

$$s_e = s_y \sqrt{1 - R^2} \quad (4)$$

где: s_y – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего); s_e – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда:

$$Y = b_1 t + b_0, \quad (5)$$

где: Y – рассматриваемая климатическая характеристика (температура воздуха, осадки и т.д.), t – время, в годах, b_1, b_0 – коэффициенты уравнения тренда.

Для модели ступенчатых изменений стандарт остатков вычисляется по информации за два интервала времени и по формуле:

$$s_{cm} = \sqrt{\frac{s_1^2 n_1 + s_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}} \quad (6)$$

где: s_{cm} – стандартное отклонение остатков относительно модели ступенчатых изменений; s_1, s_2 – стандартные отклонения двух отрезков временного ряда, на которые разбивается ряд наблюдений по дате ступенчатых изменений, n_1, n_2 – объемы двух частей ряда наблюдений в годах.

Момент ступенчатых изменений (t_n) определяется визуально или на основе дополнительной информации о факторе и дате нарушения стационарности (например, изменение индекса атмосферной циркуляции), а также может быть определен итерациями при достижении минимального значения суммы квадратов отклонений двух частей временного ряда.

$$SS = \sum_1^{n_1} (Y_i - Y_{1cp})^2 + \sum_{n_1+1}^n (Y_i - Y_{2cp})^2 = \min \quad (7)$$

Для количественной оценки отличий модели тренда и ступенчатых изменений от модели стационарного среднего были рассчитаны относительные отклонения по формулам:

$$\Delta_{mp} = \left(\frac{s_y - s_e}{s_y} \right) * 100\% \quad (8)$$

$$\Delta_{cm} = \left(\frac{s_y - s_{cm}}{s_y} \right) * 100\% \quad (9)$$

где: Δ_{mp}, Δ_{cm} – относительные отклонения или отличия (в %) модели тренда и ступенчатых изменений от модели стационарной выборки.

Для оценки статистической значимости как монотонных, так и ступенчатых изменений во временных рядах был применен критерий Фишера, статистики которого вычислялись по формулам:

$$F_{TP} = \frac{S^2_Y}{S^2_e} \quad (10)$$

$$F_{CT} = \frac{S^2_Y}{S^2_{cm}} \quad (11)$$

В случае, если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) является статистически значимо лучше, чем модель стационарной выборки.

Параметры трех видов моделей временных рядов: стационарная выборка, линейный тренд и ступенчатые изменения, а также показатели их эффективности и статистической значимости были определены для каждой прикладной климатической характеристики на каждой метеостанции сформированной БД на территории России.

Пример результатов расчетов и оценки приведен в таблице 1 для максимальных годовых температур воздуха для случаев эффективных (при $\Delta_{тр}$ или $\Delta_{ст} > 10\%$) и статистически значимых нестационарных моделей. В таблице 1: $\Delta_{тр}$, % $\Delta_{ст}$, % – эффективность моделей тренда и ступенчатых изменений по отношению к стационарной модели в %; F_{TP} , F_{CT} – статистики критерия Фишера, для оценки статистической значимости модели тренда и ступенчатых изменений по отношению к стационарной модели; $T_{ст}$, $T_{нач}$, $T_{кон}$ – годы ступенчатых изменений, начала и окончания наблюдений; n – продолжительность наблюдений (в годах); R – коэффициент корреляции модели линейного тренда.

Таблица 1 – Характеристики нестационарных моделей временных рядов максимальных в году температур воздуха.

| Код станции | $\Delta_{тр},\%$ | $\Delta_{ст},\%$ | $F_{тр}$ | $F_{ст}$ | $T_{ст}$ | $T_{нач}$ | $T_{кон}$ | n | R |
|-------------|------------------|------------------|----------|-------------|----------|-----------|-----------|-----|-------|
| 24688 | 6,1 | 11,9 | 1,13 | 1,29 | 1988 | 1936 | 2005 | 66 | 0,34 |
| 26477 | 9,1 | 16,6 | 1,21 | 1,44 | 1943 | 1881 | 2005 | 107 | -0,42 |
| 26781 | 9 | 17,3 | 1,21 | 1,46 | 1942 | 1881 | 2005 | 108 | -0,41 |
| 29263 | 7,3 | 13,9 | 1,16 | 1,35 | 1912 | 1884 | 2005 | 119 | -0,38 |
| 29698 | 4,5 | 10,9 | 1,1 | 1,26 | 1937 | 1882 | 2005 | 124 | -0,3 |
| 30230 | 11,5 | 16,7 | 1,28 | 1,44 | 1922 | 1892 | 2005 | 109 | -0,47 |
| 30521 | 5,9 | 10,9 | 1,13 | 1,26 | 1927 | 1887 | 2005 | 116 | -0,34 |
| 31004 | 5,4 | 10,8 | 1,12 | 1,26 | 1964 | 1937 | 2005 | 68 | -0,32 |

Моделирование и его оценка выполнены для всех 147 метеостанций на территории России, в которых имеют место наблюдения суточной дискретности. Ярким цветом в таблице выделены отличия от стационарной модели в 10 % и более, а также статистически значимые отличия по критерию Фишера, характеризующие статистическую значимость нестационарных моделей.

Основной вывод из моделирования максимальных в году среднесуточных температур состоит в том, нестационарные модели практически не дают лучшего описания временных рядов максимальных в году температур воздуха по сравнению со стационарной моделью. Средние отличия от стационарной модели составляют 2,1 % для модели линейного тренда и 4,8 % для ступенчатой модели, хотя наибольшие отличия достигают 11,5 % и 17,3 % соответственно. Из этого также можно заключить, что модель ступенчатых изменений эффективнее модели линейного тренда. В общем же из 147 рядов только для одного ряда (0,7 % всех случаев) модель линейного тренда на ≥ 10 % эффективнее стационарной модели и для 8 рядов (5,4 % от всех случаев) модель ступенчатых изменений является эффективнее. Статистически значимое отличие нестационарных моделей от стационарной выборки было установлено только для трех рядов, причем для всех трех только по модели ступенчатых изменений. Среднее же значение расчетных статистик Фишера невелико и составляет всего 1,04 и 1,11 для моделей тренда и ступенчатых изменений соответственно. Средняя дата ступенчатых изменений приходится на 1952 год, хотя размах этих дат очень существенен: от 1895 до 1995 г.

Общая статистика по выбору эффективных моделей временных рядов для каждой характеристики температурного режима на территории России приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Обобщение результатов статистического моделирования временных рядов характеристик термического режима

| Характеристика | Число станций | Эффективные нестационарные модели | | Статистически значимые нестационарные модели | |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|------|--|------|
| | | Число станций | % | Число станций | % |
| Максимальные суточные | 147 | 8 | 5,4 | 3 | 2,0 |
| Минимальные суточные | 147 | 28 | 19,0 | 10 | 6,8 |
| Минимальные пентадные | 147 | 14 | 9,5 | 5 | 3,4 |
| Максимальные в году среднемесячные | 309 | 8 | 2,6 | 1 | 0,3 |
| Минимальные в году среднемесячные | 309 | 34 | 11,0 | 13 | 4,2 |
| Коэффициент B_1 | 309 | 28 | 9,1 | 10 | 3,2 |
| Коэффициент B_0 | 309 | 182 | 58,9 | 91 | 29,4 |
| Параметр Se | 309 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Как следует из результатов таблицы 2, наибольший процент нестационарных моделей (почти 59 % эффективных и 29 % статистически значимых) имеет место для коэффициента функции сезонных изменений B_0 , который характеризует среднегодовую температуру воздуха. Следующими по нестационарности являются характеристики минимальной среднесуточной и минимальной среднемесячной в году температуры воздуха, а также минимальной среднепентадной температуры с процентами нестационарных рядов: 19 %, 11 % и 9,5 % соответственно. Именно для этих характеристик имеет смысл осуществлять пространственные обобщения по территории. Некоторым образом к ним относится и коэффициент B_1 , характеризующий амплитуду годового хода с процентом нестационарности 9,1 %. Для характеристик же максимальной среднесуточной и среднемесячной температуры процент нестационарных рядов составляет 5,4 % и 2,6 % и в этих случаях нестационарность связана с индивидуальными особенностями рядов.

Надежность полученных результатов обусловлена большим количеством проведенных статистических расчетов, число которых при моделировании составило почти 2000 рядов. В целом сделан вывод, что модель ступенчатых изменений в 1,5-2 раза эффективнее, чем модель линейного тренда.

Для 5 характеристик осадков также были рассчитаны параметры моделей временных рядов. Причем из-за выявленной неоднородности регистрации осадков, модели были получены как за весь период наблюдений, так и за последний период, начиная с 1963 г., когда смена регистрирующих проборов была гарантировано закончена на всех метеостанциях. Общая статистика по выбору эффективных моделей временных рядов для каждой характеристики режима осадков на территории России приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Обобщение результатов статистического моделирования временных рядов характеристик режима осадков.

| Период | Число станций | Эффективные нестационарные модели | | Статистически значимые нестационарные модели | |
|--|---------------|-----------------------------------|------|--|------|
| | | Число станций | % | Число станций | % |
| Максимальные в году суточные осадки | | | | | |
| Весь период | 143 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| С 1963 г. | | 7 | 4,9 | 0 | 0 |
| Максимальные в году суммы месячных осадков | | | | | |
| Весь период | 309 | 16 | 5,2 | 6 | 1,9 |
| С 1963 г. | | 27 | 8,7 | 1 | 0,3 |
| Минимальные в году суммы месячных осадков | | | | | |
| Весь период | 309 | 13 | 4,2 | 5 | 1,6 |
| С 1963 г. | | 27 | 8,7 | 4 | 1,3 |
| Осадки теплого периода года | | | | | |
| Весь период | 309 | 11 | 3,6 | 3 | 1,0 |
| С 1963 г. | | 26 | 8,4 | 3 | 1,0 |
| Осадки холодного периода года | | | | | |
| Весь период | 309 | 62 | 20,1 | 35 | 11,3 |
| С 1963 г. | | 52 | 16,8 | 15 | 4,8 |

Как следует из результатов таблицы 3, число нестационарных моделей для осадков существенно меньше, чем для температуры воздуха. Причем наиболее стационарными остаются максимальные в году суточные осадки, для которых даже за последний период эффективная нестационарность идентифицируется менее, чем в 5 % случаев и обусловлена, скорее всего, индивидуальными особенностями данных метеостанций.

Для всех видов осадков, за исключением только осадков холодного полугодия, характерно увеличения числа эффективных нестационарных моделей за последний период наблюдений с 1963 г. до 8,4 – 8,7 % по сравнению с моделированием за весь период наблюдений, где число нестационарных моделей было 4 – 5 %. Вместе с тем, число статистически значимых нестационарных моделей или осталось практически таким же (1 % – 1,6 %) как для минимальных в году месячных осадков и осадков теплого периода года или даже уменьшилось с 1,9 % до 0,3 % как для максимальных в году месячных осадков. В любом случае таких нестационарных рядов по всей территории России не так много (менее 9 %) и их детальное исследование и мониторинг необходимо осуществлять.

Особенная ситуация имеет место для осадков холодного полугодия, где число нестационарных моделей уменьшилось за период наблюдений с 1963 г. Поэтому можно сделать вывод, что смена приборов существенно повлияла именно на эту характеристику осадков и ее следует рассматривать только за последний период однородных наблюдений. Кроме того, процент эффективных нестационарных моделей для осадков холодного периода самый высокий и составляет почти 17 %. Поэтому на эту характеристику надо обратить особое внимание при ее пространственном обобщении.

В четвертой главе осуществлено построение пространственных интерполяционных моделей по территории России для показателей $\Delta_{тр}$ (%) модели линейного тренда и показателей $\Delta_{ст}$ (%) модели ступенчатых изменений для каждой прикладной климатической характеристики термического режима и режима осадков. В полученных пространственных моделях выделены области с эффективными значениями показателей отличия от стационарности ($\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$).

Пример пространственного распределения отклонений нестационарной модели ступенчатых изменений от стационарной ($\Delta_{ст}$ %) для минимальных в году среднесуточных температур воздуха показан на рисунке 2.

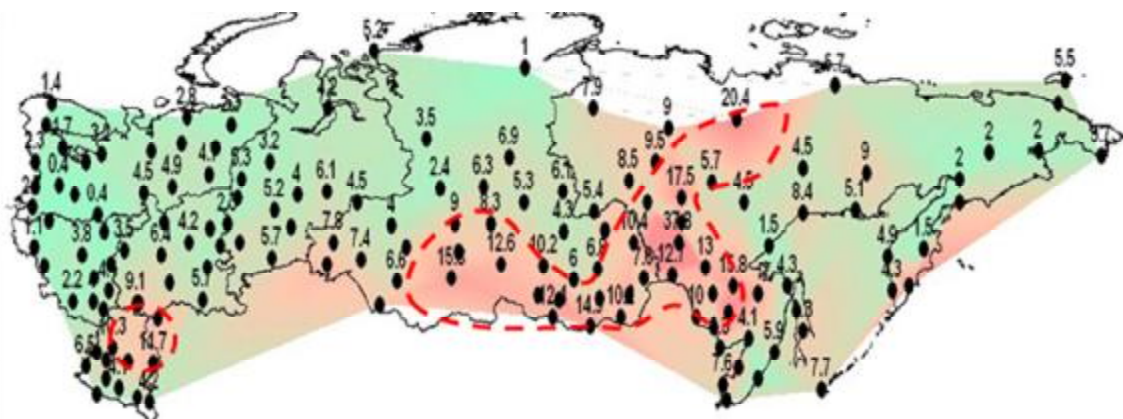


Рисунок – 2. Пространственное распределение отклонений нестационарной модели ступенчатых изменений от стационарной ($\Delta_{ст}$ %) для минимальных в году среднесуточных температур

Из общего числа 147 моделируемых рядов нестационарными можно считать 27 рядов минимальных суточных температур воздуха. Наибольшие отклонения от стационарной модели достигают 20-30 % и даже около 40 % и относятся к модели ступенчатых изменений. Такие отклонения, превышающие 15 %, наблюдаются на метеостанциях Верхоянск, Якутск, Минусинск, Чулан, Сретенск, Улан-Уде, Екимчан, Чекунда, Петропавловск, причем эти отклонения от стационарности являются статистически значимыми по критерию Фишера. Во всех случаях в нестационарных моделях минимальные суточные температуры растут и это относится в основном к территории Восточной Сибири.

Для минимальных среднесуточных температур воздуха выделено 2 локализованных зоны с эффективными нестационарными моделями роста минимальных температур. Одна небольшая зона находится на юге европейской территории России, а вторая занимает практически половину Восточной Сибири. Для минимальных среднепятидневных температур выделено 3 локализованных зоны с эффективными нестационарными моделями роста минимальных пятидневных температур. Одна зона находится на юге Сибири, вторая занимает центральную часть Восточной Сибири и третья – самую восточную часть страны: Камчатку и Курильские острова.

Для максимальной в году среднесуточной температуры воздуха отклонения от стационарной модели наблюдаются на метеостанциях Великие Луки, Смоленск и Киренск. В большинстве случаев в нестационарных моделях максимальные суточные температуры уменьшаются и только для станций Туруханск и Оймякон наблюдается их увеличение. Для модели ступенчатых изменений выделено 5 локализованных зон, в которых имеют место эффективные нестационарные модели. Для модели линейного тренда таких зон выделяется всего две: в европейской и азиатской частях страны.

Для максимальных среднемесячных температур и модели ступенчатых изменений выделено 3 небольшие локализованные зоны с эффективными нестационарными моделями роста максимальных среднемесячных температур: Черноморское побережье, юг Сибири и Чукотка. Для модели линейного тренда выделяется только одна зона на территории Чукотки. Для минимальных среднемесячных температур зоны с достаточно высокими значениями Δ являются практически одинаковыми как для модели ступенчатых изменений, так и для модели линейного тренда. Практически это одна большая зона роста температур, которая занимает южную, центральную и западную части Восточной Сибири, относящиеся к Якутии, и Приморье. В модели ступенчатых изменений выделяется еще и область на юге Красноярского края, но она также соединяется с югом Ангарского бассейна и Забайкальем. На остальной территории страны, особенно на европейской ее части, в Западной Сибири и на Чукотке отклонения от стационарной модели практически отсутствуют.

Для коэффициента B_1 модели внутрigoдовых колебаний, связанного с амплитудой годового хода, и для модели ступенчатых изменений выделяются четыре зоны уменьшения коэффициента B_1 : юг Восточной Сибири и три небольших локализованных области: на севере Красноярского края, на юге и в центральной части Якутии. Для модели линейного тренда таких зон три, причем две из них относятся к югу Восточной Сибири (юг Красноярского края и Забайкалье), а третья находится на севере Красноярского края. Для коэффициента B_0 модели внутрigoдовых колебаний, связанного со среднегодовой температурой, и для модели ступенчатых изменений на территории страны выделяется целый пояс роста коэффициентов B_0 , который занимает всю южную половину России, а также Якутию, Чукотку, Дальний Восток и часть Камчатки. Для модели линейного тренда южная часть страны представлена уже не сплошным поясом, а четырьмя большими районами, а пятый район включает восточную часть Якутии и Чукотку. Эффективные нестационарные модели для параметра Se сезонной функции температур воздуха, который связан с интенсивностью синоптических процессов, отсутствуют.

В связи с тем, что смена регистрирующих приборов в 1950-х – начале 1960 годов существенно влияет на однородность данных, временные ряды осадков рассматривались только начиная с 1963 г.

Для рядов максимальных в году суточных осадков из общего числа 143 анализируемых ряда нестационарными можно считать всего 6 рядов или 0,4%. Наибольшие отклонения от стационарной модели достигают 18 - 20 % и относятся как к модели ступенчатых изменений, так и линейного тренда. Статистически значимые отличия от стационарной модели по критерию Фишера отсутствуют, т.к. объем выборки является небольшим. Для модели ступенчатых изменений выделяются три локализованных района: на ЕТР, в Западной Сибири и в центральной Якутии. Для модели линейного тренда имеет место только один район в Западной Сибири. При этом выделенные районы характеризуются всего 1-2 станциями, а вся остальная территория страны представлена стационарными моделями.

Для рядов максимальных в году месячных осадков и модели ступенчатых изменений выделяются два локализованных района, каждый из которых включает не менее трех станций, на севере Западной и Восточной Сибири, а также примерно 6 вкраплений (3 в европейской и 3 в азиатской частях страны), включающих по одной станции. Для модели линейного тренда имеют место только один район на севере

Восточной Сибири и 3 локальные вкрапления, включающие по одной станции. В целом пространственная структура моделей максимальных месячных осадков также свидетельствует о том, что каких-либо достаточно больших областей нестационарности, может быть за исключением территорий уменьшения осадков на крайнем севере ЕТР и Восточной Сибири, на территории России выделить нельзя.

Для рядов минимальных в году месячных осадков и для модели ступенчатых изменений выделяется практически вся арктическая часть страны, а также восточный район, включающий Дальний Восток, Магадан, Сахалин, Курилы и небольшой район на Алтае. Для модели линейного тренда арктическая область уменьшения осадков представлена двумя небольшими районами западным и восточным, а все остальная территория страны относится к стационарным условиям.

Для рядов осадков теплого полугодия (с апреля по октябрь) и для модели ступенчатых изменений выделяются два локализованных района, каждый из которых включает несколько станций, на севере ЕТР и Западной Сибири и в Восточной Сибири. Один небольшой район также выделяется рядом с Таймыром. Кроме этого два небольших района (с 1-2 станциями) образуются в европейской части России и один – в Приморье. Для модели линейного тренда имеют место только два северных района на западе и востоке арктического побережья.

Для рядов осадков холодного полугодия (с ноября по март) и модели ступенчатых изменений выделяются три северных района с нестационарными осадками, которые охватывают арктическое побережье и распространяются на юг. Это район Новой Земли – Обской губы, район Таймыра и самый большой район, занимающий весь северо-восток страны, включая часть Якутии, Магаданскую область и Чукотку. Отдельные локальные очаги нестационарности (всего 6), состоящие практически из 1-2 станций наблюдаются в центре ЕТР, на Средней Волге, на Южном Урале и юге Западной Сибири, в Хабаровском Крае и на Камчатке. Для модели линейного тренда арктическая область представлена двумя районами: небольшим около Таймыра и достаточно большим на Северо-Востоке. Локальные очаги нестационарности имеют место в районе Новой Земли, Поволжья и в Западной Сибири на севере и юге.

Пятая глава является завершающей частью исследования, в которой представлены результаты выделения зон неустойчивости климатических характеристик на территории России.

После того как в главе 4 установлены области нестационарности для каждой модели выделение зон климатического риска и моделирование в них осуществляется в следующей последовательности.

а) Определение зон климатической неустойчивости со значимыми тенденциями увеличения или уменьшения прикладных климатических характеристик на основе сопряжения областей с эффективными значениями относительных отклонений от модели стационарной выборки и областей со статистически значимыми коэффициентами корреляции линейного тренда.

б) Построение общей пространственной модели для временных рядов прикладной климатической характеристики с эффективными значениями относительных отклонений от модели стационарной выборки.

в) Построение пространственной модели для каждой зоны климатической неустойчивости, если число рядов наблюдений в зоне достаточно для обобщения (не менее 8-10 рядов).

г) Построение типовых нестационарных моделей для каждой зоны климатической неустойчивости, если число рядов наблюдений в зоне недостаточно для обобщения (менее 8 рядов).

Пространственная линейная модель внутри выделенной зоны климатической неустойчивости строится на основе связи среднего климатического поля и поля каждого года. Средние многолетние значения климатических характеристик, представленные на

географическом пространстве в однородном районе, образуют климатическое поле, характеризующее географию климата на рассматриваемой территории. Это климатическое поле существует всегда, но в каждый год его параметры изменяются в зависимости от совместного влияния факторов климата и адвекции данного года. Связь между многолетним климатическим полем и полем каждого года можно представить линейным уравнением:

$$Y_{ij} = A_{1j}Y_{cpi} + A_{0j} \pm E_{ij} \quad (12)$$

где: Y_{ij} – значение климатической характеристики на i -ой станции в j -ый год; Y_{cpi} – среднее многолетнее значение климатической характеристики на i -ой станции; A_{1j} , A_{0j} – коэффициенты уравнения, определяемые по МНК; E_{ij} – случайные отклонения.

В уравнении (12) коэффициент A_{1j} характеризует градиент, а A_{0j} – уровень поля или среднее региональное значение климатической характеристики. Если выразить случайные отклонения E_{ij} через их стандарт σ_{Ej} , то этот параметр будет характеризовать внутреннюю неоднородность пространственного поля в каждый j -ый год. Таким образом, всю пространственную динамику поля можно выразить в виде многолетних рядов трех параметров A_{1j} , A_{0j} и S_{Ej} .

Еще одна особенность уравнения (12) состоит в том, что оно позволяет разделить поле климатической характеристики каждого года на две однородные составляющие Y_1 и Y_2 , где $Y_1 = A_{1j}Y_{cpi} + A_{0j}$ – климатическая составляющая поля, $Y_2 = E_{ij}$ – адвективная составляющая поля, которая характеризует проявление синоптических особенностей данного года по территории.

Для полученных по пространственной модели (12) временных рядов параметров A_{1j} , A_{0j} и S_{Ej} также выбиралась в соответствии с формулами (4) – (11) наилучшая модель ряда при сопоставлении нестационарных моделей тренда и ступенчатых изменений со стационарной.

Зоны климатической нестабильности были установлены для каждой прикладной климатической характеристики температуры воздуха и осадков. Так, для максимальных в году среднесуточных температур воздуха, как показано на рисунке 3, выделяются три северные области роста температур (бассейн Енисея, центральная Якутия и Чукотка) и три южные зоны падения максимальной температуры (европейская, южно-сибирская и Хабаровский Край). Условная граница, делящая страну на северную часть с ростом осадков и южную, включающую всю ЕТР и всю центральную и южную Сибирь, Камчатку и Дальний Восток, проходит от Новой Земли через центр Сибири до Чукотки. В то же время большая часть рядов в этих зонах относится к модели стационарной выборки.

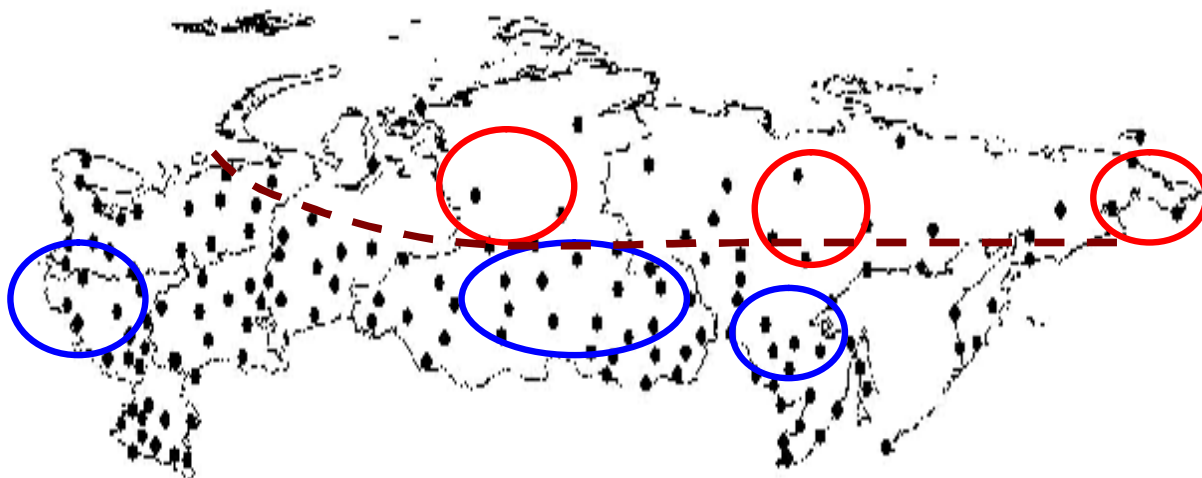


Рисунок 3 – Зоны климатической нестабильности на территории России для максимальных в году температур воздуха.

Получены следующие свойства зон климатической нестабильности максимальных в году суточных температур:

- на севере страны имеют место три отдельные зоны роста максимальных суточных температур: бассейн Енисея, центральная Якутия и Чукотка;
- в зонах роста наблюдается некоторое уменьшение коэффициента A_1 пространственной модели и некоторый рост коэффициента A_0 , что, однако, не является статистически значимым;
- имеют место три зоны падения максимальных в году суточных температур: европейская, южно-сибирская и Хабаровский Край;
- в европейской зоне падения максимальных в году суточных температур имеет место уменьшения коэффициента A_1 (с 1973 г.) и рост A_0 (с 1994 г.); в южно-сибирской зоне и в Хабаровском крае коэффициент A_1 вырос, а A_0 уменьшился в 1950-х годах и в настоящее время коэффициенты устойчивы.

Для минимальных в году среднесуточных температур воздуха на территории России выделяются две зоны роста минимальной температуры: небольшая европейская и достаточная большая азиатская. Временные ряды коэффициентов и параметров пространственных моделей в зонах являются практически стационарными за исключением небольшого роста средних значений для коэффициента A_0 в модели для азиатской зоны. Для минимальных в году среднепятидневных температур воздуха на территории Сибири выделены три зоны повышения температур, находящиеся практически рядом друг с другом. Коэффициент A_1 , характеризующий градиент поля общей пространственной модели, уменьшается в последние годы, и внутренняя неоднородность поля несколько уменьшилась с 1948 г.

Для максимальных среднемесячных температур воздуха - на территории страны имеют место три зоны роста температур: Северо-Кавказская, южно-сибирская и Чукотская. Коэффициенты и параметры пространственных моделей являются практически стационарными, за исключением некоторого роста в последние годы коэффициентов A_0 в южно-сибирской и Чукотской зонах. Для минимальных среднемесячных температур воздуха три зоны повышения температур расположены достаточно близко друг от друга на территории Восточной Сибири и могут быть объединены в одну зону нестабильности. Коэффициенты и параметры пространственных моделей являются практически стационарными, за исключением некоторого роста в последние годы коэффициентов A_0 в южно-сибирской и якутской зонах.

Для коэффициента B_1 , характеризующего амплитуду сезонной функции температур воздуха, три зоны уменьшения на территории Восточной Сибири расположены практически рядом и могут быть объединены в одну зону, а одна небольшая зона роста B_1 на территории Якутии представлена всего 2 рядами наблюдений. Коэффициент A_1 растет, а коэффициент A_0 уменьшается в общей пространственной модели зоны климатического риска, связанного с уменьшением амплитуды годового хода температуры. Для коэффициента B_0 , характеризующего положение сезонной функции температур воздуха и связанного со среднегодовой температурой, три зоны увеличения в европейской части, юге всей Сибири и на северо-востоке охватывают половину территории страны. Коэффициенты пространственных моделей A_0 , характеризующие среднезональное значение B_0 , растут во всех зонах, причем рост A_0 в европейской зоне имеет место с 1930 г. (начала данного ряда наблюдений) и проявляется в виде линейного тренда. В двух других зонах рост A_0 начался с середины 1980-х, причем в северо-восточной зоне он самый большой и имеет вид линейного тренда, а в южно-сибирской зоне – вид ступенчатых изменений. Коэффициенты пространственных моделей A_1 , характеризующие градиент поля, являются стабильными, хотя для северо-восточной зоны они увеличились в середине 1970-х.

Особенность выбора зон климатической нестабильности для осадков состоит в том, что в ряде случаев эти зоны могут быть предельно локализованы и включать всего 1-2 станции. Построить пространственную модель для такой зоны невозможно. Поэтому для каждой зоны могут быть построены только хронологические графики типовых нестационарных моделей или все зоны с одинаковыми тенденциями (увеличение или уменьшение осадков) объединяются в одну общую пространственную модель, если число рядов не менее 7-8. Вторая особенность построения пространственных моделей состоит в том, что ряды осадков рассматриваются только с 1963 г., когда завершилась смена регистрирующих приборов и условия измерений стали однородными. Поэтому ряды рассчитываемых коэффициентов и параметров пространственных моделей также не являются продолжительными и составляют 50 лет с небольшим.

Для максимальных в году суточных осадков нестационарных рядов всего 6 (4 %) и они формируют примерно столько же локальных зон нестабильности, причем 5 зон с ростом и 1 зона – с уменьшением осадков. Нестационарность каждого ряда осадков индивидуальна и вероятнее всего обусловлена локальными особенностями каждой станции. Для максимальных месячных осадков получены две северные области уменьшения осадков и много локальных зон, как увеличения, так и уменьшения осадков. Локальный рост и уменьшение осадков связаны в основном с недостаточным объемом рядов наблюдений или индивидуальными особенностями станций. Коэффициенты общей пространственной модели северной зоны уменьшения осадков являются стационарными. Для минимальных месячных осадков получены две северные области уменьшения осадков и одна восточная область, а также локальные зоны увеличения осадков. - Локальный рост осадков связан в основном с недостаточным объемом рядов наблюдений и индивидуальными особенностями станций. Коэффициенты общей пространственной модели общей зоны уменьшения осадков являются практически стационарными.

Для осадков теплого полугодия получены три северные и одна приморская области уменьшения осадков, а также локальные зоны увеличения осадков. Локальный рост осадков связан в основном с недостаточным объемом рядов наблюдений и индивидуальными особенностями станций. Коэффициенты общей пространственной модели общей зоны уменьшения осадков являются практически стационарными, особенно в последние годы. Для осадков холодного полугодия, получены три северные и одна дальневосточная области уменьшения осадков, а также локальные зоны увеличения осадков. Локальный рост осадков связан в основном с недостаточным объемом рядов наблюдений и индивидуальными особенностями станций. Коэффициенты общей пространственной модели общей зоны уменьшения осадков становятся стационарными с 1977 г. для коэффициента A_1 и с 1987 г. для коэффициента A_0 .

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные при работе над диссертацией.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Создана База данных многолетних рядов прикладных климатических характеристик термического режима и режима осадков на территории России и сопредельных государств общим числом 478 метеостанций (327 метеостанций на территории России) на основе стандартных метеорологических архивов суточной и месячной дискретности с возможностью пополнения вновь поступающей информацией из Интернета.

2. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов прикладных климатических характеристик суточной дискретности: максимальная и минимальная в году среднесуточные температуры воздуха и минимальная среднепятидневная температура. Получено, что наибольшая нестационарность проявляется во временных рядах минимальной в году температуры, которая имеет тенденцию роста. Число временных рядов этой характеристики, для которых отличие от стационарной

модели 10 % и более составляет 19 % от всех случаев или 28 станций. Причем статистически значимые отличия от стационарной модели имеют место всего для 10 рядов. Для рядов наиболее холодной пятидневки модель ступенчатых изменений наиболее эффективна для 14 станций, а статистически значима только для 5 рядов. Для максимальных в году температур влияние нестационарности еще меньше и проявляется для 8 станциях при статистически значимом проявлении только на трех.

3. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов прикладных климатических характеристик месячной дискретности: максимальных и минимальных в году среднемесячных температур воздуха. Получено, что ряды максимальных в году среднемесячных температур на 309 метеостанциях России мало отличаются от модели стационарной выборки с постоянным средним и дисперсией. В тоже время для минимальной температуры число случаев, отличных от стационарной модели достигает 11 % или 34 станций, а статистически значимые нестационарности характерны для 13 станций (4,2 %), что достаточно много и требует пространственной интерпретации и районирования.

4. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов параметров модели внутригодовых колебаний температуры воздуха. Получено, что наиболее стационарными являются модели временных рядов параметра Se , что свидетельствует о стабильности и устойчивости макросиноптических процессов, в том числе и в настоящее время. Среднее отличие от модели стационарной выборки не превышает 0,7 – 2,4 %, а максимальное 9,6 %. Наиболее отличаются от модели стационарной выборки временные ряды коэффициента B_0 , характеризующего положение функции годового хода и связанного со среднегодовой температурой воздуха. Для коэффициента B_0 средние отличия от стационарной модели составляют 9 % и 12 % а максимальные превышают 30 %. В результате почти для 60 % всех рядов нестационарные модели являются эффективными, а для почти 30 % рядов еще и статистически значимыми. Для коэффициента B_1 отличие от стационарной модели небольшое и составляет 4 - 5 % от общего числа временных рядов или всего порядка 1 % в случае статистически значимой модели.

5. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов максимальных в году суточных осадков. Получено, что за весь период наблюдений модель стационарной выборки, является, как эффективной, так и статистически значимой по сравнению с нестационарными моделями тренда и ступенчатых изменений, что может быть обусловлено большой изменчивостью осадков. Отличие нестационарных моделей от модели стационарной выборки не превышает 9,7 %. Чтобы полностью исключить влияние смены регистрирующих приборов на однородность данных, отдельно было осуществлено моделирование для последней части ряда с 1963 по 2005 г.. Хотя число эффективных нестационарных моделей несколько выросло, но основной вывод о подавляющем преобладании модели стационарной выборки не изменился.

6. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов максимальных и минимальных в году сумм месячных осадков. В результате моделирования установлено, что число эффективных нестационарных моделей, полученных за весь период наблюдений невелико, и практически не превышает 5 %. При моделировании только последней части ряда с 1963 г. число эффективных нестационарных моделей увеличивается почти в два раза, хотя причины нестационарности за счет смены регистрирующих приборов в этот период отсутствуют. Однако из-за меньшего объема последней части ряда статистически значимых нестационарных моделей не так много (всего 4 случая) и для них необходимо осуществлять мониторинг и более детально исследовать устойчивость моделей во времени.

7. Осуществлен анализ однородности, восстановление пропусков и моделирование многолетних рядов сумм осадков за теплый и холодный период года. Получено, что структура временных рядов осадков летнего и зимнего полугодий различается. Так, если за весь период наблюдений число эффективных нестационарных моделей для осадков теплого полугодия составляет не более 4 %, то для осадков холодного полугодия это число достигает 20 % и притом для 11,5 % от всего числа рядов вывод о нестационарной модели является статистически значимым. Проведенное моделирование за вторую часть ряда с целью исключения инструментальной неоднородности, показало, что число эффективных нестационарных моделей для осадков теплого полугодия выросло более чем в 2 раза. Для осадков зимнего полугодия это число даже несколько уменьшилось, т.к. был исключен эффект инструментальной неоднородности. В связи с тем, что число нестационарных моделей для осадков теплого и холодного полугодий достигают 10 % и 20 % соответственно, от общего числа рядов, полученные результаты требуют пространственной интерпретации и районирования.

8. Разработана методика климатического районирования и моделирования на основе которой были получены пространственные интерполяционные модели относительных отклонений от модели стационарной выборки, зоны климатического риска с имеющимися место изменениями прикладных климатических характеристик на территории России и коэффициенты пространственных моделей в зонах климатического риска с оценкой их динамики.

По результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы, можно сделать следующие, **выводы**:

- Минимальные температуры являются самыми нестабильными из всех рассмотренных прикладных климатических характеристик. Они имеют тенденцию к росту и образуют для среднемесячной минимальной температуры три наиболее значительные зоны климатического риска на территории Восточной Сибири, которые характерны в несколько меньшей степени и для минимальной среднепятидневной температуры, а для минимальных в году суточных температур выделяется всего одна большая зона.
- Максимальные суточные температуры образуют три северные зоны роста на территории Восточной Сибири и три южные зоны падения температуры. Максимальные среднемесячные температуры более стабильны и формируют только три небольших зоны роста.
- Из параметров функции внутригодовых колебаний наиболее нестабильным является коэффициент B_0 , связанный со среднегодовой температурой, который формирует одну большую зону роста во всей южной половине России и во всей Восточной Сибири. Для коэффициента B_1 , связанного с амплитудой годового хода, выделяются четыре небольшие зоны на территории Восточной Сибири, в трех из которых B_1 растет и в одной падает. Показатель интенсивности макросиноптических процессов Se является стабильным на всей территории страны.
- Характеристики осадков являются более стабильными, чем характеристики температуры. В большинстве случаев выявляется нестационарность только по отдельным станциям. От двух до трех северных зон уменьшения выделено для осадков месячной и полугодовой дискретности.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Лобанов В.А., Задорожный С.П., Молдован Н.В., Шадурский А.Е., Шукри О.А. Информация и методы для определения зон климатического риска при инженерных изысканиях. // Инженерные изыскания. – Москва, 2011. – С.72 – 77.
2. Лобанов В.А., Задорожный С.П., Молдован Н.В., Шадурский А.Е. Особенности гидрометеорологических расчетов для строительного проектирования в Западной Сибири // Промышленное и гражданское строительство. – Москва 2010, № 11, С.18-20.
3. Шадурский А.Е., Лобанов В.А. Оценка региональных климатических изменений на севере Западной Сибири // Ученые записки РГГМУ № 15, 2010. – С. 44-49.
4. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ № 14, 2010. – С. 73-88.

Другие публикации за период подготовки диссертации:

1. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Выявление зон климатического риска на территории России при современном изменении климата / Монография. Санкт-Петербург: Изд-ние РГГМУ, 2013. – 123 С.
2. Шадурский А.Е., Лобанов В.А. Выявление зон климатического риска на территории России при современном изменении климата // Физика атмосферы, метеорология, геофизический мониторинг: Тезисы доклада Научная конференция «Молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». – г. Обнинск: НПО «Тайфун» – 2013. – С. 357-359.
3. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии Часть 2 / Учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-ние РГГМУ, 2012. – 147 С.
4. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии Часть 1 / Учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-ние РГГМУ, 2011. – 145 С.
5. Lobanov V. A., Gorlova S. A., Shadursky A.E. Analysis of past climate fluctuations and comparison with modern climate change // Abstracts of 11th International Meeting on Statistical Climatology, July 12-16, 2010, Edinburgh, Scotland, p.98-99.
6. Lobanov V. A., Shadursky A.E. Understanding recent climate change in key regions of Russia // Abstracts of 11th International Meeting on Statistical Climatology, July 12-16, 2010, Edinburgh, Scotland, p.218.