

На правах рукописи

Кошкин Дмитрий Александрович

**ДИНАМИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Иркутск – 2012

Работа выполнена в Институте географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат географических наук, доцент
Кочугова Елена Александровна

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Воробьев Валерий Игоревич

кандидат географических наук
Мирвис Виктория Михайловна

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 14 марта 2012 г. в 11 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова».

Автореферат разослан «10» февраля 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

Мещерская А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение климатических изменений целесообразно проводить для экстремальных явлений погоды и даже для аномальных лет и сезонов, которые в совокупности с изменением средних величин можно рассматривать как естественные модели климатических ситуаций. Непосредственно наблюдаемые погодные и климатические экстремумы являются более информативными, чем средние характеристики. Средние нуждаются в дополнительной интерпретации: в учете соотношения периода осреднения, оценке дисперсий и т.п. Хотя экстремальные явления погоды и связаны с малыми вероятностями, они обладают большей изменчивостью, и нередко с ними связан ощутимый социально-экономический ущерб. Ущерб, наносимый экстремальными гидрометеорологическими явлениями, по оценкам ООН, составляет 70 % суммарного ущерба от воздействия природных катастроф и стихийных бедствий (Оценочный доклад..., 2008). Значительная часть от этих сумм приходится на атмосферные стихийные явления в России.

Вклад естественных наук в изучение стихийных бедствий и природных катастроф состоит в углубленном исследовании экстремальных состояний природной среды. В разных географических районах климатические экстремумы проявляются по-разному. В одно и то же время в одних регионах можно наблюдать сильнейшую засуху, тогда как в других – обильные осадки. И даже в пределах одного региона климатические изменения проявляют себя по-разному в различные сезоны года.

Для лучшего понимания механизмов климатических изменений на региональном уровне необходимы более детальные оценки тенденций различающихся по чувствительности к разным факторам климатических характеристик во времени и их пространственные обобщения.

Цель работы – исследование региональных проявлений изменения климата на территории Иркутской области, оцениваемых по значениям трендов индексов экстремальности приземной температуры воздуха и осадков.

Основные задачи и этапы исследования

- Составить перечень экстремальных климатических показателей. Выбрать статистические методы исследования для оценки состояния и изменения климата.
- Сформировать базу данных индексов экстремальности климата, привлекая данные наблюдений и материалы архива NCEP/NCAR Reanalysis.
- Исследовать тенденции изменения индексов экстремальности во времени.
- Обобщить по пространству показатели временной динамики индексов экстремальности.
- Показать возможные причины изменений во времени отдельных климатических индексов экстремальности.

Научная новизна работы

- Впервые описано пространственное распределение особенностей межгодового и сезонного изменения климатических показателей экстремальности температурного режима и режима осадков на территории Иркутской области.

- В рамках рассматриваемых временных периодов (1947–1976 гг. и 1977–2006 гг.) с учетом характеризующей их различной скорости потепления обнаружена территориальная неоднородность поля долговременного тренда показателей экстремальности температуры воздуха и осадков в Иркутской области.
- Впервые показаны региональные изменения отдельных климатических показателей экстремальности температуры воздуха на территории Иркутской области в связи с изменениями циркуляции атмосферы, в том числе Азиатского антициклона, с количественной оценкой их вклада в изменение климатических показателей экстремальности.
- Предложена авторская компьютерная программа расчета доли экстремально холодного и теплого времени года.

Основные положения, выносимые на защиту

- База данных климатических показателей экстремальности.
- Пространственно-временные закономерности изменений климатических показателей экстремальности на территории Иркутской области за период с 1947 по 2006 гг.
- Оценка вклада Арктической осцилляции и Азиатского антициклона в изменения минимальных температур воздуха на рассматриваемой территории.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть полезны при оценке вклада региональной составляющей как части глобальных климатических изменений. Полученная в работе база данных по климатологии индексов экстремальности может быть применена в качестве обновленных справочных материалов при климатических описаниях территории области, для анализа наиболее холодных и наиболее теплых периодов года. Автоматизированная методика расчета доли экстремально холодного и теплого времени года внедрена в работу отдела метеорологических прогнозов, а также отдела климата Иркутского ГМЦ. Изложенные в диссертации теоретические и методические положения использованы в учебном процессе при подготовке метеорологов в Иркутском государственном университете в рамках курса «Региональная климатология».

Достоверность результатов расчетов, представленных в работе, подтверждается большим объемом и качеством используемого фактического материала данных наблюдений и архива NCEP/NCAR Reanalysis, оценками статистической значимости результатов, а также их апробацией на различных конференциях и семинарах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах:

- Научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Ресурсы Байкальского региона: освоение, состояние, экологические проблемы» (Иркутск, ИГУ, 2005 г.);
- Научно-теоретическая конференция молодых ученых (Иркутск, ИГУ, 2006 г.);
- VII сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2007 г.);

- XIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, ИГ СО РАН, 2007 г.);
- International Conference on environmental observations, modeling and information systems "Enviromis" (Tomsk, 2008);
- III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Научное творчество XXI века» (Красноярск, 2010 г.);
- Семинар на заседании Ученого совета Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Иркутск, 2010 г.);
- Всероссийская конференция с международным участием «Физика окружающей среды» (Томск, 2011 г.);
- Семинар отдела прикладной климатологии ФГБУ «ГГО» (Санкт-Петербург, 2011 г.);
- Семинар кафедры климатологии и мониторинга окружающей среды СПбГУ (Санкт-Петербург, 2011 г.);
- Результаты также докладывалась на семинарах в Ливерпульском университете (Великобритания) (Liverpool University, Faculty of Science and Engineering), где автор прошел обучение в магистратуре по направлению «Изменения окружающей среды и климатические изменения» («MSc in Environment and Climate Change») в 2008–2009 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 статьи – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, сборе, обработке материала, расчетах и интерпретации полученных результатов. Автор является разработчиком компьютерной программы расчета доли экстремально холодного и теплого времени года.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 199 страниц, 57 рисунков, 27 таблиц и 41 приложение. Библиографический список включает 130 наименований (в том числе 32 – иностранных).

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность научному руководителю Елене Александровне Кочуговой, к.г.н., доценту кафедры метеорологии и охраны атмосферы Иркутского государственного университета, без поддержки и неоценимой помощи которой работа была бы невозможна. Многолетнее и плодотворное сотрудничество с Еленой Александровной вдохновило автора на научный и творческий поиск, позволило подготовить и выпустить в свет ряд совместных работ и докладов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** формулируются основные цели и задачи диссертации, актуальность выбранной темы, научная новизна, практическая ценность работы, выдвинуты основные положения, выносимые на защиту, приведены другие сведения о работе, ее объеме и структуре.

В **первой главе** приведен подробный литературный обзор современных работ о пространственно-временной структуре климатических показателей экстремальности в XX веке на земном шаре и территории РФ, в частности ряда отечественных (Булыгина, Груза, Киктев, Шмакин, Попова, Платова, Шерстюков и др.) и зарубежных климатологов (Alexander, New, Folland, Karl и др.).

Во **второй главе**, посвященной материалам информационного обеспечения и методам решения задач, описаны фактические базы данных климатологической информации, полученные в процессе работы над кандидатской диссертацией для территории Иркутской области. Использовался банк данных по температуре приземного воздуха и осадкам суточного разрешения для 6 станций с периодом наблюдений с 1936 по 2006 гг., созданный во ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.cliware.meteo.ru/>). Этот массив исходных данных был дополнен архивом NCEP/NCAR Reanalysis для максимальных и минимальных температур за период с 1950 по 2007 гг. (Kalnay et al., 1996). Данные суточного разрешения за этот период снимались с регулярной сетки банка NCEP/NCAR Reanalysis (шаг сетки массива данных – $1,875^\circ$ по широте и $3,75^\circ$ по долготе). Использовались данные в узлах регулярной сетки, ближайших к 15 отобраным станциям (<http://www.esrl.noaa.gov/>). Данные месячного разрешения за инструментальный период наблюдений по экстремальным температурам и осадкам 30 метеорологических станций Иркутской области взяты из таблиц метеорологических станций ТМС архивного фонда Иркутского межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Также дана подробная физико-географическая карта-схема расположения метеорологических станций; показано, что Иркутская область с резко континентальным климатом вызывает особый научный интерес с позиции исследования экстремальных климатических показателей. Приведено описание ряда индексов атмосферной циркуляции, в том числе Азиатского антициклона, введены определения рассматриваемых климатических показателей, включая индексы экстремальности климата, описана методика их расчета.

Рассмотрены методы статистической обработки полученных временных рядов и оценки достоверности результатов. Для определения уровня значимости и угловых коэффициентов описан и применен тест Манна-Кендалла (Mann-Kendall test) и непараметрический метод оценивания наклона Сена (Sen slope estimator). Эти методы являются надежными с точки зрения резко выделяющихся значений (всплесков) и отсутствующих данных (лакун) и не требуют нормального распределения данных. Так как тренды в рядах экстремальных значений метеовеличин практически всегда оцениваются на базе скудной статистики, вопросы робастности и статистической значимости результатов приобретают здесь особое значение.

Циклические колебания во временных рядах метеорологических параметров исследовались с применением Фурье-анализа. Кроме того, в работе использовалось вейвлет-преобразование (wavelet analysis). В отличие от преобразования Фурье вейвлет-анализ более соответствует специфике нестационарных явлений.

В настоящей работе использовались климатические показатели экстремальности (как характеристики экстремальных свойств климата на годовом отрезке времени), разработанные в 1999 г. и рекомендованные экспертной группой по обнаружению климатических изменений, мониторингу и индексам при Комиссии по климатологии ВМО (<http://www.clivar.org/>) (табл. 1).

Таблица 1

Описание климатических показателей экстремальности (Karl et al., 1999)

Обозначение	Название	Определение	Ед. изм.
Температура воздуха			
<i>FD</i>	Число дней с морозом	Количество дней в году с минимальной температурой <i>TNn</i> ниже 0 °С	дни
<i>SU</i>	Число жарких дней	Количество дней в году с максимальной температурой <i>TXx</i> выше 25 °С	дни
<i>ID</i>	Число дней со льдом	Количество дней в году с максимальной температурой <i>TXx</i> ниже 0 °С	дни
<i>TXx</i>	Годовой максимум температуры воздуха	Ежегодно наблюдаемая предельно высокая суточная температура воздуха; самый жаркий день в году	°С
<i>TNx</i>	Максимальное значение летнего минимума температуры воздуха	Верхний предел суточной минимальной температуры воздуха летом; самая теплая летняя ночь в году	°С
<i>TNx'</i>	Максимальное значение зимнего минимума температуры воздуха	Верхний предел суточной минимальной температуры воздуха зимой, самая теплая зимняя ночь	°С
<i>TXn</i>	Минимальное значение зимнего максимума температуры воздуха	Нижний предел суточной максимальной температуры воздуха зимой; самый холодный зимний день в году	°С
<i>TXn'</i>	Минимальное значение летнего максимума температуры воздуха	Нижний предел суточной максимальной температуры воздуха летом, самый холодный летний день	°С
<i>TNn</i>	Годовой минимум температуры воздуха	Ежегодно наблюдаемая предельно низкая суточная температура; самая холодная ночь в году	°С
<i>TN10p</i>	Повторяемость холодных ночей в году	Годовая доля суток с минимальными температурами (<i>TNn</i>) ниже 10 % процентиля ежесуточного распределения минимальных температур за базовый период 1961–1990 гг.	% (дни)
<i>TX10p</i>	Повторяемость холодных дней в году	Годовая доля суток с максимальными температурами (<i>TXx</i>) ниже 10 % процентиля ежесуточного распределения максимальных температур за 1961–1990 гг.	% (дни)
<i>TN90p</i>	Повторяемость теплых ночей в году	Годовая доля суток с минимальными температурами (<i>TNn</i>) выше 90 % процентиля ежесуточного распределения минимальных температур за базовый период 1961–1990 гг.	% (дни)
<i>TX90p</i>	Повторяемость теплых дней в году	Годовая доля суток с максимальными температурами (<i>TXx</i>) выше 90 % процентиля ежесуточного распределения максимальных температур за базовый период 1961–1990 гг.	% (дни)

Продолжение таблицы 1

<i>WSDI</i>	Индекс продолжительности экстремально теплых периодов	Годовое количество последовательных (≥ 6) теплых дней, когда держалась экстремально жаркая погода, включающая значения максимальной температуры TXx выше 90 % перцентиля	дни
<i>CSDI</i>	Индекс продолжительности экстремально холодных периодов	Годовое количество последовательных (≥ 6) холодных ночей, когда держалась экстремально холодная погода, включающая значения минимальной температуры TNn ниже 10 % перцентиля	дни
<i>DTR</i>	Амплитуда суточного хода температуры воздуха	Суточная разница максимальной и минимальной температур	$^{\circ}\text{C}$
<i>GSL</i>	Продолжительность вегетационного периода	Годовое число дней между первым периодом со средней суточной температурой $T > 5^{\circ}\text{C}$ в течение ≥ 6 последовательных суток и первым периодом после 1 июля ≥ 6 последовательных суток со средней суточной температурой $T < 5^{\circ}\text{C}$ (для зерновых культур)	дни
<i>Атмосферные осадки</i>			
<i>R1d</i>	Максимальная сумма осадков за сутки	Максимальное количество осадков в году, выпавших за сутки	мм
<i>R5d</i>	Максимальная пентадная сумма осадков	Максимальное в году количество осадков, выпавших за последовательные пять суток (индекс выявляет ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков)	мм
<i>SDI</i>	Суточный индекс интенсивности осадков	Отношение годовой суммы осадков к числу дней с осадками (≥ 1 мм/сутки) в году	мм/сутки
<i>R10mm</i>	Число суток с осадками ≥ 10 мм/сутки	Количество дней в году с суточной суммой осадков <i>R1d</i> не менее 10 мм	дни
<i>R20mm</i>	Число суток с осадками ≥ 20 мм/сутки	Количество дней в году с суточной суммой осадков <i>R1d</i> не менее 20 мм	дни
<i>CDD</i>	Максимальная продолжительность сухих периодов	Максимальное число последовательных сухих дней в году (с осадками < 1 мм/сутки)	дни
<i>CWD</i>	Максимальная продолжительность влажных периодов	Максимальное число последовательных влажных дней в году (с осадками ≥ 1 мм/сутки)	дни
<i>R95p</i>	Сумма сильных осадков	Годовая сумма сильных осадков (выше 95 % перцентиля распределения суточных осадков за 1961–1990 гг. в общем годовом количестве осадков)	мм
<i>PRCPTOT</i>	Количество осадков	Годовая сумма осадков	мм

В **третьей главе** излагаются результаты исследования динамики экстремальных климатических показателей на территории Иркутской области.

В первом разделе главы сопоставляются данные наблюдений и архива NCEP/NCAR Reanalysis по минимальным и максимальным температурам приземного воздуха как исходным для расчета всех остальных индексов экстремальности по температуре. Выполненное сравнение, в целом, свидетельствует о большом сходстве трендов экстремальных температур, рассчитанных по фак-

тическим наблюдаемым данным и материалам архива NCEP/NCAR Reanalysis, а следовательно, NCEP/NCAR Reanalysis отражает реальный процесс изменения температуры. Наиболее близкие совпадения расчетов NCEP/NCAR Reanalysis с фактическими данными наблюдаются в ходе минимальных температур, где коэффициент корреляции указанных рядов превышает 0,60. Также следует отметить, что величина трендов минимальных температур, рассчитанных по архиву NCEP/NCAR Reanalysis, в среднем примерно на 0,3 °C/10 лет меньше аналогичных, основанных на фактических наблюдениях; для максимальных температур, – наоборот, завышенными (приблизительно на 0,07 °C/10 лет) по сравнению с расчетами на основе стационарных наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

Тренды в рядах годовых минимальных T_{\min} и максимальных T_{\max} температур (°C/10 лет) на отдельных станциях Иркутской области* по данным наблюдений и расчетов NCEP/NCAR Reanalysis и оценка их соответствия

Индекс	Станция	Временной период	По данным наблюдений	По архиву NCEP/NCAR	Корреляция рядов
			(°C/10 лет)	(°C/10 лет)	
			1950–2006 гг.	1950–2007 гг.	1950–2006 гг.
T_{\min}	Ербогачен		0,84	0,48	0,62
	Киренск		0,85	0,53	0,63
	Нижнеудинск (АМСГ)		0,88	0,69	0,73
	Иркутск		1,29	0,90	0,61
T_{\max}	Ербогачен		0,24	0,26	0,44
	Киренск		0,24	0,25	0,61
	Нижнеудинск (АМСГ)		0,42	0,32	0,68
	Иркутск		0,30	0,28	0,57

*Жирным указаны тренды и коэффициенты, статистически значимые на уровне 5 %

Расчеты по архиву NCEP/NCAR Reanalysis не отражают реального изменения в режиме осадков. Статистически значимый коэффициент корреляции многолетнего хода годовой суммы осадков в Иркутске, рассчитанный по данным наблюдений и архиву NCEP/NCAR, составил 0,38. Но уравнения регрессии и значения годовой суммы осадков сильно различаются (в 1968 г. – 1299 мм по архиву NCEP/NCAR и 420 мм по данным наблюдений) (рис. 1). Изменения в режиме осадков выявлялись с помощью индексов экстремальности, которые были посчитаны для отдельных станций на базе данных наблюдений.

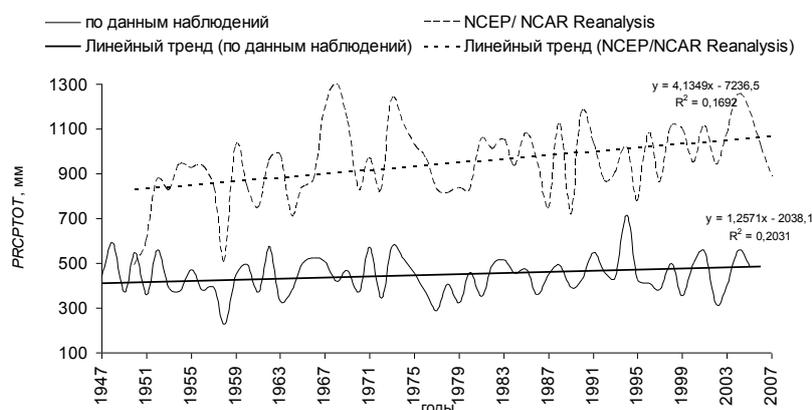


Рис. 1. Динамика многолетнего хода годовой суммы осадков ($PRCPTOT$) в Иркутске, построенного по данным наблюдений и архиву NCEP/NCAR Reanalysis

Во втором разделе рассмотрен термический режим Иркутской области в терминах индексов экстремальности температуры воздуха. В работе использовалось специализированное районирование территории Иркутской области. На территории области специалистами ИУГМС принято выделять пять районов с характерными климатическими особенностями (Северный, Западный, Центральный, Верхне-Ленский, Южный).

Анализ минимумов температуры воздуха показал, что в 77 % случаев интервал экстремально низких температур TNn изменяется от -54 до -40 °С, и только в 16 % случаев они опускаются ниже -55 °С. Сравнивая два периода 1947–1976 гг. и 1977–2006 гг., отметим, что после 1977 г. доля низких температур (ниже -47 °С) уменьшилась с 50 до 34 % по территории Иркутской области.

Анализ кусочно-линейного тренда минимумов температуры воздуха за период с 1947 по 1976 гг. указывает на тенденцию к потеплению. Это выражается в повышении минимальных температур, которые изменяются со скоростью от 0,01 °С/год (Верхняя Гутара, 1947–1976) до 0,27 °С/год (Усть-Уда, 1947–1976) (рис. 2, а). Максимальная скорость изменения температуры отмечена в центральной части исследуемой территории, минимальная – в северной. Скорость потепления в центральной части Иркутской области уменьшилась в 1,5–2 раза, например, на станции Усть-Уда (0,27 °С/год до 1970-х гг. и 0,11 °С/год после 1970-х гг.), в Максимово (0,12 °С/год; 0,05 °С/год), на станции Зима (0,13 °С/год; 0,04 °С/год соответственно). Другой особенностью линейных трендов минимальной температуры после 1970-х гг. является более интенсивное повышение минимальных температур на севере рассматриваемой территории. Здесь скорость роста минимальных температур увеличилась на 0,10 °С/год (Ербогачен) и 0,16 °С/год (Наканно). В западном и высокогорном районах Иркутской области отмечается монотонная и устойчивая тенденция роста минимальной температуры. Но на фоне общего положительного тренда отмечены годы с аномально холодными зимами (2000–2001 и 2005–2006 гг.). Следует отметить, что после 1990-х гг. сильно опустились годовые минимальные температуры (и возросли годовые максимальные температуры). Особенно ярко эта тенденция просматривается на станции Иркутск, что представляется несомненным связать с усилением антициклонического режима зимой (и летом) после 1990-х гг. (рис. 2, а, б).

Анализ показателей экстремальности, ассоциируемых с холодом, показал существенные изменения их пространственных распределений для различных климатических районов Иркутской области. Скорость потепления увеличивается с севера рассматриваемой территории на юг. Это выражено в росте минимальных суточных температур TNn (характеризующих температуру ночного времени суток) в среднем на 0,68 °С/10 лет, росте минимальных значений максимумов температуры воздуха TXn (характеризующих температуру самого холодного дня в году) в среднем на 0,57 °С/10 лет, сокращении числа дней со льдом ID . Следует отметить, что сокращение числа дней с морозом FD наблюдалось повсеместно на территории Иркутской области со скоростью $-2,0... -2,3$

дн./10 лет, на севере области – менее интенсивно (–1,2 дн./10 лет). Повторяемость холодных дней $TX10p$ уменьшается со скоростями –0,89, –0,82, –0,72, –0,67 %/10 лет в Южном, Центральном, Западном и Северном климатических районах соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Регионально осредненные коэффициенты трендов a_{tr} показателей экстремальности, ассоциируемых с холодом, с учетом климатического районирования Иркутской области (по материалам NCEP/NCAR Reanalysis – 1950-2007 гг.)

Район \ Индекс	TNn , годовой минимум (°C/10 лет)	TXn , мин. значение зимнего максимума (°C/10 лет)	ID , число дней со льдом (дн./10 лет)	FD , число дней с морозом (дн./10 лет)	$TX10p$, повторяемость холодных дней (%/10 лет)	$TN10p$, повторяемость холодных ночей (%/10 лет)
Северный	0,43	0,40	–1,4	–1,2	–0,67	–0,57
Западный	0,58	0,51	–1,6	–2,2	–0,72	–0,79
Центральный и Верхне-Ленский	0,67	0,67	–1,6	–2,0	–0,82	–
Южный	1,02	0,68	–2,4	–2,3	–0,89	–1,10

Найденные пороговые значения температуры воздуха, оцениваемые из функции распределения по уровню 0,90 и 0,10 за базовый период 1961–1990 гг., позволяют оценить, какую температуру следует считать аномально холодной для каждого месяца на каждой станции, т.е., считать пороговым значение температуры воздуха, соответствующее: $TX10p$ и ниже – аномально холодным днем, $TN10p$ и ниже – аномально холодной ночью. Например, аномально холодным днем в июле считается день с максимальной температурой ниже 19,2 °C (станция Бодайбо) или ниже 18,8 °C (станция Иркутск). Аномально холодной ночью в январе считать ночь с минимальной температурой ниже –44,7 °C (станция Бодайбо) или ниже –32,1 °C (станция Иркутск). Следует отметить, что такие оценки следует проводить, привлекая базы данных фактических наблюдений. По расчетам NCEP/NCAR Reanalysis можно судить только о тенденциях, но не о самих величинах (табл. 4).

Таблица 4

Значения температурных порогов, соответствующих 10 % процентиллю ежесуточного распределения максимальных (TXx) и минимальных температур (TNn), за базовый период данных наблюдений 1961–1990 гг. ($TX10p$ и ниже – аномально холодный день, $TN10p$ и ниже – аномально холодная ночь)

	Ербогачен						Жигалово					
	ХII	I	II	VI	VII	VIII	ХII	I	II	VI	VII	VIII
$TX10p$	-38,9	-39,8	-33,4	13,3	18,3	13,5	-31,4	-33,8	-25,7	15,8	20,0	15,9
$TN10p$	-47,9	-49,6	-49,5	-0,2	3,3	0,4	-41,2	-44,6	-42,2	0,0	5,6	3,0
	Бодайбо						Нижнеудинск					
	ХII	I	II	VI	VII	VIII	ХII	I	II	VI	VII	VIII
$TX10p$	-36,6	-38,2	-32,0	15,0	19,2	15,9	-22,6	-24,3	-19,4	15,6	18,9	15,9
$TN10p$	-42,5	-44,7	-42,8	2,2	6,9	5,0	-34,8	-38,3	-37,6	2,2	6,7	3,7
	Киренск						Иркутск					
	ХII	I	II	VI	VII	VIII	ХII	I	II	VI	VII	VIII
$TX10p$	-35,1	-36,7	-30,0	15,2	18,8	15,8	-20,8	-21,8	-17,8	16,0	18,8	16,1
$TN10p$	-45,0	-46,6	-45,4	2,0	7,3	4,4	-30,7	-32,1	-31,5	3,9	8,4	5,7

Анализ максимумов температуры воздуха показал, что после 1976 г. наблюдается ускорение роста максимальных температур TX_x , однако зависимость от широты в распределении трендов максимальных температур воздуха TX_x по региону выявить не удалось. Над территорией исследования поле коэффициентов трендов имеет многоочаговую структуру (рис. 2, б).

За всю историю инструментальных наблюдений максимумы температуры воздуха TX_x изменялись от 22 °С до 40 °С. Предельно высокая температура в Иркутской области была зафиксирована на станции Усть-Уда в 1996 г. и составила 40 °С. Максимальные годовые температуры TX_x , возможные 1 раз в 20 лет, лежат в пределах от 28 °С в районе побережья озера Байкал (станция Солнечная) до 38 °С (станция Бодайбо Патомского нагорья). Самыми жаркими на исследуемой территории являются центральные районы Иркутской области (станция Жигалово) и Патомского нагорья (станции Бодайбо, Мама), для которых характерны температуры 36...38 °С; для высокогорий Восточного Саяна – до 38 °С (станция Алыгджер), Хамар-Дабана – до 32 °С. После 1970-х гг. доля экстремально высоких температур (выше 33 °С) возросла с 39 до 47%.

Анализ показателей экстремальности приземного воздуха, ассоциируемых с теплом, показал, что в их изменениях преобладала тенденция к увеличению. Это выражено в росте максимальных суточных температур TX_x (характеризующих температуру дневного времени суток) в среднем на 0,41 °С/10 лет, росте максимальных значений минимумов температуры воздуха TN_x (характеризующих температуру самой теплой ночи в году) – на 0,29 °С/10 лет (табл. 5).

Таблица 5

Регионально осредненные коэффициенты трендов α_{tr} показателей экстремальности, ассоциируемых с теплом, с учетом климатического районирования Иркутской области (по материалам NCEP/NCAR Reanalysis – 1950-2007 гг.)

Район \ Индекс	TX_x , годовой максимум (°С/10 лет)	TN_x , макс. значение летнего минимума (°С/10 лет)	$WSDI$, продолжительность жарких периодов (дн./10 лет)	SU , число жарких дней (дн./10 лет)	TX_{90p} , повторяемость теплых дней (%/10 лет)	TN_{90p} , повторяемость теплых ночей (%/10 лет)
Северный	0,43	0,29	0,75	0,80	0,96	1,13
Западный	0,48	0,36	1,17	1,05	0,86	1,65
Центральный и Верхне-Ленский	0,26	0,21	0,63	-0,41	0,71	0,96
Южный	0,47	0,28	0,92	0,19	1,10	1,59

Известно, что степень неблагоприятного воздействия высоких температур воздуха определяется не столько достижением температуры критических пределов, сколько длительностью их воздействия. В таблице 5 приводятся тенденции продолжительности теплых периодов $WSDI$, в которые ≥ 6 дней подряд держалась экстремально жаркая погода (включающая значения максимальной температуры выше 90 перцентиля ежесуточного распределения максимальных температур за базовый период 1961–1990 гг.). Индекс $WSDI$ увеличился в среднем на 0,87 дн./10 лет. Наиболее интенсивное увеличение $WSDI$ отмечено в За-

падном климатическом районе (1,17 дн./10 лет). Следует также отметить, что увеличилась повторяемость теплых дней $TX90p$ (в среднем на 0,91 % /10 лет с максимальным очагом роста 1,10 % /10 лет в Южном климатическом районе) и увеличилась повторяемость теплых ночей $TN90p$ (в среднем на 1,33 %/10 лет с максимальным очагом роста 1,65 % /10 лет в Западном районе). Индекс, характеризующий тенденцию числа жарких дней в году SU , показывает неоднозначные результаты. Западный район подвержен наиболее интенсивным изменениям индексов экстремальности, ассоциируемых с теплом (табл. 5).

По аналогии с определением anomalно холодного дня и anomalно холодной ночи по показателям $TX10p$ и $TN10p$, были найдены пороговые значения $TN90p$ (анomalно теплая ночь) и $TX90p$ (анomalно теплый день). Так, anomalно теплой ночью в январе, например, считается ночь с минимальной температурой выше $-21,8$ °C (Бодайбо) или выше $-14,6$ °C (Иркутск). Anomalно теплым днем в июле считается день с максимальной температурой выше $32,0$ °C (Бодайбо) или выше $28,9$ °C (Иркутск) (табл. 6).

Таблица 6

Значения температурных порогов, соответствующих 90 % процентиллю ежесуточного распределения максимальных температур (TXx) и минимальных температур (TNn), за базовый период данных наблюдений 1961–1990 гг. ($TN90p$ и выше – anomalно теплая ночь, $TX90p$ и выше – anomalно теплый день)

Ербогачен							Жигалово					
	XII	I	II	VI	VII	VIII	XII	I	II	VI	VII	VIII
$TN90p$	-19,2	-21,7	-20,1	11,4	14,1	12,0	-17,2	-22,6	-19,4	12,0	15,0	13,1
$TX90p$	-9,3	-11,7	-8,3	28,5	30,2	26,4	-7,1	-10,8	-5,7	30,0	30,3	28,0
Бодайбо							Нижнеудинск					
	XII	I	II	VI	VII	VIII	XII	I	II	VI	VII	VIII
$TN90p$	-17,8	-21,8	-20,2	12,0	15,5	13,6	-12,7	-17,1	-15,0	12,3	14,6	13,0
$TX90p$	-9,5	-12,8	-9,7	30,2	32,0	28,5	-2,3	-5,2	-0,4	28,7	29,0	26,6
Киренск							Иркутск					
	XII	I	II	VI	VII	VIII	XII	I	II	VI	VII	VIII
$TN90p$	XII	I	II	VI	VII	VIII	-11,5	-14,6	-14,2	12,8	15,5	14,0
$TX90p$	-14,7	-17,6	-18,1	12,7	15,8	13,5	-2,7	-6,1	-1,8	28,9	28,9	26,7

Вследствие активного повышения годовых минимумов TNn отмечается интенсивное уменьшение амплитуды суточного хода температур DTR ($-0,15$ °C/10 лет для станции Иркутск).

В третьем разделе анализ продолжительности сезонов года показал, что даты перехода среднесуточных температур подвержены сильным колебаниям. С начала 1960-х гг. зима на большей части Иркутской области стала наступать позднее средней многолетней даты, представленной в справочнике по климату, а период средних суточных температур выше 10 °C (летний сезон) в последние годы сместился в сторону более поздних дат. Продолжительность вегетационного периода GSL растет в среднем на 1,5 дн./10 лет за счёт увеличения времени между переходом температуры воздуха через 5 °C весной и осенью (табл. 7).

Таблица 7

Оценка коэффициентов линейных трендов α_{tr} (дн./10 лет)* индекса продолжительности вегетационного периода GSL , стандартной ошибки углового коэффициента S_α , граничного уровня значимости p и вкладов R^2 (%) тренда в полную дисперсию рядов GSL на отдельных станциях Иркутской области

Станция \ Временной период	По данным наблюдений, (1947–2006 гг.)				По материалам NCEP/NCAR Reanalysis (1950–2007 гг.)			
	α_{tr}	S_α	p	R^2	α_{tr}	S_α	p	R^2
Ербогачен	2,21	0,87	0,014	10,8	1,78	0,88	0,039	6,5
Киренск	0,47	0,84	0,672	0,5	1,19	0,88	0,247	3
Нижнеудинск	1,06	1,02	0,366	1,6	1,08	1,04	0,374	1,7
Иркутск	1,65	1,01	0,107	4,5	2,36	1,01	0,012	8,7

* Жирным указаны тренды, статистически значимые на уровне 5 %

В четвертом разделе рассмотрены тенденции изменений климатических индексов экстремальности, которые характеризуют режим атмосферного увлажнения Иркутской области. Пространственно-временная динамика экстремумов осадков очень сложна. Например, исследования имеющихся временных рядов суточных сумм за весь рассматриваемый период показал, что на территории области возрастает число дней с интенсивным выпадением осадков. Сравнительный анализ двух временных периодов (1947–1976 гг. и 1977–2006 гг.) также показал, что после 1970-х гг. повторяемость суточных максимумов осадков $R1d$ увеличилась на большинстве рассматриваемых станций, особенно хорошо данная тенденция выражена в теплый период. Зимой повторяемость сильных осадков возросла только на станциях Ербогачен и Мама. Годовая сумма атмосферных осадков $PRCPTOT$ за теплый сезон увеличилась с регионально осредненной скоростью 4,35 мм/10 лет для года в целом. Для суточных максимумов осадков $R1d$ характерна 2–4, 5–7, 9–11 и 16–17-летняя автоколебательная цикличность. В рядах суточного индекса интенсивности осадков $SDII$ статистически значимые тренды по рассматриваемой территории не выявлены. Интерпретируя данные по числу дней с осадками не менее 10 мм, отметим, что $R10mm$ достаточно полно отражает как число дней с осадками вообще, так и число дней с обильными осадками. Число таких дней имеет тенденцию к увеличению с наветренной стороны орографических препятствий, аналогично годовому количеству осадков $PRCPTOT$ в целом. Неоднозначные результаты получены при анализе изменений сумм сильных осадков $R95p$ в их общем годовом количестве, которые приходятся на экстремальные суточные суммы осадков с вероятностью превышения 5 %. Нужно отметить тенденции к согласованному росту максимальной продолжительности влажных периодов CWD (с регионально осредненной скоростью 0,14 дн./10 лет) по территории исследования и одновременные тенденции к уменьшению максимальной продолжительности сухих периодов CDD (с регионально осредненной скоростью –1,59 дн./10 лет). Но не во всех случаях выявленные тенденции подтверждаются статистической значимостью. В силу этого, а также детального анализа отдельных индексов экстремальности атмосферных осадков можно отметить некоторые тенденции перехода к более влажному климату до 2006 г.

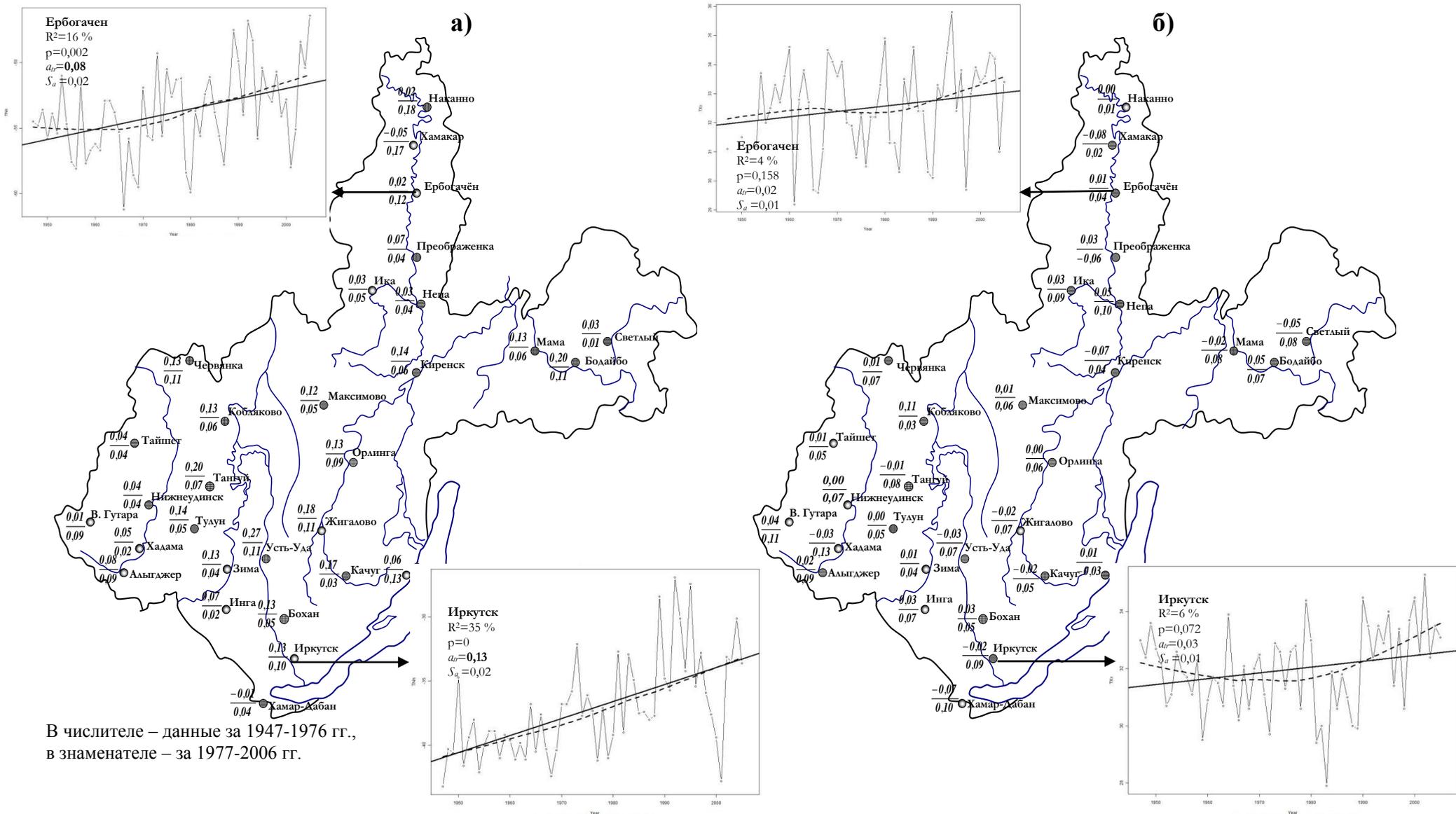


Рис. 2. Распределение скорости изменения **а)** годового минимума температуры воздуха (TNn), °C/год, **б)** годового максимума температуры воздуха (TXx), °C/год на территории Иркутской области (по данным наблюдений)

В пятом разделе рассмотрена связь отдельных экстремальных климатических показателей с изменениями атмосферной циркуляции.

Представляется несомненным, что изменения экстремальных температур наиболее вероятно связаны с изменениями атмосферной циркуляции, например, минимальные температуры, равно как и повторяемость холодных дней/ночей находятся под влиянием Азиатского антициклона (*SHI*) и зимней Арктической осцилляции (*AO*). Кроме того, существует вероятность, что зимняя планетарная *AO* сама влияет на Азиатский антициклон опосредованно через динамические процессы. Показано, что если наблюдается ослабление Азиатского антициклона, то зимняя *AO* находится в своей положительной фазе. Если же Азиатский антициклон усиливается, *AO* наблюдается в своей отрицательной фазе.

Полученные методами гармонического анализа периодичности в рядах индексов циркуляции (*AO*, *NAO*) и Азиатского антициклона (*SHI*) характерны и для вариаций минимальных температур воздуха (от 8 до 11 лет и от 15 до 18 лет) (рис. 3).

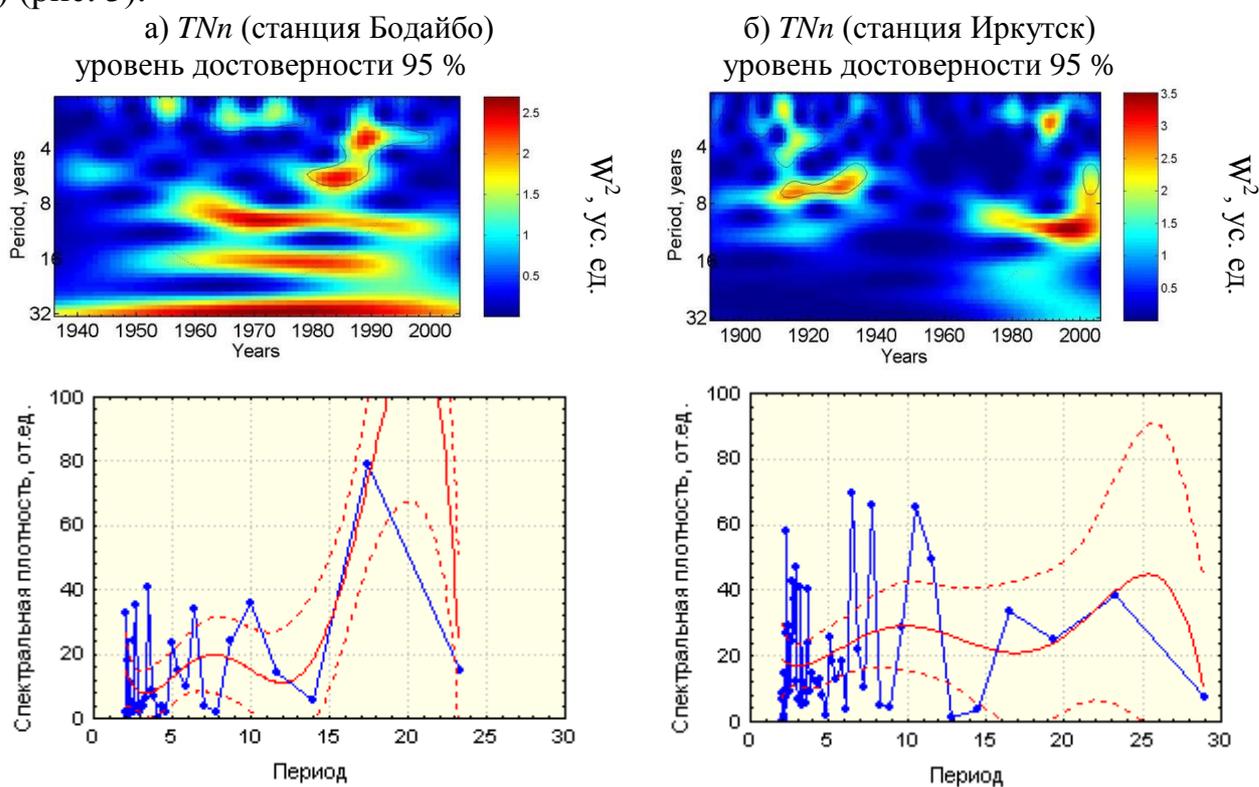


Рис. 3. Распределение плотности энергии (W^2) и спектральной плотности в зависимости от периода для годового минимума температуры воздуха *TNn* на станциях Бодайбо (1936–2006 гг.) и Иркутск (1887–2006 гг.)

Примечание: на верхней панели сплошные линии показывают уровень достоверности 95 %, на нижней панели пунктирные линии показывают пределы доверительного интервала, сплошная линия – средняя доверительного интервала

Присутствие в рядах экстремально низких температур тех же циклов, которые свойственны циркуляционным индексам, свидетельствует о необходимости детального изучения этого вопроса.

Представим минимальную температуру TNn как функцию, зависящую от индексов Азиатского антициклона SHI и Арктической осцилляции AO , и оценим тесноту совместного влияния Азиатского антициклона и Арктической осцилляции на поведение минимальных температур на станциях Иркутск и Бодайбо. Теснота связи определяется величиной коэффициента линейной множественной корреляции и детерминации. Оказалось, что для станции Иркутск $R^2 = 0,64^2 = 0,41$, т.е. 41 % суммарной дисперсии минимальных температур можно объяснить изменениями Азиатского антициклона и Арктической осцилляции; для станции Бодайбо $R^2 = 0,57^2 = 0,32$, то есть Азиатский антициклон с Арктической осцилляцией могли бы объяснить до 32 % изменчивости минимальных температур.

Вероятно, совместное действие других глобальных мод (не рассмотренных в диссертационном исследовании), а также влияние антропогенного фактора могли бы внести вклад в изменение минимальных температур TNn зимой. Однако это нуждается в дальнейшем исследовании.

Заключение

1. Сформирована база данных индексов экстремальности климата с использованием данных наблюдений и материалов архива NCEP/NCAR Reanalysis.

2. Найдены пороговые значения экстремальности температуры воздуха за базовый период 1961–1990 гг. при выбранных процентилях (90 % и 10 %) для выделения доли экстремально холодного и теплого времени года.

3. Рассчитаны и проанализированы ряды климатических показателей экстремальности на территории Иркутской области, оценены их тренды.

4. Ассоциируемые с холодом индексы экстремальности показали уменьшение повторяемости холодных дней/ночей и продолжительности экстремально холодных периодов на фоне возросших минимальных значений максимальных температур и годовых минимумов температуры воздуха в рамках рассматриваемых периодов.

Ассоциируемые с теплом индексы экстремальности показали увеличение повторяемости теплых дней/ночей и продолжительности теплых периодов, с незначительным увеличением годовых максимумов температуры воздуха и самых высоких значений минимальных температур. Вследствие активного повышения годовых минимумов TNn отмечалось интенсивное уменьшение амплитуды суточного хода температур DTR .

5. Архив NCEP/NCAR Reanalysis достаточно хорошо отражает общую качественную картину изменения фактических данных наблюдений температуры воздуха на территории Иркутской области (значимые коэффициенты корреляции $0,44 \div 0,73$), но не пригоден для оценки изменения количества осадков (коэффициент корреляции $0,38$).

6. Анализ продолжительности сезонов года показал, что зима на большей части Иркутской области стала наступать позднее средней многолетней даты, представленной в справочнике по климату, а период средних суточных температур выше $10\text{ }^\circ\text{C}$ (летний сезон) в последние годы сместился в сторону более

поздних дат. Продолжительность вегетационного периода *GSL* растет в среднем на 1,5 дн./10 лет за счёт увеличения времени между переходом температуры воздуха через 5 °С весной и осенью.

7. Выявлен переход к более влажному климату за рассматриваемый период в регионе, на что указывают тенденции к согласованному росту максимальной продолжительности влажных периодов *CWD* (с регионально осредненной скоростью 0,14 дн./10 лет) и одновременные тенденции к уменьшению максимальной продолжительности сухих периодов *CDD* (с регионально осредненной скоростью –1,59 дн./10 лет). Однако, не во всех случаях выявленные тенденции подтверждаются статистической значимостью. Годовая сумма атмосферных осадков *PRCPTOT* за теплый сезон увеличилась с регионально осредненной скоростью 4,35 мм/10 лет.

В рядах суточных максимумов осадков *R1d* выявлены характерные циклы в 2–4, 5–7, 9–11 и 16–17 лет.

8. Корреляционный анализ показал, что Азиатский антициклон вместе с Арктической осцилляцией объясняют до 41 % изменчивости годовых минимальных температур *TNn* в зимний период на территории Иркутской области.

Основные результаты исследования отражены в публикациях автора:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кочугова Е.А., Кошкин Д.А. Тенденции изменения годовых экстремумов приземной температуры воздуха на территории Иркутской области // География и природ. ресурсы. – 2010. – № 2. – С. 63–69.

2. Кошкин Д.А., Кочугова Е.А. Индикация изменения климата в терминах индексов экстремальности температуры воздуха и их связь с изменениями атмосферной циркуляции на территории Предбайкалья // Ученые записки. Электрон. научн. журн. Курского гос. ун-та. – Курск, 2011. – № 1. (17). – 8 с., зарегистрировано 01.04.2011 под № 0421100068/0035.

Публикации в научных изданиях:

3. Кошкин Д.А., Кочугова Е.А. Динамика экстремумов температуры воздуха в Иркутске за инструментальный период наблюдений // Вестник Иркутского университета. Спец. выпуск. Материалы научно-теор. конференции молодых ученых. – Иркутск, 2005. – С. 36–37.

4. Кочугова Е.А., Кошкин Д.А. Изменения климата в холодный период года в значениях экстремумов температуры воздуха // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук Высшей школы России. Ч. 3. – Иркутск, 2006. – С. 59–70.

5. Кочугова Е.А., Кошкин Д.А. Региональные проявления изменения климата в значениях экстремальных температур воздуха на территории России // Вестник Иркутского университета. Спец. Выпуск. Материалы научно-теор. конференции молодых ученых. – Иркутск, 2006. – С. 25–26.

6. Кошкин Д.А., Кочугова Е.А. Влияние изменений климата на продолжительность сезонов года в Иркутской области // VII Сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Мат-лы рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Аграф-Пресс, 2007. – С. 78–80.

7. Игнатов А.В., Балыбина А.С., Густокашина Н.Н., Кичигина Н.В., **Кошкин Д.А.**, Максютова Е.В., Трофимова И.Е. Поиск и моделирование закономерностей гидрологических и климатических процессов на территории Сибири // Материалы XII научного Совещания географов Сибири и Дальнего Востока. Т. 1. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. – С. 140–141.

8. **Koshkin D.A.**, Kochugova E.A. Trends of extreme annual temperatures over Predbaikalie // International Conference on environmental observations, modeling and information systems "Enviromis". – Tomsk, Russia, June, 28–July, 5, 2008. – P. 87–88.

9. **Кошкин Д.А.**, Кочугова Е.А. Сезонные особенности и тенденции изменений индексов экстремальности осадков на севере Иркутской области // В мире научных открытий. – Красноярск: Изд-во «Научно-инновационный центр», 2010. – № 6 (1). 12. – С. 324–326.

10. **Кошкин Д.А.** Изменение продолжительности сезонов года и вегетационного периода в Иркутской области на фоне современных изменений климата // Мат-лы всерос. конф. с межд. участ., посв-ой 50-летию первого полета человека в космос и 75-летию регулярных исследований ионосферы в России. – Томск: Томское Университетское изд-во, 2011. – С. 113–117.