

На правах рукописи

Платова Татьяна Владимировна

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ВО ВТОРОЙ
ПОЛОВИНЕ 20 ВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.

Специальность 25.00.36 Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в ГУ Институт глобального климата и экологии
Росгидромета и РАН

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор Груза Георгий Вадимович

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук, профессор Клещенко Александр Дмитриевич
Кандидат физико-математических наук, Мяч Лариса Тимофеевна

Ведущая организация:

Государственное учреждение "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации"

Защита состоится « 21 » ноября 2008 г. в _____ 12⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д002.049.01 в ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН по адресу: РФ 107258, Москва, ул. Глебовская, дом 20Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

Автореферат разослан « 20 » _____ октября _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук, профессор



Г.М. Черногаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Климат – это важнейшая характеристика среды обитания всего живого на земле, в том числе среды обитания человека и его хозяйственной деятельности. Для проблем геоэкологии чрезвычайно важной является оценка состояния и изменений реального климата, его изменчивости и экстремальности в каждый текущий момент времени (диагноз) и в ближайшем будущем (прогноз). В настоящее время, в условиях меняющегося климата, эти оценки, которые составляют предмет климатологии должны быть регулярно обновляемыми, основанными на новейшей доступной информации. Самым надежным источником информации о реальном климате являются данные инструментальных гидрометеорологических наблюдений, в частности, собранные в процессе регулярного мониторинга климата РФ.

Таким образом, задача диссертации - получение обновленных оценок состояния и тенденций в изменении, изменчивости и экстремальности современного климата на территории России по данным наблюдений, с использованием новейшей доступной информации актуальна и своевременна.

Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является оценка состояния и изменений современного климата, его изменчивости и экстремальности на территории России по данным многолетних инструментальных наблюдений, а также оценка возможности их обновления по данным регулярного мониторинга климата России.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- ° По данным инструментальных наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками подготовить современное климатическое описание территории России и ее отдельных экорегионов с учетом текущих изменений климата.
- ° Получить оценки изменчивости и экстремальности региональных климатов на территории России с использованием индексов экстремальности (рекомендованных МГЭИК) и климатических характеристик, важных для экономики и сельскохозяйственного производства.

° Оценить качество воспроизведения наблюдаемого климата XX века (его экстремальности, изменчивости и изменений) современными климатическими моделями.

Научная новизна работы

По данным инструментальных наблюдений получены оценки и выявлены закономерности пространственного распределения показателей экстремальности климата и тенденций их изменений в XX веке для всей территории России за единый период (1936 – 2000 гг).

Выполнен анализ качества воспроизведения современными климатическими моделями климата России в XX веке, включая показатели экстремальности и изменчивости климата.

По данным прямых фенологических наблюдений в зерносеющих районах России получены оценки трендов агроклиматических характеристик (сроки наступления основных фаз вегетации, продолжительность межфазных периодов)

Соискатель выносит на защиту:

1. Современное климатографическое описание территории РФ и ее отдельных экорегионов по данным регулярного мониторинга климата (температура воздуха и атмосферные осадки), включая индексы экстремальности и оценку трендов.

2. Оценки качества воспроизведения современными климатическими моделями структуры, изменчивости и экстремальности климата России (на примере модели INMCM3.0).

3. Оценки тенденций изменения агроклиматических характеристик (сроки наступления основных фаз вегетации, продолжительность межфазных периодов) по данным прямых фенологических наблюдений во второй половине XX столетия.

Практическое значение.

Регулярно обновляемые оценки современных тенденций изменений климата на территории России используются в бюллетенях мониторинга климата и справках по запросам заинтересованных организаций. В работе содержатся

рекомендации для потребителей по использованию данных о климате с учетом его изменений.

Внедрение.

Результаты исследования по теме диссертации были использованы в НИР "Обнаружение и прогноз антропогенных изменений климата и повторяемости экстремальных условий на территории Европы и СНГ в региональном масштабе" Лаборатории комплексного мониторинга ИГ РАН за 2005 – 2006 гг., при выполнении проекта РФФИ № 03-05-64379 "Климатические экстремумы температуры приземного воздуха и атмосферных осадков и их связь с современными изменениями климата", в ежегодных "Обзорах загрязнения окружающей среды в Российской Федерации" Росгидромета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были доложены на Второй Всероссийской конференции "Научные аспекты экологических проблем России" (Москва, 29-31 мая 2006 г.), Итоговой научной сессии (2006 г.) и на научных семинарах в ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН и ИГ РАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Общий объем работы составляет 109 страниц, включая 5 таблиц, 59 рисунков. Список литературы содержит 93 наименования.

Введение содержит необходимые общие сведения о диссертации, ее актуальности, целях и задачах, новизне, практической значимости, выносимых на защиту положениях, апробации и основных публикациях.

В главе 1 представлена общая характеристика температурно-влажностного режима России по литературным источникам. Приведен обзор основных известных данных о климате разных регионов России и наблюдаемых изменениях за отдельные исторические периоды, которые, как правило, завершаются в 1990-х гг. XX столетия.

В главе 2 дана постановка задачи, введены определения рассматриваемых климатических переменных, включая индексы экстремальности климата, и описана методика их расчета по данным суточных наблюдений за температурой и осадками на 223 российских станциях международного обмена.

Индексы экстремальности предложены в 1999 г. объединенной рабочей группой ВМО по обнаружению изменений климата (ККл/КЛИВАР) как характеристики экстремальных свойств климата на годовом отрезке времени (описание их дано на сайте <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/stardex>). Десять из них (перечислены ниже) были рекомендованы ВМО для использования в исследованиях по обнаружению изменений экстремальности и изменчивости климата. Эти 10 индексов были также включены в программу оценки качества современных климатических моделей (IPCC-2001, IPCC-2007).

В диссертации в качестве климатических переменных, характеризующих условия текущего года, использованы перечисленные ниже 16 величин, среди которых рекомендованные Межправительственной группой экспертов по обнаружению изменений климата (МГЭИК) индексы экстремальности представлены наряду с обобщенными за год характеристиками температуры и осадков. Все рассматриваемые индексы пригодны для характеристики климата в средних широтах (в частности, на территории России). Принятые обозначения: $T_{X_{yd}}$, $T_{N_{yd}}$ – суточный максимум и минимум температуры для дня d и года y ; TE_{yd} – средняя суточная температура; R_{yd} – суточная сумма осадков; N_{dy} – число дней в году (365 или 366). Через E^d обозначен статистический оператор осреднения по множеству дней года; через Min^d , Max^d – операторы определения экстремумов из ежедневных значений. $N^d\{A\}$ – число дней с осуществлением события A . Напомним, что говорят об измеримых осадках, если суточная сумма не ниже 1 мм; в противном случае измерение квалифицируется как «без осадков» ($R_{yd}=0$) либо как «следы осадков» ($0 < R_{yd} < 1$).

1. E_T – среднегодовая температура приземного воздуха:

$$ET_y = E^d (TE_{yd})$$

2. MiT – годовой минимум температуры (минимум из суточных минимумов):

$$MiT_y = Min^d (TN_{yd})$$

3. MaT – годовой максимум температуры (максимум из суточных максимумов):

$$MaT_y = \text{Min}^d (TX_{yd})$$

4. ET01 – среднемесячная температура января:

$$ET01_y = E^d (TE_{yd}), d \in Jan$$

5. ET07 – среднемесячная температура июля:

$$ET07_y = E^d (TE_{yd}), d \in Jul$$

6. FD – суммарное число дней с морозом (дни). Показатель важен для сельского хозяйства и растениеводства. Рассчитывается как число дней в календарном году с суточным минимумом температуры воздуха ниже 0°C:

$$FD_y = N^d \{TN_{yd} < 0\}$$

7. ETR – годовой размах температур (°C):

$$ETR_y = MaT_y - MiT_y$$

8. GSL – продолжительность вегетационного сезона (дни). Начало сезона GSB_y определяется как первый день текущего календарного года, начиная с которого более 5 последовательных дней средняя суточная температура воздуха превышает 5°C, то есть $TG_{yd} > 5^\circ\text{C}$. Окончание сезона GSE_y – первый день (после 1 июля), начиная с которого более 5 дней подряд средняя суточная температура воздуха была ниже 5°C, то есть $TG_{yd} < 5^\circ\text{C}$. Тогда:

$$GSL_y = GSE_y - GSB_y + 1$$

Даты перехода температуры через 5°C рассматриваются, в частности, как начало и конец вегетационного периода хладостойких растений.

9. HWDD – индекс продолжительности волн тепла (дни), характеризует устойчивость экстремально жаркой погоды. Индекс связан со статистикой смертности. Рассчитывается как максимальное количество последовательных дней за год (не менее 5) с суточным максимумом температуры, превысившим более чем на 5°C свою многолетнюю «норму». Каждый такой индивидуальный

процесс называется волной тепла; его продолжительность $N_k = N^d \{TX_{yd} > \text{norm}(TX)_d + 5\}$, где «норма» $\text{norm}(TX)_d$ рассчитывается как средняя максимальная температура для дня d за 1961-1990 гг. В результате, годовой индекс

$$HWDD_y = \text{Max}^k (N_{yk}, \text{если } N_{yk} > 5 \text{ дней})$$

10. Tn90 – доля теплого времени года (%), то есть число дней за год с суточным минимумом температуры TN_{yd} выше своего 90%-го перцентиля TN_{90} ., выраженное в % от общего числа дней в году. Перцентиль TN_{90} устанавливается по множеству всех значений TN_{yd} за 1961-1990 гг. Индекс направлен на исследование повторяемости самых теплых ночей в году и рассчитывается как:

$$Tn90_y = N^d \{TN_{yd} > TN_{90}\} / Nd_y * 100\%$$

11. ER – среднегодовая суточная сумма осадков:

$$ER_y = E^d (R_{yd})$$

Индекс равносителен традиционно используемой синоптиками годовой сумме осадков, но выражен в мм/день.

12. R10 – Количество дней с осадками не ниже 10 мм (дни); на территории России характеризует повторяемость интенсивных осадков, т.к. в средних широтах 10 мм соответствуют, в целом, обильным осадкам. Рассчитывается за год:

$$R10_y = N^d \{R_{yd} > 10 \text{ мм}\}$$

13. CDD – максимальное за год число последовательных «сухих» дней (дни); означает максимальную (в году) продолжительность «сухих периодов» $D_k = N^d \{R_{yd} < I\}$, т.е. периодов без осадков или со следами осадков; может служить индикатором засух. Изменение длительности такого явления и смещение его границ незамедлительно сказывается на растительности и экосистемах в целом. Рассчитывается как:

$$CDD_y = \text{Max}^k (D_{yk})$$

14. R5d – максимум пятидневных сумм осадков (мм), индекс может служить индикатором событий, связанных с переувлажнением и наводнениями.

Рассчитывается для календарного года как максимум из скользящих 5-дневных сумм осадков:

$$R5d_y = \text{Max}^d (\sum_t R_{ydt}, t=[d-2, d+2])$$

15. SDII – интенсивность осадков (мм/сутки). Рассчитывается для календарного года как годовая сумма осадков, деленная на число дней с осадками не ниже 1 мм (дни со следами осадков в сумму не включаются):

$$SDII_y = ER_y / N^d \{R_{yd} \geq 1\}$$

16. R95T – доля интенсивных осадков в годовой сумме (%). Рассчитывается как процентное отношение суммы интенсивных осадков (суточная сумма осадков выше 95%-перцентиля R_{95} за 1961-1990 гг.) к полной годовой сумме осадков:

$$R95t_y = \sum_d \{R_{yd}, \text{если } R_{yd} > R_{95}\} / \sum_d \{R_{yd}\} * 100\%$$

В главе 3 приведены полученные в работе оценки статистических характеристик всех 16 выбранных климатических переменных, составляющих в совокупности климатографическое описание территории России за 1936-2000 годы. Набор статистических характеристик для каждой климатической переменной включает: многолетние: среднее, стандартное отклонение, экстремумы и оценки линейных трендов, полученные методом наименьших квадратов. Для всех показателей выполнен анализ пространственно осредненных временных рядов и пространственных распределений на территории России. Результаты анализа представлены в работе в виде таблиц и карт. Пример карт из климатографического описания приведен на рис. 1 (для переменной «годовой максимум температуры»), а также на следующих восьми рисунках (рис.2- рис. 9, верхние фрагменты). Более подробный анализ представлен в диссертации.

В работе приводится полный комплект карт с аналогичными описаниями современного климата (1976-2005 гг.).

Глава 4 посвящена оценке способности современных климатических моделей к адекватному воспроизведению наблюдаемого климата (в терминах рассматриваемых климатических переменных). Описываются результаты сопоставления одноименных статистик, рассчитанных по данным наблюдений и по результатам климатического моделирования суточного разрешения. Данные моделирования (модель ИВМ РАН в эксперименте «20С3М» - климат 20-го столетия) предварительно интерполированы в точки расположения 223 используемых станций. Расчет индексов выполнен по модельным и наблюдаемым данным по единой методике (см. гл.2) на едином периоде (1936-2000). Полученные пространственные распределения «наблюденных» и «модельных» норм и коэффициентов линейного тренда приведены на рисунках 2-8. В таблицах 1-4 приведены результаты пространственного обобщения точечных (на 223 станциях) оценок этих статистик. В частности, приведены средние по территории России и размах точечных значений в модели и наблюдениях, а также оценки соответствия модельных и наблюдаемых оценок: ошибки воспроизведения и пространственная корреляция.

В главе 5 приводятся результаты **анализа**, в котором уникальные данные прямых фенологических наблюдений за наступлением фаз развития озимой пшеницы (за период 1967 – 1997 гг.) используются для оценки изменчивости продолжительности вегетационного периода от возобновления вегетации до восковой спелости (реальный вегетационный период, РВП). Рассчитанные временные ряды продолжительности РВП, осредненные по административным областям основных зернопроизводящих районов России, указывают на реальное сокращение продолжительности РВП на всей территории страны, за исключением юга ЕТР.

Тенденции изменений продолжительности РВП сравниваются с тенденциями изменений «метеорологического вегетационного периода» (МВП), за который принимается период устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5°C (см. индекс **GSL** выше).

В результате совместного анализа временных рядов урожайности зерновых культур на территории Российской Федерации (РФ) и фенологических характеристик метеорологических условий получена общая форма зависимости урожая от температуры и осадков. Показано, что эта зависимость не линейная.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. По данным инструментальных наблюдений за температурой приземного воздуха и атмосферными осадками подготовлено климатическое описание России, в котором, наряду с традиционными характеристиками (среднегодовая температура, среднегодовая суточная сумма осадков, годовой минимум и максимум температуры), представлены также рекомендованные ВМО индексы годовых климатических экстремумов. Последние включают такие показатели, как число морозных дней, число дней с повышенной влажностью, продолжительность вегетационного периода, максимальная продолжительность волн тепла, бездождных периодов и др.

Климатическое описание содержит оценки многолетних статистических характеристик (средние, стандартные отклонения, абсолютные экстремумы оценки линейных трендов) всех выбранных климатических переменных, выполненное на едином периоде наблюдений для всех базовых станций. Результаты картированы в виде полей изолиний. Пример таких карт для одной климатической переменной (годовой максимум температуры) приведен на рис. 1. В работе приведен анализ для полного комплекта статистик и переменных.

Отметим, что выявленные основные закономерности пространственных распределений статистик базовых климатических переменных (годовые температуры: средняя, минимальная, максимальная) не противоречат выводам монографий (Борисов, 1967; Борисов, 1975; Климат России, 2001 – см. главу 1 диссертации), относящихся к периоду инструментальных наблюдений до 90-х годов 20 века. Это означает правомерность (и целесообразность) получения климатографических обобщений по данным регулярного мониторинга климата (в частности, по данным о температуре и осадках) суточного разрешения на 223 станциях международного обмена. Отметим, что в перечисленных монографиях отсутствуют оценки трендов и поля статистик индексов экстремальности, а также, что в условиях меняющегося климата все оценки должны обновляться по новейшим наблюдениям через каждые 5-10 лет.

Учитывая, что карты, приведенные в настоящей работе (включая карты оценок индексов экстремальности и локальных трендов), характеризуют локальные климаты на территории России за единый период с 1936 по 2000 гг., их можно рекомендовать для использования в качестве справочных материалов.

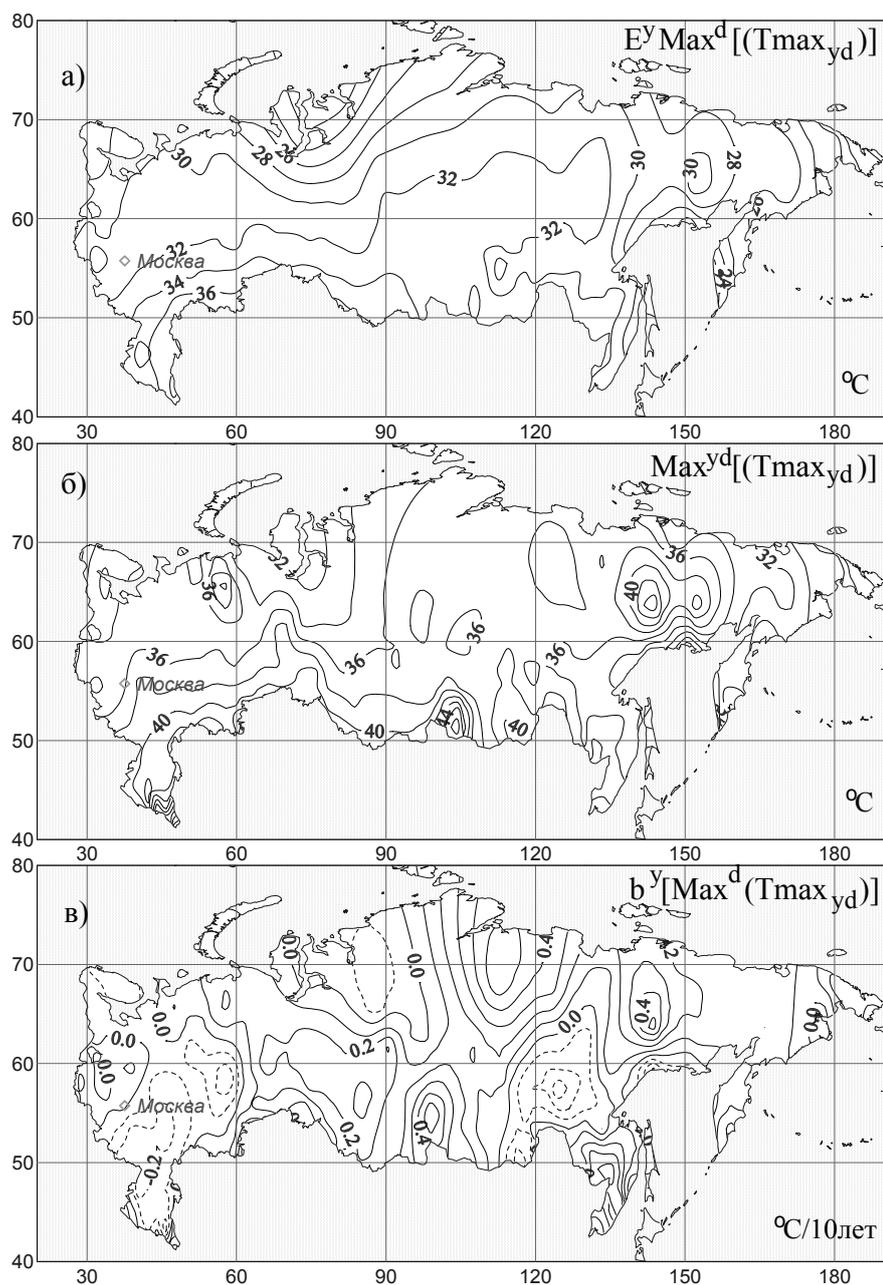


Рис. 1. Годовой максимум температуры. Пространственные распределения точечных статистических характеристик:

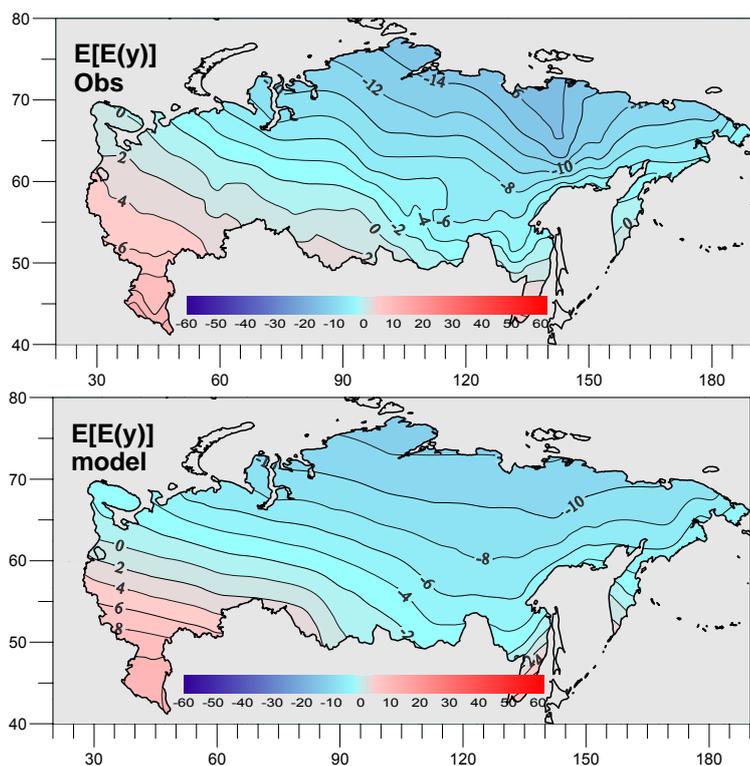
- а) среднее многолетнее значение ($^{\circ}\text{C}$),
- б) максимальное значение (максимум-максимум, ($^{\circ}\text{C}$)),
- в) коэффициенты линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет).

Оценки получены за период 1936-2000 гг. по данным стационарных наблюдений.

Для уточненной характеристики современного климата (в соответствии со сформулированной выше рекомендацией) автором получен аналогичный комплект статистик по данным за 1976-2005 гг. (последнее тридцатилетие). Набор соответствующих карт включен в приложение и может рассматриваться как атлас обновленных (с использованием новейших данных) статистических оценок.

2. Выполнена оценка воспроизводимости современными климатическими моделями изменчивости, экстремальности и изменений реального климата (на примере климатической модели INM CM3.0, ИВМ РАН). С этой целью аналогичные по составу климатические описания территории России за 1936-2000 гг. были построены параллельно по данным наблюдений и по результатам климатического моделирования и сравнены между собой.

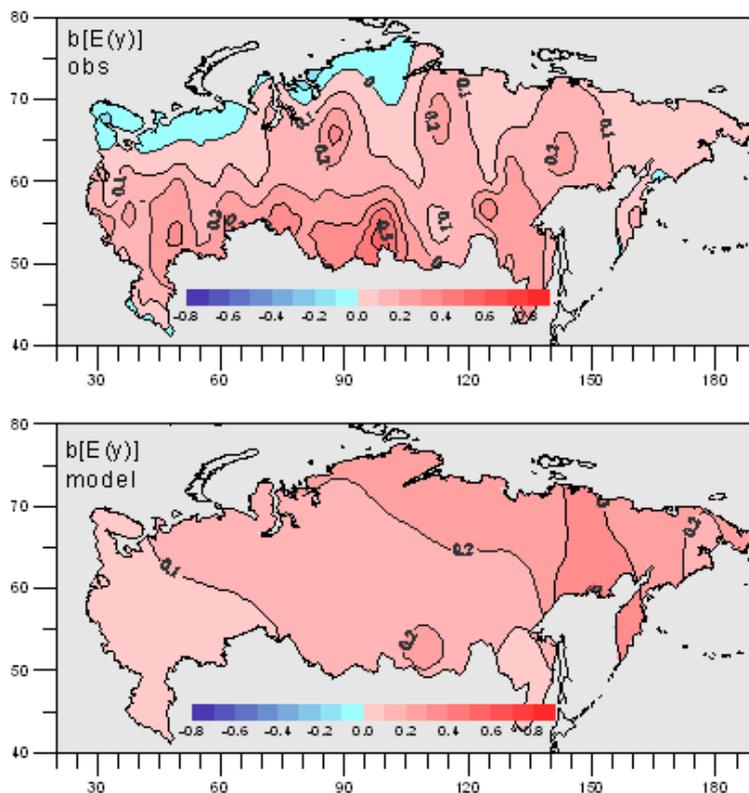
Примеры полученных пространственных распределений «наблюденных»



и «модельных» многолетних средних и коэффициентов линейного тренда приведены на рисунках 2-5 для характеристик температурного режима.

Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в среднем за период 1936-2000 гг. по данным наблюдений (вверху) и по данным модели ИВМ РАН, эксперимент 20С3М (внизу)

Рис. 3 – Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов среднегодовой температуры воздуха за 1936-2000 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) по наблюдаемым и модельным данным.



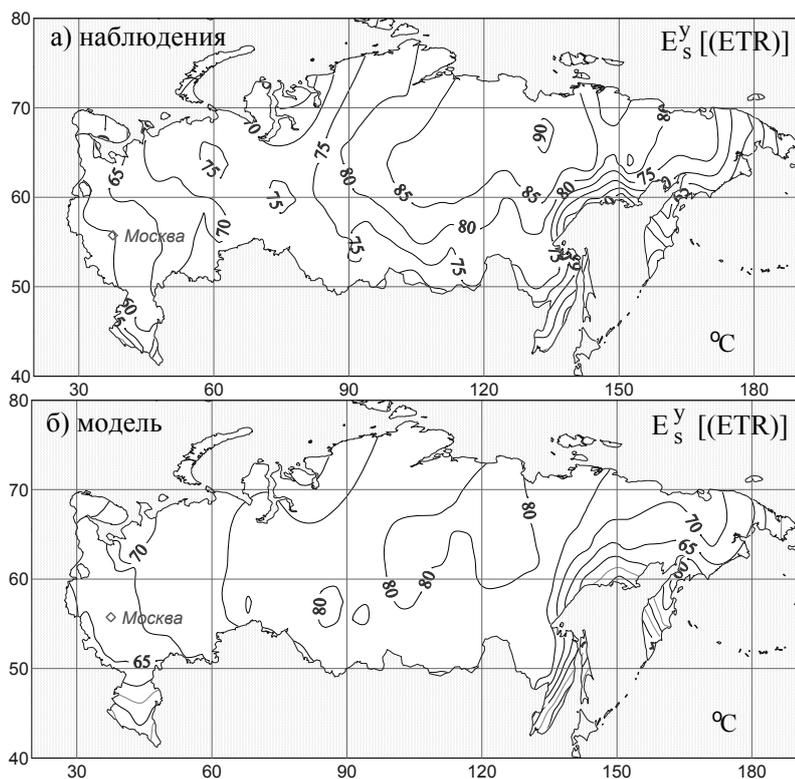


Рис. 4. Годовой размах экстремальных температур (ETR) в среднем за 1936-2000 гг. по данным наблюдений и результатам моделирования

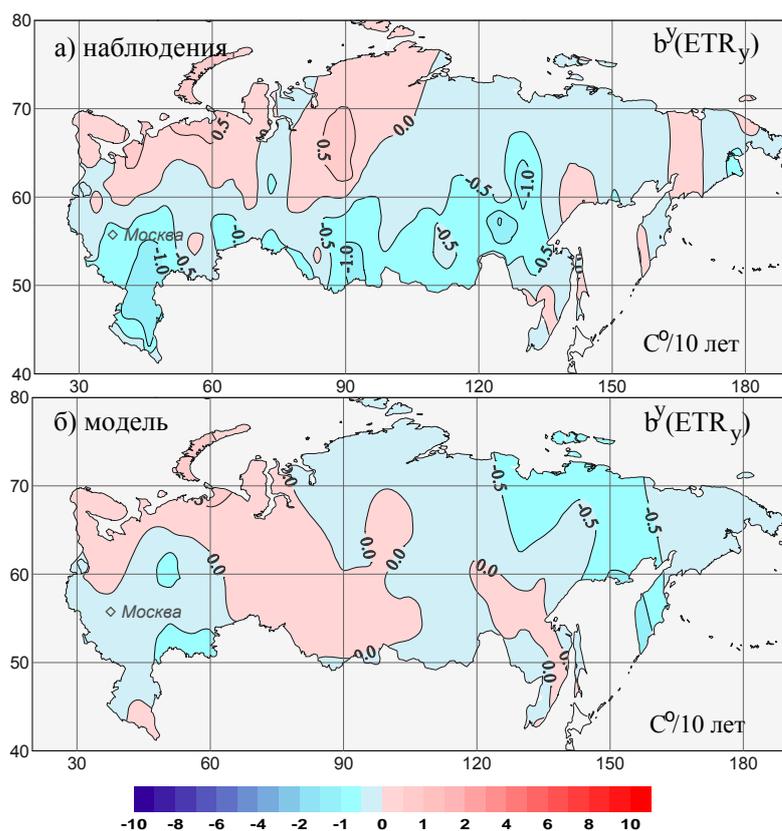


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов годового размаха экстремальных температур (ETR) за 1936-2000 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) по наблюдаемым и модельным данным.

В таблицах 1-2 приведены результаты пространственного обобщения точечных (на 223 станциях) оценок этих статистик по территории России для всех рассмотренных индексов.

Пространственные статистики средних многолетних значений индексов экстремальности температуры по данным наблюдений и результатам моделирования и оценки их соответствия, 1936-2000 гг.

<i>Индексы экстремумов температуры приземного воздуха</i>	<i>Данные</i>	<i>Пространственные статистики</i>			<i>Ошибки воспроизведения</i>			<i>Корреляция полей</i>
		<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	<i>Средняя</i>	<i>Абсолютная</i>	<i>Квадратическая</i>	
<i>Средняя многолетняя среднегодовая температура приземного воздуха</i>	Модель	2.15	-11.7	14.58	-0.41	2.08	2.85	0.92
	Наблюдения	2.55	-16.2	17.1				
<i>Среднее многолетнее значение из годовых минимумов температуры приземного воздуха</i>	Модель	-36.2	-54.5	-2.4	-3.28	5.76	7.08	0.88
	Наблюдения	-32.9	-60.5	-5.5				
<i>Среднее многолетнее значение из годовых максимумов температуры приземного воздуха</i>	Модель	29.4	9.7	39.8	-3.62	3.97	4.63	0.86
	Наблюдения	33.0	12.5	44.4				
<i>Суммарное число дней с морозом FD</i>	Модель	181.4	17.2	289.2	-7.3	27.3	38.2	0.85
	Наблюдения	188.6	17.1	310.1				
<i>Размах экстремальных температур внутри года ETR</i>	Модель	67.2	38.1	81.8	-0.1	5.1	6.3	0.84
	Наблюдения	67.3	38.8	90.3				
<i>Продолжительность вегетационного сезона GSL</i>	Модель	176.5	20.4	348.1	12.4	26.2	42.9	0.86
	Наблюдения	165.0	0.74	318.4				
<i>Индекс продолжительности волн тепла HWDI</i>	Модель	110.4	52.1	146.9	5.3	16.5	19.9	0.66
	Наблюдения	105.1	47.9	160.4				
<i>Доля теплого времени года Tn90</i>	Модель	10.0	8.6	11.1	0.02	0.6	0.73	0.21
	Наблюдения	10.0	7.2	12.6				

В частности, приведены средние по пространству и экстремальные из точечных значений в модели и наблюдениях, (столбец «пространственные статистики»). Значение «среднего» характеризует средний уровень значений индекса на территории России (соответственно, в модели и наблюдениях), а

экстремумы характеризуют диапазон колебаний этих значений от станции к станции (диапазон пространственной изменчивости). В столбце «ошибки воспроизведения» приведены осредненные по полю точечные разности «модель минус наблюдение» (средняя ошибка), осредненные модули разностей (абсолютная ошибка) и их квадраты с последующим извлечением корня (средняя квадратическая ошибка). Наконец, в столбце «корреляция» приведен коэффициент пространственной корреляции, который оценивает геометрическое сходство сравниваемых полей.

Таблица 2

Пространственные статистики коэффициентов линейного тренда характеристик экстремальности температуры по данным наблюдений и результатам моделирования и оценка их соответствия, 1936-2000 гг.

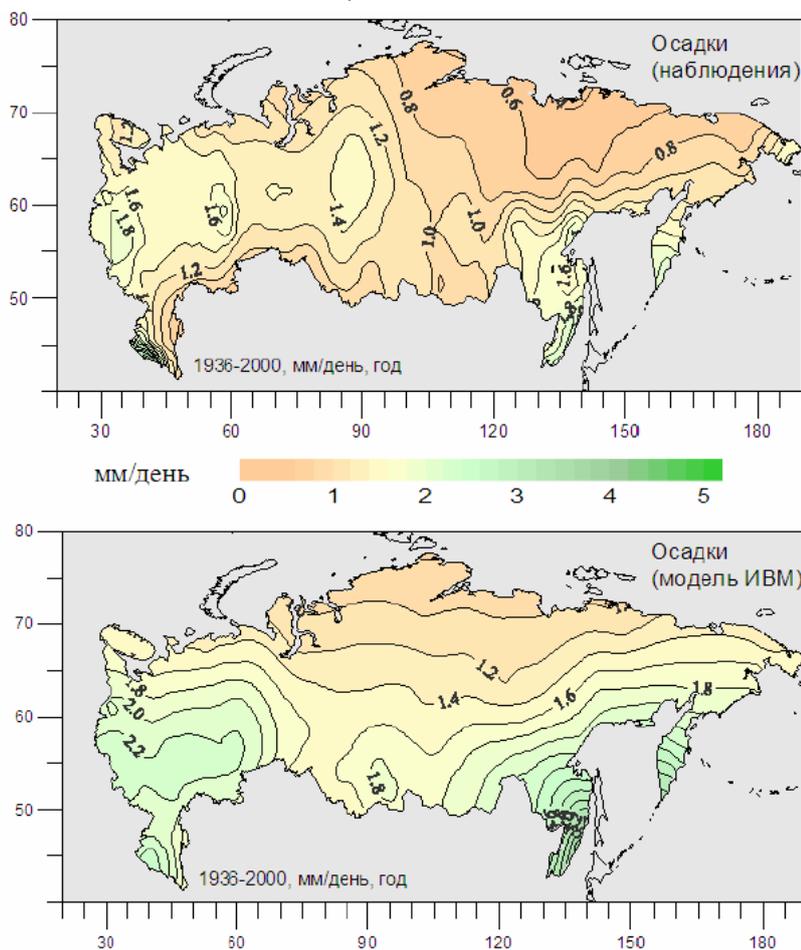
<i>Индексы экстремумов температуры приземного воздуха</i>	<i>По данным моделирования</i>			<i>По данным наблюдений</i>			<i>Корреляция полей</i>
	<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	
<i>Средняя многолетняя среднегодовая температура приземного воздуха</i>	0.11	0.01	0.4	0.15	-0.3	0.6	-0.09
<i>Среднее многолетнее значение из годовых минимумов температуры приземного воздуха</i>	0.23	-0.5	1.6	0.46	-1.7	1.8	0.04
<i>Среднее многолетнее значение из годовых максимумов температуры приземного воздуха</i>	0.09	-0.3	0.4	0.05	-0.7	1.6	0.00
<i>Суммарное число дней с морозом FD</i>	-0.67	-3.9	0.8	-2.12	-12.7	9.5	-0.18
<i>Размах экстремальных температур внутри года ETR</i>	-0.15	-1.5	0.6	-0.32	-2.1	4.4	0.08
<i>Продолжительность вегетационного сезона GSL</i>	0.32	-19.4	20.6	-0.69	-17.8	11.0	0.25
<i>Индекс продолжительности волн тепла HWDI</i>	0.71	-2.6	3.5	-0.13	-8.5	7.6	0.02
<i>Доля теплого времени года Th9</i>	0.32	-0.1	0.9	0.33	-1.6	2.0	0.09

Модель очень хорошо воспроизводит геометрическую форму полей многолетних средних значений («норм») самих температур (рис. 2, корреляция 0.92). Определенное сходство пространственного распределения фактических и

модельных оценок на территории России обнаруживается также для годового максимума и годового минимума (корреляция 0.88, 0.86 соответственно). Однако, точечные ошибки весьма существенные (для средней температуры в среднем 2°C , а для экстремальных – $4\text{-}6^{\circ}\text{C}$) и притом разного знака. В результате в пространственном распределении «норм» температурных индексов (рис. 5) обнаруживаются районы как с завышенными, так и с заниженными модельными оценками, хотя на большей части территории России модель ИВМ РАН занижает значения температуры воздуха.

Геометрическое сходство распределений модельных и наблюдаемых норм для всех температурных индексов, кроме $Tn90$, подтверждается данными таблицы 1: пространственная корреляция практически для всех средних полей положительна (табл.1). Что касается индекса $Tn90$, то распределение его «норм» практически не воспроизводится моделью - пространственная корреляция равна 0.21.

В значениях модельных и наблюдаемых оценок трендов практически для всех индексов экстремальности температуры отмечаются существенные различия (табл. 2, рис. 3, рис. 5). Действительно, пространственная корреляция полей трендов практически отсутствует для всех индексов (и даже отрицательная), а сами оценки трендов весьма различны (в модельных и наблюдаемых данных).



На рис. 6-9 и в таблицах 3-4 аналогичные результаты приведены для индексов осадков.

В распределении многолетних «норм» осадков можно найти некоторое сходство в конфигурации полей (в частности, на западе и юго-востоке), но уровень осадков в модели всюду завышен (рис. 6)

Рис. 6. Среднегодовые суточные суммы осадков (мм/сутки) в среднем за период 1936-2000 гг. (поле

«норм») по данным наблюдений (вверху) и по данным модели ИВМ РАН, эксперимент 20С3М (внизу)

Рис. 7. Пространственное распределение средних много-летних значений максимального числа последовательных дней с осадками менее 1 мм (CDD). Индекс рассчитан по суточным данным наблюдений и результатам моделирования за период 1936-2000 гг.

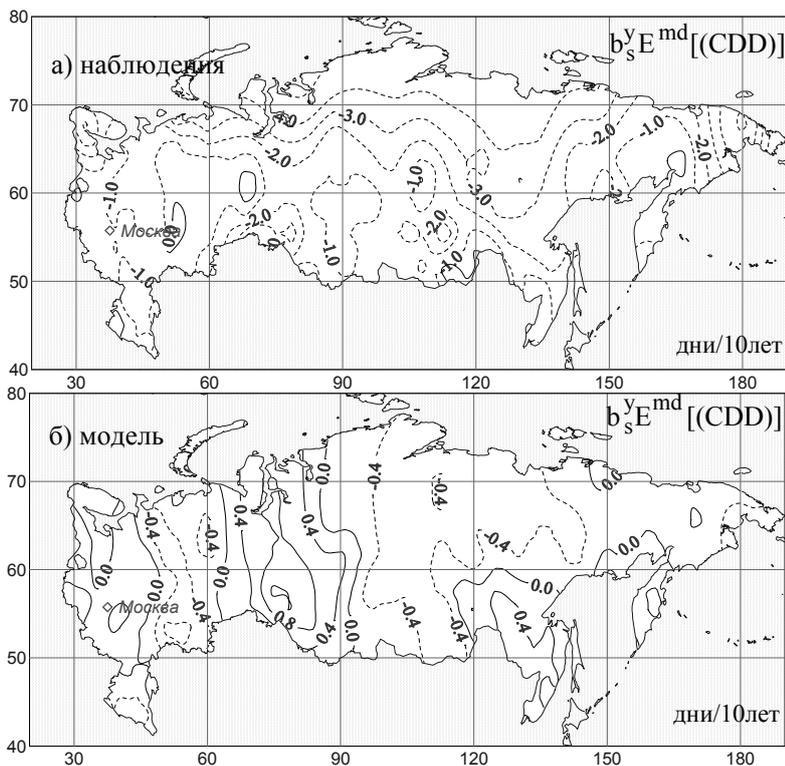
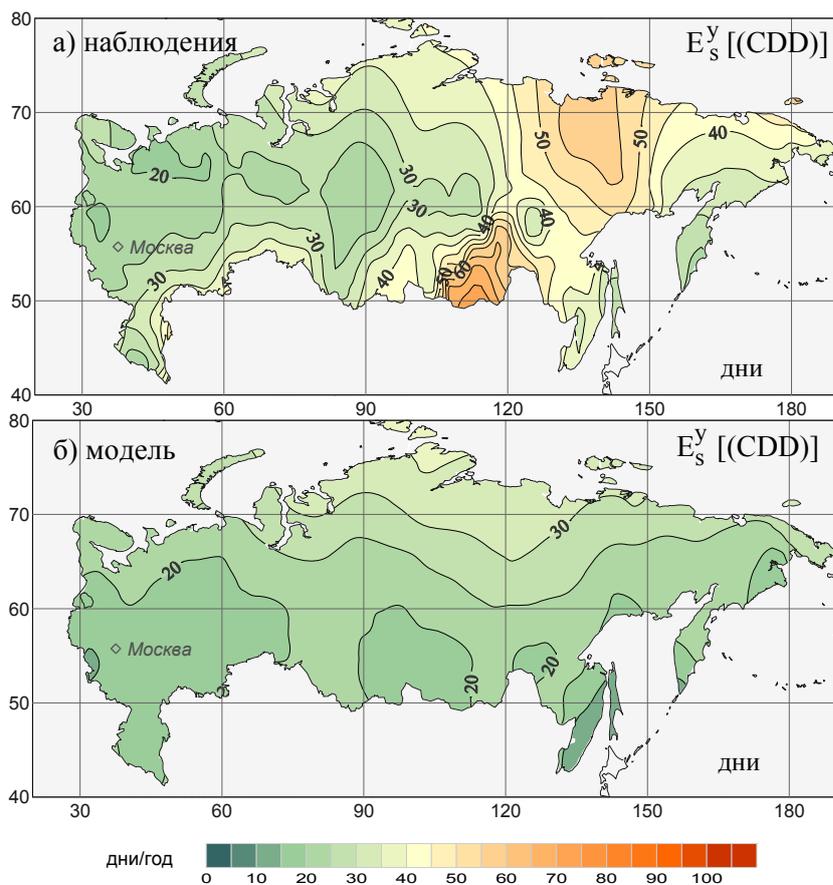


Рис. 8. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов максимального числа последовательных дней с осадками менее 1 мм (CDD) за 1936-2000 гг. (дни/10 лет) по наблюдаемым и модельным данным.

Пространственные статистики средних многолетних значений индексов экстремальности осадков по данным наблюдений и результатам моделирования: и оценки их соответствия, 1936-2000 гг.

Индексы экстремумов осадков	Данные	Пространственные статистики			Ошибки воспроизведения			Корреляция полей
		Среднее	Минимум	Максимум	Средняя	Абсолютная	Квадратическая	
Число дней с интенсивными осадками R10	Модель	9.6	0.6	44.7	-0.8	3.9	6.0	0.64
	Наблюдения	10.3	1.2	51.2				
Макс длина "сухого" периода CDD	Модель	23.2	11.8	82.1	-20.7	20.8	27.6	0.88
	Наблюдения	43.9	15.1	176.6				
Макс сумма пятидневных осадков R5D	Модель	45.2	21.7	80.4	-11.9	14.7	22.3	0.61
	Наблюдения	57.2	19.3	159.9				
Средняя интенсивность осадков SDII	Модель	4.2	3.0	7.0	-1.8	1.8	2.9	0.30
	Наблюдения	6.0	3.7	23.5				
Доля интенсивных осадков R95t	Модель	28.8	19.8	41.7	-25.0	24.95	26.96	0.41
	Наблюдения	53.7	36.3	86.6				

В целом, сходство модельных и наблюдаемых полей многолетних средних для индексов осадков существенно хуже, чем для температуры, но отдельные соответствия географического распределения отметить можно (корреляция полей, судя по табл. 3, положительная).

Тем не менее, судя по данным табл. 3, следует заключить, что модель ИВМ РАН занижает оценки практически всех рассмотренных индексов осадков. В частности, для показателей CDD и SDII заниженные модельные значения отмечаются на большей части территории России. Наибольшее сходство пространственных распределений многолетних средних обнаруживается для индекса CDD, который может использоваться как индикатор засушливых условий.

Для всех индексов осадков по данным наблюдений обнаруживаются области с различной направленностью трендов. В модельных данных тренды выражены существенно слабее (табл. 4) и закономерности их географических распределений моделями не воспроизводятся (корреляция отрицательная).

Поскольку осредненные по территории значения коэффициентов тренда тождественны коэффициенту линейного тренда пространственно осредненного индекса, данные табл.2 и табл.4 означают, что, в целом для территории России, наблюдаемые в 1936-2000 гг. тренды рассматриваемых индексов климатических экстремумов моделью ИВМ РАН практически не воспроизводятся, хотя в наблюдениях таковые тренды определенно обнаруживаются.

Таблица 4

Пространственные статистики коэффициентов линейного тренда индексов экстремальности осадков по данным наблюдений и результатам моделирования и оценка их соответствия, 1936-2000 гг.

<i>Индексы экстремумов осадков</i>	<i>По данным моделирования</i>			<i>По данным наблюдений</i>			<i>Корреляция полей</i>
	<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	
<i>R10 - Число дней с интенсивными осадками (дней/10 лет)</i>	0.06	-0.5	1.1	0.36	-1.0	1.9	-0.008
<i>CDD - Мах длина "сухого" периода (дней/10 лет)</i>	-0.01	-1.7	2.5	-1.65	-9.4	7.5	-0.021
<i>R5D - Мах сумма пятидневных осадков (мм/10 лет)</i>	0.12	-2.3	2.7	3.87	-5.6	72.4	-0.212
<i>SDII - Средняя интенсивность садков (мм/день/10 лет)</i>	0.00	-0.1	0.1	0.36	-0.2	19.6	-0.122
<i>R95t - Доля интенсивных осадков (%/10 лет)</i>	0.02	-1.6	1.3	0.41	-4.9	3.0	0.027

3. В работе определены закономерности изменения даты наступления фаз вегетации (возобновление вегетации, колошение, восковая спелость) и продолжительности межфазных периодов озимых зерновых по данным реальных наблюдений во времени и пространстве за озимой пшеницей. Данные агрометеорологических наблюдений, обобщены по 65 областям основных зернопроизводящих районов России.

Временные ряды характеристик вегетационных сезонов и урожайности озимых культур за 1967-1997 гг. сформированы в ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН на основе табличных данных отдела агрометеорологии Росгидрометцентра и включены в базу климатических данных ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН. Метеорологические данные на станциях собраны и

накапливаются в квазиреальном времени в ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН. Необходимая обработка данных (включая осреднение в пространстве и во времени и расчет статистических характеристик рядов и их долгопериодных тенденций) выполнена автором.

Кроме того, для каждой области выбрана так называемая "опорная" станция (максимально близкая к административному центру из числа 455 станций, представленных в базе данных).

Для наглядности представленные ниже оценки трендов приведены в форме пространственных распределений угловых коэффициентов, где значения коэффициентов отнесены к точкам расположения соответствующих станций (или опорных станций – для областных данных). При достаточной густоте сети станций такие распределения можно анализировать с помощью системы изолиний. В данном случае для интерполяции "точечных" коэффициентов тренда в пространстве нет достаточно оснований и правильнее относить эти оценки непосредственно к точке. При анализе (и интерполяции) областных оценок следует учитывать пространственный масштаб соответствующих областей. В любом случае наличие связных ареалов с трендами одного знака повышает доверие к реалистичности полученных результатов, а пестрота получаемых распределений скорее свидетельствует об отсутствии существенных трендов, чем о неоднородности выявленных изменений климата.

На рис. 9 представлено географическое распределение коэффициентов линейного тренда средней температуры приземного воздуха для весеннего сезона (март-май), оцененных на периоде 1967-1997 гг., непосредственно в точках размещения станций. Исследуемый регион на этом рисунке выделен

прямоугольником.

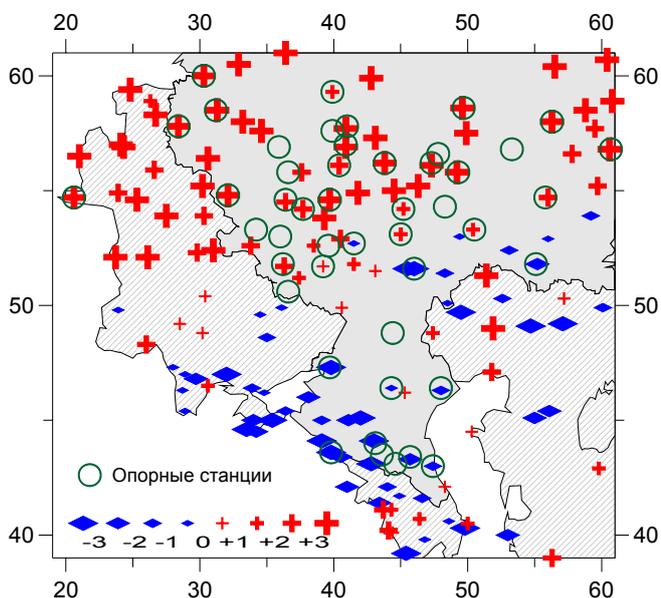


Рис. 9 Коэффициенты линейного тренда средней за весенний сезон (март-май) температуры приземного воздуха на Европейской территории России. Тренды оценены за период 1967-1997 гг. и выражены в °С/100 лет. Знак "плюс" соответствует положительному тренду, горизонтально вытянутый ромб – отрицательному. Размер символа соответствует интенсивности тренда.

Из рисунка видно, что тенденция к потеплению охватывает Европейскую часть России севернее примерно 52° с.ш. Область отрицательных трендов отмечается в районе Северного Кавказа и вблизи Черного моря.

На рис. 10(а) представлены распределения коэффициентов линейного тренда средних областных дат возобновления вегетации весной для озимой пшеницы. На большей части Европейской территории этой фазе свойственно смещение дат ее наступления в сторону более ранних сроков (до 3 дн./10 лет). Лишь в некоторых областях центральной части ЕТР отмечаются положительные тренды (т.е. эта фаза сдвигается в сторону запаздывания до 4 дн./10 лет).

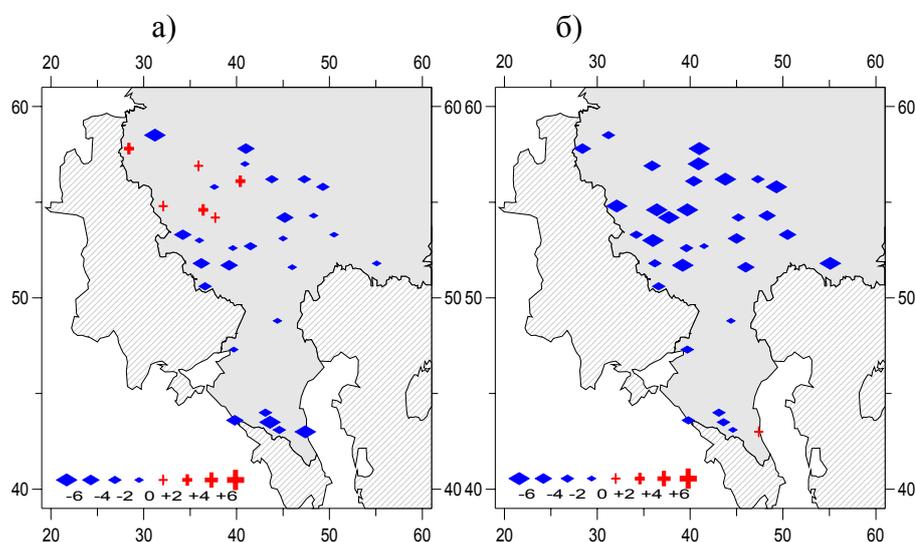


Рис. 10. Коэффициенты линейного тренда даты возобновления вегетации (а) и даты наступления восковой спелости (б) (дни/10 лет), оцененные за период 1967-1997 гг. Знак "плюс" соответствует положительному тренду (сдвиг на более поздние сроки), горизонтально вытянутый ромб – отрицательному (сдвиг на более ранние сроки). Размер символа соответствует величине тренда, как показано в легенде.

Тенденция к смещению на более ранние сроки даты наступления восковой спелости (рис. 10, б) характерна для всей исследуемой территории за исключением единственной области на юге России.

Рядом дат наступления фазы колошения свойственны отрицательные тренды, т.е. более раннее наступление данной фазы (за исключением отдельных

областей на севере и юге исследуемой территории). На большей части территории это опережение составило до 2 дней/10 лет и лишь в некоторых областях на севере региона оно достигло 4-5 дней/10 лет (рисунок не приводится).

Пространственное распределение тенденций изменения продолжительности межфазных периодов приведено на рис. 11. Можно отметить здесь сокращение длины периода от даты возобновления вегетации до даты восковой спелости (рис. 11, а), причем средняя скорость этого сокращения на указанном 30-летии уменьшается в направлении с севера на юг от более 6 до 2 дней за 10 лет. В южных областях, напротив, отмечается тенденция к увеличению длины периода. Вывод о смещении начала фазы колошения (на те же от 6 до 2 дней за 10 лет) хорошо согласуется уменьшение продолжительности периода "возобновление вегетации - восковая спелость".

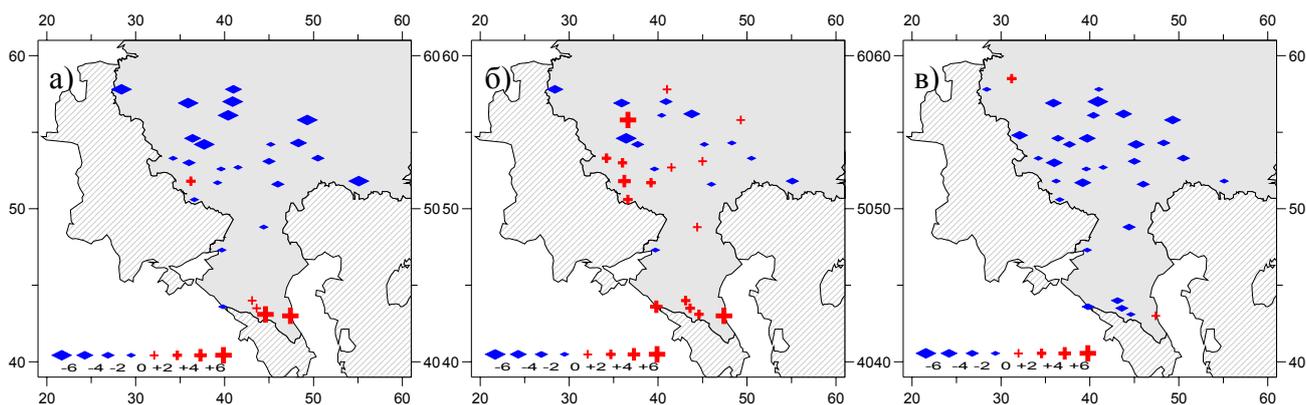


Рис. 11. Коэффициенты линейного тренда продолжительности периода возобновление вегетации - восковая спелость (а), возобновление вегетации – колошение (б) и колошение - восковая спелость (в) (дни/10 лет), оцененные за период 1967-1997 гг. Обозначения см. рис. 10.

Рассмотрим теперь отдельно продолжительность двух подпериодов "возобновление вегетации - колошение" (рис. 11, б) и "колошение – восковая спелость" (рис. 11, в). Распределение коэффициентов линейного тренда для первого из них отличается большой неоднородностью. Лишь на юго-западе ЕТР и на Северном Кавказе имеются несколько областей с одинаковой тенденцией к росту продолжительности этого периода со скоростью 2-4 дня за 10-летие.

Период от даты колошения до даты восковой спелости, напротив, характеризуется практически повсеместным уменьшением его продолжительности на 4-6 дней/10 лет.

4. Изменения климата угрожают биоразнообразию дикой природы. Чтобы сохранить как можно большую часть биологического разнообразия планеты, эксперты Всемирного фонда дикой природы (WWF) выделили 200 экорегионов мира, известные как «Глобал 200». Выделенные территории охватывают все главные типы экосистем.

Под экорегионом здесь понимаются большие области относительно однородного климата, которые предоставляют кров характерным видам и природным сообществам.

В настоящее время информация о последствиях климатических изменений и их воздействии на охраняемые виды, экосистемы и приоритетные экорегионы WWF недостаточно систематизирована и часто противоречива. Поэтому WWF в последние годы инициировал работу по созданию "Климатических паспортов экорегионов", в которых обобщаются доступные данные о наблюдаемых региональных изменениях климата и анализируются возможности для минимизации их негативного воздействия. Для территории России такие паспорта изданы для наиболее уязвимых экорегионов: Чукотка, Таймыр, Алтай-Саянский, Кольский. К сожалению, данные в них ограничены концом 20 века (иногда и много ранее) и притом месячного разрешения.

Ниже приводятся оценки (средние за год, январь, июль), полученные по суточным данным о температуре приземного воздуха и атмосферных осадках, на выбранных опорных станциях для каждого из этих четырех экорегионов.

В Алтай-Саянском экорегионе по данным опорной станции Минусинск (рис. 12) наиболее значительный рост температуры наблюдается зимой и составляет $0,87\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет в январе. Летом имеют место слабые положительные тренды. Интенсивность осадков слабо увеличивается в среднем на $0.13\text{ мм}/\text{день}$ за 10 лет.

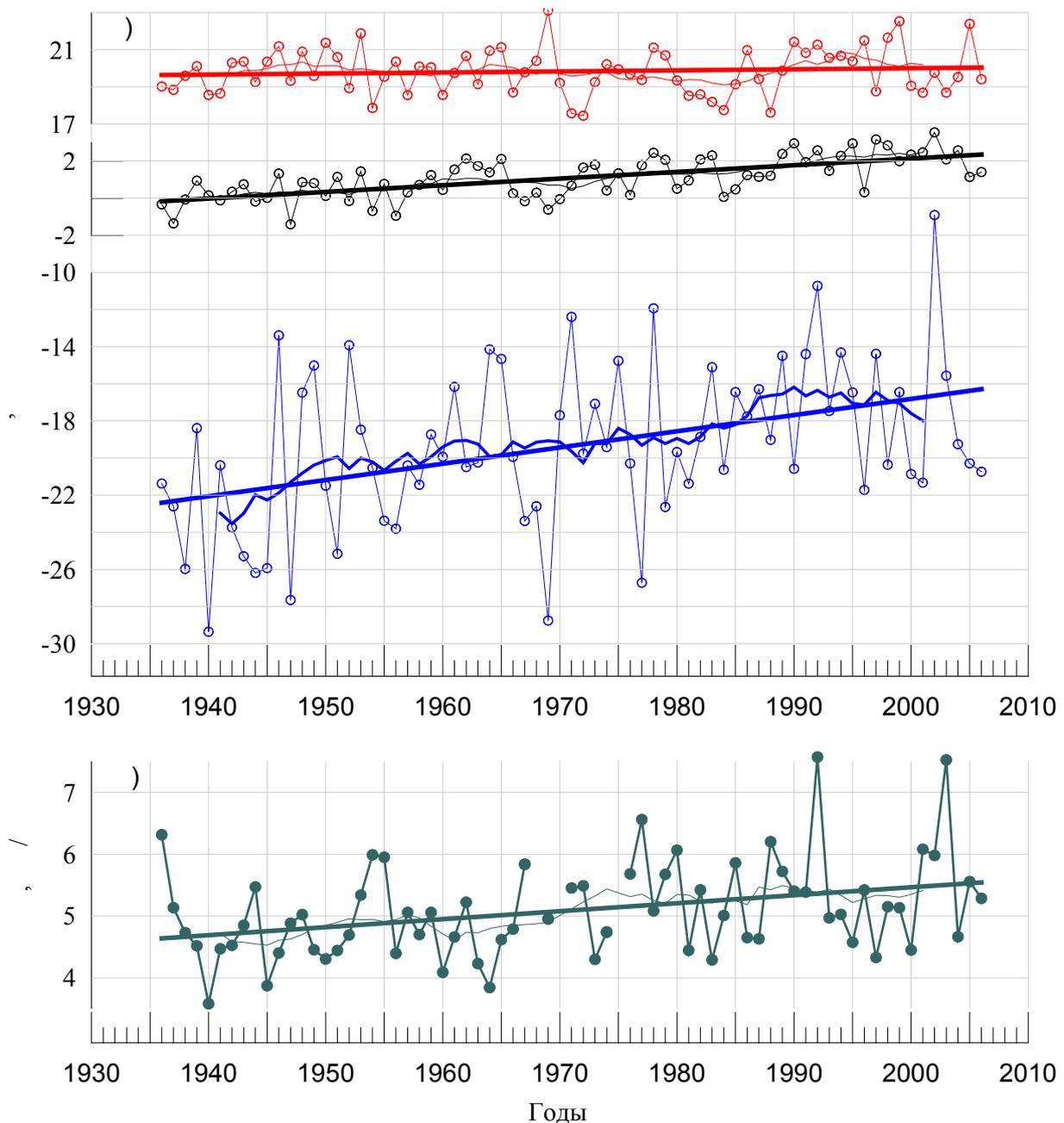


Рис. 12. Средние годовые и среднемесячные температуры приземного воздуха (а) и суточная интенсивность атмосферных осадков (б) на станции Минусинск (Алтай-Саянский экорегион).

Показаны 11-летняя скользящая средняя и линейный тренд за период 1936-2006 гг.

Для Чукотского экорегиона (рис. 13) характерно понижение средней месячной температуры воздуха в январе. Средняя месячная июльская и средняя годовая температуры воздуха, а также интенсивность осадков, наоборот, имеют тенденцию к росту за период с 1936 по 2006 гг.

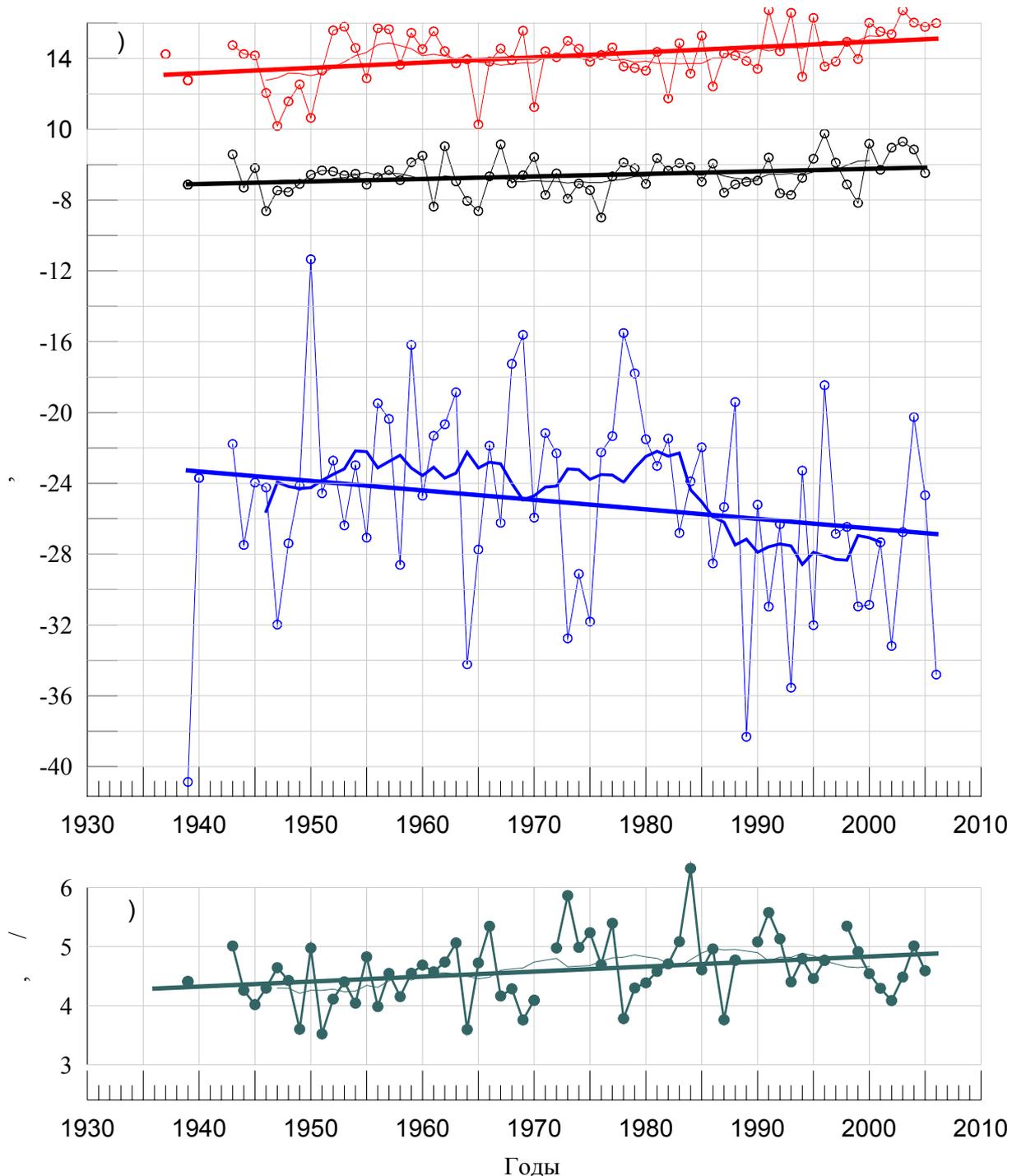


Рис. 13. Средние годовые и среднемесячные температуры приземного воздуха (а) и суточная интенсивность атмосферных осадков (б) на станции Марково (Чукотский экорегион).

Показаны 11-летняя скользящая средняя и линейный тренд за период 1936-2006 гг.

В Кольском экорегионе (рис. 14) за период 1936-2006 гг. не выявлено направленных изменений в средней годовой и июльской температуре приземного воздуха. Средняя месячная температура января уменьшалась в среднем со скоростью $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие. Интенсивность осадков на протяжении рассматриваемого периода практически не менялась.

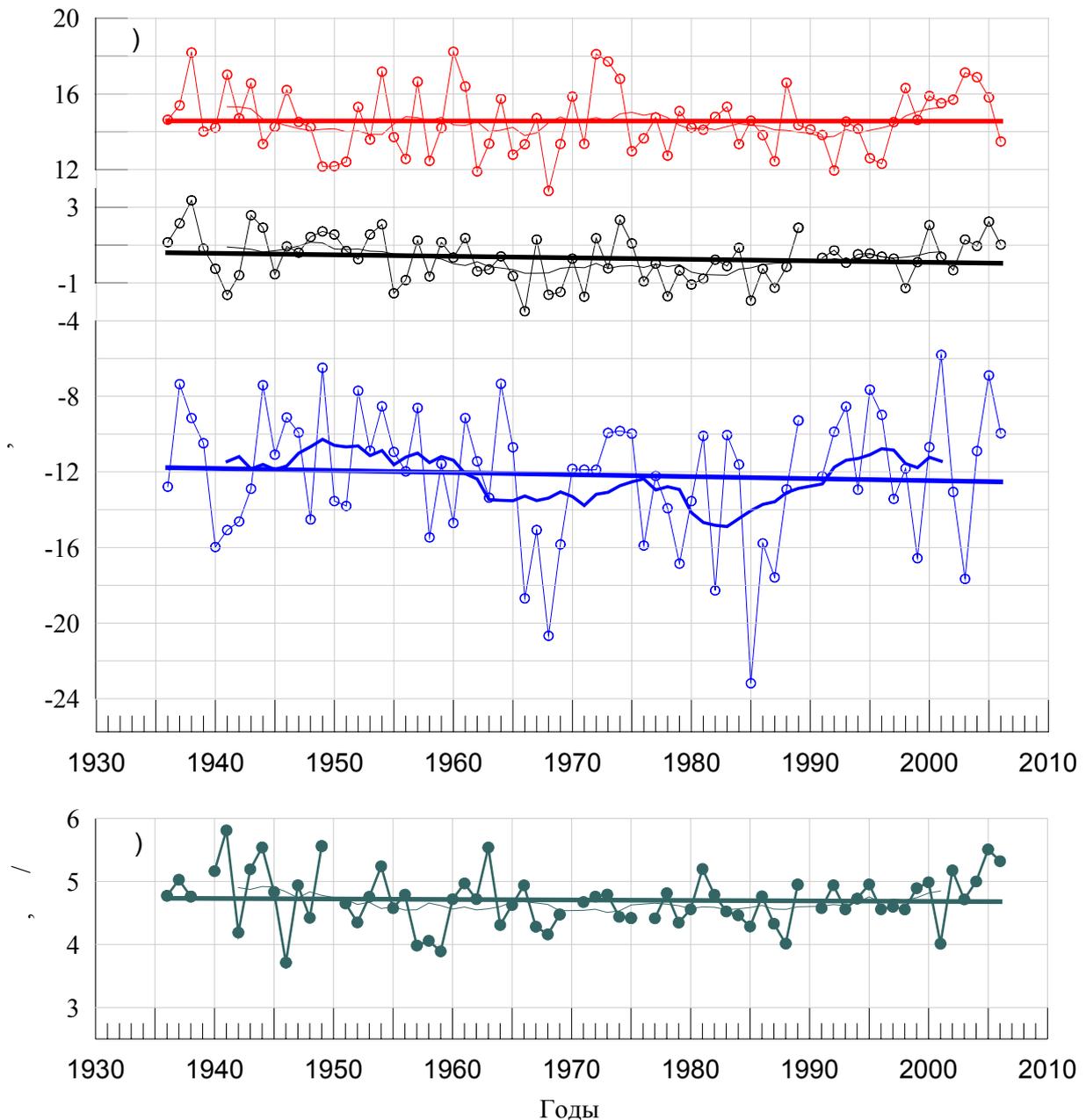


Рис. 14. Средние годовые и среднемесячные температуры приземного воздуха (а) и суточная интенсивность атмосферных осадков (б) на станции Кандалакша (Кольский экорегион).

Показаны 11-летняя скользящая средняя и линейный тренд за период 1936-2006 гг.

В Таймырском экорегионе (рис. 15) для всех рассматриваемых температур характерен отрицательный тренд, наиболее ярко выраженный в январе ($-0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Интенсивность осадков здесь имеет тенденцию к уменьшению на 0.05 мм/день за 10 лет.

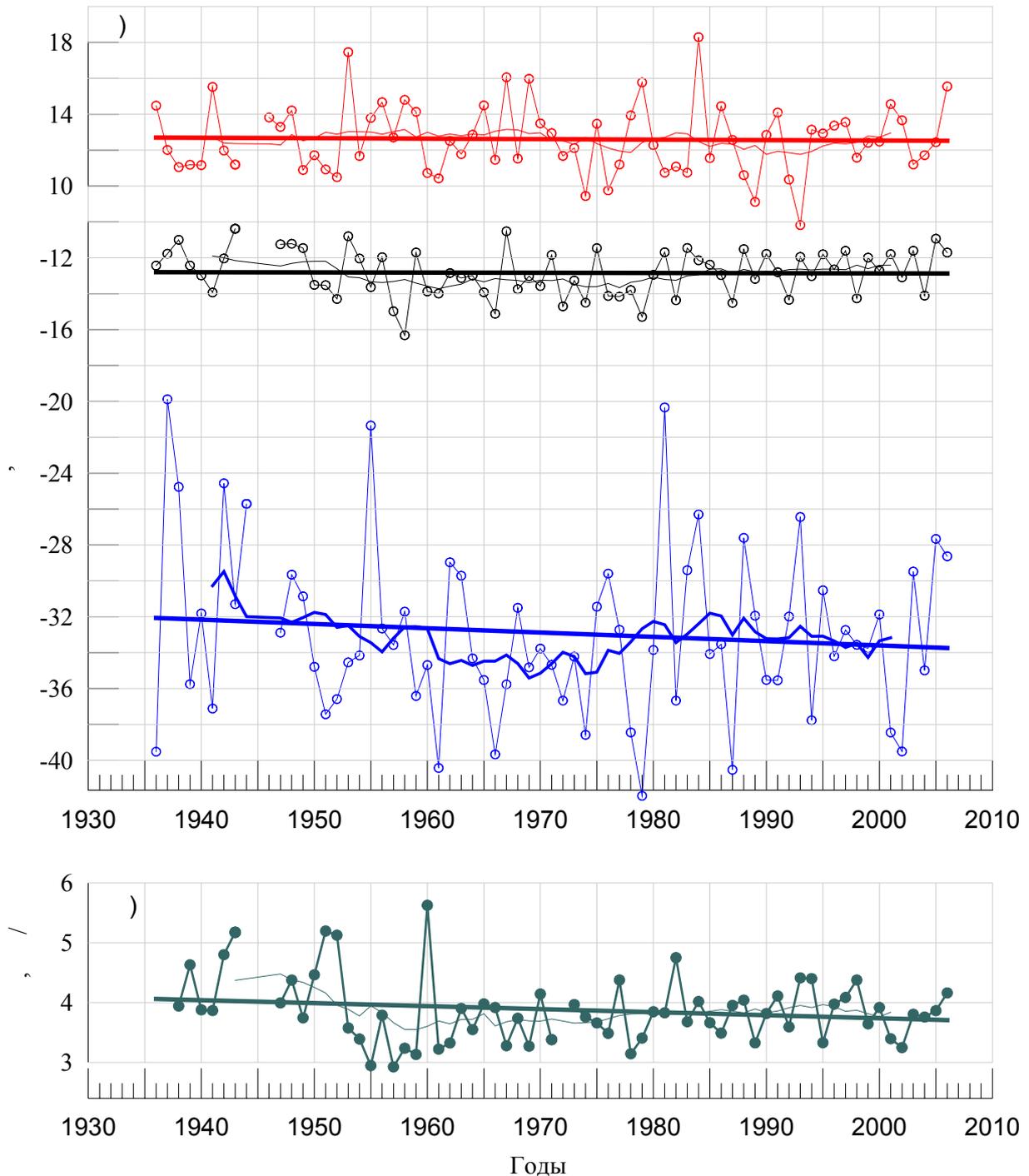


Рис. 15. Средние годовые и среднемесячные температуры приземного воздуха (а) и суточная интенсивность атмосферных осадков (б) на станции Хатанга (Таймырский экорегион).

Показаны 11-летняя скользящая средняя и линейный тренд за период 1936-2006 гг.

5. В результате совместного анализа временных рядов урожайности зерновых культур на территории России и фенологических характеристик метеорологических условий получена общая форма зависимости урожая от температуры и осадков. Показано, что во временном ряду урожая нерегулярные межгодичные колебания накладываются на некоторый монотонный рост (положительный тренд). Последний обычно объясняют развитием агротехники и, возможно, влиянием медленных колебаний и изменений климата, тогда как формирование урожая определяется гидрометеорологическими условиями каждого конкретного года. Поэтому для выявления связи урожая с гидрометеорологическими факторами из временного ряда урожая был сначала исключен линейный тренд (порядка 0.2 ц/год), а затем построена зависимость остатков (отклонений от тренда) от гидрометеорологических факторов: суммы температур воздуха и суммы осадков за календарные (межфазные) периоды.

Показано, что связь урожая с исследуемыми метеорологическими характеристиками межфазных периодов не линейная и при определенных допущениях аппроксимируется системой поверхностей эллипсов (рис. 16). Поверхность напоминает функцию двумерного нормального распределения. При таком подходе выявляется область оптимальных для формирования урожая метеорологических условий (в рамках с/х культур, обеспеченных данными об урожайности на территории РФ) – на рисунке эта область заштрихована.

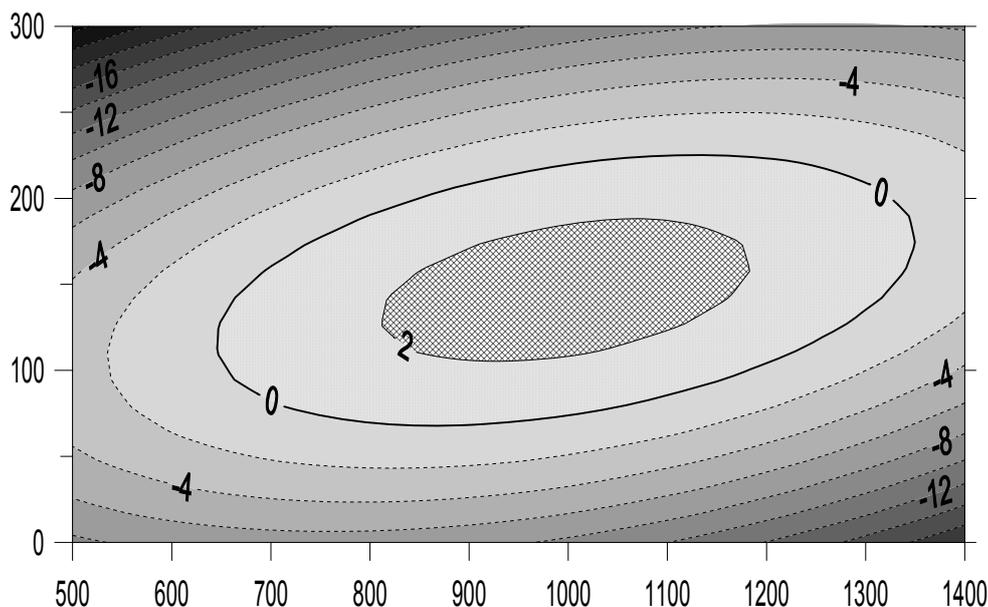


Рис. 16. Урожай озимой пшеницы в отклонениях от линейного тренда в зависимости от суммы температур воздуха (ось X) и суммы осадков (ось Y) за период колошение – восковая спелость.

ВЫВОДЫ

1. Описание климата в современных условиях (в условиях меняющегося климата) должно включать оценку трендов за разные периоды, максимально приближенные к текущему моменту.

Данные 223 станций, обновляемые в процессе регулярного мониторинга климата, позволяют получить адекватное климатическое описание реального климата и текущих тенденций изменений климата на территории России.

Климатология индексов экстремальности должна включаться в климатические справочники, наряду с традиционно рассматриваемыми характеристиками температуры и осадков.

2. Климатическое описание территории России за 1976-2005 гг., предложенное в Приложении, характеризует современные локальные климаты на территории России за единый период – истекшее 30-летие, отвечает всем трем перечисленным требованиям и может быть рекомендовано для использования в качестве справочных материалов. Обнаруженные тенденции в рядах индексов экстремальности температуры воздуха и атмосферных осадков позволяют лучше охарактеризовать проявление глобального потепления на территории России.

По данным о коэффициентах линейного тренда выделены регионы наибольшего изменения интенсивных осадков. На Европейской территории (особенно западной части) и Дальнем Востоке (особенно Приморском побережье) наблюдается тенденция к росту осадков от 1936 года к концу столетия. В Западной Сибири (между реками Обь и Енисей) индексы указывают на убывание интенсивных осадков в течение 1936-2000 гг.

3. Выполнена оценка воспроизводимости изменчивости, экстремальности и изменений реального климата современной климатической моделью Института Вычислительной Математики РАН. Модель достаточно адекватно воспроизводит геометрическую форму полей средних значений, как самих температур и осадков, так и индексов экстремальности на территории России. Однако тренды рассматриваемых индексов климатических экстремумов моделью ИВМ РАН практически не воспроизводятся, хотя в наблюдениях таковые тренды определенно обнаруживаются.

4. Оценки трендов для агроклиматических характеристик (сроки наступления основных фаз вегетации, продолжительность межфазных периодов) отличаются большей пространственной неоднородностью по сравнению с трендами температуры воздуха.

Обнаружены сдвиги дат сроков наступления основных фаз вегетации озимой пшеницы в сторону более ранних сроков на большей части территории. Наиболее интенсивно отмеченная тенденция проявляется для даты наступления восковой спелости.

Предложена общая форма зависимости урожая (зерновых культур) от температуры и осадков за период вегетации, по которой предлагается в будущем оценить влияние изменений климата на урожай.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Груза Г.В., Платова Т.В. Оценка зависимости урожайности озимых зерновых от колебаний климатических условий // В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. С.-Пб., Гидрометеиздат, 2000, т. XVII, с. 91 – 96.

2. Платова Т.В. О климатических изменениях в зернопроизводящих районах России. // В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. С.-Пб., Гидрометеиздат, 2002, т. XVIII, с. 221 – 233.

3. Платова Т.В. Климатические изменения продолжительности вегетационного периода в России в конце 20 века. // В кн.: Научные аспекты экологических проблем России: труды II Всероссийской конференции / Под редакцией Ю.А. Израэля. – М.: 2006, с. 82-86.

4. Платова Т.В. Климатические изменения некоторых характеристик температурного режима на территории России. // В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. С.-Пб., Гидрометеиздат, 2007, т. 21, с. 146 – 159.

5. Платова Т.В. Климатическая характеристика некоторых показателей экстремальности температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на территории России // Использование и охрана природных ресурсов в России. – Бюллетень "Использование и охрана природных ресурсов в России", 2007, № 1. Изд-во НИА-Природа, с. 38 – 47.

6. Платова Т.В. Годовые экстремумы температуры воздуха на территории Российской Федерации и их климатические изменения. – Метеорология и гидрология, 2008, № 11.