

Анализ гидрометеорологических полей по данным моделирования и долговременного мониторинга

УДК 551.577.1

М.Ю.Бардин, Т.В.Платова

Институт географии РАН, г.Москва

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, г.Москва

ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КВАНТИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ СНГ

Анализируются экстремумы внутри календарных сезонов. В качестве показателей экстремальности рассматриваются экстремальные, т.е. соответствующие близким к 0 или 1 вероятностям, процентилю сезонных выборок суточных средней, минимальной и максимальной температуры и суточных сумм атмосферных осадков, и анализируются временные изменения этих процентилю.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *экстремальные процентилю, температура, атмосферные осадки, европейская часть СНГ.*

В литературе чаще рассматриваются изменения частот значений, превышающих заданные фиксированные пороги [1 – 3, и др.]. Это во многом связано с активной деятельностью рабочей группы по экстремумам МГЭИК: значительная часть предложенных этой группой индексов экстремумов определяется именно таким образом; многие из этих индексов, несомненно, практически полезны (некоторые – после определенной адаптации к региональным климатическим условиям). Однако они не дают непосредственной характеристики изменения функции распределения климатической переменной на ее «хвостах». Поэтому был использован подход, использующий величины экстремальных квантилю, который должен давать достаточно ясное и последовательное описание изменений экстремумов в терминах функции распределения и численные величины изменения экстремальных значений, которые могут быть непосредственно сопоставлены с изменениями статистик (например, среднего и дисперсии).

Использовались данные архива суточных средней, минимальной и максимальной температуры и сумм осадков на 600 станциях РФ и стран СНГ, подготовленного и периодически пополняемого во ВНИИГМИ-МЦД (http://meteo.ru/climate/d_temp.php). Реально, с учетом требований к полноте данных для расчета статистик и трендов представленные результаты основаны на данных более 300 станций. Анализовались тренды за период, начинающийся 1976 годом; с этого времени не происходило существенных изменений в инструментах и регламенте наблюдений: таким образом, ряды не содержат неоднородностей, вызванных этими причинами. На отдельных станци-

© М.Ю.Бардин, Т.В.Платова, 2013

ях возможны неоднородности, вызванные переносом станции (документированы в каталоге архива) и/или изменениями окружающего ландшафта. Следует с осторожностью относиться к особенностям трендов на отдельных станциях, считая обоснованными лишь согласованные по территории результаты.

Аномалии (нормированные и нет) рассчитывались относительно полного периода, т.е., 1976 – 2009 гг. Годовой ход сглаживался фильтром, отсекающим колебания с периодом менее 30 дней. Аналогично рассчитываются стандартные отклонения (также сглаженные).

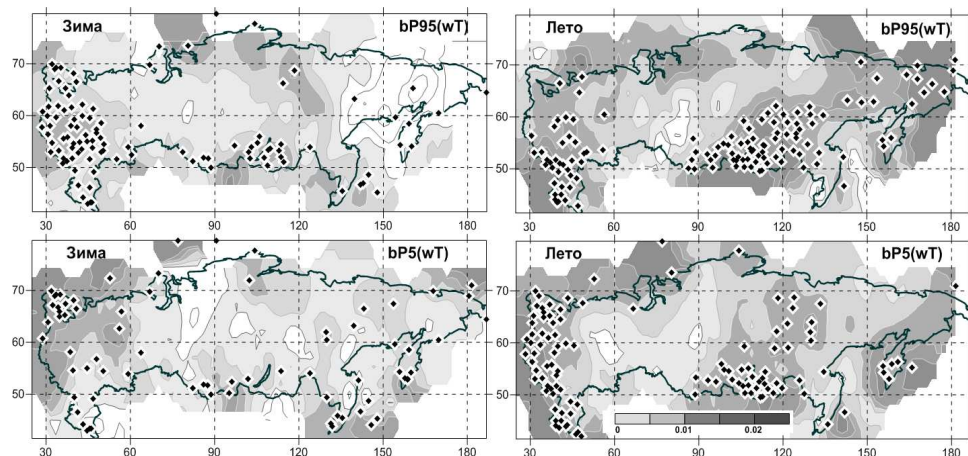
Для каждого сезона 1976 – 2009 гг. оценивались выборочные статистики по выборке длиной ≤ 90 дней (с учетом пропусков, различных для разных переменных) для каждой из 4 переменных: T_e , T_{min} , T_{max} – суточная средняя, минимальная и максимальная температура, R – суточная сумма осадков. Статистики температуры: E – среднесезонное значение, S – стандартное отклонение, S_k – коэффициент асимметрии, P_5 – 5-й процентиль, P_{95} – 95-й процентиль, Min , Max – сезонные минимум и максимум. Набор статистик для осадков несколько иной: E , S , S_k , P_o – доля дней без осадков (точнее, с нулевыми измеренными осадками), P_{95} – 95-й процентиль полной сезонной выборки, PR_{95} – 95-й процентиль выборки дней с осадками, Max . Статистики рассчитывались для сезонов с наличием не менее 95 % данных. Для краткости процентиля, близкие к левому «хвосту» распределения (в данном случае, P_5), будут называться «отрицательными экстремумами», а близкие к правому «хвосту» (P_{95}) – «положительными экстремумами».

Для зимы и лета на каждой станции и переменной рассчитывались оценки линейного тренда каждой статистики: коэффициент тренда, доля объясненной трендом дисперсии, а также оценка «значимости тренда»: минимальный уровень из стандартного набора {1 %, 2,5 %, 5 %}, при котором коэффициент значимо отличен от 0, или « ∞ », если тренд незначим на уровне 5 % (используется двусторонний критерий, основанный на статистике $T^2 = (n - 2)R^2 / (1 - R^2)$, имеющей при $b = 0$ распределение Стьюдента с $n - 2$ степенями свободы). Сам термин «значимость» используется формально: не учитываются отклонения от «основных предположений» (независимость и гауссовость остатков); тем не менее, «значимые» величины тренда указывают на достаточно большие значения отношения «сигнал-шум» для него. Это обычная практика; попытки улучшить оценки вероятностей с использованием различных техник статистического моделирования оказываются односторонними: либо учитывается негауссовость остатков (используется обычно «бутстрэп»), либо последовательная корреляция (моделируется авторегрессией). Принципиально вопрос о «правильных» вероятностях этим не решается и выводы остаются прежними. Для качественного анализа важнее наличие крупномасштабных областей с когерентными изменениями. Тренд оценивался за период 1976 – 2009 гг., т.е., с условного начала современного потепления. Оценки тренда рассчитывались, если в ряду сезонных статистик имелось не менее 80 % данных и имелись данные в начальных и конечных 3-летиях периода.

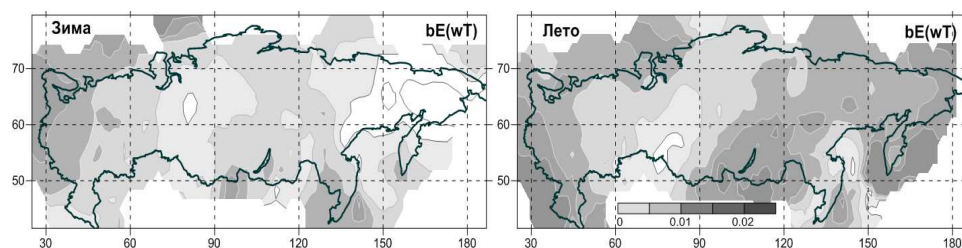
Температура воздуха. Функция плотности распределения суточной температуры близко напоминает классическую колоколообразную кривую нормального (Гауссова) распределения: она «почти» унимодальна и сим-

метрична (хотя для отдельных географических локализаций возможны вторичные моды и отклонения от симметрии, связанные с наличием выраженных циркуляционных режимов) и примерно так же быстро спадает с удалением от центра распределения. Процентили нормального распределения однозначно определяются значениями первых 2 моментов: среднего и дисперсии. Можно ожидать, что изменения процентилей суточной температуры в основном определяются изменениями тех же моментов. Увеличение (уменьшение) среднего вызывает смещение распределения в целом и, соответственно, рост (убывание) экстремальных процентилей обоих знаков, а изменение дисперсии – того же знака изменение положительных экстремумов и противоположного знака – отрицательных. Одновременные изменения среднего и дисперсии может, таким образом, приводить к различным результатам в зависимости от соотношения знаков и величины этих изменений.

На рис.1 показано географическое распределение коэффициентов линейного тренда 95-го (P_{95}) и 5-го (P_5) процентилей ежегодных внутрисезонных нормированных аномалий средней суточной температуры воздуха для зимы и лета. Рассматривались нормированные аномалии, чтобы исключить климатические внутрисезонные изменения как средних, так и дисперсии. Сравнение с изменениями среднесезонных значений нормированной аномалии (рис.2) показывает, что география изменения пороговых значений экстремумов качественно в основных чертах определяется общим смещением распределения температуры. Летом это выраженный рост почти на всей территории РФ с максимумами на западе страны (в особенности – на юго-западе Европейской части России (ЕЧР)), вокруг Байкала и на дальнем Северо-Востоке (Камчатка, Чукотка); зимой – менее выраженный рост с максимумом на западе и обширная область убывания температур на дальнем Северо-Востоке. Однако имеются отличия в величинах и даже знаках изменения для положительных и отрицательных экстремумов, которые следует



Р и с . 1 . Изменения процентилей P_5 и P_{95} нормированной аномалии температуры (линейный тренд 1976 – 2009 гг.). Аномалии рассчитаны относительно «постоянного» годового хода за 1976 – 2009 гг. Положительные тренды показаны градациями серого, отрицательные – изолиниями без заливки. Шаг изолиний: $0,005 \cdot \text{год}^{-1}$. Выделены станции, где тренд значим на уровне 5 %.



Р и с . 2 . Изменение среднесезонной нормированной аномалии температуры (линейный тренд 1976 – 2009 гг). Шаг изолиний: $0,005 \cdot \text{год}^{-1}$.

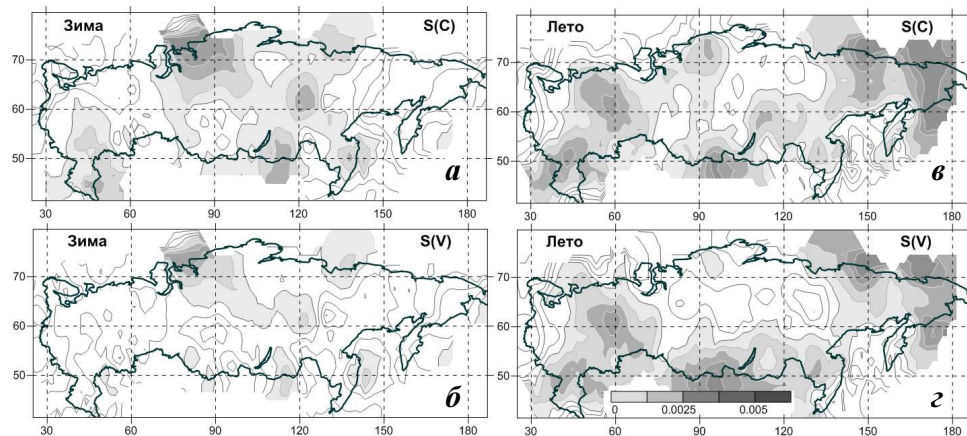
анализировать с учетом изменения дисперсии.

При использовании для анализа аномалий относительно постоянного годового хода изменения дисперсии включают также изменения средних, связанные с изменениями амплитуды и формы (включая фазы гармоник) годового хода. Чтобы исключить эти межгодовые изменения годового хода, рассматривались аномалии относительно «переменного» годового хода: отклонения от сглаженного фильтром, отсекающим периоды менее 90 дней, исходного ряда – т.е. за годовой ход принимаются вариации внутри года с периодами от сезона и более (в годовом ходе остаются гармоники с периодами более четверти года). Сезонные статистики отклонений от такого «переменного годового хода» для каждого года можно интерпретировать, как описание собственно внутрисезонной изменчивости для этого года (т.е., полностью исключаются изменения *средних*). На рис.3 представлен тренд сезонных стандартных отклонений температуры относительно постоянного годового хода, рассчитанного по выборке за 1976 – 2009 гг., и относительно «переменного» годового хода.

Наиболее ярко выраженные отличия изменений экстремумов от изменения сезонных средних и асимметрия изменений положительных и отрицательных экстремумов наблюдаются для зимы. Следует в первую очередь отметить отсутствие области отрицательного тренда на дальнем Северо-Востоке для величины 5-го перцентиля: это значит, что общее выраженное зимнее похолодание в этой области не приводит к углублению экстремумов холода. Напротив, здесь наблюдается некоторое смягчение экстремальных холодов (рост P_5). С другой стороны, величины экстремумов тепла (P_{95}) снижаются здесь значительно быстрее средних температур. Эти особенности объясняются значительным уменьшением дисперсии температуры в данном регионе.

Также уменьшением дисперсии, но на фоне выраженного роста среднесезонных температур, объясняется то обстоятельство, что максимум роста на северо-западе Европейской России между $60 - 70^\circ$ с.ш. наблюдается только для P_5 , а величины P_{95} там хотя и растут, но намного медленнее (максимум роста положительных экстремумов южнее – на западе между $60 - 70^\circ$ с.ш., причем тренды в этой области везде статистически значимые).

Важная особенность – усиление экстремумов холода на востоке Северного Кавказа, не сопровождающееся уменьшением сезонных средних и снижением порога положительных экстремумов. Оно как будто объясняется ростом дисперсии в южной половине ЕЧР (рис.3, а): но здесь ситуация существенно отличается от рассмотренных выше. Рост дисперсии здесь (в отличие от Северо-Востока и Северо-Запада) исключается при рассмотрении



Р и с . 3 . Изменение стандартного отклонения аномалий температуры, рассчитанных относительно постоянного годового хода (за 1976 – 2009 гг.) (*а, в*) и «переменного» годового хода (*б, г*) для зимы (*а, б*) и лета (*в, г*). Обозначения см. рис.2; шаг изолиний: $0,00125 \cdot \text{год}^{-1}$

аномалий относительно переменного годового хода (рис.3, *б*). Таким образом, это уменьшение P_5 связано не с изменением внутрисезонной изменчивости, а, по-видимому, с изменением формы годового хода. Похожая ситуация для P_5 (усиление экстремумов холода) наблюдается на севере Западной Сибири, но здесь все же изменения частично связаны с изменением внутрисезонной дисперсии и частично – годового хода.

Изменения границ экстремумов обоих знаков летом значительно более сходны между собой и с изменениями среднесезонных температур, нежели зимой. Ниже перечислены основные различия.

- Рост положительных экстремумов значительно превосходит рост отрицательных на юге ЕЧР, вокруг Байкала, на Северо-Востоке (объясняется ростом дисперсии в этих регионах).
- Наблюдается область усиления отрицательных экстремумов (убывание P_5) на Урале, также связанная с ростом дисперсии.
- Максимум роста P_5 наблюдается на западе ЕЧР (область убывания дисперсии), а не на юго-западе, как для P_{95} и среднесезонной температуры.

Обращает на себя внимание очевидная противофаза летних и зимних изменений собственно внутрисезонной дисперсии (рис.3, *б, г*) на большей части территории РФ, особенно ярко выраженная на Северо-Востоке, на Урале и севере ЕЧР и на юге России (но на западе ЕЧР и зимой, и летом наблюдается убывание межсуточной изменчивости). Преобладающая тенденция зимнего сезона – убывание изменчивости, тогда как летом преобладает рост.

Обобщенные по крупным регионам (европейской и азиатской частям России, табл.1) тенденции изменений P_{95} и P_5 на большей части территории РФ соответствуют ожидаемым при потеплении. Большая часть изменения определяется изменением среднесезонных величин. Летние изменения значительно превосходят зимние, особенно в азиатской части. Летом верхние процентиля растут несколько быстрее, а нижние – медленнее, чем средние, что согласуется с общим ростом дисперсии температур летнего сезона. Зи-

Т а б л и ц а 1. Оценки регионально осредненных линейных трендов сезонных (зима и лето) процентилей нормированных отклонений средних суточных температур воздуха от постоянного годового хода и среднесезонных температур (1/100 лет).

регионы	зима		лето	
	P_5	P_{95}	P_5	P_{95}
Европейская часть России	0,90	0,69	1,11	1,39
изменения среднесезонных аномалий	1,01		1,28	
Азиатская часть России	0,36	0,32	0,86	1,21
изменения среднесезонных аномалий	0,42		1,08	

мой же как P_{95} , так и P_5 растут медленнее средних, что должно выражаться в изменении асимметрии распределения (в действительности она растет); при этом P_5 растет быстрее, чем P_{95} (особенно в ЕЧР): это выражается в уменьшении дисперсии зимних температур.

Итак, большая часть наблюдаемых изменений экстремальных квантилей температуры качественно объясняется изменениями средних (среднесезонных величин и формы годового хода) и внутрисезонной изменчивости. Возникает вопрос, насколько хорошо это описание количе-

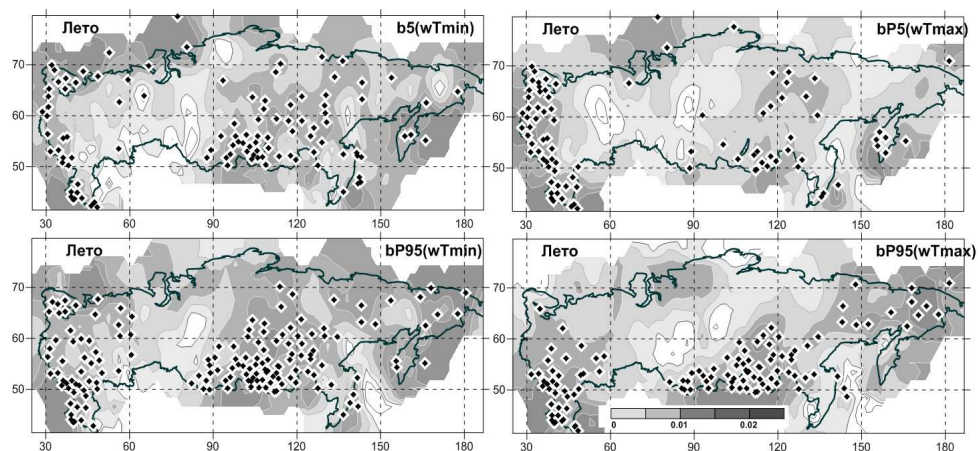
ственно. Мы рассмотрим простейшую модель, основанную на аппроксимации распределения суточных аномалий внутри сезона Гауссовым распределением. В этом случае изменения трендов процентилей линейно выражаются через изменения среднего и стандартного отклонения.

Для летнего сезона аппроксимация изменений обеих процентилей такой моделью вполне успешна: смещение можно считать пренебрежимым (около 5 % стандартного отклонения аппроксимируемых величин трендов на станциях), а дисперсия остатков («ошибок аппроксимации») в 19 (17) раз меньше разброса самих величин. Для зимы аппроксимация гораздо хуже. Можно считать ее приблизительно несмещенной. Величина же разброса ошибок аппроксимации лишь незначительно меньше разброса самих величин тренда: менее чем в 2 раза для P_5 , и лишь на 20 % для P_{95} . Такое различие качества аппроксимации для зимы и лета возможно связано со значительно большей интенсивностью зимних режимов циркуляции и, соответственно, их вклада в функции распределения температуры: в результате последние, представляющие собой смеси распределений для различных режимов, значительно больше отклоняются от гауссовости, чем это имеет место летом.

Как и для среднесуточных температур, основной характер изменений экстремальных процентилей T_{min} и T_{max} летнего сезона (рис.4) определяется изменением среднесезонных температур. Ему соответствуют основные максимумы роста (на западе ЕЧР, в регионе вокруг Байкала, на дальнем Северо-Востоке) и область убывания в Западной Сибири.

В отличие от среднесезонных температур имеется область убывания на востоке ЕЧР для отрицательных экстремумов как максимальных, так и минимальных суточных температур (и, соответственно, среднесуточной температуры).

Отрицательные экстремумы максимальной температуры в восточной части страны растут незначительно; в частности, практически отсутствуют



Р и с . 4 . Изменения процентилей P_5 и P_{95} нормированной аномалии максимальной и минимальной суточной температуры. Обозначения см. рис.1.

области роста вокруг Байкала и на дальнем Северо-Востоке. Напротив, экстремумы обоих знаков минимальной температуры значительно растут практически по всей восточной части РФ (восточнее 90° в.д.).

На севере ЕЧР наблюдается максимум роста порогов экстремумов обоих знаков минимальной суточной температуры: т.е. общее положительное смещение распределения минимальной температуры. Именно с этим (и отчасти с ростом порогов отрицательных экстремумов максимальной температуры) связан максимум роста положительных экстремумов среднесуточных температур в этом регионе, в то время как абсолютные экстремумы тепла (положительные экстремумы максимальной температуры) здесь не растут.

Атмосферные осадки Функция распределения осадков $F(r)$ является смесью непрерывного распределения $\Phi(r)$ на полуоси $r > 0$ (т.е. при их наличии) и дискретного распределения с вероятностью P_o , сосредоточенной в 0 (отсутствие осадков); «хвосты» распределения суточных осадков зависят (1) от P_o и (2) хвостов распределения ненулевых осадков $\Phi(r)$. Можно показать, что рост P_o влечет уменьшение квантиля $F - 1 P_o(\alpha)$, соответствующего фиксированной вероятности α .

На рис.5 представлены изменения 95-го перцентиля «полной» сезонной функции $F(r)$ и величины $P_r = 1 - P_o$ (для большей наглядности анализа изменений 95-го перцентиля $F(r)$ показано изменение числа дней с осадками P_r вместо P_o , т.к. рост перцентиля соответствует *росту* P_r). Следует, однако, иметь в виду, что в использованном архиве не различаются отсутствие и «следы» осадков ($< 0,1$ мм). Осадки представлены относительными аномалиями (в долях суточной нормы).

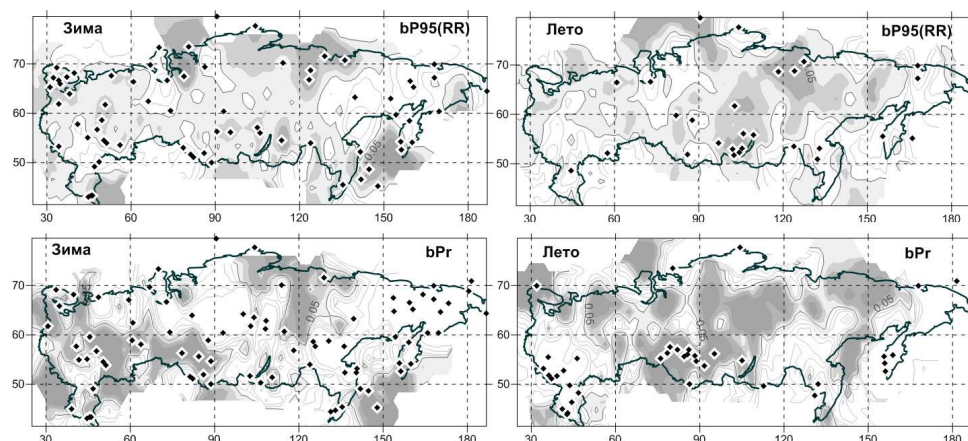
Зимой 95-й сезонный перцентиль суточных осадков *растет* на большей части территории РФ, причем максимум роста наблюдается в северной половине ЕЧР (здесь тренд значим на многих станциях, особенно вокруг Белого моря), на севере Сибири, вокруг Байкала и в районе Сахалина. Большая область убывания – на дальнем северо-востоке, и меньшая – в южной части ЕЧР (исключая Северо-Кавказский ФО). Число зимних дней с осадками (P_r), напротив, убывает на большей части страны (т.е., *растет* чис-

ло дней без осадков). Максимумы – на Дальнем Востоке (особенно на севере), Западной и Средней Сибири, северо-востоке ЕЧР.

Максимумы роста 95-го процентиля сезонной функции распределения связаны в основном непосредственно с ростом сильных осадков (95-й процентиль функции $\Phi(r)$). В то же время его убывание на Северо-Востоке объясняется преимущественно убыванием числа дней с осадками (на юге ЕЧР действуют оба фактора). Заметим, что рост сильных осадков на большей части территории перекрывает эффект, связанный с ростом числа дней без осадков (особенно явно – на северо-востоке ЕЧР).

Летом также преобладает *рост сильных осадков* с максимумами так же, как зимой, в регионе вокруг Байкала и на севере ЕЧР (исключая Кольский п-ов), и кроме того, на западе ЕЧР (граница с Белоруссией), на Урале, в Магаданской области. Убывание сильных осадков наблюдается на Южном Урале и в Нижнем Поволжье, на севере Западной Сибири, в Забайкалье и Приамурье. В отличие от зимы, летом на большей части территории РФ число дней с осадками растет (в особенности в Западной и Средней Сибири). Имеются три выраженные области роста числа дней без осадков: большая часть ЕЧР (особенно – южная половина; здесь результирующий эффект для R_{95} суточных осадков всего сезона – убывание), Чукотка-Камчатка и Забайкалье – юг Якутии.

Для понимания наблюдаемых региональных изменений погодных экстремумов очень важны исследования, связывающие статистики экстремумов с региональными изменениями циркуляции – в особенности, циклонической и антициклонической активности и блокирования зонального переноса, далее с ведущими крупномасштабными модами климатической изменчивости (такими, как САК, АО и др.) и, наконец, с глобальными изменениями антропогенного происхождения. К сожалению, имеется не так много работ, посвященных эмпирическому или модельному анализу связей в этой цепочке. Если имеется очень большое число работ, посвященных



Р и с . 5 . Изменения (линейный тренд 1976 – 2009 гг.) 95-го процентиля полной сезонной функции распределения относительной аномалии (доли суточной нормы) суточных сумм осадков ($год^{-1}$); изменения доли числа дней с дождем в сезоне ($\% \cdot год^{-1}$): зима, лето.

общей характеристике и анализу изменений климатических мод, то значительно меньше работ, характеризующих изменения региональной циркуляции, еще меньше – связывающих эти изменения с климатическими модами или с статистиками экстремумов, и совсем единицы – связывающих изменения климатических мод и региональной циркуляции с глобальными антропогенными изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Платова Т.В.* Климатическая характеристика некоторых показателей экстремальности температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на территории России / спользование и охрана природных ресурсов в России.– Бюллетень "Использование и охрана природных ресурсов в России".– М.: Изд-во НИИ-Природа, 2007.– № 1.– С.38-47.
2. *Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Groisman P.Ya.* Climate variations and changes in extreme climate events in Russia // Environ. Res. Lett. 2 N4 (October-December 2007).– 045020.– 7 p.
3. *Alexander L. et al.* Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // J. Geoph. Research-Atmospheres.– 2006.– v.11.– P.D05109.
4. *Бардин М.Ю.* Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов РФ до 2030 г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата // Метеорология и гидрология.– 2011.– № 4.– С.5-20.
5. *Крыжов В.Н.* Связь средней годовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием // Метеорология и гидрология.– 2004.– № 1.– С.5-14.
6. *Мохов И.И., Акперов М.Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2006.– т.42, № 4.– С.467-475.
7. *Попова В.В., Шмакин А.Б.* Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий зимней температуры воздуха в Северной Евразии в конце XX столетия // Метеорология и гидрология.– 2006.– № 12.– С.15-24.
8. *Mantua N., Hare S.J.* The Pacific Decadal Oscillation // J. Oceanogr.– 2002.– 58.– P.35-44.
9. *Trenberth K.E.* Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change // Climatic Change.– 1999.– 42(1).– P.327-339.

Материал поступил в редакцию 14.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ Аналізуються екстремуми всередині календарних сезонів. В якості показників екстремальності розглядаються екстремальні, тобто відповідні близьким до 0 або 1 ймовірностям, процентилю сезонних вибірок добових середньої, мінімальної та максимальної температури і добових сум атмосферних опадів, і аналізуються тимчасові зміни цих процентилей.

ABSTRACT The extremes within the calendar seasons are analyzed. As indicator of extreme, extreme, i.e. corresponding to close to 0 or 1 probabilities, percentage of samples of seasonal daily average, minimum and maximum temperature and the daily sums of precipitation are considered and temporal changes in these percentiles are analyzed.