

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 процентилей.

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 квантилей, 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. Анализировались 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_0 – 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

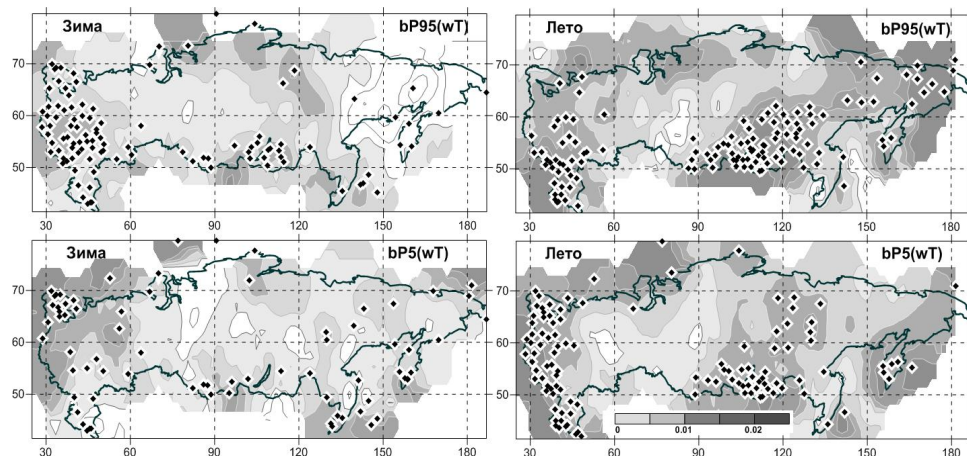
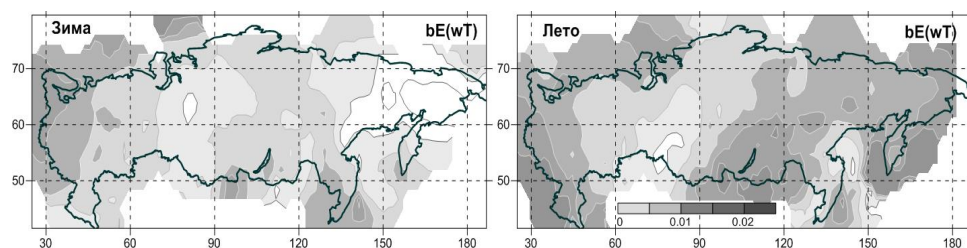


Рис. 1. Изменения процентилей P_5 и P_{95} нормированной аномалии температуры (линейный тренд 1976 – 2009 гг.). Аномалии рассчитаны относительно «постоянного» годового хода за 1976 – 2009 гг. Положительные тренды показаны градациями серого, отрицательные – изолиниями без заливки. Шаг изолиний: $0,005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



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

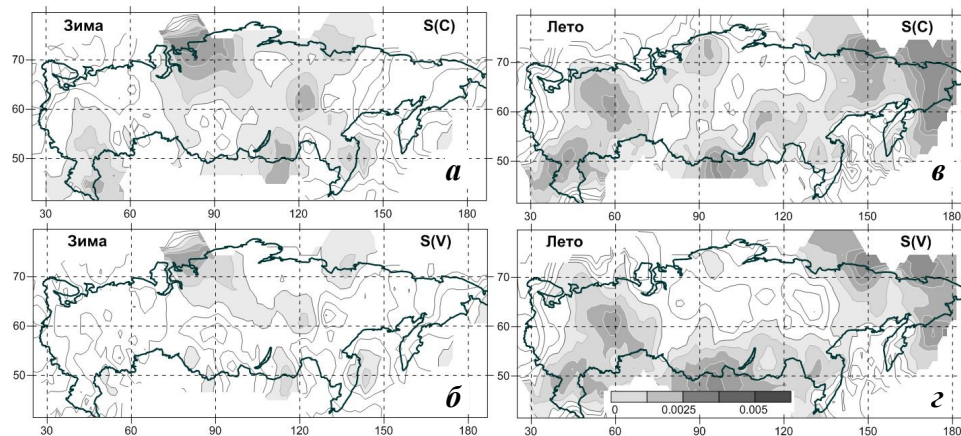
анализировать с учетом изменения дисперсии.

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	

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 обоих 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.

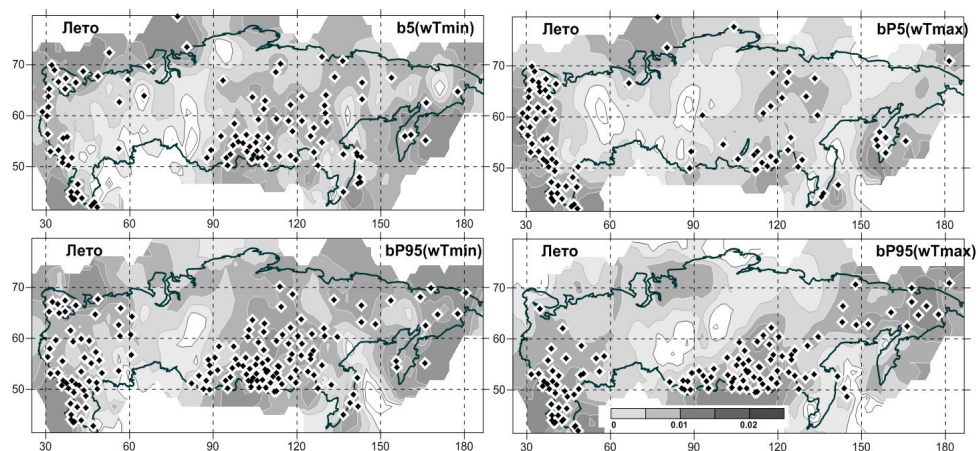
Как и для среднесуточных температур, основной характер изменений экстремальных процентилей T_{min} и T_{max} летнего сезона (рис.4) определяется изменением среднесезонных температур. Ему соответствуют основные максимумы роста (на западе ЕЧР, в регионе вокруг Байкала, на дальнем Северо-Востоке) и область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

мой же как P_{95} , так и P_5 растут медленнее средних, что но 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-



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 процентиля «полной» сезонной функции $F(r)$ и величины $P_r = 1 - P_o$ (для большей наглядности анализа изменений 95-го процентиля $F(r)$ показано изменение числа дней с осадками P_r вместо P_o , т.к. рост процентиля 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).

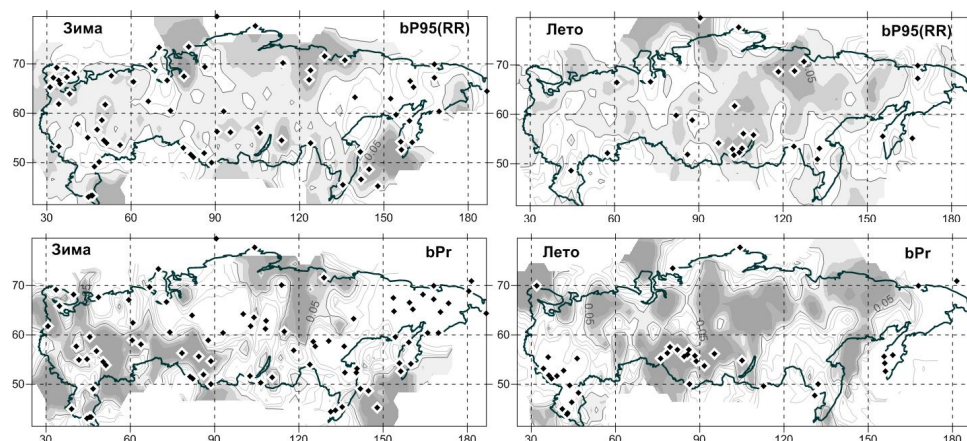
Зимой 95-й сезонный процентиль суточных осадков *растет* на большей части территории РФ, причем максимум роста наблюдается в северной половине ЕЧР (здесь тренд значим на многих станциях, особенно вокруг Белого моря), на севере Сибири, вокруг Байкала и в районе Сахалина. Большая область убывания – на 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 Колыский 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 P_{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 ($\% \cdot \text{год}^{-1}$): 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 / использование 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.