СОВРЕМЕННАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ В РОССИИ

О.Г. Золина¹⁾, О.Н. Булыгина^{1,2)}

¹⁾ Институт Океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36; zol@sail.msk.ru

²⁾ ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Королева 6; bulygina@meteo.ru

Резюме. В статье рассматриваются долгопериодные изменения некоторых характеристик экстремальных осадков на территории России с 1966 по 2012 годы по данным наблюдений на метеорологических станциях с суточным разрешением. Обнаружены и количественно оценены линейные тренды характеристик экстремальных осадков — абсолютной и относительной экстремальности и продолжительности периодов с осадками и без них. При этом были предложены новые, более устойчивые статистические метрики для оценивания экстремальных осадков. В целом на территории России наблюдается усиление интенсивности экстремальных осадков, что увеличивает риск возникновения наводнений. В то же самое время наблюдается также увеличение длительности периодов без осадков, что говорит о возможности возникновения засух. Таким образом, частота опасных гидрологических явлений, связанных с избытком или же недостатком воды, существенно увеличивается в последние десятилетия.

Ключевые слова. Экстремальные осадки, климатическая изменчивость, Россия.

CURRENT CLIMATIC VARIABILITY OF EXTREME PRECIPITATION IN RUSSIA

O.G. Zolina¹⁾, O.N. Bulygina^{1,2)}

¹⁾ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS,
Nakhimovsky ave., 36, 117997 Moscow, Russia; zol@sail.msk.ru

²⁾ All-Russia Institute for Hydrometeorological Information,
6, Koroleva str., 249035 Obninsk, Kaluga region, Russia; bulygina@meteo.ru

Summary. Long-term changes in some characteristics of extreme precipitation in Russia in 1966–2012 are analyzed using daily rain gauges. Linear trends in characteristics of absolute and relative extremes as well as in the duration of wet and dry spells are found and quantified. This was accomplished with the proposed new more robust metrics for the estimation of precipitation extremes. In general, increasing intensity of extreme precipitation is observed in Russia, which may result in the growing risk of flooding. Simultaneously a tendency of the lengthening in dry periods is also found. This implies the increase in probability of droughts. Hence, frequencies of dangerous hydrological phenomena associated with both water excess and scarcity have increased substantially in recent decades.

Key words. Extreme precipitation, climate variability, Russia.

Введение

Мы живем в эпоху глобальных изменений климата, связанных как с деятельностью человека, так и с природными механизмами (IPCC, 2013), причем роль антропогенных изменений и собственной изменчивости климатической системы достаточно трудно разделима, особенно на масштабах времени в несколько десятилетий. Современные климатические изменения проявляются, помимо изменений средних величин, в резком увеличении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий. В части гидрологического цикла, это, в первую очередь, увеличение повторяемости сильных наводнений и засух. За последние 4 года на территории России произошло 3 катастрофических наводнения (Сочи, 2015 год, Дальний Восток, 2013 год и Крымск, 2012 год) и десятки сильных региональных наводнений. Также наблюдалась сильнейшая волна тепла в июле — августе 2010 года в центральной части России, когда аномалия среднемесячной температуры в июле превысила $+6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Надо отметить, что в целом последние десятилетия в Евразии характеризуются сильными температурными аномалиями — экстремально холодными зимами, сокращением времени переходных сезонов (весны и осени), сильной сезонностью в изменениях температур, в том числе, например, необычно теплой погодой зимой и холодной летом, или наоборот. Эти аномалии неразрывно связаны с изменениями цикла влаги в атмосфере. Будучи зависимыми от аномалий температуры, фазовые переходы влаги сами существенно влияют на температурный режим, формируя многочисленные обратные связи с такими процессами как радиационный нагрев (через облачность), циркуляция атмосферы (через формирование градиентов давления), изменения ледового и снежного покрова и многие другие.

Как следствие, понимание механизмов изменчивости климата на различных временных масштабах является в значительной степени проблемой понимания механизмов изменений цикла атмосферной влаги. Ключевыми параметрами, характеризующими этот цикл, являются атмосферная адвекция влаги и атмосферные осадки. Механизм формирования последних, с физической точки зрения, удивительно прост и определяется термодинамическим уравнением Клайперона-Клаузиса, связывающего изменения равновесных значений температуры и влажности при фазовых переходах и определяющего условия конденсации влаги при данной температуре. Однако, интенсивность осадков в реальной атмосфере, может существенно превышать задаваемую уравнением Клайперона-Клаузиса. Это происходит ввиду незамкнутости и неравновесности системы (Allan, Soden, 2008; Lenderink, van Meijgaard 2008), приводя к особо сильным, экстремальным осадкам, основным механизмом которых во внетропических широтах является адвекция влаги внетропическими циклонами (Trenberth et al., 2003). Эти процессы происходят по-разному на различных пространственно-временных масштабах и в различных районах с разными условиями подстилающей поверхности и рельефа. Как результат, атмосферные осадки характеризуются высокой кластеризацией в пространстве и во времени, и не формируют классического

скалярного поля, как другие атмосферные характеристики (температура, давление). Проявлением этой кластеризации являются экстремальные осадки с интенсивностями в десятки раз превосходящими средние. Крайне важным является то, что степень кластеризации и интенсивность экстремальных осадков могут меняться во времени совершенно по другому, чем средние величины осадков.

Механизмы, определяющие формирование экстремальных осадков и их изменчивость, изучены крайне плохо в силу того, что пространственно-временная структура осадков недостаточно точно измеряется и недостоверно описывается в атмосферных и климатических моделях вследствие, как относительно грубого разрешения моделей, так и недостаточно развитых параметризаций процессов конденсации. Результатом является то, что погрешности оценок характеристик экстремальных осадков по наблюдениям и по модельным данным составляют десятки процентов. При этом средние осадки диагностируются и прогнозируются с гораздо лучшей точностью. В частности, климатические модели крайне неточны в воспроизведении и прогнозе экстремальных осадков.

Эта проблема особенно важна для внетропических районов, в частности для России. Количество влаги в атмосфере здесь значительно меньше, чем в тропиках, но роль адвективных процессов, связанных с динамикой синоптических вихрей, гораздо сильнее. Кроме того, именно в средних широтах происходят наиболее существенные изменения в интенсивности экстремальных осадков, приводя часто к природным катастрофам. Во многих районах одновременно с интенсивностью экстремальных осадков возрастает частота и интенсивность экстремальных волн тепла и связанных с ними продолжительных засух. Экстремальные погодные явления свидетельствуют о том, что изменяются характеристики атмосферного гидрологического цикла и, в частности, меняется структура режима увлажнения, то есть продолжительность и интенсивность влажных и засушливых периодов. Для достоверного диагноза и прогноза этих явлений недостаточно рутинного анализа долгосрочных климатических рядов. Требуются подходы, основанные на анализе данных высокого разрешения по времени и пространству, и использующие принципиально отличные от традиционных метрики экстремальности осадков с учетом пространственно-временных масштабов процессов. Это позволит по-новому взглянуть на результаты моделирования современного и будущего климата и понять, как меняется цикл влаги в атмосфере и какие именно механизмы влияют на изменчивость экстремальных осадков.

В данной статье приводится подробный анализ климатического пространственного распределения и изменчивости различных характеристик экстремальных осадков за период с 1966 по 2012 годы, выполненный по данным измерений на Российских станциях.

Данные и методы

По данным метеорологических наблюдений, поступающих в Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды во ВНИИГ-

МИ-МЦД, был сформирован массив суточных сумм атмосферных осадков на 1579 станциях России за период с 1881 года по настоящее время. В рядах наблюдений за осадками имеется большое количество пропусков (рис. 1а). Эти пропуски могут сильно влиять на статистические оценки экстремальных осадков. Авторами был проведен детальный статистический анализ количества и распределения во времени пропущенных значений в рядах суточных осадков. Ранее, в работе (Zolina et al., 2005) были даны рекомендации о допустимом количестве пропущенных значений в суточных рядах осадков для достоверной статистической оценки трендов экстремальных осадков. В соответствии с этими рекомендациями из 1579 станций было выбрано 1430 станций (рис. 1б), удовлетворяющих критериям максимально допустимого количества пропущенных значений в рядах осадков для их дальнейшего статистического анализа и оценки трендовых изменений. Для анализа был выбран период с 1966 по 2012 годы. Такой период обусловлен тем, что до 1966 года в наблюдениях за осадками, по крайней мере, трижды была

Рисунок 1. (а) Количество пропущенных значений (%) в массиве 1579 российских станций за период с 1881 по 2013 годы. Красным цветом выделен период, выбранный для анализа (1966–2012 годы).

(б) Местоположение станций, прошедших контроль качества и отобранных для анализа.

нарушена однородность рядов: а) в 30-е годы прошлого столетия произвели массовый перенос станций на открытое место, репрезентативное для ряда элементов, но не для осадков; б) в начале 50-х годов массовое нарушение однородности вызвано сменой прибора, был установлен осадкомер с защитой Третьякова; в) с января 1966 года поправка на смачивание стала вводиться непосредственно на станции. Все это может существенно влиять на оценки долгопериодной изменчивости характеристик осадков. После 1966 года никаких изменений в методиках измерений и обработки не происходило, поэтому ряды сумм осадков не содержат неоднородностей, связанных с этими изменениями. Необходимо отметить, что мы не устраняли ошибки измерений, связанные с влиянием ветра, которое в большей мере сказывается на точности измерения твердых осадков в районах с сильными ветрами (Гройсман и др., 2014). Эта методика требует большого объема дополнительной информации, которая в настоящее время недоступна. Таким образом, был получен массив данных измерений осадков с суточным разрешением, полнота которого и отсутствие методической и инструментальной неоднородности позволяет использовать его для анализа климатических изменений.

Для того, чтобы обосновать использование тех или иных метрик осадков и анализировать их изменения, необходимо определить, что считать экстремальными осадками. Отметим, что это определение может быть различным для разных задач и для разных географических районов. Существует три основных группы характеристик экстремальных осадков, и, соответственно, три методологических подхода к их определению. Первый подход — это анализ абсолютных значений. При этом, в качестве экстремальных, рассматриваются осадки, превышающие выбранное некоторым образом пороговое значение. Выбор порогового значения является ключевым при отнесении осадков к классу экстремальных. Часто используют единое пороговое значение для группы станций, локализованных в одном районе (например, 10 или 20 мм/день). Однако, при анализе экстремальных осадков для достаточно большой территории с разными режимами увлажнения пороговое значение будет разным, меняясь в соответствии с климатическим распределением средних осадков. В этом случае удобно пользоваться вторым подходом — пороговым квантилем, определяемым из функций плотности вероятности (Bulygina et al., 2007), получаемой аппроксимацией данных теоретическим распределением. Абсолютные экстремальные осадки могут определяться как осадки, например, 5 %- или 1 %-ной повторяемости, причем соответствующие пороговые значения будут различны по абсолютным значениям. Этот подход позволяет оценивать также характеристики относительной экстремальности или вклада дней с наиболее сильными осадками в общее количество осадков за некоторый период — еще одну группу характеристик экстремальности, принципиально отличную от абсолютной экстремальности (Klein Tank, Koenen, 2003; Zolina et al., 2009). При этом осадки, характеризующиеся высокой относительной экстремальностью, далеко не всегда являются экстремальными по абсолютным величинам, а, следовательно, не обязательно имеют значимые природные последствия

в виде наводнений. Однако их анализ также важен для понимания механизмов, приводящих к возникновению сильных осадков. Наконец, третья группа характеристик и, соответственно, третий подход, предполагает анализ продолжительности и интенсивности периодов с непрерывными осадками (Zolina et al., 2010, 2013). Эта характеристика существенно отличается от первых двух. В этом случае анализируются не индивидуальные дни с осадками (которые предполагаются независимыми в первых двух случаях), а периоды, в течение которых наблюдались осадки.

Рисунок 2. Пороговые значения (95-й процентиль аппроксимирующего Гамма-распределения) абсолютных экстремальных осадков за период с 1966 по 2012 годы зимой (а) и летом (б) (мм/день).

Так как практически для всех регионов России наблюдаются очень сильные сезонные различия в поведении осадков, то в дальнейшем были проанализированы отдельно осадки в зимний (январь, февраль, март) и летний (июнь, июль, август) периоды. Для анализа длительности периодов с осадками и без осадков год был разделен на холодный (с октября по март) и теплый (с апреля по сентябрь) сезоны.

Результаты

Климатическое распределение и изменчивость величин абсолютных экстремальных осадков

На рис. 2 показано климатическое пространственное распределение значений абсолютных экстремальных осадков в мм/день для территории России, определенных как значения 95-го перцентиля, полученные на основе аппроксимации эмпирического распределения суточных сумм осадков Гамма-распределением за период с 1966-го по 2012-ый годы.

В целом пространственное распределение абсолютных значений порогов экстремальных осадков качественно повторяет распределение средних значений осадков, отражая климатические особенности местности и рельеф. Это фундаментальное свойство экстремальных осадков, оцениваемых с помощью Гамма-распределения (или других экстремальных распределений), поскольку величины экстремальных осадков скоррелированы с параметрами формы и масштаба, которые определяют среднее в таких распределениях. Наибольшие значения порогов абсолютных экстремальных осадков (более 26 мм/день) наблюдаются в Северо-Кавказском федеральном округе, характеризующемся сложной орографией и наличием горных систем. В Южном и Приволжском федеральных округах значения порогов абсолютных экстремальных осадков уменьшаются до 10–18 мм/день зимой и до 18–24 мм/день летом. На остальной территории России пороги экстремальных осадков изменяются от 2–3 до 10 мм/день зимой и от 10 до 22 мм/день летом. При этом летние пороги абсолютных экстремальных осадков повсеместно значительно выше зимних. Это связано с большим вкладом летней конвекции — механизма, приводящего к сильным, хоть и коротким по продолжительности осадкам — в процессы осадкообразования. Летом также наблюдаются высокие значения порогов абсолютных экстремальных осадков на юге Дальневосточного федерального округа. Это обусловлено влиянием муссонной циркуляции, когда сильная адвекция океанской влаги на континент приводит к аномальным продолжительным осадкам.

На рис. 3 показаны тренды в величинах порогов абсолютных экстремальных осадков для территории России, полученных на основе Гамма-распределения для каждого сезона периода 1966–2012 гг. Статистическая значимость трендов оценивалась по *t*-критерию Стьюдента; принят уровень значимости 90%. Для всех сезонов года практически на всей территории России наблюдается устойчивая тенденция увеличения значений экстремальных осадков до 8% (величины за 1966–2012 гг.) в десятилетие, что соответствует увеличению абсолютных значений экстремальных

Рисунок 3. Линейные тренды (в % величины за весь период в десятилетие) порогов экстремальных осадков за период с 1966 по 2012 годы зимой (а) и летом (б). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 90 % (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента).

осадков примерно на 4 мм/день за последние 50 лет зимой и около 7 мм/день летом. В частности, очень сильные положительные тренды (более 9% в десятилетие зимой и 7–9% в десятилетие летом) наблюдаются в южной части Дальневосточного округа в бассейне реки Амур. В терминах средних климатических значений это очень существенный рост экстремальных осадков, который потенциально может привести к увеличению количества и интенсивности наводнений, хотя реальная вероятность возникновения последних

в значительной степени определяется также гидрологическими процессами в речной сети и в почве.

Климатическое распределение и изменчивость характеристик относительной экстремальности осадков

Рассмотрим теперь характеристики относительной экстремальности осадков, которые могут не обязательно быть тесно коррелированы с абсолютными величинами экстремальных осадков. Относительная экстремальность показывает вклад наиболее влажных дней в общее количество осадков за определенный промежуток времени (месяц, сезон). Традиционно оценки относительной экстремальности выполняются с использованием индекса $R95_{tot}$ (Klein Tank, Koenen, 2003) или аналогичных индексов для других квантилей. Этот индекс показывает, долю осадков, выпавших в течение 5% дней с наиболее сильными осадками, в общее количество осадков. Индекс $R95_{tot}$ рассчитывается как:

$$R95_{tot} = \frac{\sum_{n=1}^N R_n | R_n > R95}{\sum_{n=1}^N R_n}, \quad (1)$$

где R_n — суточное количество осадков в конкретный день n ($R \geq 1$ мм) рассматриваемого сезона или месяца, N — число дней с осадками в течение этого сезона (месяца), $R95$ — 95-й процентиль осадков, полученный для всего анализируемого периода (полной выборки всех дней с осадками в рассматриваемые сезоны или месяцы в интервале между начальным и конечным годом анализируемого периода), $R_n | R_n > R95$ — условное выражение, равное R_n при $R_n > R95$ и 0 в противном случае. Для расчета таких упрощенных индексов относительной экстремальности используются оценки, основанные на использовании данных наблюдений, а не аппроксимирующих функций распределения.

Эти индексы традиционно используются в отчетах IPCC для оценки изменчивости экстремальных осадков. Однако, эти оценки являются весьма неопределенными, поскольку в 30–40% случаев эти индексы обращаются в ноль, особенно в случае малого числа дней с осадками (Zolina et al., 2009). Как следствие, эти индексы традиционно рассчитываются для годовых рядов наблюдений, поскольку для сезонных и, тем более, месячных данных пороговое значение, как правило, является плохо статистически обеспеченным, при этом величина самого индекса обращается в 0 для большого количества лет, приводя к существенным ошибкам в расчетах климатических трендов. С другой стороны, получение сезонных, а не только годовых оценок, принципиально важно, поскольку осадки вообще и экстремальные осадки в частности, демонстрируют ярко выраженную сезонность.

Для достоверного определения относительной экстремальности, необходимо получить теоретические распределения для долевых вкладов в суммы осадков произвольного числа дней с наиболее интенсивными осадками

в предположении аппроксимации рядов суточных осадков, например, Гамма-распределением (традиционно используемом для суточных значений осадков). Нами был развит метод, позволяющий рассчитать вклад различных долей суммарного количества дней с осадками в сезонные или месячные суммы осадков в предположении аппроксимации распределения всей выборки Гамма-распределением (Zolina et al., 2009, 2013). Гамма-распределение относится к семейству экспоненциальных распределений, определенных в положительной области. Формула (2) представляет функцию плотности вероятности (ФПВ) Гамма — распределения:

$$F(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0 \quad (2),$$

где $\Gamma(\alpha)$ — Гамма-функция, α — параметр формы, а β — параметр масштаба. Параметр формы α безразмерный и определяет при $\alpha > 1$ асимметричность ФПВ Гамма-распределения, сдвигая его моду влево при малых значениях α и вправо при больших значениях α . Параметр масштаба β имеет размерность анализируемой переменной (мм/день, в данном случае) и определяет «горизонтальный размер» (растяжение-сжатие) ФПВ. Средняя интенсивность осадков равна произведению α и β .

Из функции плотности вероятности Гамма-распределения (2) можно получить распределение отношения осадков, выпавших в течение заданного количества дней k к сумме осадков, выпавших за некоторый период времени (месяц, сезон) для $1 \leq k \leq n$, где n — количество дней с осадками (объем выборки):

$$y_k = \sum_{j=1}^k x_j / \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$x_i, i = 1, \dots, n$ — суточные значения осадков за период n , $x_j, j = 1, \dots, k$ — суточные значения осадков для выбранных k дней. Независимая переменная y в (3) изменяется от 0 до 1 и зависит от α и от количества дней с осадками n , при этом она не зависит от β . Это распределение было названо нами «Распределением Частичного Вклада» (РЧВ).

Можно получить следующее выражение для РЧВ (функции распределения случайной величины $y = y_k$):

$$C(n, k; y) = \frac{\Gamma(n\alpha)}{k\alpha \Gamma[(n-k)\alpha] \Gamma(k\alpha)} \cdot y^{k\alpha} (1-y)^{(n-k)\alpha} F_2^1(1, n\alpha, k\alpha + 1, y), \quad (4)$$

где $F_2^1(a, b, c, y)$ — Гауссова гипергеометрическая функция.

Функция плотности вероятности этого распределения имеет следующий вид:

$$F(n, k; y) = \frac{\Gamma(n\alpha)}{\Gamma[(n-k)\alpha] \Gamma(k\alpha)} y^{k\alpha-1} (1-y)^{(n-k)\alpha-1} \quad (5)$$

В практических приложениях предложенного распределения должна также быть рассмотрена точность аппроксимации и чувствительность распределения к изменению параметров. Однако, так как предлагаемое распределение является точным математическим следствием Гамма-распределения для случайных значений, его точность аппроксимации и устойчивость определяется точностью аппроксимации исходного распределения. Использование именно Гамма-распределения не является критичным условием, любой другой вид теоретического распределения может быть использован для расчета РЧВ.

На основании РЧВ был получен новый устойчивый индекс относительной экстремальности:

$$R95tt = 1 - C_{95}(n), \quad (6)$$

где n — количество дней осадками, C_{95} — оценка функции распределения S РЧВ для соответствующего процентиля осадков (в данном случае 95 %), полученного для всего периода измерений по Гамма-распределению. Предложенный нами индекс заставил авторов традиционного индекса $R95tot$ пересмотреть его формулировку и предложить новый индекс, также основанный на теоретических распределениях (Leander et al., 2014). Использование этого нового индекса позволило получать устойчивые оценки относительной экстремальности осадков для отдельных сезонов и исследовать ее долгопериодную изменчивость для этих сезонов.

На рис. 4 показана климатология индекса $R95tt$ для зимнего и летнего сезонов. Интерпретация относительной экстремальности осадков не столь очевидна, как абсолютной. Проценты, показанные на картах, характеризуют вклад дней с наиболее сильными осадками (превышающими 95-й процентиль в данном случае) в общее количество осадков. Летом (рис. 4б) значения индекса $R95tt$ существенно выше, чем зимой (рис. 4а), что подтверждает преимущественно конвективный характер экстремальных осадков и, как следствие, большую долю сумм осадков выпадающих в дни с сильной конвекцией. Зимой пространственное распределение $R95tt$ более похоже на распределение порогов абсолютных значений экстремальных осадков. Самые большие величины индекса $R95tt$ наблюдаются в южной части России и на Дальнем Востоке (18–22 %). В Центральном федеральном округе вклад дней с наиболее сильными осадками в общее количество осадков составляет не более 15–18 % и этот вклад существенно уменьшается с увеличением континентальности климата на восток до 13–14 %. Летом распределение значений относительных экстремальных осадков характеризуется большей пространственной однородностью по сравнению с распределением абсолютных значений: индекс $R95tt$ изменяется в пределах 20–22 % практически повсеместно по территории России.

Изменения индекса относительной экстремальности осадков существенно отличаются от изменений абсолютных значений экстремальных осадков. На рис. 5 показаны тренды в относительной экстремальности (индекса

Рисунок 4. Оценка индекса $R95tt$ относительных экстремальных осадков за период с 1966 по 2012 годы зимой (а) и летом (б) (%).

$R95tt$) для российских станций. Пространственная структура трендов характеризуется сильной изменчивостью и выделение устойчивых кластеров положительных или отрицательных тенденций достаточно затруднительно. Так, на рис. 5 количество станций, показывающих уменьшение относительной экстремальности со временем значительно меньше по сравнению с числом точек, где наблюдаются отрицательные тренды абсолютных значений экстремальных осадков. В целом и зимой и летом наблюдаются в основном положительные тренды в относительной экстремальности осадков до 6% в десятилетие. При этом зимой в Южном и Северо-Кавказском

Рисунок 5. Линейные тренды (% значения за 1966–2012 в десятилетие) относительных экстремальных осадков, определенных как индекс $R95_{tt}$, основанный на Гамма распределении, за период с 1966 по 2012 годы зимой (а) и летом (б). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 95 % (оценка значимости производилась по t -тесту Стьюдента и непараметрическому тесту Манна-Кендала).

федеральных округах большое количество станций показывает уменьшение вклада сильных осадков в суммарные. Летом же отрицательные тренды относительной экстремальности наблюдаются вдоль южной границы России. Климатический сигнал для оценок относительных экстремальных осадков менее устойчив, чем для абсолютных экстремальных осадков, что ранее отмечалось для территории западной Европы (Zolina et al., 2009).

Климатическое распределение длительности периодов с осадками и ее изменчивость

Третьей важной характеристикой экстремальных осадков является продолжительность периодов, в течение которых ежедневно выпадали осадки. Эта характеристика принципиально отличается от параметров абсолютной и относительной экстремальности, поскольку здесь анализируются не индивидуальные дни с осадками, а разной длительности периоды с осадками. Значение этой характеристики в ее более тесной связи с вероятностью возникновения наводнений, особенно для районов, подверженных ливневым паводкам, как, например, бассейн реки Амур. Очень сильные осадки, выпадающие в течение относительно непродолжительного времени, не столь опасны с точки зрения возможности возникновения наводнений, как осадки даже средней интенсивности, но выпадающие в течение длительного периода.

Рисунок 6. Суточные значения осадков для зимних периодов 1994 (синий цвет) и 1967 (зеленый цвет) годов для немецкой станции Бонн-Фридрихсхоф.

Для понимания смысла рассмотрения длительности периодов с осадками приведем простой пример. На рис. 6 показаны суточные значения осадков для немецкой станции Бонн-Фридрихсхоф. Суммы осадков для двух зимних периодов разных лет, были очень близки (211 и 224.5 мм соответственно). Классический анализ экстремальных осадков, включающий расчеты абсолютных и относительных характеристик экстремальности, показывает, что зима 1967 года была значительно более экстремальной, чем зима 1994 года. Однако в 1994 году наблюдалось непрерывное выпадение осадков средней интенсивности в течение 37 дней. Несмотря на то, что эти осадки формально не могут рассматриваться как экстремальные, гидрологические последствия (вероятность наводнения, критическое увеличение влажности почвы и т. п.) такого события были намного серьезнее, чем последствия нескольких коротких периодов с экстремальными осадками, разнесенных во времени. Тради-

ционные подходы к изучению экстремальных осадков не позволяют обнаружить описанные эффекты, которые могут быть успешно идентифицированы только при совместном рассмотрении продолжительности периодов с осадками и их интенсивности.

При анализе характеристик дождливых периодов мы имеем дело с периодами, различной продолжительности и их количество, естественно, меньше, чем традиционное число дней с осадками. Для получения более статистически устойчивых оценок длительности периодов с осадками мы рассматри-

Рисунок 7. Средняя продолжительности дождливых периодов с 1966 по 2012 годы для холодного, с октября по март (а) и теплого, с апреля по сентябрь (б) полугодий, в днях.

вали периоды года, условно определяемые, как холодный и теплый сезоны (с октября по март и с апреля по сентябрь, соответственно).

На рис. 7 показано географическое распределение длительности периодов с осадками на территории России. Средняя продолжительность дождливых периодов в России относительно невелика и варьирует от 1.3 до 2-х дней, что примерно на 30 % меньше чем аналогичные оценки для Западной Европы (Zolina et al., 2010, 2013). В холодный период (рис. 7а) длительность

Рисунок 8. Линейные тренды (% в десятилетие) продолжительности дождливых периодов с 1966 по 2012 годы для холодного: с октября по март (а) и теплого: с апреля по сентябрь (б) полугодий. Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 90 % (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента).

периодов с осадками уменьшается как с севера на юг, так и в меридиональном направлении. Так, в Европейской части России (ЕТС) продолжительность дождливых периодов уменьшается от 2.2 дней в северных областях до 1.3 дней на юге ЕТС. Локальное увеличение длительности периодов с осадками до 2 дней отмечается в районе Южного Урала. К востоку от Уральских гор на территории Сибири наблюдаются существенно меньшие длительности периодов с осадками, до 1.2 дней. В летний сезон (рис. 7б) наблюдается

Рисунок 9. Линейные тренды (% в десятилетие) продолжительности сухих периодов с 1966 по 2012 годы холодного полугодия с октября по март (а) и теплого полугодия с апреля по сентябрь (б). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 90% (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента).

меньшая длительность периодов с осадками в тех районах, где зимой она была максимальна и увеличение продолжительности дождливых периодов для районов, где она была минимальна зимой. Так, в ЕТС длительность дождевых периодов летом уменьшается до 1.6–1.8 дней, а в Дальневосточном федеральном округе и на Камчатке, в результате действия муссона, увеличивается до 1.8–2.0 дней.

На рис. 8 приведены линейные тренды длительности периодов с осадками за последние 50 лет. И в холодное, и в теплое полугодия наблюдается существенное увеличение продолжительности периодов с осадками: примерно на 6% в десятилетие зимой и на 5% в десятилетие летом. Наиболее сильный рост длительности периодов с осадками происходит зимой в Центральной России и в Сибирском федеральном округе. В теплый период года эти тенденции сохраняются, однако, величина трендов-несколько уменьшается. Это связано с тем, что в летний период преобладают конвективные осадки, которые имеют обычно меньшую продолжительность по сравнению с фронтальными зимними осадками.

В контексте изменений периодов длительности осадков, интересно рассмотреть совместные изменения в длительности влажных периодов и периодов без осадков или сухих периодов. Если длительное выпадение осадков может привести к возникновению наводнений, то длительные бездождевые периоды способствуют возникновению засух, и маловодий, которые также являются экстремальными гидрометеорологическими явлениями.

На рис. 9 показаны линейные тренды в длительности сухих периодов в холодное и теплое время года. В холодное полугодие (рис. 9а) в центральной и южной частях России наблюдается уменьшение длительности периодов без осадков. В то же время на всей остальной территории происходит увеличение длительности таких периодов на 8–9% в десятилетие. В теплое полугодие (рис. 9б) повсеместно происходит удлинение периодов без осадков в среднем на 9–10% в десятилетие. С одной стороны, такое сильное увеличение продолжительности периодов без осадков существенно увеличивает риск засух на территории России. Однако, как было показано ранее, увеличивается и вероятность наводнений за счет удлинения влажных периодов.

Этот результат требует объяснения и интерпретации. Для простой интерпретации обнаруженного феномена можно представить нитку с бусами (рис. 10), где количество бусинок (дней с осадками) фиксировано. Расстояние

Рисунок 10. Схематический механизм одновременного изменения длительности сухих и влажных периодов на примере бус с фиксированным количеством бусинок. (По результатам Zolina et al., 2013).

между группами бусин является аналогом сухих периодов. Перегруппировка бусинок в более длинные серии без изменения их количества, приводит к одновременному увеличению длительности как влажных, так и засушливых периодов.

Таким образом, на территории России в большом количестве районов отмечается одновременное увеличение длительности, как сухих, так и влажных периодов, что приводит к существенной кластеризации осадков во времени и к одновременному увеличению повторяемости длительных эпизодов без осадков и периодов с дождем.

Заключение

Рассмотренные в статье долгопериодные изменения различных характеристик экстремальных осадков позволили построить достаточно подробное описание их климатической динамики за последние десятилетия на территории России. Обнаружены и количественно оценены линейные тренды в различных характеристиках экстремальных осадков — абсолютной и относительной экстремальности и продолжительности периодов с осадками и без них. При этом были предложены новые, более устойчивые статистические метрики для оценивания относительной экстремальности осадков. В целом на территории России наблюдается увеличение интенсивности экстремальных осадков, что увеличивает риск возникновения наводнений. В то же самое время наблюдается также увеличение длительности периодов без осадков, что указывает на рост возможности возникновения засух. Таким образом, риски, связанные с возникновением опасных гидрологических явлений увеличиваются в последние десятилетия.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на использование предложенных подходов к оцениванию экстремальных осадков для валидации результатов модельных экспериментов с глобальными и региональными климатическими моделями, как для воспроизведения современного климата, так и для расчетов его изменений при различных сценариях антропогенного воздействия на климат.

Работа выполнена при поддержке гранта 14.B25.31.0026 Министерства образования и науки РФ и гранта Российского Научного Фонда (грант 14-17-00700).

Список литературы

Гройсман П. Я., Богданова Е. Г., Алексеев В. А., Черри Ж. Е., Булыгина О. Н. 2014. Влияние погрешности в измерениях снегопадов на суммы атмосферных осадков и их тренды по Северной Евразии. — Лед и снег, т. 54, № 2, с. 29–43, doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-29-43.

Allan R. P., Soden B. J. 2008. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. Science, vol. 321, p. 1481–1484, doi:10.1126/science.1160787.

Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Groisman, P. Ya. 2007. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. *Environ. Res. Lett.*, vol. 2, No. 4, 045020, 7 pp. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045020.

IPCC 2013. *Climate Change 2013: Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Klein Tank A. M.G., Koennen G. P. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *J. Climate*, vol. 16, p. 3665–3680.

Klok E. J., Klein Tank A. M.G. 2009. Undated and extended European data set of daily climate observations. *Int. J. Climatol.*, vol. 29, p. 1182–1191.

Leander L., Buishand T.A., Klein Tank A. M.G. 2014. An alternative index for the contribution of precipitation on very wet days to the total precipitation. *J. Climate*, vol. 27, No 4, p. 1365–1378, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00144.

Lenderink G., van Meijgaard E. 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nat. Geosci.*, 1, p. 511–514.

Trenberth K. E., Dai A., Rasmussen R. M., Parson D. B., 2003. The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 84, p. 1205–1217.

Zolina O., Simmer C., Kapala A., Gulev S. K. 2005. On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14707, doi:10.1029/2005GL023231.

Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Kapala A., Gulev S. K. 2009. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, p. 701–716, doi: 10.1175/2008JHM1055.1.

Zolina O., Simmer C., Gulev S. K., Kollet S. 2010. Changing structure of European precipitation: longer wet periods leading to more abundant rainfalls. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L06704, doi:10.1029/2010GL042468.

Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S. K., Koltermann P. 2013. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J. Climate*, vol. 26, No 6, p. 2022–2047, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00498.1>.

Статья поступила 03.08.2015; после переработки 10.02.2016