

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОБЫТИЙ ОЧЕНЬ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

П.А. Шабанов^{1)*}, *Т.А. Матвеева*^{2)*}, *М.Ю. Маркина*^{1,2)}

¹⁾ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
г. Москва, 117997, Нахимовский пр-т, 36; **pa.shabanov@gmail.com*

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1; **matania.777@gmail.com*

Резюме. В работе проведено исследование случаев сильных атмосферных осадков (экстремальных суточных сумм) в пределах Европейской части России (ЕЧР). Предложено понятие «событие очень сильных осадков» (СОСО), а также ряд характеристик для количественной оценки межгодовых изменений событий очень сильных осадков. СОСО – это суточные суммы осадков, которые превышают пороговое значение, определяемое через квантиль 0.999 соответствующей сезонной выборки дней с осадками. По данным осадкомеров с 107 пунктов стационарных наблюдений в пределах ЕЧР были обнаружены статистически значимые положительные тенденции годовых характеристик СОСО: общего количества СОСО, числа дней с СОСО, числа уникальных пунктов, на которых регистрировались СОСО, и сумм осадков, связанных с СОСО. Полученные оценки тенденций были проверены на устойчивость к начальным данным методом Монте-Карло. Внутри рассматриваемой части ЕЧР выделены районы, которые в большей степени определяют характер межгодовых изменений полного набора данных: это западный (западнее 45° в.д.) и северный регионы (севернее 60° с.ш.). Выявлено, что формирование межгодовой изменчивости характеристик СОСО с 1966 по 1990 гг. проходило на фоне положительных тенденций летних событий очень сильных осадков, а впоследствии – на фоне роста числа зимних событий и увеличения числа дней с очень сильными осадками высокой пространственной связанности, т.е. за счёт дней, когда на ЕЧР фиксировались события очень сильных осадков на нескольких пунктах наблюдений. Такие пространственно-связанные события происходят в основном в осенний и зимний периоды. При этом было обнаружена значимая тенденция к снижению числа осенних дней с СОСО после 1990 года.

Рост среднего количества СОСО в день с СОСО в период 1991-2015 гг. и положительная тенденция средних сумм очень сильных осадков в день с СОСО за весь период 1966-2015 гг. указывают на увеличение числа дней, когда происходило более одного события очень сильных осадков на ЕЧР.

Ключевые слова. Сильные осадки, дни с сильными осадками, климатическая изменчивость, Европейская часть России.

INTER-ANNUAL VARIATIONS OF HEAVY PRECIPITATION EVENTS OVER EUROPEAN RUSSIA

*P.A. Shabanov¹⁾**, *T.A. Matveeva²⁾**, *M.Yu. Markina^{1,2)}*

1) Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovski ave., 117997 Moscow, Russia; **pa.shabanov@gmail.com*

2) Lomonosov Moscow State University,
1, Lenin Gory, 119991 Moscow, Russia; **matania.777@gmail.com*

Summary. A study of heavy precipitation events, i.e., extreme daily totals, over European part of Russia (EPR) is conducted. The term "heavy precipitation event" (HPE) and some characteristics of its long-term variability are proposed. HPE means daily precipitation sum exceeding the threshold determined as percentile 99.9 for the joint seasonal rain-days sample. Statistically significant positive trends in the annual HPE characteristics are found using daily rain gauge data from 107 stations over EPR. This related to the HPEs total number, the number of days with HPEs, the number of unique observation points with recorded HPE, and precipitation sum associated with HPEs. The obtained trends are tested for robustness to input data with the Monte Carlo method. Western (westward of 45° E) and northern regions (north of 60° N) of the area are identified as domains that predominantly determine the character of inter-annual variability within the whole data set. It is found that the formation of inter-annual variability of HPE in 1966-1990 took place against the background of positive trends in summer heavy precipitation events and, afterwards, against the background of increase in the number of winter events and increase in the number of days with HPE of high spatial connectivity. The latter means that HPEs were observed at several stations in the EPR simultaneously. Such spatially cohesive events occur mainly in autumn and winter. A significant tendency to decrease in the number of autumn days with HPE was also detected after 1990. An increase in the average number of HPE per day with HPE during 1991-2015 and positive trend in mean precipitation totals per day with HPE in 1966-2015 indicate the increase in the number of days with more than one heavy precipitation event over EPR.

Keywords. Heavy precipitation, very wet days, climate variability, European part of Russia.

Введение

Изменения режима увлажнения на Европейской части России за последние полвека проходят на фоне глобальных изменений климата. Наблюдаемые положительные тенденции в режиме приземной температуры воздуха как на ЕЧР, так и в целом по России, сопровождаются (Второй оценочный доклад...2014) менее выраженными положительными тенденциями годовых сумм атмосферных осадков. Среди всех разновидностей осадков, случаи с высокими и очень высокими абсолютными значениями (мм), играют важную роль для оценки природных и отраслевых рисков. Для региона, где по данным

Росстата на 1 января 2017 года проживает более двух третей населения России, мониторинг и понимание динамики событий очень сильных осадков, как опасных погодных явлений, являются особенно актуальными с экономической и социальной точек зрения. Вне зависимости от выбранного критерия выделения, направленные тенденции сильных и очень сильных осадков являются индикатором изменения регионального климата, что представляет большой интерес в областях изучения региональных проявлений глобальных изменений климата. Флуктуации атмосферных процессов синоптического и более крупных пространственных масштабов (в первую очередь изменение характеристик циклонов и антициклонов, а также процессов блокирования зонального переноса) формируют на региональном масштабе изменчивость режима увлажнения, в том числе и сильных осадков. Чтобы описать взаимосвязь атмосферных процессов с сильными осадками, необходимо, во-первых, определить последовательность таких событий и оценить межгодовые изменения их некоторых характеристик, а во-вторых, выделить пространственно-временные особенности динамики таких событий на рассматриваемой территории.

Анализ межгодовой изменчивости сильных осадков на территории России не является слабо освещённой областью, скорее наоборот: за доступный период наблюдений анализ проводился на основе разных наборов данных, за разные периоды и используя разные процедуры для выделения «сильных осадков» (Богданова и др., 2010а; Groisman et al., 2005; Zolina et al., 2005; Zolina et al., 2009). Высокая изменчивость от года к году значений сильных осадков и производных от них характеристик, проявление мощных событий осадков в последнее десятилетие, небольшая длина выборок с сильными осадками и различные процедуры определения – всё это существенно затрудняет сопоставление результатов исследований. В целом же в предыдущих исследованиях, относящихся к данному региону за сопоставимый временной период, отмечается непропорциональное увеличение сумм сильных осадков к средним значениям на ЕЧР (Groisman et al., 2005), общий рост числа дней с сильными осадками западнее 80° в.д., особенно вдоль западной границы России с Белоруссией (Богданова и др., 2010а). Максимумы роста годового числа случаев значительных суточных осадков (>10 мм сут⁻¹) наблюдаются на севере и западе ЕЧР; при этом летом повторяемость значительных осадков убывает на большей части ЕЧР, а рост годового числа случаев здесь определяется весенним и осенним сезонами (Второй оценочный доклад... 2014).

При этом изменения режима очень сильных осадков именно на Европейской территории России не рассматривалось. В зарубежной литературе «сильные осадки» называют «heavy/very heavy/ extreme precipitation», «intense precipitation» или «very wet days» (Groisman et al., 2001; Zolina et al., 2009). Такое определение обычно вводится на суточном временном масштабе, так как именно данные такого разрешения широко доступны и имеют длительные ряды наблюдений. Помимо «очень сильных осадков» существуют и другие определения, выделяющие случаи осадков с большими абсолютными значениями. Так в практике гидрометеорологической службы РФ используется система классификации опасных явлений погоды (ОЯП). В табл. 1 представ-

лены некоторые определения из перечня ОЯП, наиболее близкие по смыслу к рассматриваемым случаям.

Таблица 1. Перечень некоторых опасных природных метеорологических явлений согласно (РД 52.88.699-2008)

Название ОЯП	Характеристики и критерии или определение ОЯ
А.1.5 Сильный ливень	Сильный ливневый дождь с количеством выпавших осадков ≥ 30 мм за период не более 1 ч
А.1.6 Очень сильный дождь (очень сильный дождь со снегом, очень сильный мокрый снег, очень сильный снег с дождем)	Значительные жидкие или смешанные осадки (дождь, ливневый дождь, дождь со снегом, мокрый снег) с количеством выпавших осадков не менее 50 мм (в ливнеопасных (селеопасных) горных районах – 30 мм) за период времени ≤ 12 ч
А.1.7 Очень сильный снег	Значительные твёрдые осадки (снег, ливневый снег) с количеством выпавших осадков не менее 20 мм за период времени ≤ 12 ч
А.1.8 Продолжительный сильный дождь	Дождь с короткими перерывами (не более 1 ч) с количеством осадков не менее 100 мм (в ливнеопасных районах с количеством осадков не менее 60 мм) за период времени более 12 ч, но менее 48 ч, или 120 мм за период времени более 2 суток

Приведённые примеры ОЯП требуют высокого временного разрешения (минуты и часы). При исследовании долгопериодных межгодовых изменений использование ОЯП затруднено, так как наиболее широко доступны данные суточного (суточные суммы) и более грубого разрешения (месяцы, годы и т.д.). В (Богданова и др., 2010а) справедливо отмечается некоторое затруднение при использовании понятия "сильный дождь", который характеризует скорее интенсивность выпадающих осадков, а не их общее суточное количество. Использование таких определений как «сильные осадки» и «интенсивные осадки» требует уточнения, что именно подразумевается, во избежание путаницы. Также в исследованиях режима атмосферных осадков больших абсолютных суточных сумм часто встречается термин «экстремальные осадки». Единого определения «экстремальности осадков» нет, в исследованиях используются различные подходы к определению экстремальных осадков (Золина, Булыгина, 2016; Groisman et al., 2001). Часто выбор ведущего признака для выделения экстремальных значений определяется спецификой задачи исследования. Так для Европейской территории России, где в среднем выпадает от 350 до 850 мм осадков в год, в задачах мониторинга изменений гидрологического режима более предпочтительным выглядит метод квантильных пороговых значений, чем метод единого порогового значения (например, более 30 мм/сут). Метод квантильных пороговых значений подразумевает расчёт локальных пороговых значений для каждого временного ряда пункта наблюдения на основе некоторого выбранного квантиля (перцентилия). Сам пороговый квантиль определяется либо по данным эмпирической функции распределения, либо исходя из подобранного для данных наблюдений теоретического распределения.

СОСО – событие очень сильных осадков

Для выделения самых сильных случаев осадков, т.е. имеющих самые высокие абсолютные значения сумм, с помощью квантильных пороговых значений широко используются квантили 0.90, 0.95 и 0.99 (Groisman et al., 2001; Бардин, Платова, 2013). Вне зависимости от выбранного уровня вероятности, существует проблема изменения пороговых значений осадков на территории России. Особенно данная проблема актуальна для северных районов ЕЧР в зимний и летний сезоны (Бардин, Платова, 2013). Так как абсолютные значения суточных сумм осадков и количество дней с осадками существенно изменяется внутри года, то при определении пороговых значений рассматривались сезонные выборки внутри календарных сезонов, т.е. для каждого сезона в каждом пункте наблюдений определялось своё пороговое значение. В качестве порогового значения для выделения СОСО использовался высокий квантиль 0.999. Такое пороговое значение с одной стороны будет выделять лишь самые сильные события с точки зрения абсолютных значений суточных сумм осадков, т.е. именно такие события, которые заслуживают пристального изучения, а с другой стороны сильно сократит выборку значений.

Во избежание путаницы при использовании понятия «сильные осадки» предлагается использовать следующее определение.

Пусть «событие очень сильных осадков» (СОСО) – это событие, определённое на суточном временном масштабе, произошедшее в некотором пункте наблюдений, которому соответствует суточная измеренная сумма атмосферных осадков, превышающая соответствующее сезонное пороговое значение, определённое через квантиль 0.999. Тогда «день с СОСО» – это календарные сутки, в пределах которых СОСО отмечались в N пунктах наблюдений ($N > 0$) рассматриваемой области. Такие дни и события формируют Календарь СОСО для выбранной территории.

Данные и методы

Для исследования многолетнего режима событий больших суточных сумм атмосферных осадков на Европейской части России (далее ЕЧР) в пределах района 30–60° в.д. и 50–70° с.ш. из архива о суточных суммах ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., Описание массива данных...) были отобраны 107 пунктов наблюдений по которым имелись наборы данных надлежащего качества (не менее 97% корректных значений). Так как выбранный регион является квазиоднородным с точки зрения режима увлажнения, для определения сезонных порогов самых сильных осадков использовался квантиль 0.999 (параметр q_{s1999}). Сезонные пороговые значения для пунктов наблюдений определялись по объединённым за период 1966–2015 гг. сезонным подвыборкам, сформированным из дней с осадками («rain-days») согласно рекомендациям (Nicholls and Murray, 1999). Те суточные суммы, которые превышали или были равны соответствующим значениям q_{s1999} , формировали ряд СОСО в данном пункте наблюдения. При использовании квантильного поро-

гового подхода предполагалось, что значения внутри сезонных выборок принадлежат одной генеральной совокупности. На этапе исследования методики было решено, что отнесение событий СОСО к разным распределениям и раздельное их рассмотрение нецелесообразно (напр., Кислов и др., 2017). Межгодовые изменения событий очень сильных осадков рассматривались за период с 1966 по 2015 г. Хотя данные наблюдений из архива ВНИИГМИ-МЦД охватывают больший период, только с 1966 г. данные наблюдений за осадками могут считаться методологически однородными (Второй оценочный доклад ..., 2014).

По данным наблюдений за измеренными суточными суммами осадков в пределах ЕЧР со 107 метеорологических станций был составлен Календарь СОСО в который вошли все эпизоды СОСО, отмеченные в период с 1966-2015 гг. Согласно полученному Календарю определено 1174 СОСО. Из них выделяется ~915 дней с СОСО, т.е. дней, когда хотя бы в одном пункте наблюдений в пределах ЕЧР регистрировалось превышение порогового значения. Наблюдение СОСО на нескольких пунктах наблюдений (более 1 СОСО) в одни сутки в пределах рассматриваемого района отмечено в 18% случаев. На два СОСО за одни сутки приходится 12% (СОСО-2), на три – 3.6%, на четыре – 1.4%. На каждую из остальных градаций приходится менее 0.4%. Максимальное число пунктов, в которых было отмечено СОСО на ЕЧР – 9 (7 октября 2003 г.). Стоит отметить, что среди случаев пространственно связанных СОСО (т.е. тех дней, когда СОСО отмечались сразу на нескольких пунктах наблюдений) преобладают зимние события: 38.6%, 30.2%, 21.5% и 9.7% для зимних, осенних, весенних и летних событий соответственно. В том числе и самые мощные по количеству одновременно охваченных пунктов случаями СОСО происходили в зимний и осенний периоды.

Результаты

Среднемноголетний режим событий сильных осадков на Европейской территории России

Среднемноголетнее распределение пороговых значений СОСО в пределах рассмотренного района ЕЧР имеет существенные различия как по форме, так и по абсолютным значениям в зависимости от рассматриваемого сезона (рис. 1).

Так переходные сезоны имеют практически одинаковую область изменений пороговых значений: от 15 до 55 мм сут⁻¹ с медианными значениями 29.6 и 32.6 мм сут⁻¹ для весеннего и осеннего сезонов соответственно. Зимние же события сильных осадков имеют меньшие по абсолютным значениям пороговые значения (от 5 до 30 мм сут⁻¹) с медианной оценкой 17.4 мм сут⁻¹. Наибольший размах имеет летние события: от 30 до 90 мм сут⁻¹ с медианной оценкой 57.2 мм сут⁻¹. Близкие абсолютные значения (20-30 мм сут⁻¹) часто используется для мониторинга большого количества осадков: например, индекс R 20mm из перечня индикаторов климатических изменений группы экспертов ETCCDMI (Peterson et al. Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071), a

также ОЯ А.1.5 (сильный ливень) из перечня ОЯ Росгидромета (табл. 1). При этом стоит отметить, что в полученном Календаре СОСО соотношение сезонных событий не одинаковое. Это связано с разным количеством дней с осадками в сезонных подвыборках (не включая случаи следов осадков, т.е. осадков самой малой интенсивности). Наибольшее число дней с осадками (и, соответственно, число СОСО) наблюдается зимой, а минимум – летом. Для 107 метеорологических станций на ЕЧР больше всего событий СОСО приходится на зиму 29%, далее на осень 26%, затем на летний сезон 23% и примерно столько же на весну – 22%. Несмотря на то, что в летний тёплый период осадки выпадают «интенсивнее» на суточном масштабе времени по сравнению с другими сезонами, не все случаи очень сильных летних осадков (например, более 30 мм сут⁻¹) попадают в категорию СОСО согласно данному определению. В пространственном отношении ярко выраженных закономерностей распределения сезонных значений qsi999 не выявлено.

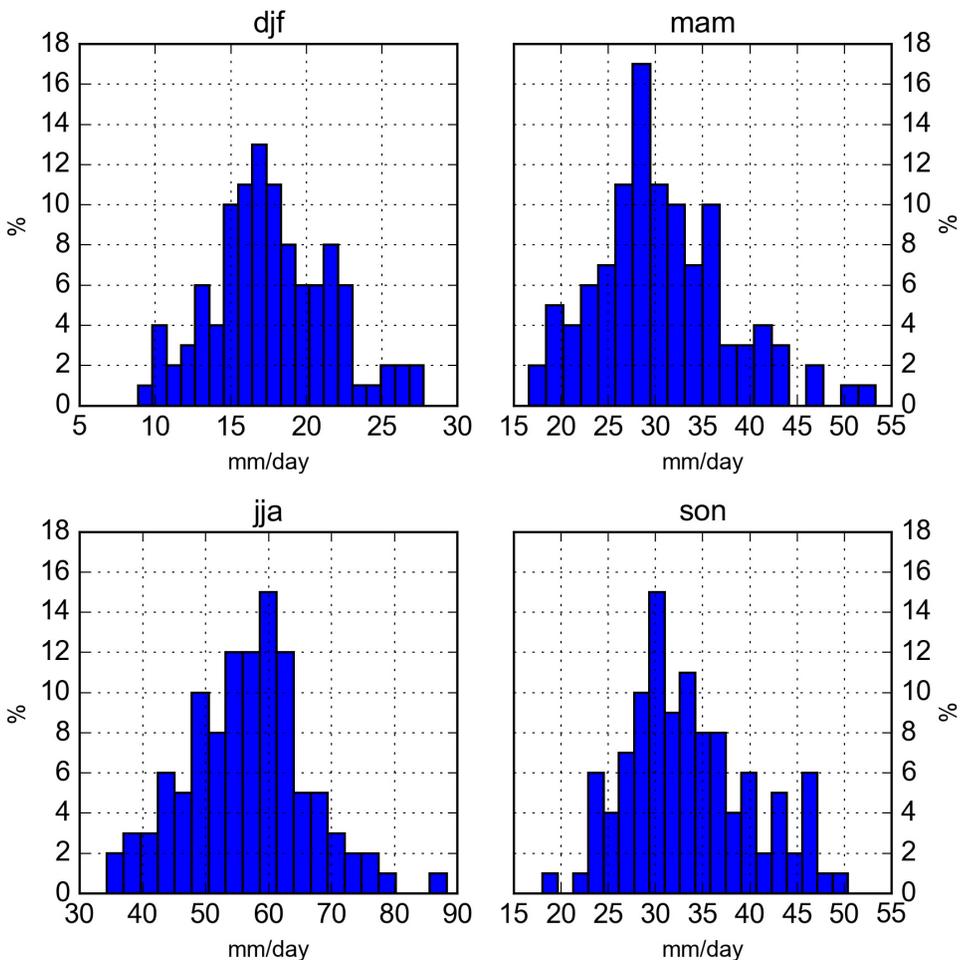


Рисунок 1. Сезонные гистограммы пороговых значений qsi999 [мм сут⁻¹]: djf – зима; mam – весна, jja – лето, son – осень.

Тенденции пороговых значений для определения СОСО

В (Nicholls and Murray, 1999) в качестве индикатора изменений сильных осадков рекомендуется оценивать динамику высоких квантилей по сезонным выборкам дней с осадками, т.е. пороговых значений. Направленные изменения такого индикатора свидетельствует о существенном изменении оценочных параметров функции распределения. Так в работе (Бардин, Платова, 2013) приводятся оценки тенденций сезонных пороговых значений для всей совокупности значений суточных осадков P_{95} и только для дней с осадками Pr_{95} , которые показывают статистически значимые (α -уровень 0.05) изменения сезонных порогов преимущественно в северных районах ЕЧР. Подобная процедура была выполнена для параметра q_{si999} по сезонным выборкам для дней с осадками. Результаты во многом совпадают с полученными в (Бардин, Платова, 2013) оценками: больше всего направленных изменений сезонных пороговых значений q_{si999} регистрируется в зимний период в северо-западных районах, статистически значимые изменения порогов регистрируются не более чем на 10% пунктов наблюдений, за исключением зимы – там доля значимых тенденций достигает 16%.

Динамика СОСО на ЕЧР в период 1966-2015 гг.

Динамику СОСО в пределах ЕЧР предлагается рассматривать в виде совокупности нескольких годовых характеристик, а именно: общее количество СОСО (I), число дней с СОСО (II), число уникальных пунктов наблюдений, на которых отмечалось хотя бы одно СОСО (III), сумма осадков, приуроченных к СОСО (IV).

Для оценки статистической значимости направленных изменений (трендов) предложенных характеристик использовались t -тест Стьюдента и тест Манна-Кендалла (Kendall, 1975; Mann, 1945). Достаточным порогом статистической значимости обоих тестов считался уровень $\alpha=0.05$. Если один тест показывал приемлемую статистическую значимость, а второй был достаточно близок, то такие тенденции считались выраженными. За период 1966-2015 гг. межгодовые изменения значений 4 характеристик СОСО имеют ярко выраженную статистически значимую (α -уровень 0.01 для I, III, IV и 0.05 для II) положительную тенденцию (рис. 2). Коэффициент детерминации составил 8-17%.

Приведённая динамика характеристик СОСО для участка ЕЧР позволяют говорить об увеличении за 50 лет не только количества дней с очень сильными осадками и ассоциированного с ними количества влаги, но и вовлечении большего числа пунктов наблюдений. За 50-летний период общее число выделяемых СОСО увеличилось более чем на 45% в год. При этом отдельные пункты наблюдений не показывают синхронных значимых изменений: короткие выборки очень сильных осадков (около 11 значений), большой диапазон значений в зависимости от сезона, отсутствие синхронных изменений в соседних пунктах наблюдений, слабая статистическая значимость получаемых оценок тенденций – всё это трудности, с которыми приходится сталки-

ваться при работе с очень сильными осадками в отдельном пункте наблюдений (Zolina et al., 2009). Пространственные индексы I-IV, полученные как совокупность локальных событий для разных пунктов наблюдений, для ЕЧР имеют отчётливые положительные тенденции, ведущие к увеличению числа случаев очень сильных осадков. Временные ряды всех четырёх приведённых характеристик имеют высокую взаимную корреляцию (0.84-0.96).

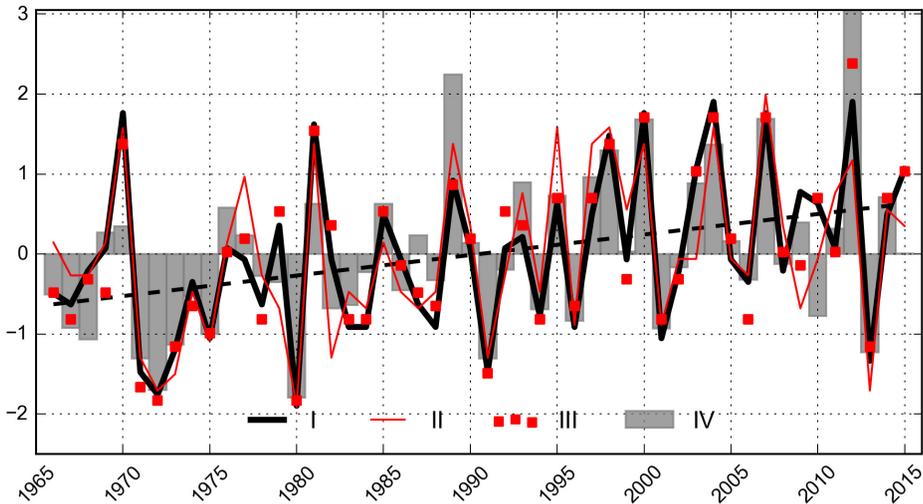


Рисунок 2. Межгодовые изменения 4 характеристик COCO (нормированные аномалии) I – количество COCO; II – число дней с COCO; III – число уникальных пунктов наблюдений, на которых отмечалось хотя бы одно COCO; IV – сумма осадков, приуроченных к COCO. Пунктир – линия тренда для II

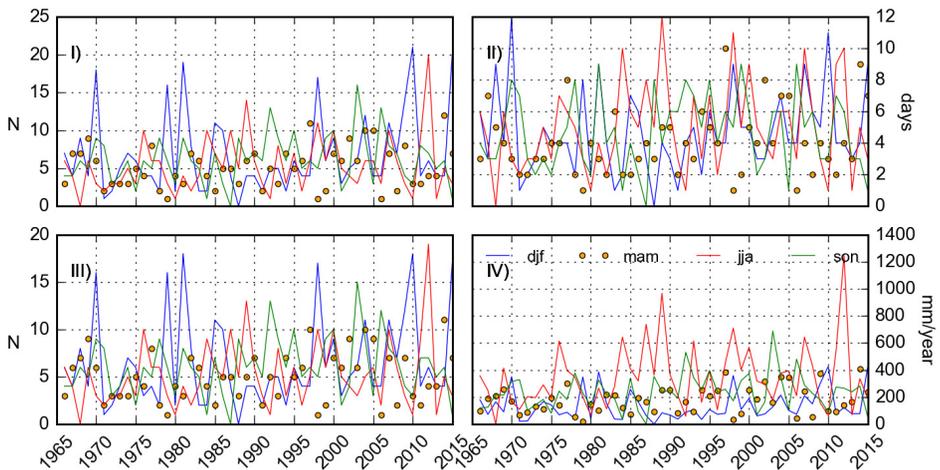


Рисунок 3. Сезонные (djf – зима; mam – весна, jja – лето, son – осень) временные ряды 4 характеристик COCO (I-IV) I – количество COCO; II – число дней с COCO; III – число уникальных пунктов наблюдений, на которых отмечалось хотя бы одно COCO; IV – сумма осадков, приуроченных к COCO. Пунктир – линия тренда для I

Сезонные характеристики СОСО

Общий годовой ход параметров I-IV складывается из совместной динамики сезонных событий (рис. 3). Хотя тенденции сезонных характеристик СОСО за весь период не имеют приемлемой статистической значимости, однако в первой половине периода до 1990 года наблюдался рост летних характеристик СОСО (α -уровень 0.05) на фоне слабо выраженных положительных тенденций других сезонов. С начала 1990-ых можно выделить слабый рост зимних характеристик (α -уровень 0.1), а также статистически приемлемо (α -уровень 0.05) выделяется уменьшение числа дней с СОСО в осенний период.

Среди 4 параметров наибольшая линейная связь между годовым и сезонными значениями проявляется для параметров I-III в зимний и летний сезоны (коэффициенты корреляции Пирсона 0.48-0.67), а для IV – в летний сезон (коэффициент корреляции Пирсона 0.78).

Для сумм осадков, связанных с СОСО (IV), доминирующую роль играет летний сезон. По абсолютным значениям вклад летних сумм в годовое значение в отдельные годы может превосходить остальные в несколько раз. Например, 2012 г. или период 1984-1989 гг. Однако летние суммы осадков, ассоциированные с СОСО, от года к году очень сильно изменяются: так за период с 2008 по 2012 гг. летние суммы СОСО изменялись от 67 мм до 1250 мм. Тем не менее начиная с 1990-ых годовые суммы, ассоциированные с СОСО, в межгодовой динамике большинство значений представляют собой положительные аномалии. Это обусловлено компенсирующим влиянием других сезонов: так осенние СОСО не раз выравнивали годовое значение до средних значений и положительных аномалии во время низких летних показателей: например, 1992 и 2003 годы. Зимние события 2010 и 2015, проходившие на фоне низких глубоких отрицательных аномалий осенних и летних событий, также формировали в итоге положительные аномалии в межгодовом ходе параметра IV. Весенние суммы в 1997, 2002, 2004, 2005, 2009 и 2014 также имели положительные аномалии, вносящие до 40% в годовые значения. Две трети положительных аномалий годовых значений сумм осадков, ассоциированных с СОСО (IV), и лишь 38% отрицательных произошли после 1990 года. Таким образом положительные тенденции зимних сумм СОСО с начала 1990-ых на фоне увеличившейся амплитуды значений переходных сезонов, компенсирующих летние процессы, способствовали формированию стойкой положительной тенденции межгодовой изменчивости сумм осадков, ассоциированных с СОСО.

Так как в поведении параметров I-III нет доминирующего сезона, как в случае с ассоциированными с СОСО суммами осадков, выявить сезонные взаимосвязи оказывается заметно сложнее. Стоит отметить, что динамика I и III очень схожа, поэтому их можно рассматривать вместе.

Больше всего сезонных СОСО (I) приходится на зимний период, а самое меньшее – на весенний. Также распределены и абсолютные значения: чаще других большее количество сезонных СОСО случается зимой. Число дней с

СОСО распределено более равномерно между сезонами, здесь значения более сопоставимы. В зимний период отмечается наибольшая доля дней, когда на ЕЧР регистрировалось более 1 СОСО, в летний же период – их минимальное число: 24%, 18%, 7% и 23% в зимний, весенний, летний и осенний сезоны соответственно.

Параметр числа дней с событиями очень сильных осадков менее подвержен изменениям, так как на нём не сказывается число пространственно-связанных событий (от 2 до 9 за сутки по данным Календаря), имеющим положительную тенденцию, что в свою очередь приводит к увеличению сезонного количества СОСО. Соответственно, как это не удивительно, летний сезон занимает лидирующее место по числу дней с СОСО – летом реже происходят пространственно-связные события (согласно выбранной методике выделения СОСО). В общем же виде большее число сезонных дней с СОСО приводит к большому количеству СОСО и связанной с этим событиями суммами осадков.

Устойчивость к выбору начальных данных

Для проверки полученных оценок тенденций характеристик СОСО было проведено тестирование методом Монте Карло на «ресэмплинг», т.е. на устойчивость результатов к набору исходных данных. Проверялась гипотеза о репрезентативности использованного набор данных для выбранного района ЕЧР.

Методика тестирования включала в себя многократное ($N=1000$) формирование псевдослучайной выборки из данных пунктов наблюдений размером от 3/4 до полной длины (80-107 пунктов). По каждой такой выборке с помощью Календаря СОСО формировались годовые временные ряды приведённых выше характеристик СОСО (I-IV) и рассчитывалась значимость их тенденций с помощью *t*-теста Стьюдента и теста Манна-Кендалла (Kendall, 1975; Mann, 1945). Так как метод линейной регрессии сильно подвержен влиянию «выбросов», т.е. далеко отклоняющихся от среднего значений, а также от начала и конца выбранного периода, то оценки тенденций обоими методами проводились с использованием «jackknife» методики.

Процедура «jackknife» заключалась в последовательном исключении каждого элемента временного ряда и расчёте оценок по оставшимся значениям. В результате получался набор оценок для каждой характеристики СОСО. Полученные массивы для двух методов оценки тенденции и четырёх временных рядов характеристик СОСО (I-IV) анализировались в виде диаграмм размаха («ящиков с усами») или средних значений (рис. 4).

Составляющие диаграмм («ящик» и «усы»), построенные по всем 107 исходным пунктам наблюдений, укладываются в уровень $\alpha=0.015$, кроме II (число дней с СОСО в год), где медианные оценки близки к 0.05 (рис. 4 слева). Анализ динамики характеристик СОСО для всей рассматриваемой области Европейской части России, а также проверка устойчивости полученных оценок тенденций к «ресэмплингу» позволяет говорить о статистически значимом увеличении годовых значений количества событий очень сильных осадков, числа пунктов, где регистрировались СОСО, а также сумм осадков, связанных с СОСО.

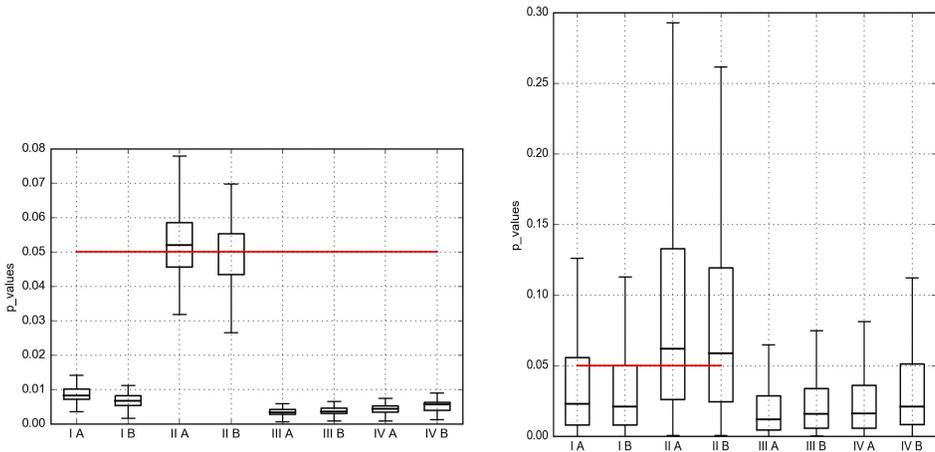


Рисунок 4. Диаграммы размаха 4 характеристики СОСО (I-IV) по исходной выборке (слева) и по методу Монте-Карло (справа)
 Обозначения рядом с номером параметра «А» – оценки t-теста Стьюдента, «В» – оценки теста Манна-Кендалла

Региональные особенности формирования СОСО

В то же время результаты теста Монте-Карло показывают, что недоучёт некоторых исходных данных приводит к иным оценкам тенденций характеристик СОСО (рис. 4 справа). Общий результат динамики характеристик СОСО в пределах ЕЧР складывается за счёт разного поведения составляющих исходный набор данных. Для выделения пространственных особенностей межгодовых изменений событий очень сильных осадков в пределах ЕЧР, а также для определения вкладов различных территорий в общую картину направленных изменений, область исследования, ограниченная 30-60° в.д. и 50-70° с.ш., была поделена параллелью 60° с.ш. на два крупных района: «Северный» и «Центральный». В Центральном районе были выделены «Западный» (западнее 45° в.д.) и «Восточный» (восточнее 45° в.д.) районы. В каждый район попало приблизительно равное число пунктов наблюдений: 38 в «Западный», 36 в «Северный», 33 в «Восточный». При этом соотношение СОСО распределилось следующим образом: 392, 448 и 334 соответственно. Принятое субъективное деление на 3 района грубо совпадает с границами федеральных округов РФ: Центральным (Западный район), Северо-Западным (Северный район) и Приволжским (Восточный районы).

По полученным оценкам регион «Восток» не имеет выраженных тенденций, тогда как и «Запад» и «Север» по трём параметрам имеет статистически значимые (α -уровень 0.05) положительные изменения в период 1966-2015 гг. Объединённые выборки регионов «Запад» и «Север» показывают статистически очень высоко значимые оценки для положительной динамики всех характеристик СОСО (α -уровень 0.01), причём даже для параметра II – числа дней с СОСО. По объединённым данным после 1990 г. в зимний период наблюдается статистически значимое (α -уровень 0.05) увеличение всех характеристик

СОСО, а также, как и в случае общей выборки, уменьшение числа дней с СОСО в осенний сезон.

Таким образом, рассмотренная область ЕЧР в разных районах имеет собственные особенности поведения временных рядов характеристик СОСО. Характерным примером является 2012, в котором рекордные летние события очень сильных осадков чётко прослеживаются по выборке «Север», но не выражены в районе «Восток». Основной вклад в общую для ЕЧР динамику характеристик СОСО обеспечивают события, происходившие западнее 45° в.д. и севернее 60° с.ш., т.е. в западных и северных районах. Предполагается, что изменения атмосферной циркуляции (циклонической активности и смещения траекторий их перемещений в первую очередь) в период 1966-2015 гг. и связанные с этим флуктуации термического режима и режима увлажнения территории, больше всего затрагивает именно северные и западные районы Европейской территории России.

Формирование межгодовых изменений СОСО

Годовые значения характеристик СОСО на ЕЧР складываются не только из сезонных показателей, но также из событий разной степени пространственно-временной связности. Так большинство СОСО – это событие, зарегистрированное в одном пункте на ЕЧР в сутки. В среднем на ЕЧР в год отмечается около 15 дней с 1 СОСО, количество таких единичных событий колеблется от 10 до 25 дней год^{-1} и не имеет выраженной тенденции за последние полвека (рис. 5). Однако наблюдается положительная статистически значимая тенденция (α -уровень 0.01) числа дней, когда в сутки регистрировалось более одного СОСО (рис. 5 линия N2+), и общего количества таких пространственно-связанных случаев (рис. 5 линия A-N1): так за 50 лет количество пространственно-связанных событий увеличилось более чем на 40% с в среднем с 5 событий до 10 событий.

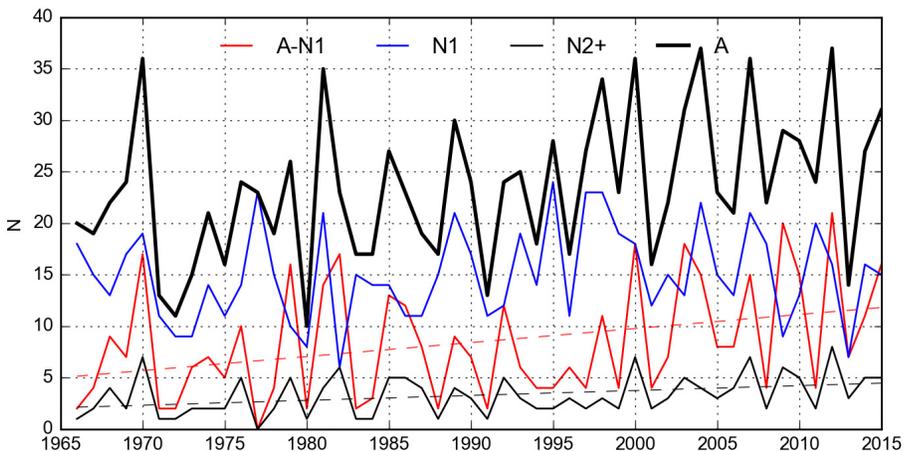


Рисунок 5. Динамика числа СОСО разной пространственной связности

A – годовое количество СОСО; N1 – число дней, когда отмечалось одно СОСО на ЕЧР; A-N1 – разность между A и N1; N2+ – число дней, когда отмечалось более одного события СОСО на ЕЧР. Пунктиром обозначены статистически значимые (α -уровень 0.01) линейные тренды

Оценки изменений среднегодовых сумм осадков, связанных с СОСО, на один случай СОСО в год (K , отношение IV/I) и среднегодовых сумм осадков, связанных с СОСО, в день с СОСО (S , отношение IV/II) с 1966 по 1999 гг. имеют значимую положительную тенденцию (α -уровень 0.01 и 0.02 соответственно), а с 1990 по 2015 гг. изменяются статистически незначимо (рис. 6). Противоположно себя ведёт индекс Z среднего количества СОСО в день с СОСО: незначимые изменения до 1990 г. сменились положительной тенденцией (α -уровень 0.05), что прямо указывает на увеличение числа дней, когда происходило более одного события очень сильных осадков на ЕЧР.

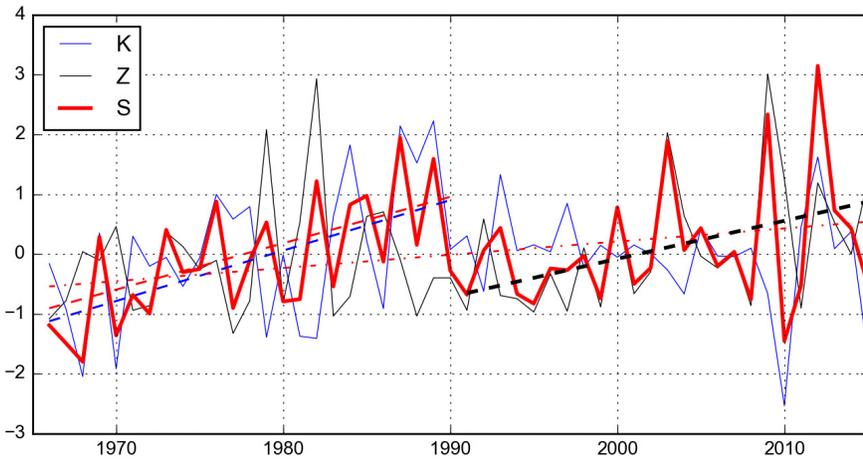


Рисунок 6. Нормированные аномалии: S —отношение сумм осадков, ассоциированных с СОСО, к числу дней с СОСО (IV/II)

Z —среднее количество СОСО в день с СОСО (I/II); K —отношение суммы осадков, ассоциированных с СОСО, к количеству СОСО. Штриховыми линиями показаны статистически значимые (α -уровень 0.05) линии трендов соответствующих периодов

Подвыборки «Север» и «Запад» по отдельности и объединённые показывают подобные тенденции изменений индексов S , K и Z , тогда как по данным района «Восток» можно лишь говорить о положительной тенденции S до 1990 года, а во второй половине периода тенденция (незначимая) среднегодового числа СОСО в день с СОСО (Z) имеет отрицательный знак.

В итоге за весь период только индекс S имеет значимые направленные положительные тенденции, т.е. растёт количество осадков при слабо выраженной изменчивости дней с СОСО: на это указывают более слабые статистические оценки тенденций характеристики дней с СОСО (рис. 4). Такое поведение говорит о больших изменениях количества СОСО и соответствующих суммах осадков при меньшей изменчивости дней с СОСО. Положительная тенденция индекса S до 1990 года обеспечивалась за счёт летних событий, приносящих большие суммы осадков, а после – с ростом числа дней с несколькими СОСО на ЕЧР, а также сокращением числа дней с осенними СОСО.

В пространственном отношении дни с несколькими СОСО на ЕЧР в сутки (> 1) отмечались по всем пунктам наблюдений, т.е. хотя бы один раз из 10-11

дней с СОСО в пункте наблюдений на каком-то другом пункте наблюдений в пределах ЕЧР тоже фиксировалось СОСО. Самые же крупные такие события (более 3 СОСО на ЕЧР в сутки) происходили преимущественно в северо-западных и юго-западных районах (рис. 6). Причём в период 1966-1990 их число заметно меньше на западе и северо-западе ЕЧР, чем в аналогичный 1991-2015 гг. Само число таких пространственно-связных событий стало заметно больше: число дней, когда регистрировалось строго более 3 СОСО, увеличилось всего с 9 до 12 дней, а число СОСО при этом увеличилось с 39 до 64.

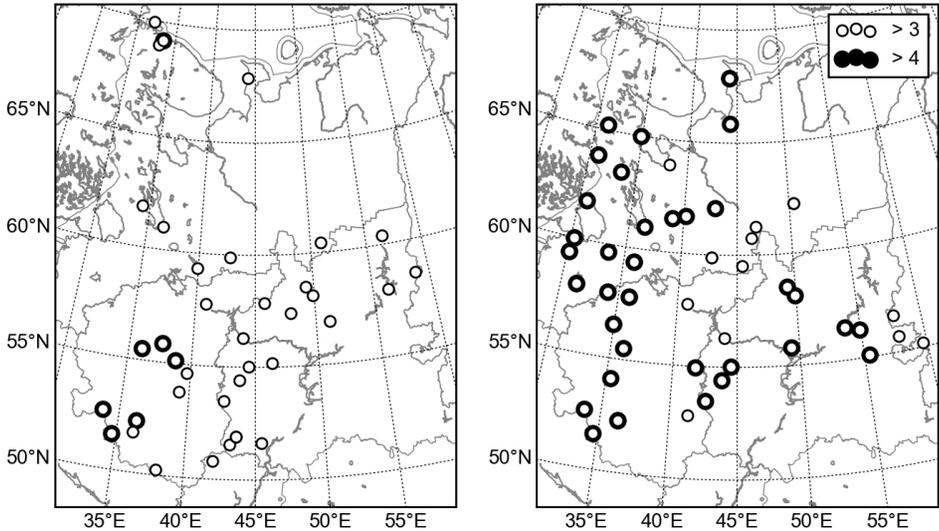


Рисунок 7. Распределение по ЕЧР пунктов наблюдений, вовлечённых в пространственно-связанные события очень сильных осадков более 3 и 4 СОСО в один день за период 1966-1990 гг. (слева) и 1991-2015 гг. (справа)

Дискуссия

Количество событий очень сильных осадков на Европейской части России за последние 50 лет стало объективно больше. Большая часть таких событий приходится на северные районы ЕЧР, где количество твёрдых осадков играет существенную роль в годовых суммах.

Помимо рассмотренного в работе набора данных об осадках существует ещё как минимум один массив, подобный по пространственно-временному разрешению: массив скорректированных сумм осадков, подготовленный специалистами ГГО, ГГИ и ВНИИГМИ-МЦД (Богданова, Гаврилова 2008; Богданова и др., 2010б; Булыгина и др.: Описание массива данных...). Согласно (Гройсман и др., 2014) два массива данных имеют существенные различия по абсолютным значениям суточных сумм, положительные поправки к годовым суммам осадков могут достигать 30-40%. Причём наибольшие поправки согласно предложенной методике (Богданова и др., 2010б), будут иметь случаи осадков с приуроченными большими скоростями ветра, что соответствует метелям и обильным снегопадам, очень сильному снегу среди ОЯП. В случае использования массива скорректированных сумм осад-

ков для 107 пунктов наблюдений, рассмотренных в данной работе, результаты могут быть существенно скорректированы. В первую очередь в связи с изменением количества зимних осадков, приуроченных к СОСО, и смене преобладающей тенденции зимних событий.

Заключение

В исследовании проанализированы межгодовые изменения ряда характеристик, описывающих особенности пространственно-временной структуры событий очень сильных осадков (СОСО) на Европейской части России в пределах 30-60° в.д. и 50-70° с.ш. за период однородных наблюдений 1966-2015 гг.

По данным измеренных суточных сумм атмосферных осадков определено понятие «событие очень сильных осадков» (СОСО) на основе порогового критерия q_{si999} – квантиля 0.999 для сезонных выборок дней с осадками.

На основе предложенной методики по данным наблюдений 107 метеорологических станций, расположенных на Европейской части России, составлен Календарь СОСО для ЕЧР.

Большая часть СОСО – это единичные события в сутки в пределах ЕЧР (82 %), число которых колеблется относительно одного уровня в 15 событий в год в период 1966-2015 гг. Остальные 18% – это пространственно-связные события, т.е. дни, когда СОСО отмечались сразу на нескольких пунктах наблюдений. Межгодовая изменчивость таких событий (как числа дней, так и общего за эти дни количества СОСО) имеет значимую положительную тенденцию, а начиная с 1990-ых годов в структуре пространственно-связных событий появляются всё более мощные по числу вовлекаемых пунктов наблюдений события. Так при сравнении двух равнозначных по длине периодов 1966-1990 и 1991-2015 гг. число дней, когда регистрировалось строго более 3 СОСО, увеличилось на 30% (с 9 до 12 дней), а число СОСО при этом увеличилось более чем на 60% (с 39 до 64 случаев). За 50 лет количество пространственно-связанных событий увеличилось более чем на 40% в среднем с 5 событий до 10 событий в год.

Среди случаев пространственно-связных СОСО (дни) преобладают зимние и осенние события.

Межгодовые изменения 4 характеристик СОСО (I-IV) за период 1966-2015 гг. имеют статистически значимые положительные тенденции. Также за весь период имеют значимые положительные тенденции и средние суммы очень сильных осадков в дни с СОСО. Полученные результаты были проверены на устойчивость к выбору начального набора данных с помощью метода Монте-Карло, который показал, что полученные тенденции устойчивы к выбору начальных данных, и их можно считать значимыми на α -уровня 0.05. Рост также подтверждается значимыми тенденциями средней суммы очень сильных осадков в дни с СОСО за 50 лет, особенно сильный в период с 1966 по 1990. После 1990 года уверенно наблюдается рост среднего количества СОСО в день на ЕЧР, что указывает на увеличение числа дней, когда происхо-

дило более одного события очень сильных осадков на ЕЧР (пространственно-связанных СОСО).

Внутри всего временного периода по данным сезонных характеристик отчётливо выделяется два равнозначных периода: до 1990 года и после. Первый характеризуется значимым увеличением летних характеристик СОСО, а второй – ростом характеристик зимних событий и снижением числа дней с СОСО в осенний период.

Внутри рассмотренной территории ЕЧР было выявлено, что подобную общей динамике СОСО, обеспечивают в совокупности два из трёх выделенных района: «Северный» (севернее 60° с.ш.) и «Западный» (западнее 45° в.д.). Сравнение наиболее мощных пространственно-связных событий очень сильных осадков за периоды 1966-1990 гг. и 1991-2015 гг. указывает, что основной прирост наблюдаемых событий очень сильных осадков происходит именно в западных и северных районах.

Благодарности

Сбор, первичная обработка исходных данных осадкомеров, а также валидация предложенной методики выделения СОСО были выполнены за счёт гранта РФФИ (проект № 14-50-00095). Исследование межгодовых изменений событий очень сильных осадков на ЕЧР было выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00212 мол_а.

Список литературы

Бардин М.Ю., Платова Т.В. 2013. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXV, с. 71 – 93.

Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю. 2008. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 87-102.

Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. 2010а. Изменение числа дней с сильными осадками на территории России за период 1936-2000 гг. – Метеорология и гидрология, № 5, с. 75-82.

Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. 2010б. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936-2000 гг. – Метеорология и гидрология, № 10, с. 78-89.

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). – Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>.

Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. 2014. – М., Росгидромет.

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. – Лёд и Снег, т. 54, № 2, с.29-43.

Золина О.Г., Булыгина О.Н. 2016. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 84-103. doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103

Кислов А.В., Суркова Г.В., Матвеева Т.А. 2017. Метеорологические условия температурного диапазона «около нуля °С» в условиях меняющегося климата западной Арктики. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 69-88.

РД 52.88.699-2008. 2008. Руководящий документ. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. – М.

Groisman P.Y., Knight R.W., Karl T.R. 2001. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: trends in the twentieth century, Bull. – Am. Meteorol. Soc., 82 (2), p. 223.

Groisman, P. Y., Knight R. W., Easterling D. R., Karl T. R., Hegerl G. C., and Razuvaev V. N. 2005. Trends in intense precipitation in the climatercord. – J. Clim., 18, pp. 1343-1367.

Kendall M. G. 1975. Rank Correlation Methods. – Charles Griffin, London.

Mann H. B. 1945. Non-parametric tests against trend. – Econometrica, 13, pp. 245-259.

Nicholls, N., and W. Murray, 1999. Workshop on indices and indicators for climatic extremes: Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997—Breakout group B; precipitation. – Climate Change, 42, pp. 23-29.

Peterson T.C. et al. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071. – Geneve, Switzerland, 143 p.

Zolina O, Simmer C, Kapala A, Gulev S. 2005. On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. – Geophysical Research Letters, 32.

Zolina O, Simmer C, Belyaev K, Kapala A, Gulev S. 2009. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. J. – Hydrometeorol, 10, pp. 701-716