

Современная климатическая изменчивость экстремальных осадков в Европе

Ольга Золина

*Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Université Joseph Fourier and LGGE/CNRS*

В докладе будут продемонстрированы изменения, происходящие в различных характеристиках экстремальных осадков на территории Европы и России за последние 60 лет по данным наблюдений на метеорологических станциях с суточным разрешением.

1. 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 достаточно трудно разделить, особенно на масштабах времени в несколько десятилетий. Современные климатические изменения проявляются, помимо изменений средних величин, в резком изменении 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 2 катастрофических наводнения (Дальний Восток, 2013 год и Крымск - 2012 год) и десятки сильных региональных наводнений, а также сильнейшая температурная аномалия в августе 2010 года в Центральной части России, когда аномалия среднемесячной температуры в июле превысила 6.5 градусов. Помимо этого каждый год приносит новые "погодные рекорды" - экстремально холодные зимы и отсутствие весны или, наоборот, необычно теплую погоду зимой и холодное лето. Наблюдаемые и прогнозируемые изменения климата неразрывно связаны с изменениями цикла влаги в атмосфере. Фазовые переходы влаги существенно влияют на температурный режим, формируя многочисленные обратные связи с такими процессами как радиационный нагрев (через облачность), динамику атмосферы (через формирование градиентов давления), ледовый и снежный покров 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 простым 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 не замкнутости и неравновесности системы (Allan and Soden 2008, Lenderink and van Meijgaard 2008), приводя к особо сильным - экстремальным осадкам, основным механизмом которых во внетропических широтах является адвекция влаги (Trenberth et al. 2003) внетропическими циклонами. 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). Следствием этой кластеризации являются экстремальные осадки с интенсивностями в десятки раз превосходящими средние. Крайне важным является то, что степень кластеризации, а следовательно, и интенсивность экстремальных осадков может 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. Результатом является то, что оценки характеристик экстремальности осадков, полученные по наблюдениям и по модельным данным имеют погрешности в десятки и сотни процентов. При этом средние осадки известны с гораздо лучшей точностью.

Эта проблема особенно важна для внетропических районов, в частности для Евразийского континента. Количество влаги в атмосфере здесь значительно меньше, чем в тропиках, но роль адвективных процессов, связанных со среднеширотной синоптической динамикой, гораздо сильнее. Кроме того, именно в средних широтах происходят наиболее существенные изменения в интенсивности характеристик экстремальных осадков, приводя часто к природным катастрофам. Во многих районах одновременно с интенсивностью экстремальных осадков возрастает частота и интенсивность экстремальных тепловых волн и связанных с ними продолжительных засух. Экстремальные погодные явления свидетельствуют о том, что изменяются характеристики водного 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 климатического анализа долговременных климатических рядов. Требуются подходы, основанные на анализе высокоразрешающих во времени и пространстве данных, и использующие принципиально отличные от традиционных метрики климатической изменчивости осадков, причем 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. Все это позволит качественно улучшить достоверность прогноза экстремальных осадков и аномальных режимов увлажнения.

2. Данные и методы

В докладе будут представлены результаты, полученные по трем разным архивам данных по измерениям осадков в Европе с суточным разрешением (рис.1). Основной массив составляют данные измерений на метеорологических станциях Европы, включающих в сумме более чем 8000 станций и покрывающих период с 1804 года по настоящее время (ECA&D - European Climate Assessment & Dataset, Klok and Klein Tank, 2009) (рис.1a). Наиболее полная и качественная информация об осадках представлена в этих данных за последние 60 лет, начиная с 1951 года. Этот архив состоит из национальных архивов синоптических станций разных стран Европы. Все данные из этих архивов прошли проверку на однородность наблюдений и введенных коррекций и, таким образом, консолидированный архив ECA&D является полностью

однородным и может быть использован как единый массив данных. Это, конечно, не означает, что в данном массиве нет проблем, связанных с ошибками оцифровки и неоднородностью, просто их значительно меньше, чем в других подобных архивах. Эти данные имеют различное разрешение, меняющееся от 1-2 км в центральной Европе до 50-100 км в восточной части Европейской территории России.

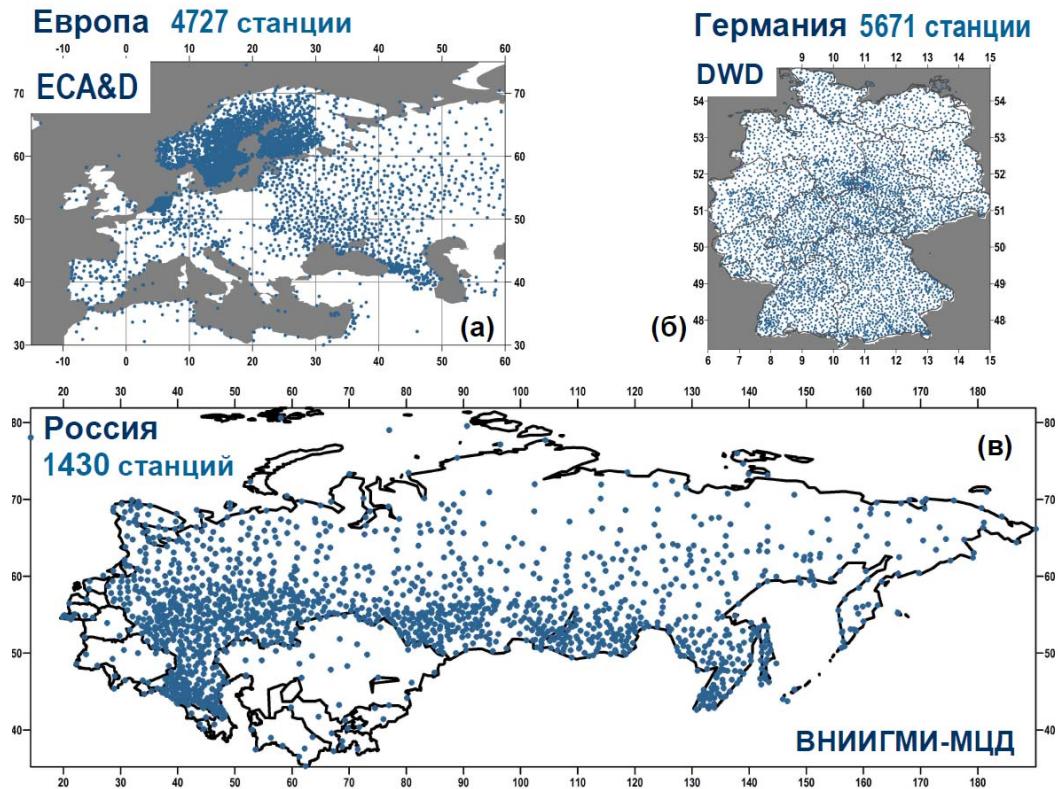


Рисунок 1. Распределение по территории Европейского континента станций наблюдений за осадками в разных коллекциях: (а) ЕСА&D, (б) Метеослужбы Германии (DWD) и (в) ВНИИГМИ-МЦД.

Для территории России был обработан и проанализирован массив данных измерений осадков на Российских станциях ВНИИГМИ-МЦД с суточным разрешением. Всего этот массив включает 1579 станций, покрывающих период с 1881 года по настоящее время. Однако в рядах наблюдений за осадками имеется большое количество пропусков. Эти пропуски могут сильно влиять на статистические оценки экстремальных осадков. Ранее нами был проведен детальный анализ влияния количества и характера пропусков (в том числе их распределения во времени) на оценки экстремальных осадков. В соответствии с рекомендациями *Zolina et al. (2005)* из 1579 станций было выбрано 1430 станций (рис. 1в), удовлетворяющих критериям максимально допустимого количества пропущенных значений в рядах осадков для получения устойчивых оценок в рамках статистического анализа. Кроме того, наблюдения, проводившиеся до 1966 года, преимущественно не удовлетворяют требованиям однородности, так как менялась практика наблюдений (сроки, приборы, с помощью которых производились измерения, методика их проведения), а также несколько раз менялась процедура оцифровки данных и форматы записи. Все это может существенно влиять на оценки долгопериодной изменчивости характеристик

осадков. Чтобы избежать влияния неоднородностей в массиве данных на результаты нами для анализа был выбран период с 1966 по 2012 годы.

Наконец, для региональных характеристик экстремальных осадков был использован архив наблюдений на немецких осадкомерных станциях (DWD), покрывающих Германию с очень высоким пространственным разрешением (рис.1б). Эта уникальная база данных Метеослужбы Германии регулярно обновляется и пополняется за счет оцифровки измерений из исторических журналов наблюдений. Немецкая осадкомерная сеть - одна из наиболее плотных и правильно организованных осадкомерных сетей в мире (Zolina et al. 2008). Всего немецкая осадкомерная сеть состоит из 11617 станций, однако в настоящее время только наблюдения на 5454 станциях оцифрованы и включены в национальную базу данных (MIRAKEL-Datenbank).

Для того, что бы объяснить использование тех или иных метрик осадков и обсуждать их изменения, необходимо сказать несколько слов об определении экстремальных осадков. Это очень сложная проблема, так как это определение может быть различно 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, как экстремальные, рассматриваются осадки, превышающие выбранное некоторым образом пороговое значение, выбор которого является ключевым при отнесении осадков к экстремальным. Часто используют единое пороговое значение для группы станций (например, 10 или 20 мм/день). Однако, при анализе экстремальных осадков для достаточно большой территории с разными режимами увлажнения пороговое значение также должно быть разным для разных районов. В этом случае удобно пользоваться пороговым квантилем, определяемым из функций плотности вероятности, полученной аппроксимацией данных теоретическим распределением. Абсолютные экстремальные осадки могут определяться как осадки, например, 5%- или 1%-ной повторяемости. Определенные таким образом пороговые значения, соответствуя одному и тому же квантилю, будут различны по абсолютным величинам. 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. Осадки, характеризующие высокой относительной экстремальностью, далеко не всегда являются экстремальными по абсолютным величинам, а, следовательно, не обязательно имеют значимые природные последствия. Наконец, третья группа характеристик предполагает анализ продолжительности периодов с непрерывными осадками. Эта характеристика существенно отличается от первых двух. В данном случае анализируются не индивидуальные дни с осадками (которые предполагаются независимыми в первых двух случаях), а периоды, в течение которых наблюдались осадки.

2. Результаты

2.1. Изменчивость величин абсолютных экстремальных осадков

На рис.2 показаны линейные тренды экстремальных осадков, определенных как осадки 95% повторяемости из Гамма-распределения за последние 47 лет. Зимой практически для всей территории Европы наблюдается положительный тренд в изменении интенсивности экстремальных осадков, составляющий 5-7% в десятилетие. Летом в

северной Европе и на Европейской территории России экстремальные осадки также увеличиваются примерно на 5-6% в десятилетие. Экстремальные осадки, оцененные по Российским станциям также демонстрируют устойчивую тенденцию увеличения значений до 8% в десятилетие, что соответствует увеличению значений экстремальных осадков примерно на 4 мм/день за последние 50 лет зимой и около 7 мм/день летом. В терминах средних климатических значений это очень существенное увеличение, которое потенциально может привести к увеличению количества наводнений в России.

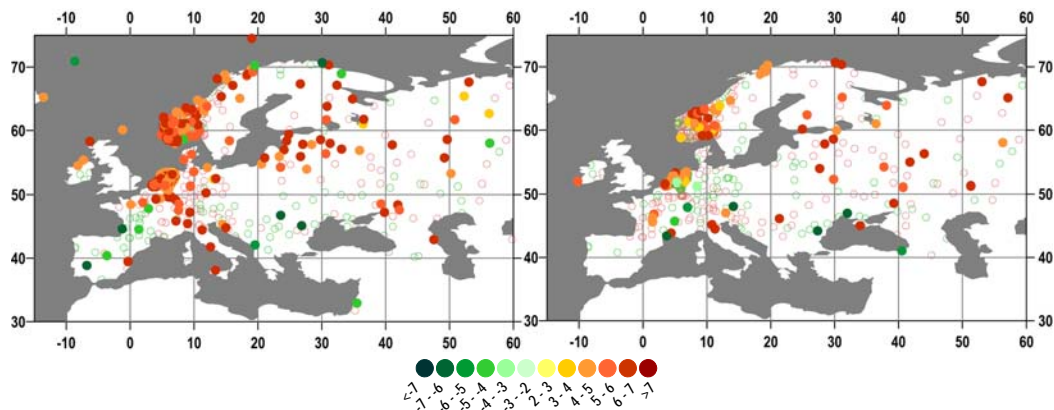


Рисунок 2. Линейные тренды (% в десятилетие) экстремальных осадков, определенных как осадки 95% повторяемости из Гамма-распределения, за период с 1951 по 2012 годы зимой (слева) и летом (справа). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 95% (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента и по непараметрическому тесту Манна-Кендала).

Отметим, что изменения экстремальных осадков в разных районах происходят по-разному. Так в Центральной Европе наблюдается уменьшение интенсивности экстремальных осадков летом. Это показывает ярко выраженную сезонность изменений осадков в этом районе. Более детально этот эффект виден при анализе трендов экстремальных осадков для немецких станций и, в целом, в Центральной Европе. Зимой наблюдается четко выраженное увеличение экстремальных осадков до 8% в декаду. Летом же все тренды, преимущественно, отрицательные. Этот пример демонстрирует важность анализа сезонного хода экстремальных осадков, так как для годовых рядов (а именно они широко используются для оценивания экстремальных величин, в том числе в рамках IPCC), ярко выраженного сигнала в величинах экстремальных осадков не наблюдается. Он маскируется разнонаправленными зимними и летними трендами.

2.1. Изменчивость характеристик относительной экстремальности осадков

Традиционно оценки относительной экстремальности выполняются с использованием индекса R95tot (Klein Tank and Koenen 2003) или аналогичных индексов для других квантилей. Они показывают, какая доля осадков, выпавших за определенный период, приходится на осадки, превышающие 95%-ную (или другую) точку распределения. Для расчета этого индекса используется эмпирическая оценка, основанная на прямом использовании данных наблюдений.

Эти индексы традиционно используются в отчетах IPCC для оценки изменчивости экстремальных осадков. Однако, эти оценки являются крайне неопределенными, поскольку в 30-40% случаев этот индекс обращается в ноль, особенно в случае малого

числа дней с осадками (Zolina et al. 2009). Именно поэтому эти индексы чаще всего рассчитываются для годовых рядов наблюдений. Для сезонных и, тем более, месячных данных пороговое значение, как правило, плохо статистически обеспечено, что приводит к тому, что значение самого индекса составляет 0 для большого количества лет, приводя к существенным ошибкам в расчетах климатических трендов. В то же время, поскольку осадки вообще и экстремальные осадки в частности, демонстрируют ярко выраженную сезонность, получение сезонных, а не только годовых оценок, принципиально важно для их достоверного анализа.

В этих случаях необходимо не только аппроксимировать ряды суточных осадков теоретическими распределениями, но и получить теоретические распределения для долевых вкладов в суммы осадков произвольного числа дней с наиболее интенсивными осадками. Такого распределения, для Гамма-распределения (традиционно используемого для аппроксимации суточных значений осадков), не существовало и именно поэтому эмпирические индексы были единственным методом для получения оценок относительной экстремальности осадков. Нам 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. Это специальное "распределение частичного вклада" (РЧВ) (Zolina et al. 2009, Zolina et al. 2013) является гипергеометрическим, ограниченным на интервале $[0,1]$ и может быть получено из функции плотности вероятности Гамма-распределения или других распределений (например, Вейбула), если они используются как распределение исходных значений для суточных осадков. Таким образом, нами был предложен новый устойчивый индекс относительной экстремальности ($R95tt$). Использование этого нового распределения позволило улучшить точность расчетов индексов экстремальных осадков, предложенных Klein Tank and Koenen [2003], Alexander et al. [2006] и другими. Предложенный нами индекс заставил авторов традиционного индекса $R95tot$ пересмотреть его формулировку и предложить новый индекс, также основанный на теоретических распределениях (Leander et al., 2014).

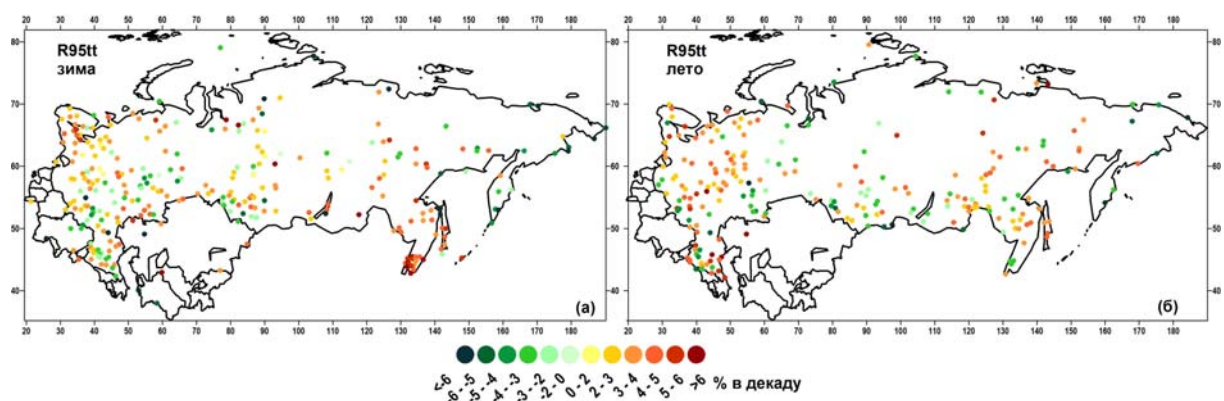


Рисунок 3. Линейные тренды (% в десятилетие) относительных экстремальных осадков, определенных как индекс $R95tt$, основанный на Гамма-распределении, за период с 1966 по 2012 годы зимой (слева) и летом (справа). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 95% (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента и непараметрическому тесту Манна-Кендала).

На рис.3 показаны тренды в относительной экстремальности для Российских станций, определенные с использованием предложенного нами индекса $R95tt$. В целом и зимой и летом наблюдаются положительные тренды в относительной экстремальности осадков

до 6% в десятилетие. При этом зимой в Южном и Северо-кавказском федеральных округах большое количество станций показывают уменьшение вклада сильных осадков в суммарные осадки. Летом же отрицательные тренды относительной экстремальности наблюдаются вдоль южной границе России. Климатический сигнал для оценок относительных экстремальных осадков менее силен и устойчив, чем для абсолютных экстремальных осадков. Однако, эта оценка также показывает важную характеристику поведения экстремальных осадков.

2.3 Изменения длительности периодов с осадками и осадков, связанных с наиболее продолжительными периодами

Третьей характеристикой экстремальных осадков является продолжительность периодов в течение которых непрерывно выпадали осадки. Эта характеристика принципиально отличается от двух предыдущих тем, что здесь анализируются не индивидуальные дни с осадками, а периоды с осадками разной длительности. Эта характеристика позволяет связать осадки с наводнениями, так как даже осадки средней интенсивности, выпадающие непрерывно в течение длительного времени, могут привести к наводнениям, тогда как даже очень сильные, но кратковременные осадки могут не иметь серьезных гидрологических последствий.

На рис.4а показано распределение длительности периодов с осадками в Европе, оцененное по всем доступным станциям. Распределение длительности периодов имеет характер уменьшения, близкого к экспоненциальному, хотя и не описываемого экспоненциальным распределением (см. ниже). Около 50% от всех периодов с осадками длится один день и они составляют около 25% от всех дней с осадками. Примерно 10% от всех дождливых периодов имеют продолжительность более 6 дней.

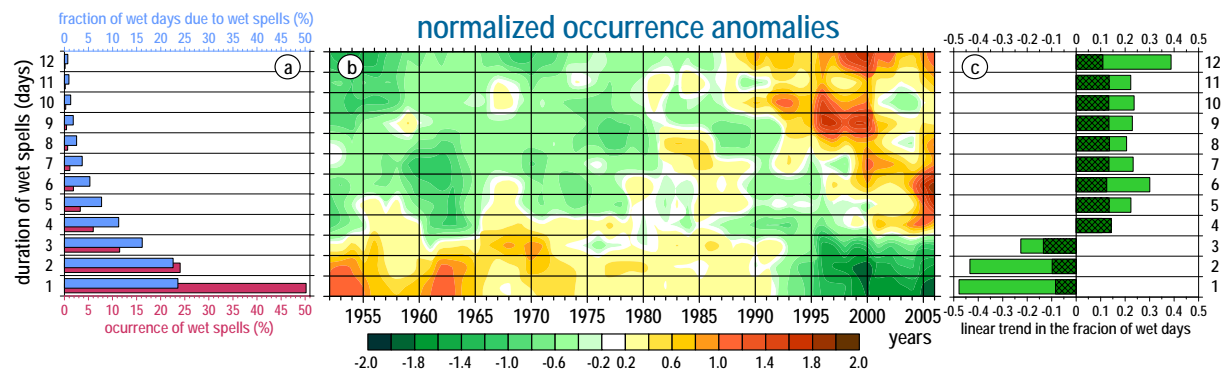


Рисунок 4. (а) Статистическое распределение длин дождевых периодов; (б) диаграмма временной эволюции аномалий количества дождевых периодов разной длительности, нормализованной на их общее количество, рассчитанная для всех Европейских станций; (с) линейные тренды аномалий количества дождевых периодов разной длительности (% в десятилетие). 95% уровень значимости показан темно-зеленой штриховкой.

На рис. 4б показана временная эволюция аномалий числа дождевых периодов разной длительности, нормализованной на их общее количество. В течение последних 30 лет четко прослеживается увеличение повторяемости периодов с длиной более 4 дней. В то же время число коротких периодов с осадками существенно уменьшается. Этот эффект хорошо виден на рис.4с, где показаны линейные тренды аномалий повторяемости дождевых периодов разной длительности. Статистически значимые положительные

тренды наблюдаются для периодов более 4 дней. Для коротких периодов с осадками наблюдаются статистически значимые отрицательные тренды.

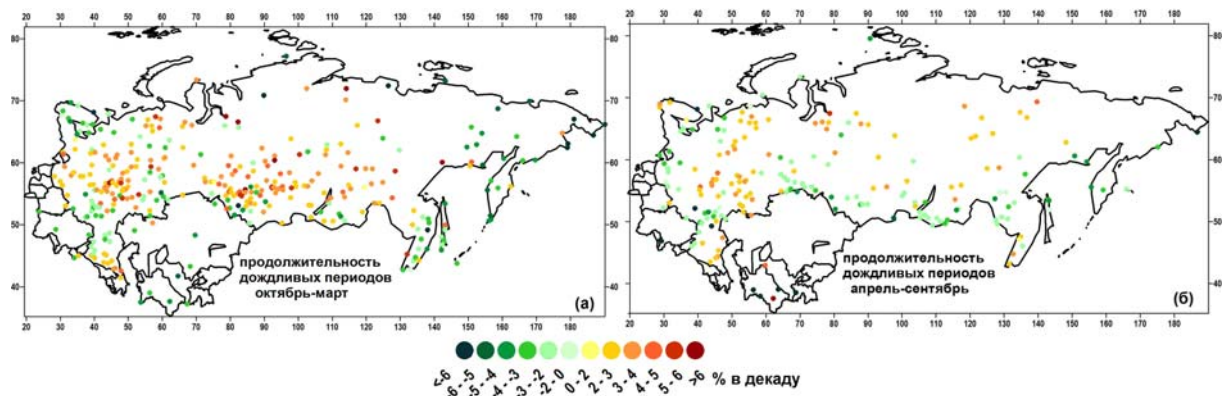


Рисунок 5. Линейные тренды (% в десятилетие) продолжительности дождливых периодов с 1966 по 2012 годы с октября по март (а) и с апреля по сентябрь (б). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 90% (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента).

На рис.5 показано географическое распределение линейных трендов длительности периодов с осадками за последние 50 лет для территории России. И в холодное, и в теплое полугодия наблюдается существенное увеличение продолжительности периодов с осадками на 6% в десятилетие зимой и на 5% в десятилетие летом. Наиболее сильное увеличение длительности периодов с осадками происходит зимой в Центральной России и в Сибирском федеральном округе. В теплый период года эти тенденции сохраняются, однако, магнитуда изменений немного уменьшается. Это связано с тем, что в летний период преобладают конвективные осадки, которые имеют обычно меньшую продолжительность по сравнению с фронтальными осадками, преобладающими зимой.

Для дальнейшего анализа периодов продолжительности осадков и оценивания экстремально длинных периодов, а также их изменчивости нами было предложено статистическое распределение длительности периодов с осадками из семейства геометрических усеченных распределений, а также предложено распределение частного вклада периодов заданной продолжительности в суммарное число дней с осадками (Zolina et al. 2013, Zolina 2014). Это распределение приложимо как к дождевым, так и к засушливым периодам и дало возможность исследования динамики статистик продолжительности периодов с осадками и без них. В частности, это дало возможность совместного анализа изменений в длительности периодов с осадками и без осадков (или сухих периодов). Если длительное выпадение осадков может привести к возникновению наводнений, то длительные бездождевые периоды могут способствовать возникновению засух, и маловодий, которые также являются экстремальными гидрометеорологическими явлениями. На рис. 6 показаны линейные тренды длительности сухих периодов в холодное и теплое время года.

В холодное полугодие (рис.6а) 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, что эквивалентно среднеклиматическому увеличению длительности сухих периодов зимой на 1.5-2 дня. Летом же (рис.6б) повсеместно происходит удлинение периодов без осадков на 9-10% в десятилетие. Это соответствует увеличению средней

длительности сухих периодов примерно на 2-2.5 дня. Такое сильное увеличение продолжительности периодов без осадков существенно увеличивает риск засух на территории России. В то же время, как было показано на рис.5б, увеличивается и вероятность наводнений.

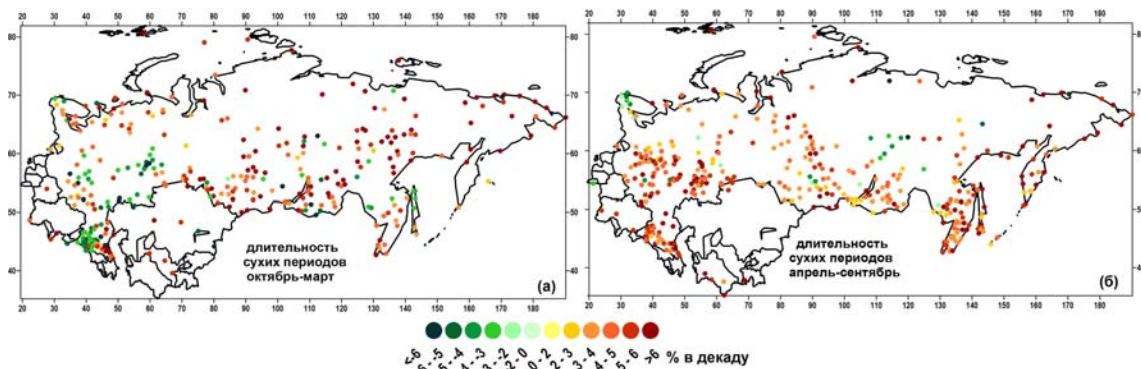


Рисунок 6. Линейные тренды (% в десятилетие) продолжительности сухих периодов с 1966 по 2012 годы с октября по март (а) и с апреля по сентябрь (б). Показаны только тренды, статистически значимые на уровне 90% (оценка значимости производилась по t-тесту Стьюдента).

Для простой интерпретации обнаруженного феномена можно представить нитку с бусинами (рис. 7), где количество бусинок (дней с осадками) фиксировано. Расстояние между бусинками является аналогом сухих периодов. Перегруппировка бусинок в более длинные ряды без изменения их количества, приводит к одновременному увеличению длительности как влажных, так и засушливых периодов.

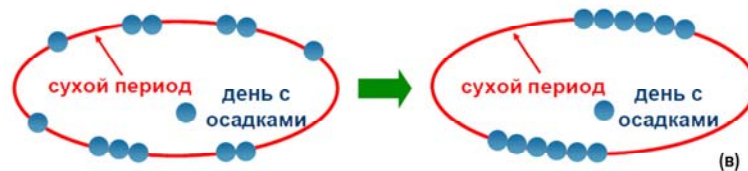


Рисунок 7. Схематический механизм одновременного изменения длительности сухих и влажных периодов на примере бус с фиксированным количеством бусинок. (По результатам Zolina et al. (2013).

Нами было также показано на основе рассмотрения 2-мерных распределений продолжительности и интенсивности осадков, что во многих районах Европы обнаруживается тесная связь между интенсивностью и продолжительностью: наиболее сильные осадки, по крайней мере зимой, связаны с длинными периодами (Zolina et al. 2010, Zolina 2014).

Заклучение

Рассмотренные в докладе долгопериодные изменения различных характеристик экстремальных осадков позволят построить наиболее полное описание их климатической динамики за последние десятилетия на территории Евразии. Обнаружены и количественно оценены линейные тренды в различных характеристиках экстремальных осадков - абсолютной и относительной экстремальности и продолжительности периодов с осадками. При этом были предложены новые, более устойчивые статистические метрики для оценивания экстремальных осадков. В целом

делается вывод об усилении интенсивности экстремальных осадков в Европе, а также об усилении осадков, связанных с наиболее продолжительными периодами. Обсуждение результатов будет включать краткий анализ динамики циклонической активности и адвекции влаги, как возможных механизмов изменений и экстремальности осадков. При наличии времени могут быть обсуждены вопросы построения сеточных климатологий осадков и их использования для тестирования результатов региональных модельных расчетов (Zolina et al. 2014), а также возможности использования спутниковой информации для оценивания экстремальных осадков (Lockhoff et al. 2014).

Литература

- Alexander, L. V., and Coauthors, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Allan, R. P., and B. J. Soden, 2008: Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321, 1481–1484, doi:10.1126/science.1160787.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., 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.
- Klok, E. J., and A. M. G. Klein Tank, 2009: Undated and extended European data set of daily climate observations. *Int. J. Climatol.*, 29, 1182–1191.
- Leander, L., T. A. Buishand, and A. M. G. Klein Tank, 2014: An alternative index for the contribution of precipitation on very wet days to the total precipitation. *J. Climate*, 27, 4, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00144.1, 1365–1378.
- Lenderink, G., and E. van Meijgaard, 2008: Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nat. Geosci.*, 1, 511–514.
- Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parson, 2003: The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1205–1217.

Избранные статьи автора по теме доклада

- Zolina, O., C. Simmer, A. Kapala, P. Shabanov, P. Becker, H. Maechel, S. K. Gulev, P. Groisman, 2014: New view on precipitation variability and extremes in Central Europe from a German high resolution daily precipitation dataset: Results from STAMMEX project. *Bulletin of Amer. Met. Soc.*, 96, doi:10.1175/BAMS-D-12-00134.1.
- Zolina, O., 2014: Multidecadal trends in the duration of wet spells and associated intensity of precipitation as revealed by very dense observational network. *Env. Res. Lett.*, 9, 025003 doi:10.1088/1748-9326/9/2/025003.
- Lockhoff, M., O. Zolina, C. Simmer, J. Schulz, 2014: Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations. *J. Climate*, 27, 607–623, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00194.1>
- Zolina, O., C. Simmer, K. Belyaev, S. K. Gulev, and P. Koltermann, 2013: Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J. Climate*, 26, 6, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00498.1>, 2022–2047.
- Zolina, O., C. Simmer, S. K. Gulev and S. Kollet, 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., V. Detemmerman and K. E. Trenberth, 2010: Improving the accuracy of estimation of climate extremes. *EOS Transactions*, 91, 51, 506.
- Zolina, O., C. Simmer, K. Belyaev, A. Kapala, S. K. Gulev, 2009: Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. *Journal of Hydrometeorology*, 10, doi: 10.1175/2008JHM1055.1, 701-716.
- Zolina, O., C. Simmer, A. Kapala, S. Bachner, S. K. Gulev, H. Maechel, 2008: Seasonality of precipitation extremes over Central Europe during the last 50 years. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, 113, doi:10.1029/2007JD008393.
- Zolina, O., C. Simmer, A. Kapala, S. K. Gulev, 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., A. Kapala, C. Simmer, S. K. Gulev, 2004: Analysis of extreme precipitations over Europe from different reanalyses: a comparative assessment. *Global and Planetary Change*, 44, 129-161.