ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАВКАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЬЮ КЛИМАТА

М.А. Алешина^{1),2)}, В.А. Семенов^{1),2)}, А.В. Чернокульский²⁾*

¹⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29; *aleshina@igras.ru

²⁾ Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

Реферат. Проведена оценка вклада увеличения температуры поверхности Черного и Средиземного морей, а также глобальных изменений температуры поверхности океана (ТПО) за последние 40 лет в изменения характеристик экстремальных осадков на Черноморском побережье Кавказа в летний период. Использовались численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы с предписанными среднеклиматическими значениями ТПО для периодов 1970-1999 гг. и 2000-2012 гг., а также с изменением ТПО только для Средиземного и Черного морей. Представлены результаты анализа экстремальных осадков и соответствующих композитов для температуры, дивергенции потоков влаги в атмосфере, а также таких параметров, как доступная конвективная потенциальная энергия и энергия конвективного подавления. Выявлено, что в модели рост ТПО не приводит к статистически значимому увеличению среднего количества осадков и их экстремальных значений на Черноморском побережье Кавказа. Установлено, что увеличение ТПО на глобальном и региональном масштабах приводит к росту конвективной энергии преимущественно над поверхностью морей, что согласуется с данными реанализа. В то же время при глобальном повышении ТПО в модели происходит усиление подавления конвекции, что может сдерживать увеличение интенсивности региональных осадков. При этом отмечается усиление дивергенции влаги над Черным морем и его восточным побережьем, что также препятствует росту экстремальности осадков. Полученные результаты соответствуют тенденциям изменения региональных осадков, выявленным ранее по данным стационарных наблюдений за последние четыре десятилетия.

Ключевые слова. Изменения климата, экстремальные осадки, динамика атмосферы, черноморское побережье, Россия, модель общей циркуляции, атмосфера, ERA-Interim, E-OBS.

Введение

Наблюдающиеся глобальные изменения климата приводят к изменению количества и интенсивности экстремальных погодных и климатических явле-

ний во многих регионах (Seneviratne et al., 2012). Важным классом опасных погодных явлений являются экстремальные осадки, часто приводящие к наводнениям, человеческим жертвам и наносящие большой экономический ущерб. На территории России период 1976-2018 гг. в среднем характеризовался увеличением суммарного количества осадков от 0.9 до 3.9% за 10 лет в разных регионах (Доклад об особенностях климата ..., 2019). При этом характеристики экстремальности режима осадков обладают большей неоднородностью. Так, одновременно с усилением интенсивности экстремальных осадков, происходит увеличение продолжительности периодов без осадков (Золина, Булыгина, 2016), что повышает риск возникновения экстремальных событий, связанных как с избытком, так и с недостатком увлажнения. По данным наблюдений также выявлено изменение характера осадков – рост ливневых и сокращение обложных осадков с увеличением вклада в общую сумму сильных ливней (Chernokulsky et al., 2019).

Северо-восточная часть побережья Черного моря характеризуется высокой повторяемостью экстремальных метеорологических событий. Например, в 2017 году на территории России было зафиксировано 166 опасных гидрометеорологических явлений, связанных с выпадением осадков (ливни, снегопады, град), нанеших социальные и экономические потери, при этом 18 из них произошло в Краснодарском крае в теплое время года, что составляет более 10% всех случаев (Коршунов, Шаймарданов, 2007). Экстремальные осадки также являются главной причиной возникновения других опасных явлений (паводки, половодья, наводнения, сели и оползни), наносящих огромный ущерб объектам экономики.

Важным вопросом в изучении характеристик режима осадков является установление механизмов формирования экстремальных событий, а также оценка связи таких явлений с глобальными климатическими процессами. Так, после сильного наводнения в Крымске в 2012 году, были проведены численные эксперименты на чувствительность экстремальных осадков в регионе (Meredith et al., 2015). Получены результаты о принципиально важной роли увеличения температуры Черного моря в формировании этого экстремального события. Данная особенность подтверждается теоретическими моделями, которые прогнозируют при увеличении температуры экспоненциальный рост количества экстремальных осадков из-за роста влагоемкости атмосферы в соответствии с законом Клаузиуса-Клапейрона (Trenberth, 1999). С другой стороны, в последние годы на основе анализа эмпирических данных выдвинута гипотеза об уменьшении интенсивности осадков при значительном повышении приземной температуры (Hardwick et al., 2010; Drobinski et al., 2016; Ali, 2018; Wang et al., 2018).

Летом для Черноморского побережья режим осадков за последние 40 лет на фоне сильного увеличения температуры не характеризуется значимым ростом как средних, так и экстремальных показателей (Алешина и др., 2018), не наблюдается в регионе и отдельного усиления ливневых или обложных осадков (Chernokulsky et al., 2019). Данные особенности могут быть обуслов-

лены совместным действием механизмов подавления конвекции, а также общим изменением характеристик общей циркуляции атмосферы в средних широтах. Действительно, в ряде работ отмечается трансформация системы ячейки Хедли при глобальном потеплении, что приводит к смещению зон увлажнения в субтропиках и умеренных широтах (Seidel et al., 2008; Staten et al., 2018; Grise et al., 2019).

В данной работе проведен анализ современных тенденций изменения режима осадков и температуры в прибрежной зоне Азово-Черноморского региона России. Представлена оценка роли глобальных изменений климата, увеличения температуры Черного и Средиземного морей, а также внутренней изменчивости атмосферы в этих процессах.

Данные и методы

В работе анализируются численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5 (спектральное разрешение T159, примерно $0.7^\circ \times 0.7^\circ$) (Roeckner et al., 2003). Ранее было показано (Volosciuk et al., 2015), что характеристики экстремальных осадков существенно зависят от пространственного разрешения модели. Используемое в работе разрешение T159 позволяет в достаточной мере реалистично воспроизвести характеристики экстремальных осадков.

Проведенный ранее анализ этих экспериментов позволил выявить связь увеличения температуры Средиземного моря с участвовавшими в начале 21 века экстремальными осадками в центральной Европе (Volosciuk et al., 2016). Показано, что повышение ТПО Средиземного моря приводит к увеличению влагосодержания средиземноморских циклонов за счет роста испарения с поверхности моря.

С использованием модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 было проведено 4 серии численных экспериментов с разными условиями ТПО и концентрации морских льдов (табл. 1). Длительность каждого эксперимента составляла 40 лет. Концентрации парниковых газов в экспериментах сохранялись на одном уровне (1995 г.). Конфигурация экспериментов позволяет оценить вклад региональных и глобальных изменений климата в наблюдающиеся тенденции.

В выбранных экспериментах использовались климатологические (с повторяющимся годовым ходом) граничные условия (ТПО и границы морских льдов) по данным HadISST1 для периодов 1970-1999 гг. и 2000-2012 гг. (Rayner et al., 2003). Изменение температуры поверхности океана (ТПО) для Черного и Средиземного морей за летний период с 1870 по 2018 гг. по данным HadISST показано на рис. 1 А. Средняя разность ТПО для этих периодов в регионе летом составляет 0.8°C . При этом заданное изменение ТПО сравнимо с амплитудой наблюдаемых межгодовых вариаций (среднеквадратическое отклонение для двух периодов составляет примерно 0.4°C).

Таблица 1. Описание экспериментов модели ECHAM5

Название эксперимента	Характеристики ТПО и морского льда (HadISST)		
	Черное море	Средиземное море	Мировой океан
Холодный океан (ХО)	1970-1999	1970-1999	1970-1999
Теплые Черное и Средиземное моря (ТЧМ/СМ)	2000-2012	2000-2012	1970-1999
Теплое Черное море (ТЧМ)	2000-2012	1970-1999	1970-1999
Теплый океан (ТО)	2000-2012	2000-2012	2000-2012

Рисунок 1. А – средние летние значения ТПО Средиземного и Черного морей по данным HadISST за период 1900-2018 гг. (Rayner et al., 2003) (синим и красным цветом выделены периоды 1970-1999 гг. и 2000-2012 гг. соответственно);
Б – сетка модели ECHAM5 с типами поверхностей (синий – море, зеленый – суша, красный – суша, область побережья Черного моря, выбранная для составления композитных карт)

Для оценки вклада регионального и глобального повышения ТПО в изменение температурного режима и характеристик осадков на территории Черноморского побережья Кавказа (ЧПК) были вычислены средние разности между экспериментами:

“теплый океан” минус “холодный океан” (ТО-ХО) – вклад глобального изменения ТПО;

“теплое Черное море” минус “холодный океан” (ТЧМ-ХО) – вклад потепления только Черного моря;

“теплые Черное и Средиземное моря” – “холодный океан” (ТЧМ/СМ-ХО) – вклад совместного повышения ТПО Черного и Средиземного морей.

Для сопоставления результатов моделирования с наблюдаемыми изменениями также были использованы данные архива E-OBS (Cornes et al., 2018) и реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011).

В численных экспериментах также были выделены случаи с экстремальными осадками на ЧПК, которые использовались при проведении композитного анализа. Критерием для составления композитного анализа было выбрано превышение суточной интенсивности осадков значения 95-го перцентиля в полной выборке суточных осадков для контрольной области на побережье Черного моря (рис. 1 Б).

Оценки значимости при сравнении характеристик среднего режима, а также результатов композитного анализа выполнена с помощью критерия t-Стьюдента.

Результаты

Изменение режима температуры и осадков по данным модельных экспериментов и наблюдений

Изменение температуры воздуха на 2 м в модельных экспериментах представлено на рис. 2 А-В. Максимальные отличия от контрольного эксперимента с холодным океаном получены при глобальном повышении температуры над морями и составили 0.7-1.5°C, над сушей около 0.5°C. Максимальный рост температуры воздуха во всех экспериментах отмечен в юго-восточной части Черного моря (до 1.5°C).

Рисунок 2. Разности средней по ансамблям приповерхностной температуры воздуха в летний сезон между экспериментами
(А) – $(TO - XO)$, (Б) – $(TЧМ - XO)$, (В) – $(TЧМ/СМ - XO)$; (Г) – разность температур
(2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.) по данным E-OBS. Значимые разности (на уровне 0.05)
показаны точками

Интересной особенностью является понижение температуры на 0.3-0.5°C на юге России и в Закавказье при региональном повышении температуры ближай-

ших морей. Региональные эффекты изменения ТПО в Черном и Средиземном море компенсируются при глобальном потеплении океана, что в итоге приводит к повышению температуры воздуха на побережье на $0.3-0.5^{\circ}\text{C}$.

По данным E-OBS за исследуемый период повышение температуры практически повсеместно превысило 1°C , на юге Восточной Европы температура увеличилась более чем на 1.5°C . Стоит отметить, что существенный вклад в среднее повышение температуры в период 2000-2012 гг. могут вносить продолжительные волны жары, наблюдавшиеся на территории Европы летом 2003 и 2010 гг. (Stefanon et al., 2012).

Изменение интенсивности осадков в модельных экспериментах показано на рис. 3. При глобальном повышении ТПО происходит небольшое (на 10-25% от нормы при холодном океане) увеличение средней интенсивности осадков над акваторией Черного моря. В то же время, при региональных изменениях это повышение выражено сильнее (на 25-50% от нормы) (рис. 3 А-В). Однако, на побережье Черного моря статистически значимого увеличения интенсивности осадков не отмечается ни в одном из экспериментов, в некоторых регионах напротив, происходит некоторое уменьшение осадков (Астраханская и Волгоградская области). Данная оценка вклада глобального потепления в изменение режима осадков согласуется с ранее полученными результатами (Алешина и др., 2018; Доклад об особенностях климата ..., 2019), где для летнего сезона на юге ЕТР не было обнаружено значимых тенденций к увеличению среднего количества осадков.

Интенсивность экстремальных осадков при региональном повышении ТПО (рис. 3 Е, Ж) увеличивается над морской поверхностью более чем в полтора раза над северо-западной частью акватории и уменьшается на побережье. Стоит отметить, что выявленные изменения статистически не значимы из-за редкости таких событий.

Рисунок 3. Средние (по ансамблю) разности между экспериментами для: (А – Г) интенсивности всех осадков и (Д – З) экстремальных осадков на Черноморском побережье (в %) *А, Д – (ТО – ХО), Б, Е – (ТЧМ – ХО), В, Ж – (ТЧМ/СМ – ХО), Г, З – разность по данным E-OBS для периодов (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.).* Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

По данным E-OBS на ЧПК статистически значимого увеличения экстремальных осадков также не обнаружено. Стоит отметить, что для данного региона характерна высокая пространственная неоднородность поля осадков, связанная в первую очередь с сочетанием разных типов подстилающей поверхностей и сложным рельефом.

Изменение характеристик статической устойчивости атмосферы

Потепление климата может являться причиной изменения характеристик устойчивости атмосферы, определяющих в том числе интенсивность конвективных процессов (Мохов, Акперов, 2006; Курганский и др., 2013; Чернокульский и др., 2017). Повышение ТПО при глобальном потеплении может приводить к увеличению содержания влаги в нижнем слое атмосферы, что важно учитывать при анализе режима осадков в прибрежных регионах.

Для модельных экспериментов были посчитаны значения характеристик доступной конвективной потенциальной энергии и энергии конвективного подавления (Doswell and Shultz, 2006). Доступная конвективная потенциальная энергия (Convective Available Potential Energy, CAPE) представляет собой количество потенциальной энергии плавучести в слое конвективной неустойчивости, которое может быть использовано для развития вертикальных движений. Энергия конвективного подавления (Convective Inhibition, CIN) является характеристикой энергии, которую необходимо затратить поднимающемуся воздуху в устойчивом слое для достижения уровня свободной конвекции. Оба показателя сильно зависят от изменений вертикальных профилей

температуры и влажности, а также характеристик поднимающейся воздушной массы.

По данным модельных экспериментов при региональном повышении ТПО Средиземного и Черного морей происходит более сильное увеличение CAPE над морями, чем при глобальных изменениях (рис. 4 А, Б). Полученный результат хорошо соотносится с результатами по увеличению средней интенсивности осадков преимущественно над акваториями (рис. 3). В то же время, по данным реанализа ERA-Interim за последние 40 лет произошло существенное увеличение CAPE над Черным морем, превышающее модельные расчеты практически в два раза (рис. 4 В). Однако над сушей статистически значимых изменений показателя не обнаружено. Для случаев экстремальных осадков повышение CAPE также наблюдается преимущественно над акваториями морей, величина изменений в экспериментах хорошо соотносится с аналогичными значениями по данным реанализа (рис. 4). Как и в средних показателях, при экстремальных осадках повышение CAPE отмечается преимущественно над акваториями и практически не затрагивает побережье.

Рисунок 4. Средние разности между экспериментами для средних значений CAPE (А, Б) и при экстремальных осадках (Г, Д) (в Дж/кг)

А, Г – (ТО – ХО), Б, Д – (ТЧМ/СМ – ХО); В – средние разности между периодами 2018-1999 гг. и 1979-1998 гг. по реанализу ERA-Interim для CAPE, Е – аналогично В, но при экстремальных осадках. Значимые разности (на уровне 0.05) показаны штриховкой

При глобальном повышении ТПО величина CIN над морями практически не изменилась, над сушей отмечается небольшое усиление подавления конвекции (рис. 5 А). Однако, при потеплении только Черного и Средиземного морей произошло значимое уменьшение CIN над морями (рис. 5 Б).

Таким образом, повышение ТПО только Черного и Средиземного морей приводит к интенсификации процессов конвекции над морями, которое может поддерживаться также за счет уменьшения CIN. Глобальное повышение ТПО также приводит увеличению CAPE, но менее сильному, при этом значения CIN в среднем практически не изменяются.

Рисунок 5. Средние разности между экспериментами для средних значений CIN (А, Б) и при экстремальных осадках (В, Г) (в Дж/кг)

А, В – (ТО – ХО), Б, Г – (ТЧМ/СМ – ХО). Значимые разности (на уровне 0.05) показаны штриховкой

Экстремальные осадки при региональном повышении ТПО возникают в условиях высоких значений CAPE, при этом CIN также незначительно снижается. В условиях глобального повышения ТПО при аналогичных значениях CAPE подавление конвекции выражено сильнее, что может служить фактором, влияющим на стабильность осадков в регионе.

Перечисленные сочетания факторов можно считать ответственными за небольшое увеличение осадков над морем в региональных экспериментах (рис. 3) и еще более слабое изменение режима осадков в глобальном эксперименте. При этом изменение условий над акваториями не приводит к сильной перестройке метеорологических условий над сушей.

Еще одним важным фактором, влияющим на характеристики осадков, является дивергенция потоков влаги в атмосфере. Получено, что при потеплении климата дивергенция влаги над морем возрастает, захватывая при этом и часть побережья. Усиление дивергенции влаги над морем происходит не только в глобальном эксперименте (рис. 6 А), но и при исключительном действии региональных изменений ТПО (рис. 6 Б, В). Моря являются мощными источниками влаги, над ними быстрее развивается конвекция, но увеличение дивергенции влаги способно компенсировать увеличение регионального влагосодержания атмосферы при росте испарения с поверхности морей. Можно предположить, что при отсутствии в регионе дивергенции влаги как фактора подавления конвекции, здесь могло бы отмечаться более сильное увеличение осадков, чем наблюдается по данным глобальных экспериментов и реанализа.

Над сушей изменения всех параметров выражены намного слабее, что в некоторой степени согласуется с отсутствием явных изменений в режиме осадков.

Рисунок 6. А-В: средние разности между экспериментами для дивергенции потоков влаги (в $\text{кг}/[\text{с} \cdot \text{м}^2]$)

А – $(TO - XO)$, Б – $(TCM - XO)$, В – $(TCM/CM - XO)$; Г – разности дивергенции потоков влаги (1999-2018 гг.) – (1979-1998 гг.) по данным ERA-Interim
Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

Заключение

По данным экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ENSAM5 проведен анализ особенностей регионального отклика режима осадков на изменение температуры поверхности как Мирового океана, так и исключительно Черного и/или Средиземного морей. Показано, что при повышении температуры на побережье Черного моря не наблюдается статистически значимых изменений как средней интенсивности осадков, так и их экстремальных значений. В то же время над морями интенсивность осадков в среднем увеличивается, причем при региональном повышении ТПО этот рост выражен сильнее, чем при изменении ТПО в глобальном масштабе.

Анализ результатов расчета характеристик процессов конвекции в атмосфере (CAPE и CIN) показал, что региональное повышение ТПО Черного и Средиземного морей приводит к образованию более благоприятных условий для развития конвективных процессов и, как следствие, выпадения осадков над морями и прибрежными регионами. Глобальное увеличение ТПО, напротив, приводит к усилению процессов, ответственных за подавление конвекции.

Одним из факторов, который также может сдерживать увеличение осадков в регионе, является изменение динамики атмосферы. Как по данным наблюдений, так и по результатам модельных экспериментов, в регионе отмечается

усиление дивергенции потоков влаги, выраженное ярче всего над поверхностью моря. Поэтому, несмотря на значительное увеличение CAPE, над морями подавление конвекции и усиление дивергенции может приводить к ослаблению вертикальных движений и, как следствие, влиять на выпадение осадков. При региональном повышении ТПО перечисленные сдерживающие факторы выражены слабее, что приводит к более заметному увеличению осадков над морем. Влага с моря может поступать на побережье при благоприятных циркуляционных условиях, как, например, случилось при катастрофическом наводнении в Крымске в 2012 году (Meredith et al., 2015).

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке проектов РФФИ № 17-05-41085 РГО_а, № 17-05-00561, анализ индексов конвективной неустойчивости проведен при поддержке проекта РНФ № 19-17-00242.

Список литературы

Алешина М.А., Торопов П.А., Семенов В.А. 2018. Изменение температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982-2014 гг. – Метеорология и гидрология, № 4, с. 41-53.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. 2019. – Москва, 79 с.

Золина О.Г., Булыгина О.Н. 2016. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 84-103.

Коршунов А.А., Шаймарданов М.З. 2007. База данных об опасных гидрометеорологических явлениях. – В сб.: Труды ВНИИГМИ-МЦД, №. 172, с. 132-139.

Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. 2013. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? – Метеорология и гидрология, № 8, с. 40-50.

Мохов И.И., Акперов М.Г. 2006. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа. – Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, т. 42, №. 4, с. 467-475.

Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. 2017. Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы. – Доклады Академии наук, т. 477, № 6, с. 722-727.

Ali H., Fowler H.J., Mishra V. 2018. Global observational evidence of strong linkage between dew point temperature and precipitation extremes. – Geophysical Research Letters, vol. 45, No. 22, pp. 12320-12330.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O.N., Mokhov I., Semenov V. 2019. Observed changes in convective and stratiform precipitation over Northern Eurasia during the last decades. – *Environmental Research Letters*, vol. 14, No. 4, p. 045001, doi: 10.1088/1748-9326/aafb82.

Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J., Jones P.D. 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. – *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, vol. 123. No. 17, pp. 9391-9409.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., and Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. – *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, vol. 137, No. 656, pp. 553-597.

Doswell CA III, Schultz DM. 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. – *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, No. 1(3), pp. 1-24.

Drobinski P., Alonzo B., Bastin S., Silva N.D., Muller C. 2016. Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: What explains the hook shape? – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 121, No. 7, pp. 3100-3119.

Grise K., Davis S., Simpson I., Waugh D., Fu Q., Allen R., Rosenlof K., Ummenhofer C., Karnauskas K., Maycock A., Quan X., Birner T., and Staten P. 2019. Recent tropical expansion: natural variability or forced response? – *Journal of Climate*, vol. 32, No. 5, pp. 1551-1571.

Hardwick Jones R., Westra S., Sharma A. 2010. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. – *Geophysical Research Letters*, vol. 37, No. 22.

Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. 2015. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. – *Nature Geoscience*, vol. 8, No. 8, pp. 615.

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, No. D14.

Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornbluh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. – *Max Planck Institute for Meteorology*. Rep. 349, Hamburg, Germany.

Seidel D.J., Fu Q., Randel W.J., Reichler T.J. 2008. Widening of the tropical belt in a changing climate. – Nature geoscience, vol. 1, No. 1, pp. 21.

Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., Reichstein M. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. – Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, pp. 109-230.

Staten P.W., Lu J., Grise K.M., Davis S.M., Birner T. 2018. Re-examining tropical expansion. – Nature Climate Change, vol. 8, No. 9, pp. 768.

Stefanon M., D'Andrea F., Drobinski P. 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. – Environmental Research Letters, vol. 7, No. 1, pp. 014023.

Trenberth K. E. 1999. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. – Weather and Climate Extremes. – Springer, Dordrecht, pp. 327-339.

Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A., Park W. 2015. Extreme precipitation in an atmosphere general circulation model: impact of horizontal and vertical model resolutions. – Journal of Climate, vol. 28, No. 3, pp. 1184-1205.

Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A., Tilinina N., Gulev S. K., Latif M. 2016. Rising mediterranean sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in central Europe. – Scientific reports, vol. 6, pp. 32450.

Wang H., Sun F., Liu W. 2018. The Dependence of Daily and Hourly Precipitation Extremes on Temperature and Atmospheric Humidity over China. – Journal of Climate, vol. 31, No. 21, pp. 8931-8944.

Статья поступила в редакцию: 25.09.2019 г.

После переработки: 17.10.2019 г.

STUDY OF THE ROLE OF GLOBAL AND REGIONAL FACTORS IN CHANGING THE EXTREMES OF SUMMER PRECIPITATION ON THE BLACK SEA COAST OF THE CAUCASUS WITH THE USE OF RESULTS OF EXPERIMENTS WITH THE CLIMATE MODEL

M.A. Aleshina^{1),2)*}, *V.A. Semenov*^{1),2)}, *A.V. Chernokulsky*.²⁾

¹⁾ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russian Federation; **aleshina@igras.ru*

²⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhyovskiy pereulok, 119017, Moscow, Russian Federation.

Abstract. The contribution of increase in surface temperature of the Black Sea and Mediterranean Sea, as well as global changes in ocean surface temperature (SST) over past 40 years to changes in the characteristics of extreme precipitation on the Black Sea coast of Caucasus in summer is assessed. Numerical experiments with a general circulation model of the atmosphere with prescribed mean climatic values of SST for 1970-1999 and 2000-2012 were used. The results of the analysis of extreme precipitation and corresponding composites for temperature, divergence of moisture flows in the atmosphere, as well as parameters such as convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition energy (CIN) are presented. It is found that SST growth in the model does not lead to statistically significant increase in the average amount of precipitation and their extreme values on the Black Sea coast of the Caucasus. It is shown that an increase in SST on the global and regional scales leads to a growth of CAPE mainly above the surface of the seas, which is consistent with the ERA-Interim reanalysis data. At the same time, along with global increase in SST, CIN increases in the model, which can constrain the increase in regional precipitation intensity. An increase in moisture divergence over the Black Sea and its eastern coast is found, which also may prevent the growth of precipitation extremes. The results are consistent with regional precipitation trends previously obtained from observation stations over the past four decades.

Keywords. Climate change, extreme precipitation, atmospheric dynamics, Black Sea coast, Russia, general circulation model, atmosphere, ERA-Interim, E-OBS.

References

Aleshina M.A., Toropov P.A., Semenov V.A. 2018. *Izmenenie temperaturno-vlazhnostnogo regima Chernomorskogo poberejia Kavkaza v period 1982-2014 gg.* [Temperature and Humidity Regime Changes on the Black Sea Coast in 1982-2014]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*, vol. 43, no. 4, pp. 235-244. <https://doi.org/10.3103/S1068373918040040>

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoi Federatsii za 2018 god [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2018]. 2019. Moscow, 79 p.

Zolina O.G., Bulygina O.N. 2016. Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost charakteristik ekstremalnykh osadkov v Rossii [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 84-103.

Korshunov A.A., Shaymardanov M.Z. 2007. Baza dannykh ob opasnykh gidrometeorologicheskikh yavleniyah [The hydrometeorological extreme events database]. *Trudy VNIIGMI-MTSD* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation], no. 172. pp. 132-139.

Kurgansky M.V., Chernokulsky A.V. Mokhov I.I. 2013. Smerch pod Hanty-Mansiyskom: poka isklyuchenie ili uzhe symptom? [The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom?]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*, vol. 38, no. 8, pp. 539-546.

Mokhov I.I., Akperov M.G. 2006. Vertikalnyi temperaturnyi gradient v troposfere i ego svyaz s pripoverkhnostnoi temperaturoi po dannym reanaliza [Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature from reanalysis data]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana – Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 42, no. 4, pp. 430-438.

Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I. 2017. Analiz izmenenij uslovij smerchegeneza v Severnoj Evrazii s ispol'zovaniem prostogo indeksa konvektivnoj neustojchivosti atmosfery [Analysis of Changes in Tornadogenesis Conditions Over Northern Eurasia Based on a Simple Index of Atmospheric Convective Instability]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, vol. 477, part 2, pp.1504–1509.

Ali H., Fowler H.J., Mishra V. 2018. Global observational evidence of strong linkage between dew point temperature and precipitation extremes. – *Geophysical Research Letters*, vol. 45, No. 22, pp. 12320-12330.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O.N., Mokhov I., Semenov V. 2019. Observed changes in convective and stratiform precipitation over Northern Eurasia during the last decades. – *Environmental Research Letters*, vol. 14, No. 4, p. 045001, doi: 10.1088/1748-9326/aafb82

Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J., Jones P.D. 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123. No. 17, pp. 9391-9409.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., and Vitart F. 2011. The

ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. – Quarterly Journal of the royal meteorological society, vol. 137, No. 656, pp. 553-597.

Doswell CA III, Schultz DM. 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. – E-Journal of Severe Storms Meteorology, No. 1(3), pp. 1–24.

Drobinski P., Alonzo B., Bastin S., Silva N.D., Muller C. 2016. Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: What explains the hook shape? – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 121, No. 7, pp. 3100-3119.

Grise K., Davis S., Simpson I., Waugh D., Fu Q., Allen R., Rosenlof K., Ummenhofer C., Karnauskas K., Maycock A., Quan X., Birner T., and Staten P. 2019. Recent tropical expansion: natural variability or forced response? – Journal of Climate, vol. 32, No. 5, pp. 1551-1571.

Hardwick Jones R., Westra S., Sharma A. 2010. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. – Geophysical Research Letters, vol. 37, No. 22.

Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. 2015. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. – Nature Geoscience, vol. 8, No. 8, pp. 615.

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 108, No. D14.

Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornbluh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. – Max Planck Institute for Meteorology. Rep. 349. Hamburg. Germany.

Seidel D.J., Fu Q., Randel W.J., Reichler T.J. 2008. Widening of the tropical belt in a changing climate. – Nature geoscience, vol. 1, No. 1, pp. 21.

Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., ... Reichstein M. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. – Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, pp. 109-230.

Staten P.W., Lu J., Grise K.M., Davis S.M., Birner T. 2018. Re-examining tropical expansion. – Nature Climate Change, vol. 8, No. 9, pp. 768.

Stefanon M., D'Andrea F., Drobinski P. 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. – Environmental Research Letters, vol. 7, No. 1, pp. 014023.

Trenberth K. E. 1999. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. – *Weather and Climate Extremes*. – Springer, Dordrecht, pp. 327-339.

Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A., Park W. 2015. Extreme precipitation in an atmosphere general circulation model: impact of horizontal and vertical model resolutions. – *Journal of Climate*, vol. 28, No. 3, pp. 184-1205.

Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A., Tilinina N., Gulev S. K., Latif M. 2016. Rising mediterranean sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in central Europe. – *Scientific reports*, vol. 6, pp. 32450.

Wang H., Sun F., Liu W. 2018. The Dependence of Daily and Hourly Precipitation Extremes on Temperature and Atmospheric Humidity over China. – *Journal of Climate*, vol. 31, No. 21, pp. 8931-8944.