

УДК 551.582.2

П.А. Торопов¹, М.А. Алешина², В.А. Семенов³**ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ЧЕРНОМОРСКО-КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ**

На основе данных реанализа ERA-Interim и наблюдений выявлены основные тенденции изменений температурно-влажностного режима Черноморско-Каспийского региона (ЧКР) за период 1982–2014 гг. Показано, что в целом по региону отмечается статистически значимое потепление в летний сезон, тесно связанное с ростом температуры поверхности морей (ТПМ) и радиационного баланса. В режиме осадков статистически значимых изменений не выявлено, несмотря на рост влагосодержания атмосферы и потенциальной конвективной энергии (CAPE). Увеличение удельной влажности компенсируется ростом дивергенции влаги вследствие интенсификации крупномасштабных нисходящих движений, в результате чего сезонные и годовые суммы осадков существенно не меняются. Предполагается, что подобные эффекты являются следствием увеличения повторяемости антициклонов над ЧКР в теплое полугодие. Этой же тенденцией объясняется рост радиационного баланса (вследствие уменьшения облачности), определяющий увеличение ТПМ и приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: региональный климат, тренды температуры и осадков, Черное море, Каспийское море, реанализ ERA-Interim.

Введение. Процесс глобального потепления, который по данным инструментальных наблюдений наиболее ярко наблюдается в последние 35 лет, совершенно по-разному проявляется в различных регионах планеты [IPCC, 2014]. Например, для Северной Евразии характерно сильное потепление в зимние месяцы, в то время как в субтропических регионах континента и на юге умеренной зоны положительный тренд температуры ярче выражен в летние месяцы. Годовые суммы осадков имеют тенденцию к увеличению на севере Евразии и к уменьшению в южных районах. В целом можно отметить, что в южных районах Евразии, в том числе в Черноморско-Каспийском регионе (ЧКР) существует некоторая неопределенность трендов климатических изменений. Интерес к изменениям климата ЧКР связан как с этой неопределенностью, так и со значительной пространственно-временной неоднородностью метеорологических величин. Сочетание эффектов крупномасштабной циркуляции с местными орографическими особенностями, а также с фактором роста температуры поверхности Черного и Каспийского морей (ТПМ) провоцирует мезомасштабные атмосферные процессы, вызывающие комплекс опасных явлений погоды: прежде всего, экстремальные осадки. Например, E.P. Meredith et al. [2015] на примере катастрофического наводнения в Крымске показана роль этих факторов, в особенности ТПМ. Еще один важный показатель экстремальности климатических условий ЧКР – ветровой режим и морское волнение. При определенных усло-

виях крупномасштабной атмосферной циркуляции на подветренных склонах гор наблюдаются штормовые и ураганные ветра – так называемые «подветренные бури» (downslope windstorm). Существует немало работ, в которых рассматриваются физические механизмы и возможности прогноза этих явлений на примере новороссийской боры [Торопов с соавт., 2014] и штормового волнения [Кислов с соавт., 2016; Мысленков с соавт., 2013]. Однако исследований, в рамках которых выполнена физически обоснованная проекция этих явлений на меняющийся в будущем климатический фон, пока немного. В значительной степени это связано с неопределенностью тенденций изменения основных климатических характеристик ЧКР, хотя работы, посвященные этой проблеме, существуют. В частности, В.В. Ефимовым с соавт. [2015] проанализированы результаты численного моделирования климата последних десятилетий XXI века. Показано, что в регионе произойдет существенное повышение температуры за счет летних месяцев, а также уменьшение количества осадков. С другой стороны, в некоторых работах [Min et al., 2011; Semenov et al., 2002] показано, что при потеплении ожидается рост интенсивности осадков из-за увеличения влагосодержания атмосферы согласно закону Клаузиуса-Клапейрона. Однако динамический форсинг интенсификации осадков может быть разным. Например, G. Lenderink et al. [2008] предполагается, что рост сумм и интенсивности осадков в будущем будет связан с интенсификацией конвективных процессов. С другой стороны, Т.А. Мат-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, канд. геогр. н., доцент; Институт географии РАН, лаборатория климатологии, вед. науч. с.; e-mail: tormet@inbox.ru

² Институт глобального климата и экологии РАН, отдел мониторинга и вероятностного прогноза климата, инженер; Институт географии РАН, лаборатория климатологии, инженер; e-mail: aleshina_maria@mail.ru

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, лаборатория теории климата, вед. науч. с.; Институт географии РАН, лаборатория климатологии, заведующий лабораторией; e-mail: vasesmenov@mail.ru

веева [2015] отмечает, что во второй половине XXI века на юге России может наблюдаться увеличение повторяемости экстремальных фронтальных осадков в летний период.

Целью данного исследования является анализ трендов некоторых климатических показателей на территории ЧКР в последние десятилетия, следствием которых может быть рост погодных рисков в этом густонаселенном регионе. Проведен совместный анализ трендов приземной температуры воздуха, ТПМ, осадков по натурным данным и данным сеточных архивов, выполнено их статистическое обобщение, а также проанализирована их связь с некоторыми ключевыми характеристиками атмосферы (влажностью атмосферы столба, облачностью, дивергенцией влаги, доступной потенциальной энергией конвекции (CAPE), суммарной солнечной радиацией).

Материалы и методы. Термин «Черноморско-Каспийский регион» обычно применяется в социально-экономической географии и геополитике для обозначения области экономического, политического и социального взаимодействия стран Ближнего Востока, Восточной Европы и СНГ. В данной работе под ЧКР понимается прямоугольная область, границами которой являются $25\text{--}55^\circ$ в. д. и $35\text{--}50^\circ$ с. ш., включающая в себя большую часть Турции и Болгарии, южные районы Украины и России, республики Закавказья, северные провинции Ирана, а также западные районы Туркменистана и Казахстана.

Анализ изменения температурно-влажностного режима проводился по нескольким источникам. Данные станционных наблюдений заимствованы из архива ВНИИГМИ-МЦД (табл. 1), а по каспийскому побережью Ирана любезно предоставлены доцентом Гилянского университета Рухоллахом Оджи. К сожалению, доступ к долгопериодным данным по территории остальных государств, входящих в ЧКР, на данном этапе исследований отсутствует. Также были использованы данные реанализа Era-Interim с горизонтальным разрешением $0,75 \times 0,75^\circ$ [Dee et al., 2011], спутниковые данные NOAA [Reynolds et al., 2007] по температуре поверхности океана (ТПО), с разрешением по пространству $0,25 \times 0,25^\circ$, данные по осадкам архивов CRU TS 3.23 (Climatic Research Unit) разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [Jones et al., 2013] и GPCP [Adler et al., 2003], записанные в узлах сетки $2,5 \times 2,5^\circ$.

В работе сделан акцент на изучение современной динамики климата ЧКР, поэтому для анализа был выбран период с 1982 по 2014 гг. Этот временной промежуток характеризуется относительно однородной плотностью мировой наблюдательной сети и более или менее равномерной обеспеченностью спутниковой информацией. Основным ограничивающим фактором при выборе временного интервала в работе послужили данные спутникового мониторинга ТПО (NOAA OI SST V2), среднемесячные значения которых имеются в доступе и представлены с декабря 1981 г.

В качестве меры климатических изменений за выбранный период времени используется коэффициент линейного тренда, полученный по методу наименьших квадратов. Проверка значимости модели регрессии проводится с использованием *F*-критерия Фишера, а коэффициентов корреляции – критерия Стьюдента с уровнями значимости 0,05.

Также были выполнены количественные оценки изменений таких характеристик, как влагосодержание столба атмосферы, доступная потенциальная энергия конвекции CAPE, дивергенция потока влаги.

Оценка степени согласованности используемой информации проводилась путем сравнения данных метеорологических станций с результатами билинейной интерполяции данных архивов ERA-Interim, CRU TS и GPCP из узлов сетки в точки станций за весь исследуемый период. В табл. 2 приведены некоторые итоги сравнения данных сеточных архивов в точках нескольких контрастных метеостанций. Для температурных рядов установлена высокая статистически значимая связь, коэффициенты корреляции для всех станций оказались выше 0,9. При этом разность между станционными и модельными данными могут превышать 2°C . Такая систематическая погрешность может быть связана с ошибками интерполяции сеточных данных в условиях сложного рельефа ЧКР. Однако высокая степень согласованности с результатами наблюдений позволяет использовать данные реанализа температуры с целью изучения общей пространственной картины климатических трендов несмотря на высокие значения абсолютных ошибок в отдельных точках. Для рядов данных по осадкам также получены статистически значимые коэффициенты корреляции, однако их величины существенно ниже, чем в случае темпе-

Таблица 1

Основные характеристики метеорологических станций архива ВНИИГМИ-МЦД

Название станции	Долгота, С°	Широта, С°	Высота, м	Первый год наблюдений*
Сочи	39,77	43,58	57	1874
Красная Поляна	40,2	43,6	566	1936
Сулак	46,25	42,4	2927	1930
Буйнакск	47,12	42,82	472	1936
Махачкала	47,48	43,01	–20	1882

*На всех выбранных метеорологических станциях период наблюдений продолжается по настоящее время.

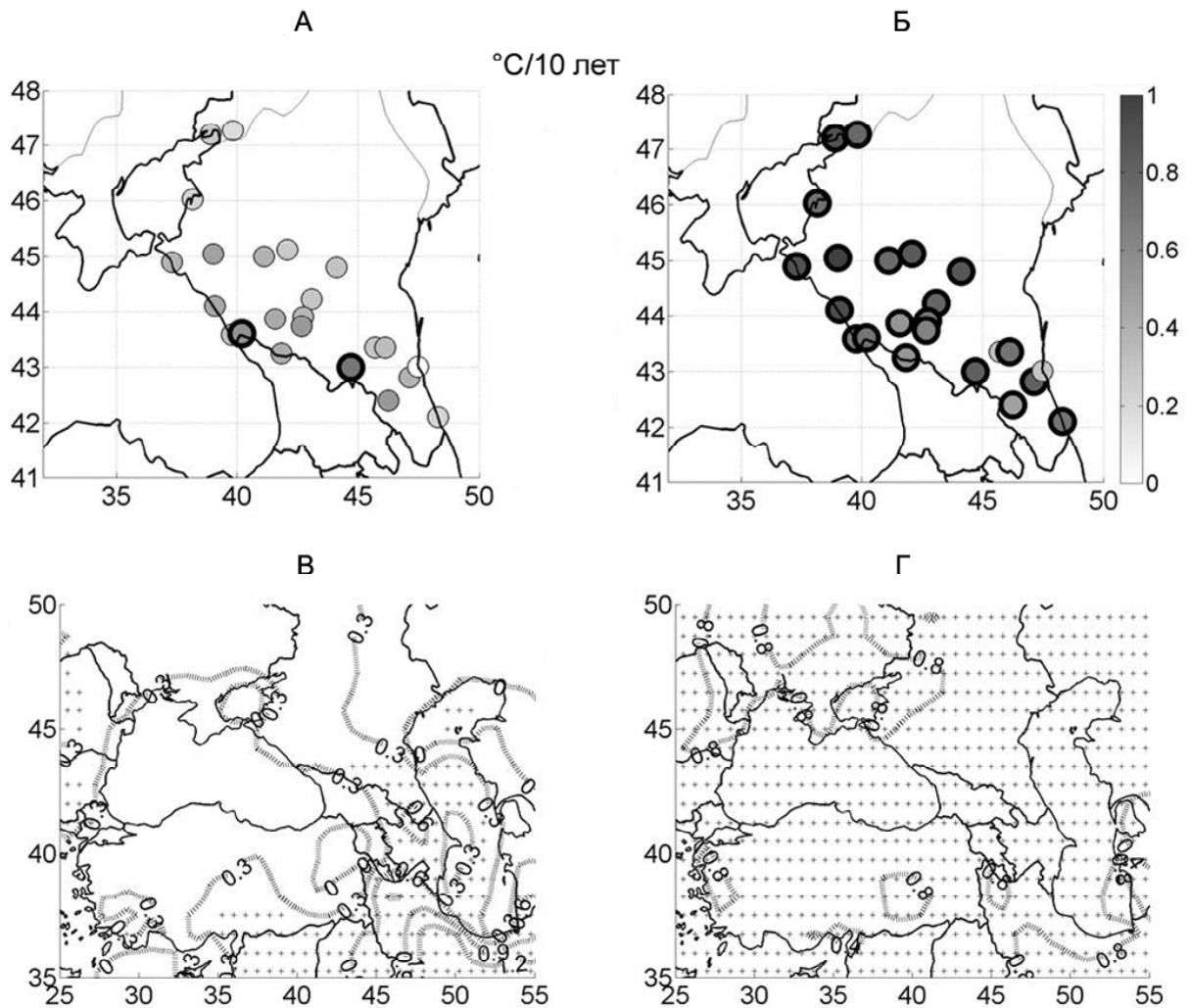


Рис. 1. Коэффициенты линейного тренда значений температуры воздуха на уровне 2 м для: А – зимы, Б – лета (данные метеостанций); В – зимы, Г – лета (данные реанализа ERA-Interim) в °С/10 лет. Штриховкой показаны области с трендами, статистически значимыми на уровне 0,05

Fig. 1. Coefficients of the linear trend of 2 m level air temperature values for: А – winter, Б – summer (data of meteorological stations); В – winter, Г – summer (ERA-Interim reanalysis data), °С/10 years. Dashed areas show statistically significant trends at about 0,05

Таблица 2

Результат сравнения данных среднемесячных значений сеточных архивов ERA-Interim, GPCP и CRU TS с данными метеостанций, характеризующих типичные условия ЧКР (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разность между результатом интерполяции сеточных архивов в точках станций и станционными данными)

Источник данных	Станция	R	Δ	RMS (Δ)
ERA-Interim, температура на 2 м, °С	Сочи	0,989	-2,51	1,39
	Красная Поляна	0,991	-3,37	1,17
	Сулак	0,980	0,61	3,40
	Буйнакск	0,995	-2,80	1,16
CRU TS осадки, мм/месяц	Сочи	0,93	66,02	52,43
	Красная Поляна	0,92	-36,96	55,12
	Сулак	0,83	-35,29	39,48
	Буйнакск	0,87	14,27	38,99
GPCP, осадки, мм/день	Сочи	0,82	-1,23	1,78
	Красная Поляна	0,90	-1,95	1,99
	Сулак	0,69	-0,93	1,40
	Буйнакск	0,62	0,33	0,82

ратурных рядов: в среднем 0,6–0,8. Кроме того, для всех станций характерны значительные абсолютные разности с сеточными данными (табл. 2). Поэтому сеточные архивы осадков можно рассматривать только лишь как дополнительный источник качественной информации. Для количественных оценок следует использовать стационарные данные.

Результаты исследования и их обсуждение.

Анализ изменений температурно-влажностного режима ЧКР. Рассмотрим сначала изменения температурного режима в регионе. На рис. 1 (А, Б) приведены поля коэффициентов линейных трендов температуры воздуха для зимнего и летнего сезонов, в табл. 2 содержится информация об аналогичных показателях на метеорологических станциях. Оба источника данных согласованно показывают небольшое, а в некоторых точках статистически незначимое потепление в зимний период, и интенсивное, а местами экстремальное (более 1°C за 10 лет) повышение температуры летом. Эта согласованность связана с относительно неплохим воспроизведением большинством реанализов приземной температуры воздуха. Вместе с тем необходимо помнить, что хорошая согласованность воспроизведения трендов температуры не означает таковой для абсолютных значений, поскольку реанализ температуры является «смесью» усвоенных гидродинамической моделью атмосферы стационарных данных и результатов вычислений, выполненных с помощью этой же самой модели, в которых неизбежны ошибки – прежде всего в расчетах компонентов теплового баланса. Поэтому разница абсолютных значений между реанализами и стационарными данными даже в случае осреднения по большим территориям может достигать 1°C [Торопов, 2005], что соизмеримо с максимальными значениями тренда, показанного на (рис. 1, А, Б).

Данные реанализа неплохо воспроизводят и пространственную структуру температурного тренда. Согласно стационарным данным, зимой статистически значимое потепление отмечается только на Восточном Кавказе, ближе к каспийскому побережью, а также в районе Красной Поляны. Такая же структура трендов прослеживается и по данным реанализа ERA-Interim. В летнее же время интенсивным потеплением охвачен практически весь ЧКР, причем максимальные значения линейного тренда отмечаются в предгорных и степных районах Краснодарского края и в Крыму. Второй очаг интенсивного потепления наблюдается над северными районами Ирана (горная система Эльбурс и побережье Каспийского моря). Интересно, что по данным реанализа сильное потепление в этих районах отмечается и зимой.

Тренды осадков на территории ЧКР по данным архива GPCP и по стационарным данным показаны на рис. 2 и в табл. 3. Несмотря на высокую пространственную изменчивость поля осадков, десятилетние сезонные тренды в точках станций и в узлах сетки согласованы, в целом, неплохо. В зимние месяцы на Черноморском побережье, а также над

степными районами Краснодарского края отмечается слабовыраженный отрицательный тренд, не превышающий, в среднем, 0,2 (мм/сут)/10 лет по интенсивности и 10 (мм/мес)/10 лет по месячным суммам осадков. Статистически значимый положительный тренд, достигающий значения 0,5 (мм/сут)/10 лет прослеживается над северной частью акватории Каспия и примыкающей к ней территории Кавказа. Обращает на себе внимание некоторый рост как интенсивности, так и суммы зимних осадков над акваторией Черного моря по данным GPCP (при этом на побережье этого не происходит). В летние месяцы преобладают области со статистически незначимым уменьшением осадков над большей частью территории ЧКР. Был также выполнен анализ трендов суточной интенсивности осадков и месячных сумм в отдельно взятых пунктах ЧКР (рис. 3). Вблизи Черного моря (Сочи, Красная Поляна) можно отметить тенденцию уменьшения как интенсивностей, так и месячных сумм осадков в январе–феврале и в летние месяцы, а также значительное увеличение этих показателей в апреле. Интерес представляет несогласованность суточных и месячных трендов осадков в отдельных случаях. Например, на метеорологической станции Сулак (восточный Кавказ) суточная интенсивность осадков заметно возрастает, в то время как месячные суммы в течение последних 30 лет меняются мало. Вблизи Черного моря (на Красной Поляне и в Сочи) обратная ситуация: в ноябре и декабре месячная сумма осадков существенно уменьшается, в то время как суточная практически не меняется. На этом основании можно предположить, что на фоне уменьшения или неизменности месячных сумм осадков повторяемость отдельных экстремальных событий в ряде пунктов ЧКР увеличивается. В целом статистически значимое увеличение интенсивности и сумм осадков, а также суточного максимума на российской территории ЧКР отмечается только в Махачкале и Буйнакске (табл. 3). На остальной территории ЧКР, включая северные провинции Ирана, значимых изменений характеристик осадков не выявлено. В большинстве районов отмечается слабая тенденция уменьшения сумм осадков (статистически не значимая).

Физические механизмы изменений температурно-влажностного режима ЧКР. Интересно попытаться выявить физические механизмы интенсивного летнего потепления, которое является одним из основных результатов анализа трендов температурно-влажностного режима ЧПК. Принимая во внимание физико-географическую специфику ЧКР, разумно предположить, что важнейшими факторами, определяющими фон летней температуры, должны быть радиационный баланс и ТПМ.

На рис. 4, А, Б представлены летние и зимние тренды ТПМ, а также средний для выбранной области ход летних значений приходящей коротковолновой радиации и общего балла облачности. Хорошо видно, что в летние месяцы поверхности обеих

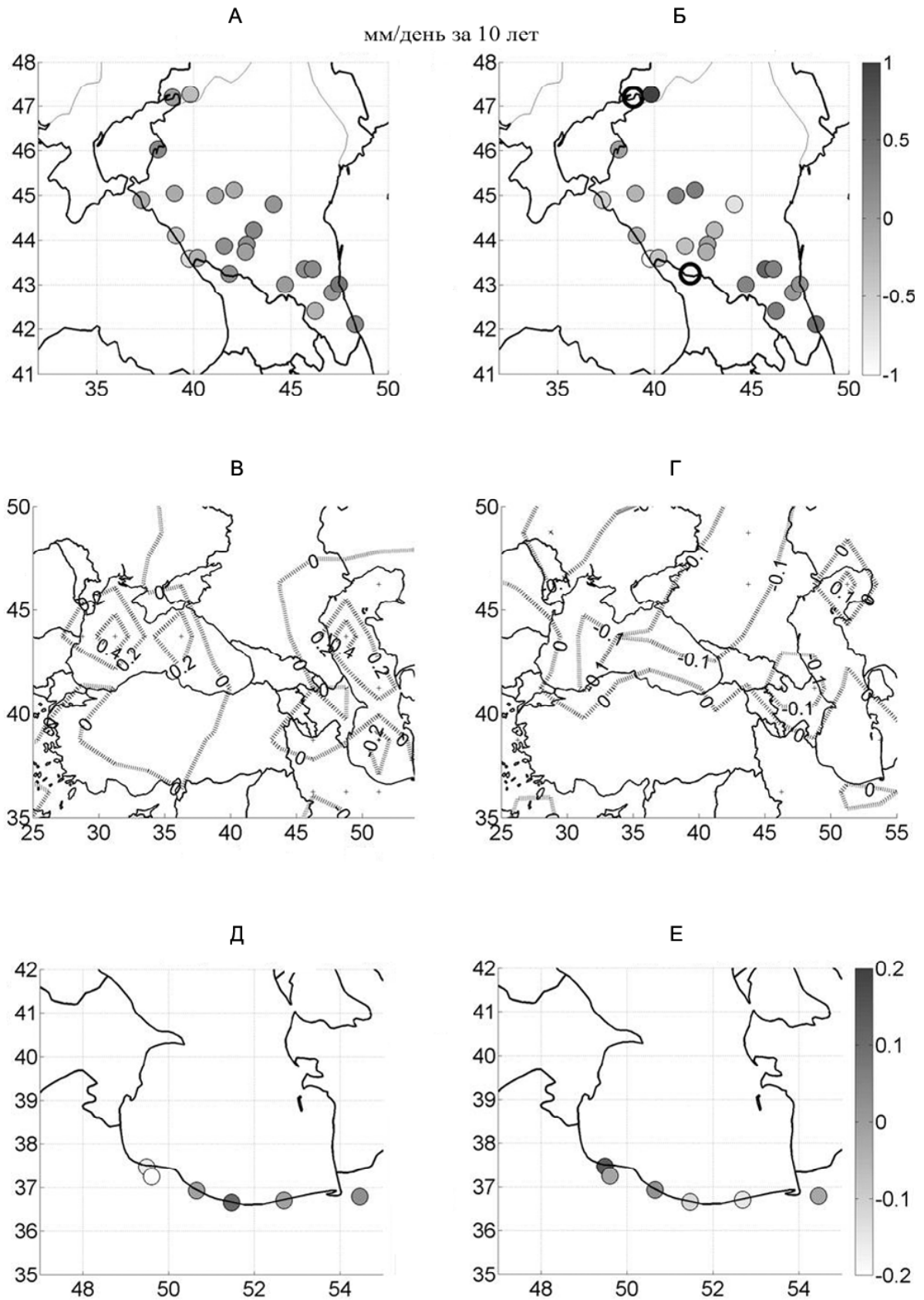


Рис. 2. Коэффициенты линейного тренда значений интенсивности осадков для: А – зимы, Б – лета (данные метеостанций РФ); В – зимы, Г – лета (данные GPCP), Д – зимы, Е – лета (данные метеостанций Ирана) (в мм/сут)/10 лет). Штриховкой показаны области с трендами, статистически значимыми на уровне 0,05

Fig. 2. Coefficients of the linear trend of precipitation intensity values for: А – winter, Б – summer (data of meteorological stations in Russia); В – winter, Г – summer (GPCP data), Д – winter, Е – summer (data of weather stations in Iran) (mm/day)/10 years. Dashed areas show statistically significant trends at about 0,05

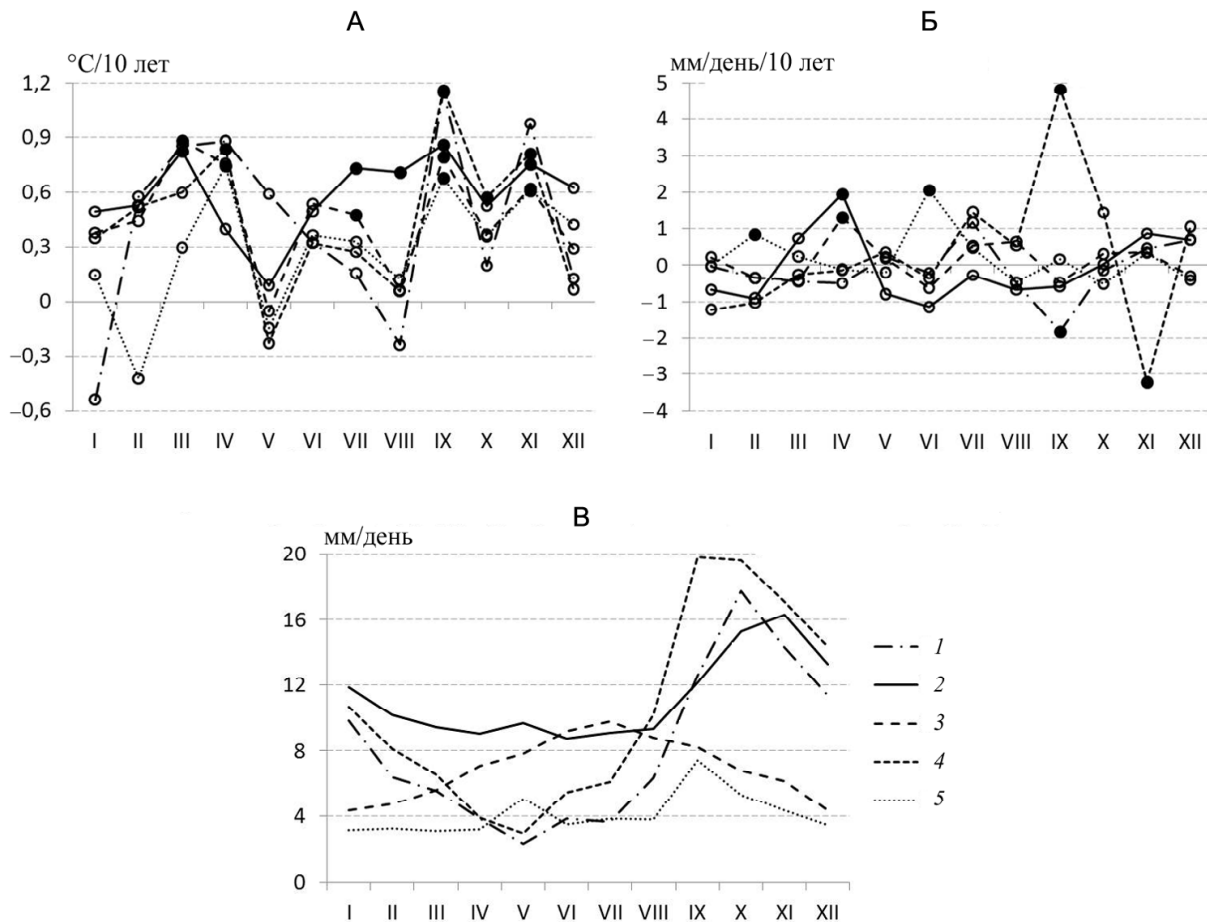


Рис. 3. Годовой ход коэффициентов линейных трендов за 10 лет: А – среднемесячной температуры воздуха на уровне 2 м, Б – среднемесячной суточной интенсивности осадков, В – месячной суммы осадков на метеорологических станциях (1 – Сочи, 2 – Красная Поляна, 3 – Сулак, 4 – Буйнакск, 5 – Махачкала), период 1982–2014 гг. (значимые тренды показаны закрашенными точками)

Fig. 3. The annual cycle of linear trend coefficients over 10 years: А – the average monthly air temperature at 2 m level, Б – the average monthly the daily intensity of precipitation, В – the monthly amount of precipitation for meteorological stations (1 – Sochi, 2 – Krasnaya Polyana, 3 – Sulak, 4 – Bujnaks, 5 – Mahachkala) during 1982–2014. Significant trends are shown by color dots

морей интенсивно прогреваются по всем акваториям: тренды статистически значимы и велики: 0,7–1°C/10 лет. Зимой знак тренда меньше по модулю и, кроме того, регионально зависим. В центральной части Каспия, а также в центре и на северо-западе Черного моря отмечается повышение температуры, достигающее 0,5°C/10 лет. Можно констатировать, что зимняя ТПМ, проинтегрированная по акваториям Каспийского и Черного морей, меняется слабо, в то время как летняя повышается очень интенсивно. Следует отметить, что данный вывод основан на спутниковой информации NOAA OI SST V2, поэтому к количественной составляющей полученного результата следует относиться осторожно, учитывая тот факт, что ошибки восстановления ТПО по спутниковым данным достигают 0,5°C [Артамонов с соавт., 2017; Мысленков с соавт., 2017]. Долгопериодные инструментальные измерения ТПМ Черного и Каспийского морей отсутствуют, поэтому количественно оценить точность спутниковой информации не представляется возможным. Тем не менее, нет оснований подвергать результат спутникового мониторинга сомнению на качественном уровне:

не: в летнее время поверхность морей на юге России по всей видимости теплеет интенсивнее, чем зимой.

Одной из основных причин летнего повышения ТПМ Черного и Каспийского морей в летнее время может быть статистически значимый рост суммарной солнечной радиации, который отмечен над регионом в последние 30 лет по данным реанализа ERA-Interim, и достигает 10 Вт/м² за 30 лет, что весьма существенно (рис. 4, В). Похожие результаты для горных районов Кавказа получены по данным реанализа NCEP/NCAR [Торопов с соавт., 2016], а также по натурным данным, полученным в относительно близко расположенном альпийском регионе [Philipona, 2013]. К величине суммарной радиации, полученной из архива любого реанализа, также нужно относиться с большой осторожностью. Однако наличие и знак тренда скорее всего соответствуют действительности, что подтверждается сериями натурных измерений, которые проводятся в нескольких точках земного шара [Philipona, 2013]. В целом, летнее потепление приповерхностных вод Черного и Каспийского морей и согласованный с ним

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты линейного тренда приземной температуры воздуха и характеристик осадков для метеостанций, характеризующих типичные условия ЧКР

Показатель	Станция	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Температура на 2 м, °С	Сочи	0,27	0,33	0,60	0,50	0,43
	Красная Поляна	0,50	0,35	0,66	0,50	0,51
	Сулак	0,53	0,48	0,46	0,40	0,46
	Буйнакск	0,39	0,71	0,78	0,58	0,61
	Махачкала	-0,02	0,33	0,33	0,35	0,25
Максимум осадков, мм/день	Сочи	-0,30	-1,75	-5,21	6,98	0,62
	Красная Поляна	-2,70	1,96	-2,98	-2,13	-2,30
	Сулак	-0,36	0,26	-1,89	0,76	-2,04
	Буйнакск	0,66	0,74	0,46	-4,40	-2,69
	Махачкала	1,08	4,93	3,27	-0,47	2,39
Интенсивность осадков, мм/день	Сочи	-0,51	-0,12	-0,73	0,12	-0,36
	Красная Поляна	-0,06	-0,05	-0,41	0,02	-0,19
	Сулак	0,02	-0,07	0,39	-0,10	0,07
	Буйнакск	0,23	0,22	0,15	-0,05	0,13
	Махачкала	0,56	0,33	0,23	-0,06	0,33
Сумма осадков, мм/месяц	Сочи	-30,17	0,37	-22,56	-2,74	-55,10
	Красная Поляна	-26,51	5,45	-18,36	-13,67	-53,09
	Сулак	3,22	-0,95	2,72	-4,84	0,15
	Буйнакск	1,80	3,16	-8,04	-6,79	-9,88
	Махачкала	14,01	2,27	2,87	-0,78	18,37

Полужирным шрифтом выделены статистически значимые на уровне 0,05 тренды.

рост приземной температуры практически по всей территории ЧКР (исключая высокогорные районы) могут быть откликом на один и тот же процесс роста суммарной солнечной радиации.

Логичным откликом на увеличение ТПМ Черного и Каспийского морей, должно стать увеличение таких параметров, как конвективная доступная потенциальная энергия (САРЕ) над морской поверхностью, а также влагосодержание атмосферы в силу роста испарения с морских акваторий и в соответствии с законом Клаузиуса-Клапейрона. Учитывая тот факт, что наиболее ярко процесс потепления в ЧКР проявился в летние месяцы, наибольшего роста САРЕ и влагосодержания атмосферы следует ожидать именно летом. На (рис. 5, А, Б) показаны тренды этих величин. Максимальный рост САРЕ отмечается в юго-восточной части Черного моря и в северной части Каспия. Также для Черного моря характерно увеличение влагосодержания атмосферы, а для восточного побережья Каспийского моря, наоборот, существенное его уменьшение. Усиление конвективной деятельности в регионе, особенно над морской поверхностью, должно приводить к росту осадков – по крайней мере, над акваториями и прилегающими районами побережий. Однако, как было установлено ранее, этого не происходит.

Анализ полей трендов дивергенции потока влаги (рис. 5, В) показал, что для лета характерен положительный тренд этой величины над большей частью черноморской акватории, а также над северными предгорьями Кавказа и северной частью Каспийского моря. Области усиления конвергенции влаги отмечаются лишь локально: в горах Западного Кавказа, на севере Ирана и в Турции. Дивергенция влаги могла послужить причиной уменьшения осадков в центральной и северо-восточной частях Черного моря, а также в северной части Каспия – даже на фоне увеличения потенциального влагосодержания атмосферы.

Циркуляционный механизм, определяющий увеличение дивергенции влаги, может быть связан с изменениями интенсивности крупномасштабной меридиональной циркуляции в атмосфере. Например, Lu et al. [2007] показали, что наблюдается уменьшение интенсивности ячейки Хедли, при этом происходит ее расширение к полюсам, что отражается на особенностях циркуляции в умеренных широтах. Это может приводить к ослаблению интенсивности западного переноса, увеличению повторяемости антициклонов субтропического происхождения в регионе и, соответственно, уменьшению влагосодержания и осадков.

Были проанализированы данные по изменению вертикальной скорости за выбранный период вре-

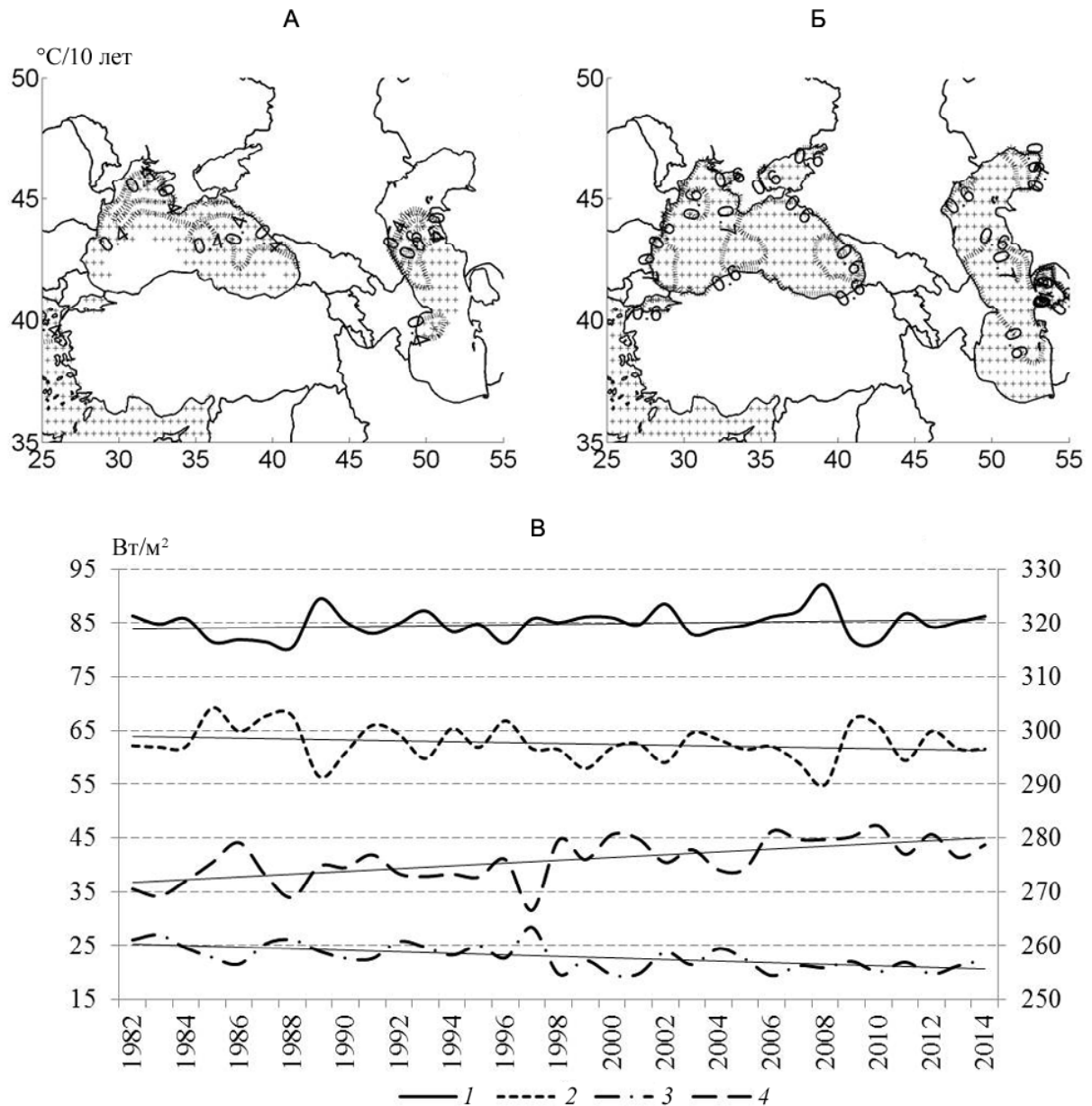


Рис. 4. Коэффициенты линейного тренда ТПМ для зимы (А) и лета (Б) (данные NOAA SST) в $^{\circ}\text{C}/10$ лет. Штриховкой показаны области с трендами, статистически значимыми на уровне 0,05: В – ход средних сезонных значений суммарной солнечной радиации (1 – зимних, по основной оси, 4 – летних – по вспомогательной оси, $\text{Вт}/\text{м}^2$) и балла общей облачности (2 – зимней, 3 – летней – по основной оси, %) для ЧКР по данным реанализа ERA-Interim за период 1982–2014 гг. Прямыми линиями показаны линейные тренды соответствующих величин

Fig. 4. Coefficients of the linear trend of SST in winter (A) and in summer (B) according to NOAA SST data, $^{\circ}\text{C}/10$ years. Dashed areas show statistically significant trends at about 0,05: В – the cycle of mean seasonal values of absorbed solar radiation (1 – winter, along the main axis, 4 – year on the auxiliary axis, Wt/m^2) and total cloudiness (2 – winter, 3 – summer – on the main axis, %) for the BCR according to ERA-Interim reanalysis data for period 1982–2014. Straight lines are for the linear trends of respective parameters

мени. На рис. 5 (Г) представлен результат расчета линейных трендов для аналога вертикальной скорости в слое 1000–850 гПа. Для большей части Черноморской акватории, а также южного и юго-западного побережья Каспия характерен процесс уменьшения вертикальной составляющей скорости ветра. Этот эффект может компенсировать увеличение влагосодержания атмосферного столба за счет роста температуры, в результате сумма средних и экстремальных осадков в регионе существен-

но не меняется. Такой механизм может объяснять полученные результаты для тенденций характеристик осадков.

Таким образом, причиной стабильности характеристик осадков на фоне потепления в регионе может выступать изменение режима атмосферной циркуляции, которое приводит к более вероятному установлению нисходящих токов воздуха, дивергенции влажного воздуха и, соответственно, уменьшению осадков.

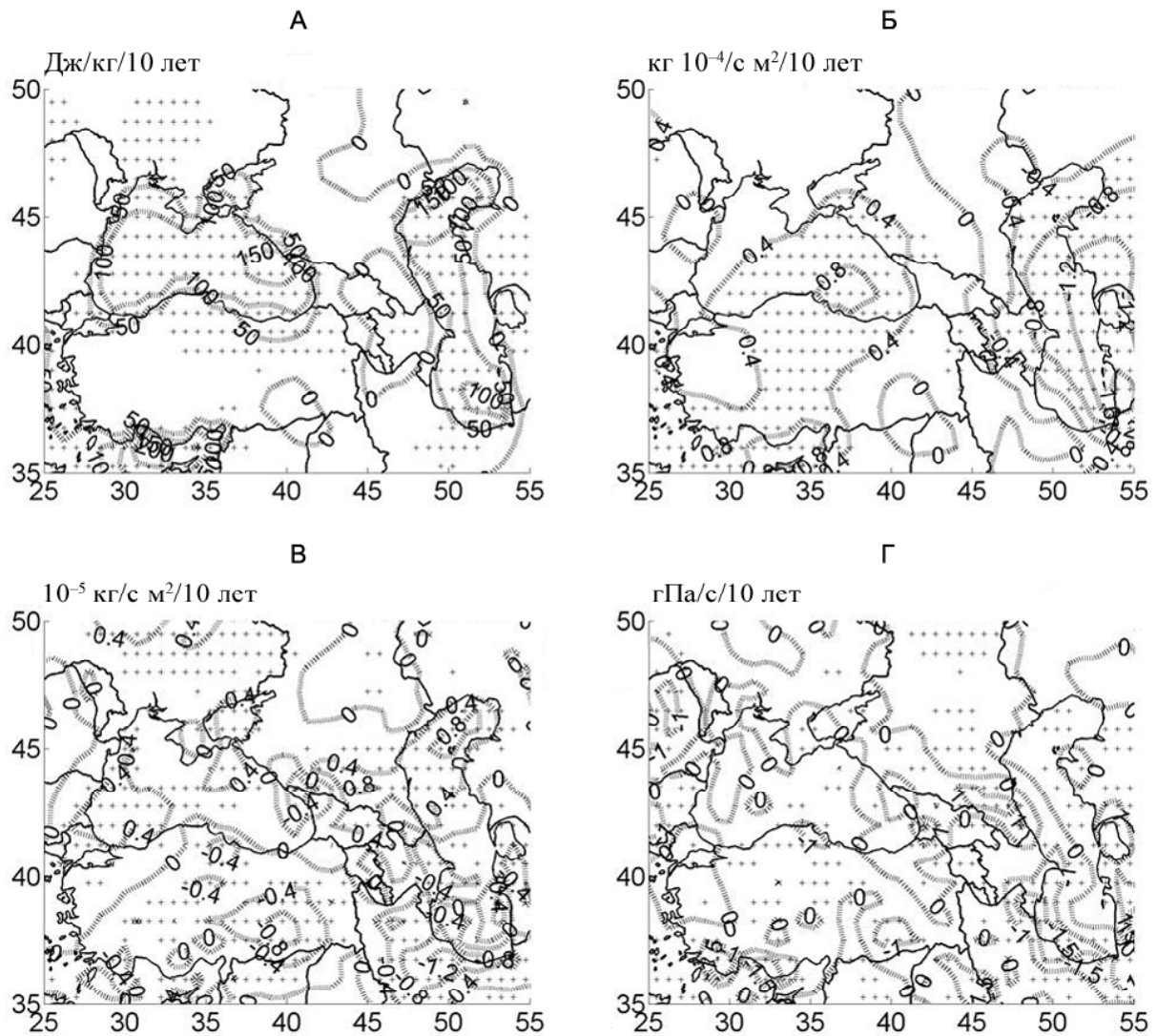


Рис. 5. Коэффициенты линейного тренда средних летних значений: А – CAPE ((Дж/кг)/10 лет), Б – влагосодержания ((кг 10⁻⁴/с м²)/10 лет), В – дивергенции потока влаги (в 10⁻⁵ кг/с м²/10 лет), Г – аналога вертикальной скорости для слоя 1000–850 гПа ((гПа/с)/10 лет). Данные реанализа ERA-Interim. Штриховкой показаны области с трендами, статистически значимыми на уровне 0,05

Fig. 5. Coefficients of the linear trend of mean summer values of: А – CAPE ((J/kg)/10 years), Б – moisture content ((kg 10⁻⁴/s m²)/10 years), В – divergence of moisture flow ((10⁻⁵ kg/s m²)/10 years), Г – analogue of the vertical rate for 1000–850 hPa layer ((hPa/s)/10 years). Data of the ERA-Interim reanalysis. Dashed areas show statistically significant trends at about 0,05

Выводы:

– потепление климата ЧКР реализуется в основном за счет летнего сезона, в течение которого по всей территории отмечается статистически значимый положительный тренд температуры, достигающий 1°C/10 лет. Исключение составляют только северные провинции Ирана, над которыми столь же интенсивное потепление наблюдается и зимой. При этом существенных изменений режима осадков не обнаружено. Можно говорить только о слабо выраженной тенденции увеличения осадков над морскими акваториями в зимние месяцы, и об их уменьшении как зимой, так и летом над сушей;

– тренды приземной температуры хорошо согласуются с трендами ТПМ, для которых также характерен интенсивный летний рост. Причиной летнего повышения ТПМ и приземной температуры, скорее

всего, является статистически значимый рост проходящей коротковолновой радиации. Его тренд по данным реанализа ERA-Interim составил 5–10 Вт/м² за 30 лет и хорошо согласуется с уменьшением общей и нижней облачности в регионе;

– увеличение ТПМ, а также теплосодержания тропосферы привело к статистически значимому росту доступной потенциальной энергии конвекции (CAPE), а также, в силу закона Клаузиуса-Клапейрона, к увеличению влагосодержания столба атмосферы. Однако это не отразилось на временной динамике осадков в силу роста дивергенции влаги. Выявленные тенденции по всей видимости связаны со значительными изменениями структуры атмосферной циркуляции, выразившиеся в увеличении повторяемости антициклонов в регионе в летнее время. Данный процесс мог стать причиной

наблюдаемого уменьшения облачности и увеличения приходящей коротковолновой радиации. Таким образом, рост влагосодержания столба атмосферы в силу закона Клаузиуса-Клапейрона компенси-

ровался увеличением дивергенции влаги в антициклональных условиях, в результате чего количество осадков в регионе осталось неизменным, или немного уменьшилось.

Благодарности. Исследование выполнено за счет грантов РФФИ (проекты № 17-05-560017 Иран_а, № 17-05-00771 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Региональные особенности климатической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 2. С. 56–66.
- Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е., Барабанов В.С. Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 4(184). С. 14–28.
- Кислов А.В., Суркова Г.В., Архипкин В.С. Повторяемость штормовых ситуаций в Балтийском, Черном и Каспийском морях в изменяющихся климатических условиях // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 67–77.
- Матвеева Т.А., Гуцина Д.Ю., Золина О.Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 11. С. 20–32.
- Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря с использованием модели SWAN // *Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013. № 350. С. 58–67.
- Мысленков С.А., Кречик В.А., Соловьёв Д.М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термоксы // *Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2017. № 364. С. 159–169.
- Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы климата Восточно-Европейской равнины // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 5. С. 5–21.
- Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лед и снег*. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–19.
- Торопов П.А., Шестакова А.А. Тестирования мезомасштабной модели (WRF) для задачи прогноза Новороссийской боры // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2014. № 3. С. 23–29.
- Adler R.F., George J. H., Chang A., et al. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) // *J. hydrometeorology*. 2003. V. 4. № 6. P. 1147–1167.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. № 137. P. 553–597.
- Intergovernmental Panel on Climate Change*. Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press, 2014.
- Jones P., Harris I. CRU TS3. 21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 3.21 of high resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901–Dec. 2012). NCAS British Atmospheric Data Centre. 2013.
- Lenderink G., Van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 8. P. 511–514.
- Lu J., Vecchi G.A., Reichler T. Expansion of the Hadley cell under global warming // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. № 6. P. 115–132.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. № 8. P. 615–629.
- Min S.K., Zhang X., Zwiers F.W. et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes // *Nature*. 2011. V. 470. № 7334. P. 378–381.
- Philipona R. Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps // *International J. Climatology*. 2013. V. 33. № 6. P. 1530–1537.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C. et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
- Semenov V., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V. 19. № 2. P. 123–140.

Поступила в редакцию 04.09.2017
Принята к публикации 01.11.2017

P.A. Toropov¹, M.A. Aleshina², V.A. Semenov³

TRENDS OF CLIMATE CHANGE IN THE BLACK SEA-CASPIAN SEA REGION DURING RECENT 30 YEARS

Based on ERA-Interim reanalysis data and observations, the main trends in the temperature-humidity regime of the Black Sea-Caspian-Sea region (BCR) for the period of 1982–2014 were revealed. The statistically significant summer warming is associated with increasing surface sea temperature (SST) and radiation balance. Despite the growth of the total moisture content in the atmosphere and the potential convective energy no statistically significant changes in precipitation mode were revealed. The growth of

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor; Institute of Geography, RAS, Laboratory of Climatology, Leading Research Scientist; *e-mail*: tormet@inbox.ru

² Institute of Global Climate and Ecology, RAS, Department of Monitoring and Probabilistic Climate Outlook, engineer; Institute of Geography, RAS, Laboratory of Climatology, engineer; *e-mail*: aleshina_maria@mail.ru

³ A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Laboratory of Climate Theory, Leading Research Scientist; Institute of Geography, RAS, Laboratory of Climatology, Head of the laboratory; *e-mail*: vasemenov@mail.ru

total moisture content is compensated by increasing divergence of moisture due to the intensification of large-scale downward movements in the troposphere. As a result the seasonal and annual precipitation amounts show just minor changes. Perhaps this effect is a consequence of increasing frequency of summer anticyclones over the BCR. This process triggers the increase of the radiation balance due to lesser cloudiness, which leads to the increase in SST and surface air temperature.

Key words: regional climate, temperature and precipitation trends, Black Sea, Caspian Sea, ERA-Interim reanalysis.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects № 17-05-560017 Iran_a and № 17-05-00771 A).

REFERENCES

- Adler R.F., George J.H., Chang A., et al.* The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) // *J. hydrometeorology*. 2003. V. 4. № 6. P. 1147–1167.
- Artamonov Yu.V., Skripaleva Ye.A., Fedirko A.V.* Regional'nye osobennosti klimaticheskoy izmenchivosti polya temperatury na poverkhnosti Chernogo morya [Regional features of climatic variability of the temperature field on the Black Sea surface] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2017. № 2. S. 56–66 (in Russian).
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. № 137. P. 553–597.
- Efimov V.V., Volodin E.M., Anisimov A.E., Barabanov V.S.* Regionalnyie proektsii izmenenij klimata v Chernomorsko-Kaspijskom regione v kontse XXI stoletiya [Regional trajectories of climate change in the Black Sea – Caspian Sea region in the end of the 21st century] // *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 2015. № 5 (184). S. 14–28 (in Russian).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press, 2014.
- Jones P., Harris I.* CRU TS3. 21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 3.21 of high resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901–Dec. 2012). NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013.
- Kislov A.V., Surkova G.V., Arhipkin V.S.* Povtoryaemost' shtormovykh situatsij v Baltijskom, Chernom i Kaspijskom moryah v izmenyayuschihsia klimaticheskikh usloviyah [Frequency of storm situations in the Baltic, Black and Caspian seas under changing climatic conditions] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016. № 2. S. 67–77 (in Russian).
- Lenderink G., Van Meijgaard E.* Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 8. P. 511–514.
- Lu J., Vecchi G.A., Reichler T.* Expansion of the Hadley cell under global warming // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. № 6. P. 115–132.
- Matveeva T.A., Guschina D.Yu., Zolina O.G.* Krupnomasshtabnye indikatory ekstremalnykh osadkov v pribrezhnykh prirodno-ekonomicheskikh zonah evropejskoj territorii Rossii [Large-scale indicators of extreme precipitation in coastal natural-economic zones of the European part of Russia] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015. № 11. S. 20–32 (in Russian).
- Meredith E.P. et al.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. № 8. P. 615.
- Min S.K., Zhang X., Zwiers F.W., et al.* Human contribution to more-intense precipitation extremes // *Nature*. 2011. V. 470. № 7334. P. 378–381.
- Myslenkov S.A., Arhipkin V.S.* Analiz vetrovogo volneniya v Tsemesskoj buhte Chernogo morya s ispolzovaniem modeli SWAN [Analysis of wind waves in the Tsemesskaya Bay of the Black Sea using the SWAN model] // *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossijskoj Federatsii*. 2013. № 350. S. 58–67 (in Russian).
- Myslenkov S.A., Krechik V.A., Solov'yov D.M.* Analiz temperatury vody v pribrezhnoj zone Baltijskogo morya po sputnikovym dannym i izmereniyam termokosy [Analysis of water temperature in the coastal zone of the Baltic Sea using satellite data and thermistor chain measurements] // *Tr. Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossijskoj Federatsii*. 2017. № 364. S. 159–169 (in Russian).
- Philipona R.* Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps // *International J. Climatology*. 2013. V. 33. № 6. P. 1530–1537.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., et al.* Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
- Semenov V., Bengtsson L.* Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V. 19. № 2. P. 123–140.
- Toropov P.A.* Otsenka kachestva vosproizvedeniya modelyami obschey tsirkulyatsii atmosfery klimata Vostochno-Evropejskoj ravniny [Assessment of the quality of the East-European Plain climate simulation by models of the general atmospheric circulation] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2005. № 5. S. 5–21 (in Russian).
- Toropov P.A., Mihalenko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A.* Temperaturnyj i radiatsionnyj rezhim lednikov na sklonah Elbrusa v period ablyatsii za poslednie 65 let [Thermal and radiation regime of Elbrus glaciers during the period of ablation for recent 65 years] // *Lyod i sneg*. 2016. T. 56. № 1. S. 5–19 (in Russian).
- Toropov P.A., Shestakova A.A.* Testirovaniya mezomasshtabnoj modeli (WRF) dlya zadachi prognoza Novorossijskoj bory [Evaluation of the WRF mezzoscale model for forecasting of the Novorossijsk bora] // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2014. № 3. S. 23–29 (in Russian).

Received 04.09.2017

Accepted 01.11.2017