Влияние изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана на тренды летних осадков на Европейском Севере России по наземным и спутниковым данным

Е. А. Черенкова

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: cherenkova@igras.ru

Исследованы региональные особенности летних осадков на севере Европейской части России (ЕЧР) в периоды устойчивых противоположных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики во второй половине XX – начале XXI вв. Согласно наземным и спутниковым данным, летом в период 1963–2015 гг. на Европейском Севере России преобладали положительные коэффициенты трендов осадков. Показано, что влияние долгопериодной составляющей Северной Атлантики (СА) на атмосферную циркуляцию в Атлантико-Европейском секторе проявилось в том, что преобладающие отрицательные аномалии температуры поверхности океана (ТПО) северной части Атлантического океана с июня по август в период 1963–1994 гг. ассоциировались с положительными фазами североатлантического колебания и колебания центров действия атмосферы «Восточная Атлантика / Западная Россия», а период устойчивых положительных аномалий ТПО СА в 1995–2015 гг. — с отрицательными фазами тех же колебаний. Выявленные статистически значимые различия в поле аномалий давления проявились в период холодной СА в усилении интенсивности региональной зональной атмосферной циркуляции и переноса тепла и влаги с Атлантики на континент, в увеличенной повторяемости лет с циклонической циркуляцией и количестве осадков выше климатической нормы в центре ЕЧР и ниже климатической нормы на её севере. Напротив, в период более тёплой СА наблюдались: ослабление зональной циркуляции, повышенная повторяемость эпизодов блокирования над ЕЧР и количество осадков на севере Европейской части России в среднем выше нормы на фоне усиления в регионе циклонической активности.

Ключевые слова: атмосферные осадки, крупномасштабная циркуляция атмосферы, дистанционное зондирование, север Европейской части России, Северная Атлантика

Одобрена к печати: 05.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-229-238

Введение

Последние десятилетия XX и начало XXI вв. характеризовались более высокой скоростью потепления в Арктике относительно температурных изменений в средних и низких широтах. Температура приповерхностного слоя атмосферы в Арктике повышалась приблизительно в два раза быстрее по сравнению с глобальным уровнем потепления (Второй..., 2014).

На изменчивость климата в Европе значительное влияние оказывают изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции (Ogi et al., 2005; Pal et al., 2004). Наиболее существенную роль при этом играет североатлантическое колебание, характеризующее ведущий режим межгодовой изменчивости атмосферной циркуляции Северной Атлантики (Hurrell, 1995). Устойчивые аномалии температуры поверхности в северной части Атлантического океана оказывают влияние на формирование аномалий климата в регионах Европы на десятилетнем и междесятилетнем временном масштабе (Черенкова, Семенов, 2017; Sutton, Dong, 2012). Вместе с тем остаётся неопределённость в оценках долговременного влияния термического состояния Северной Атлантики на изменения атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе.

В условиях продолжающегося наблюдаемого потепления на севере Европейской части России (ЕЧР) мониторинг осадков остаётся весьма актуальным, особенно в летние месяцы,

поскольку потепление привело к существенному продвижению границ засухи к северу (Черенкова, 2012), что ассоциируется с повышенными рисками верховых пожаров в зоне лесных ландшафтов. Вместе с тем увеличение осадков на территориях избыточного увлажнения на Европейском Севере России на фоне потепления и деградации мерзлоты на Крайнем Севере приводит к необходимости адаптации арктических наземных экосистем, прежде всего растительных сообществ, к новым условиям.

Цель статьи состоит в анализе трендов летних осадков на севере ЕЧР в периоды устойчивых аномалий температуры поверхности Северной Атлантики во второй половине XX — начале XXI вв., а также в исследовании изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и выявлении их влияния на изменения осадков.

Материалы и методы

В фокусе исследования находится территория, расположенная на севере Европейской части России севернее 60° с.ш. и ограниченная с востока 70° в.д., которая охватывает субарктические (тундровые и лесотундровые) и бореальные (северотаёжные и среднетаёжные) ландшафты. Особенностью формирования регионального климата территории летом является прохождение вторичной ветви арктического фронта и связанная с ней максимальная повторяемость центров циклонов на территории ЕЧР, локализованная в зонально-ориентированной полосе на широте 60° с.ш. (Титкова и др., 2015). Проведённые исследования выявили влияние североатлантического колебания (САК) на повышенную повторяемость циклонов в регионе (Бардин и др., 2015). Установлено, что на фоне продолжающегося наблюдаемого и прогнозируемого потепления положение арктического фронта остаётся квазистационарным по данным наблюдений за последние 30 лет и ожидается таковым в период до 2060 г. согласно данным численных экспериментов с региональной климатической моделью Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Черенкова и др., 2014).

Для анализа трендов осадков использовался сеточный архив данных месячных сумм осадков CRU TS4.0 Университета Восточной Англии (Harris et al., 2014), созданный на основе данных наземных наблюдений, полученных из национальных метеослужб и интерполированных в узлы сетки пространственного разрешения $0,5 \times 0,5^\circ$. Осадки в летние месяцы дополнительно были изучены по данным о суммарных месячных осадках над сушей и океанами из архива GPCP V2.2 (Huffman et al., 2009) пространственного разрешения $2,5 \times 2,5^\circ$, начало измерений которых датируется 1979 г. Архив создан на основе комбинирования наземных станционных измерений осадков, а также косвенных измерений характеристик облачности и яркостной температуры в микроволновом и инфракрасном диапазоне с нескольких спутников, которые затем с помощью достаточно сложных алгоритмов преобразованы в атмосферные осадки.

Для исследования были привлечены данные среднемесячных температур поверхности океана северной части Атлантического океана с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ из архива Центра Гадлея Метеослужбы Великобритании, HadISST1.1 (Rayner et al., 2003). Архив данных температуры поверхности океана (ТПО) создан в результате комбинирования спутниковых данных и судовых измерений. Среднемесячные значения ТПО были рассмотрены в качестве характеристики долгопериодной изменчивости Северной Атлантики, периодичность которой оценивается разными авторами от 60 до 80 лет (например (Delworth et al., 2007)). Такая периодичность отчётливо прослеживается на графике изменений ТПО Северной Атлантики (СА) на *рис. 1а* (см. с. 231). В данной работе периоды исследования трендов осадков с июня по август были выбраны с учётом периодов устойчивых аномалий температуры поверхности Северной Атлантики. Период 1963–1994 гг. с преобладающими отрицательными аномалиями ТПО был отнесён к фазе условно более холодной СА, а период 1995–2015 гг. характеризует её более тёплое состояние (см. *рис. 1а*). Как проиллюстрировано на *рис. 1а*, особенностью периода 1995–2015 гг. является то, что в этот временной интер-

вал потепление СА было беспрецедентным: наибольшая аномалия температуры поверхности океана в Северной Атлантике наблюдалась к северу от 40° с. ш. и достигала 0,8 °С по сравнению со средним значением ТПО за период 1871–2008 гг. (Черенкова, 2017).

Изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции с июня по август исследованы на основе данных об аномалии высоты геопотенциала на уровне 500 гПа (Z500) Северного полушария из архива реанализа NCEP/NCAR (2,5×2,5°) (Kalnay et al., 1996). Изменчивость атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе характеризуется главным образом тремя основными режимами (или модами): североатлантическим колебанием, колебанием региональных центров действия (областей максимальной изменчивости) над Скандинавией, а также колебанием центров действия атмосферы «Восточная Атлантика/Западная Россия». Временная изменчивость указанных центров действия описывается с помощью индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции внетропической зоны Северного полушария — NAO (North Atlantic Oscillation), SCAND (Scandinavia) и EAWR (East Atlantic/Western Russia), соответствующих ведущим модам изменчивости барического поля на высоте 500 гПа Северного полушария, полученным ранее в работе (Barnston, Livezey, 1987) как результат разложения на естественные ортогональные функции поля аномалий высоты геопотенциала 700 гПа. Индекс NAO отражает интенсивность региональной зональной атмосферной циркуляции и переноса тепла и влаги с Атлантики на континент. Принято считать, что временная изменчивость индекса EAWR характеризует динамику блокирования зонального переноса над Северной Евразией, в то время как положительная фаза индекса SCAND связана с антициклоническими режимами над Скандинавией и северной половиной Европейской части России. Пространственное распределение аномалий высоты геопотенциала на уровне 500 гПа в противоположные фазы указанных индексов телеконнекции в период с 1950 г. представлено на официальном интернет-сайте Центра прогнозирования погоды и климата NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>). Характерной особенностью выделенных ведущих режимов изменчивости поля давления является то, что противоположные фазы каждого циркуляционного индекса, описывающего временные изменения ведущего режима, в среднем характеризуют противоположные по знаку аномалии высоты геопотенциала прежде всего в центрах действия атмосферы, которые характеризуют индексы.

Статистическая значимость трендов на уровне 0,05 была определена согласно достаточно простому критерию оценки параметров регрессионного уравнения, описанному в работе (Seber, 1977), не использующему методологию бутстреп, но при этом достаточно надёжно выявляющему значения отношения «сигнал — шум».

Рис. 1. Межгодовая изменчивость аномалий среднегодовой ТПО Северной Атлантики в период 1901–2015 гг. (а), а также индексов NAO, SCAND и EAWR в июне – августе в период 1950–2015 гг. (б)

Обсуждение результатов

Как следует из анализа результатов, положительные тренды осадков летом в период 1963–2015 гг., свидетельствующие об их росте, преобладали на Европейском Севере России, что согласуется с увеличением среднего количества осадков в том же регионе летом в 1926–2012 гг. в периоды устойчивых положительных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики по сравнению с её более холодными периодами (Черенкова, 2017). Летом в период 1963–2015 гг. на Европейском Севере России наблюдался рост осадков с наибольшими статистически значимыми изменениями на юго-западе региона (до 1 мм/год на юге Карелии) и на юго-востоке (до 0,7 мм/год на юге Республики Коми). Выявленная направленность изменений трендов осадков и пространственное распределение коэффициентов трендов на территории ЕЧР не противоречит аналогичным характеристикам за период 1979–2012 гг., приведённым в работе (Второй..., 2014). Временные изменения осадков по данным Университета Восточной Англии, осреднённых по территории севера ЕЧР, продемонстрировали статистически значимый рост со скоростью 4,5 мм/10 лет летом в период 1963–2015 гг. (рис. 2). На том же рисунке показано, что аналогичные тенденции изменения осадков прослеживаются и по спутниковым данным. О тесной связи между временными рядами наземных и спутниковых данных свидетельствуют коэффициенты корреляции от 0,72 до 0,98 (рисунок не приводится). Однако необходимо отметить, что в целом по территории исследования количество осадков, полученных на основе измерений со спутников, завышается по сравнению с данными архива CRU. Так, осадки летом на севере ЕЧР в период 1979–2015 гг. были переоценены методами дистанционного зондирования в среднем на 7,6 %.

Полученные результаты согласуются с выводами о наблюдении во второй половине XX века статистически значимых положительных трендов осадков над Скандинавией и об их увеличении в Северной Европе (Groisman et al., 2005) и на северо-западе России (Титкова, 2003), которые многие исследователи связывают с глобальным потеплением. Отметим, что тенденция роста осадков летом на Европейском Севере России в период 1963–2015 гг. подкрепляется выводами об увеличении интенсивности фронтальных процессов, а также о расширении зоны максимального числа центров циклонов на вторичной ветви арктического фронта в период 1981–2000 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. (Титкова и др., 2015).

Как показано на графике на рис. 2, в период 1963–1994 гг. на Европейском Севере России наблюдалось в среднем меньшее количество осадков (на 5,6 %), чем в 1995–2015 гг., что оказало влияние на формирование положительного знака тренда летних осадков в регионе в период 1963–2015 гг.

Рис. 2. Межгодовая изменчивость осадков с июня по август на севере ЕЧР по наземным (1) и спутниковым (3) данным в период 1963–2015 гг., а также 5-летние скользящие средние осадков (2). Линейный тренд в период 1963–2015 гг. показан сплошной линией синего цвета, средние значения осадков в периоды 1963–1994 и 1995–2015 гг. отмечены черными сплошными линиями, коридоры среднеквадратического отклонения — пунктирными линиями

Для того чтобы прояснить, могли ли изменения атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе повлиять на формирование положительных трендов осадков на территории исследования летом в период 1963–2015 гг., рассмотрим статистику индексов NAO, SCAND и EAWR в фазы устойчивых аномалий ТПО СА противоположного знака. Как можно увидеть на нижнем графике *рис. 1б*, в период 1963–1994 гг. преобладала положительная фаза индекса EAWR (63,5 % случаев), а в 1995–2015 гг. доминировала фаза отрицательных значений индекса (55,6 % случаев). То же можно сказать об аналогичном соотношении для индекса NAO: 59,4 и 58,7 % (верхний график на *рис. 1б*). С другой стороны, ранее было установлено, что влияние долгопериодной составляющей СА на атмосферную циркуляцию в Атлантико-Европейском секторе летом проявилось в том, что положительные аномалии и экстремумы ТПО СА в этот период ассоциировались с отрицательными значениями индексов NAO и EAWR, а отрицательные аномалии и экстремумы ТПО СА — с положительными значениями индексов NAO и EAWR (Семенов, Черенкова, 2018). При этом различия в статистике как аномальных, так и экстремальных значений пар индексов NAO и EAWR летом были статистически значимы в рассмотренные периоды тёплой и холодной СА. Аналогичные различия в статистике значений индекса SCAND также наблюдались летом в периоды 1963–1994 и 1995–2015 гг., однако они были статистически незначимыми. Можно предположить, что различия в преобладании противоположных фаз североатлантического колебания и колебания «Восточная Атлантика/Западная Россия», а также североатлантического и скандинавского колебаний летом в период более холодной СА и её более тёплый период связаны, прежде всего, со смещением области наибольшей повторяемости циклонов в Северной Атлантике (*рис. 2* в работе (Бардин и др., 2015)) при ослаблении САК в период потепления СА и изменением путей циклонов над Европой. Вследствие смещения барических центров САК происходит изменение силы и направления западных ветров в Северной Атлантике (Hurrell, 1995).

Результаты, полученные с помощью статистических оценок, проиллюстрированных на *рис. 1б*, можно интерпретировать изменениями барического поля. Анализ *рис. 3а, б* выявил сходство пространственной структуры поля трендов аномалии Z500 в период 1963–2015 гг. и поля изменений аномалий Z500, осреднённых за годы отрицательных значений индексов NAO и EAWR с июня по август в период 1995–2015 гг. по сравнению с годами их положительных значений в 1963–1994 гг., подтверждающее их связь. Отметим, что при этом наиболее существенные отличия аномалий Z500 над юго-востоком ЕЧР (см. *рис. 3б*) ассоциируются с менее благоприятными условиями для образования осадков в степных ландшафтах летом в период 1995–2015 гг. (Черенкова, 2018).

Рис. 3. Коэффициенты тренда (гПм/год) аномалий Z500 с июня по август за период 1963–2015 гг. (*а*) и изменение аномалий Z500 (гПм), осреднённых за годы отрицательных значений индексов NAO и EAWR с июня по август в период 1995–2015 гг., по сравнению с годами их положительных значений в 1963–1994 гг. (*б*). Области статистически значимых коэффициентов трендов и изменений Z500 отмечены точками

Рис. 4. Аномалии Z500 (гПм) с июня по август в период 1963–1994 гг. (а, б) и их корреляция с индексами NAO (а), EAWR (б) и в период 1995–2015 гг. (в, з) и их корреляция с индексами NAO (в), EAWR (з). Корреляции Z500 с NAO и EAWR показаны цветными линиями, значимые корреляции отмечены точками

Исследование пространственной связи временных рядов индексов NAO и EAWR с изменениями аномалий Z500 с июня по август в 1963–1994 гг. показало, что барическое поле аномалий Z500 в Атлантическом секторе (рис. 4а) отражает положительную фазу североатлантического колебания летом, для которой характерно наличие области отрицательной аномалии с центром над Гренландией, а также области положительной аномалии с центром над Британскими островами и Западной Европой. Подобная пространственная структура аномалий давления, выявленная в качестве ведущей моды изменчивости поля давления на уровне моря в Атлантико-Европейском секторе (в регионе 25–70° с. ш., 70° з. д. – 50° в. д.), получила название Summer North Atlantic Oscillation (SNAO, (Folland et al., 2009)). В той же работе была выявлена значимая отрицательная корреляция SNAO с облачностью над Северной Европой и осадками в июле – августе (наибольший коэффициент корреляции в 1850–2007 гг. с временными рядами осадков в Англии и Уэльсе составил –0,63). Вместе с тем временные ряды осадков, осреднённых в пределах исследуемой территории летом в период 1963–2015 гг. (см. рис. 2), продемонстрировали отрицательную корреляцию с индексом NAO (коэффициент корреляции в июне составил –0,47), что ассоциируется с дефицитом осадков на севере ЕЧР в положительную фазу САК в среднем за летние месяцы. Преобладание положительной фазы колебания «Восточная Атлантика/Европейская Россия» и экстремальных значений индекса EAWR летом в период 1963–1994 гг. отразилось в более частой повторяемости лет с циклонической циркуляцией над центром ЕЧР, связь с индексом EAWR подтверждается значимой корреляцией аномалии давления в основном центре действия над ЕЧР с индексом EAWR (рис. 4б). На рис. 4в показано, что с июня по август в период 1995–2015 гг. над Атлантическим регионом в среднем наблюдались аномалии Z500 противоположного знака: положительные над Гренландией и отрицательные над Британскими островами, характеризующие отрицательную фазу североатлантического колебания летом. На связь выявленной структуры аномалий Z500 с САК указывают значимые коэффициенты корреляции между аномалиями Z500 в области центра действия атмосферы над Гренландией и индексом NAO (см. рис. 4в). Пространственное распределение аномалий Z500 над Европой с областью пониженного относительно нормы давления с центром над Британскими островами и повышенного давления над ЕЧР, а также значимая корреляция над ЕЧР (рис. 4з) в 1995–2015 гг. свидетельствуют о влиянии колебания «Восточная Атлантика/Европейская Россия» в отри-

пательной фазе, для которой характерна повышенная повторяемость эпизодов блокирования над ЕЧР, на структуру аномалий Z500 в Европейском секторе. Корреляция временных рядов осадков на севере ЕЧР с индексом EAWR в июле в период 1963–2015 гг. составила $-0,33$. В то время, когда над центром ЕЧР летом наблюдаются эпизоды блокирования, циклоны вынуждены обходить область стационарирования антициклона в центре ЕЧР, в частности над севером Европы, создавая благоприятные условия для образования осадков в области прохождения и, в том числе, на Европейском Севере России. Из анализа *рис. 4а–г* следует, что такая ситуация в период 1995–2015 гг. встречалась чаще, чем в 1963–1994 гг., что обусловило в среднем большее количество осадков на севере ЕЧР летом в период 1995–2015 гг., чем в 1963–1994 гг. (см. *рис. 2*).

Заключение

Проведённое исследование позволило сделать следующие выводы.

Положительные тренды осадков летом в период 1963–2015 гг., выявленные по наземным измерениям, преобладали на Европейском Севере России. Наблюдаемый в этот период рост осадков со скоростью 4,5 мм/10 лет в среднем на всей территории исследования был статистически значимым. Об увеличении летних осадков в период 1979–2015 гг. на той же территории свидетельствуют и данные, полученные со спутников.

Устойчивые аномалии температуры поверхности в северной части Атлантического океана играли важную роль в формировании аномалий климата летом на Европейском Севере России на десятилетнем и междесятилетнем временном масштабе. Влияние долгопериодной составляющей СА на атмосферную циркуляцию в Атлантико-Европейском секторе с июня по август в 1963–2015 гг. проявилось в том, что положительные аномалии ТПО СА в этот период ассоциировались с отрицательными фазами североатлантического колебания и колебаний центров действия атмосферы «Восточная Атлантика/Западная Россия», а отрицательные аномалии ТПО СА — с положительными фазами этих колебаний. Выявленные особенности ассоциируются со значимыми различиями аномалий высоты геопотенциала на уровне 500 гПа в Атлантико-Европейском секторе в июне — августе в периоды устойчивых аномалий ТПО СА противоположного знака в 1963–2015 гг. Преобладание положительной фазы колебания «Восточная Атлантика/Европейская Россия» и экстремальных значений характеризующего его индекса EAWR летом в период 1963–1994 гг. более холодной Северной Атлантики отразилось в более частой повторяемости лет с циклонической циркуляцией и более благоприятными условиями для образования осадков над центром ЕЧР. В тот же период на севере ЕЧР наблюдалось количество осадков в среднем ниже климатической нормы. Для периода 1995–2015 гг. было характерно ослабление зональной атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, повышенная повторяемость эпизодов блокирования над ЕЧР и количество осадков на севере ЕЧР в среднем выше нормы на фоне повышенной циклонической активности в регионе.

Исследование трендов сезонных осадков на севере Европейской части России проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20123). Анализ изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции в высоких широтах Северного полушария выполнен в рамках проекта № 18-05-60216, финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований.

Литература

1. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 14–40.

2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2014. 1009 с.
3. Семенов В. А., Черенкова Е. А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 6. С. 697–701.
4. Титкова Т. Б. Изменение климата Европейского севера России в XX в. // Известия РАН. Сер. географическая. 2003. № 6. С. 30–38.
5. Титкова Т. Б., Виноградова В. В., Михайлов А. Ю. Климатические вариации арктического фронта в теплый период года и их проявления в ландшафтах севера // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2015. № 4. С. 39–46.
6. Черенкова Е. А. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18. № 4 (53). С. 13–21.
7. Черенкова Е. А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2017. № 5. С. 72–81.
8. Черенкова Е. А. Влияние долгопериодных изменений Северной Атлантики на увлажнение степных ландшафтов Европейской территории России // Степи Северной Евразии: материалы 8-го Международного симп. Оренбург: ИС УрО РАН, 2018. С. 1073–1077.
9. Черенкова Е. А., Семенов В. А. Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости Арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 38–52.
10. Черенкова Е. А., Титкова Т. Б., Михайлов А. Ю. Сезонные особенности арктического фронта на территории России в XX и XXI веках // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 4. С. 78–85.
11. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low — frequency atmospheric circulation pattern // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. P. 1083–1126.
12. Delworth T. L., Zhang R., Mann M. E. Decadal to centennial variability of the Atlantic from observations and models. Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts // Geophysical Monograph Series 173. American Geophysical Union, Washington, DC, 2007. P. 131–148.
13. Folland C. K., Knight J., Linderholm H. W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J. W. The summer North Atlantic oscillation: Past, present, and future // J. Climate. 2009. V. 22. P. 1082–1103.
14. Groisman P. Ya., Knight R. W., Easterling D. R., Karl T. R., Hegerl G. C., Razuvaev V. N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record // J. Climate. 2005. V. 18. P. 1326–1350.
15. Harris I., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset // Intern. J. Climatology. 2014. V. 34 (3). P. 623–642.
16. Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Gu G. Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1 // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. P. L17808.
17. Hurrell J. W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // Science. 1995. V. 269. P. 676–679.
18. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
19. Ogi M., Yamazaki K., Tachibana Y. The summer northern annular mode and abnormal summer weather in 2003 // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. P. L04706.
20. Pal J. S., Giorgi F., Bi X. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. P. L13202.
21. Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. No. D14. P. 4407.
22. Seber G. A. F. Linear Regression Analysis. John Wiley and Sons, 1977. 496 p.
23. Sutton R. T., Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s // Nature Geoscience. 2012. V. 5. P. 788–792.

Influence of changes in large-scale atmospheric circulation and ocean surface temperature on the trends of summer precipitation in the north of European Russia based on terrestrial and satellite data

E. A. Cherenkova

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: cherenkova@igras.ru

The regional peculiarities of summer precipitation in the north of the European part of Russia (EPR) during the periods of the stable opposite North Atlantic (NA) Sea Surface Temperature (SST) anomaly in the second half of the 20th and the beginning of 21st centuries were studied. It was revealed that positive trends of precipitation prevailed in the European North of Russia during the period 1963–2015, both for terrestrial and satellite observations. The influence of the multidecadal variability of the North Atlantic on the atmospheric circulation in the Atlantic-European sector was associated with positive phases of the North Atlantic oscillation and pattern “East Atlantic/Western Russia” from June to August in the period 1963–1994 of negative NA SST anomalies. The negative phases of the same atmospheric patterns prevailed during the period 1995–2015 of the positive NA SST anomalies. The revealed statistically significant differences in the pressure anomalies link with the increase of the intensity of regional zonal atmospheric circulation and the transfer of heat and moisture from the Atlantic to the continent, the growth of low-pressure frequency and the amount of precipitation above the climatic norm over the central European Russia and below-average precipitation in its north during cooler NA. On the contrary, a weakening of the zonal circulation, an increase recurrence of blocking episodes over European Russia, and the growth of cyclonic activity in its north accompanying precipitation above climatic norm were observed during the period of warmer NA.

Keywords: precipitation, large-scale atmospheric circulation, remote sensing, north of the European part of Russia, Northern Atlantic

Accepted: 05.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-229-238

References

1. Bardin M. Yu., Platova T. V., Samokhina O. F., Osobennosti izmenchivosti tsiklonicheskoi aktivnosti v umerennykh shiroтах Severnogo polushariya, svyazannye s vedushchimi modami atmosfernoі tsirkulyatsii v Atlantiko-Evropeiskom sektore (Specific features of variability of cyclone activity in northern extratropics associated with leading atmospheric circulation modes in Atlantic-European sector), *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, Vol. 2, pp. 14–40.
2. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Roshydromet second assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation), Moscow: Federal Service on Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2014, 1009 p.
3. Semenov V. A., Cherenkova E. A., Otsenka vliyaniya atlanticheskoi mul'tidekadnoi ostsillyatsii na krupnomasshtabnyuyu atmosfernuyu tsirkulyatsiyu v Atlanticheskoy sektore v letnii sezon (Evaluation of the Atlantic Multidecadal Oscillation Impact on Large-Scale Atmospheric Circulation in the Atlantic Region in Summer), *Doklady Akademii nauk*, 2018, Vol. 478, No. 6, pp. 697–701.
4. Titkova T. B., Izmenenie klimata Evropeiskogo severa Rossii v XX v. (Change in climate of the European Russia in the XX century), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2003, No. 6, pp. 30–38.
5. Titkova T. B., Vinogradova V. V., Mikhailov A. Yu., Klimaticheskie variatsii arkticheskogo fronta v teplyi period goda i ikh proyavleniya v landshaftakh severa (Climatic variation of the Arctic Front during the warm period and their influence on the northern landscapes), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2015, No. 4, pp. 39–46.
6. Cherenkova E. A., Analiz osobennostei obshirnykh atmosferynykh zasukh na yuge Evropeiskoi Rossii (Analysis of extensive atmospheric droughts features in the south of the European Russia), *Aridnye ekosistemy*, 2012, Vol. 18, No. 4 (53), pp. 13–21.

7. Cherenkova E. A., Sezonnye osadki na territorii Vostochno-Evropeiskoi ravniny v periody teplykh i kholodnykh anomalii temperatury poverkhnosti Severnoi Atlantiki (Seasonal precipitation in the East European Plain during the periods of warm and cool anomalies of the North Atlantic surface temperature), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2017, No. 5, pp. 72–81.
8. Cherenkova E. A., Vliyanie dolgoperiodnykh izmenenii Severnoi Atlantiki na uvlazhnenie stepnykh landshaftov Evropeiskoi territorii Rossii (The influence of multidecadal variability in North Atlantic on the humidification of steppe in European Russia), *Steppes of Northern Eurasia: Proc. VIII Intern. Symp.* Orenburg: IS UB RAS, 2018, pp. 1073–1077.
9. Cherenkova E. A., Semenov V. A., Svyaz' zimnikh osadkov na territorii Evropy s izmeneniyami ledovitosti Arkticheskogo basseina, temperatury okeana i atmosfernoii tsirkulyatsii (A link between winter precipitation in Europe and the Arctic sea ice, sea surface temperature, and atmospheric circulation), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, No. 4, pp. 38–52.
10. Cherenkova E. A., Titkova T. B., Mikhailov A. Yu., Sezonnye osobennosti arkticheskogo fronta na territorii Rossii v XX i XXI vekakh (Seasonal features of Arctic Front on the territory of Russia in the 20th and 21st centuries), *Kriosfera Zemli*, 2014, Vol. XVIII, No. 4, pp. 78–85.
11. Barnston A. G., Livezey R. E., Classification, seasonality and persistence of low — frequency atmospheric circulation pattern, *Monthly Weather Review*, 1987, Vol. 115, pp. 1083–1126.
12. Delworth T. L., Zhang R., Mann M. E., Decadal to centennial variability of the Atlantic from observations and models. Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts, *Geophysical Monograph Series 173*, American Geophysical Union, Washington, DC, 2007, pp. 131–148.
13. Folland C. K., Knight J., Linderholm H. W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J. W., The summer North Atlantic oscillation: Past, present, and future, *J. Climate*, 2009, Vol. 22, pp. 1082–1103.
14. Groisman P. Ya., Knight R. W., Easterling D. R., Karl T. R., Hegerl G. C., Razuvaev V. N., Trends in Intense Precipitation in the Climate Record, *J. Climate*, 2005, Vol. 18, pp. 1326–1350.
15. Harris I., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H., Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset, *Intern. J. Climatology*, 2014, Vol. 34 (3), pp. 623–642.
16. Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Gu G., Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, p. L17808.
17. Hurrell J. W., Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation, *Science*, 1995, Vol. 269, pp. 676–679.
18. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, Vol. 77, pp. 437–471.
19. Ogi M., Yamazaki K., Tachibana Y., The summer northern annular mode and abnormal summer weather in 2003, *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, p. L04706.
20. Pal J. S., Giorgi F., Bi X., Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, p. L13202.
21. Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A., Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. D14, pp. 4407.
22. Seber G. A. F., *Linear Regression Analysis*, John Wiley and Sons, 1977, 496 p.
23. Sutton R. T., Dong B., Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s, *Nature Geoscience*, 2012, Vol. 5, 788–792.