

О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений

А. Ф. Нерушев, К. Н. Вишератин, Л. К. Кулижникова, Р. В. Ивангородский

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, 249038, Россия
E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

Рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха в 2017–2019 гг. на 147 метеорологических станциях Европы и 53 станциях европейской территории России (ЕТР) с характеристиками высотных струйных течений, определяемыми по данным измерений радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения в канале водяного пара с центром на 6,2 мкм. На основе статистического анализа показано, что наибольшая связь аномалий среднемесячной приземной температуры отмечается с аномалиями широты центра струйного течения. Отмечается также связь с аномалиями средней площади и эффективного времени жизни струйного течения. При смещении центра струйного течения на север относительно среднего многолетнего положения на значительной территории Европы и в северных районах ЕТР среднемесячная температура с большой степенью вероятности опускается ниже климатической нормы, и наоборот. Увеличение характерного времени жизни, а также уменьшение средней площади струйного течения относительно среднего многолетнего значения приводит в ряде случаев к увеличению температуры относительно климатической нормы в северных районах ЕТР и Европы. Предложен алгоритм расчёта годового хода среднемесячных аномалий широты центра струйного течения под влиянием изменения температуры верхней тропосферы и площади арктического морского льда, качественно отражающий основные особенности наблюдаемых по спутниковым данным вариаций широты центра струйного течения в 2017–2019 гг.

Ключевые слова: температурные аномалии, характеристики струйных течений, верхняя тропосфера, геостационарные метеорологические спутники, статистический анализ

Одобрена к печати: 16.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-199-209

Введение

Участвовавшее в последнее время проявление аномальных погодных явлений, связанных, по мнению большинства учёных, с глобальным потеплением, заметно повысило интерес к высотным струйным течениям, как к одному из возможных факторов, влияющих на возникновение таких аномалий (см., например, работы (Archer, Caldeira, 2008; Coumou et al., 2014; Hall et al., 2017; Masters, 2014; Petoukhov et al., 2013; Screen, Simmonds, 2014) и цитируемую литературу). Проявление аномальных погодных явлений связывают с аномальным поведением струйных течений — главным образом с изгибами их траекторий, в результате чего происходит возмущение траекторий движения воздушных масс, определяющих погоду на значительных по площади территориях. Высказываются различные точки зрения на причины такого поведения струйных течений. Их объясняют и существенным уменьшением площади морского льда в Арктике (Нерушев и др., 2018; Francis, Vavrus, 2012), и изменением поведения волн Россби (Petoukhov et al., 2013), и влиянием крупномасштабных атмосферных явлений — Североатлантического колебания (NAO) и Эль-Ниньо, или Южного колебания (Нерушев и др., 2018; Masters, 2014).

Особого внимания заслуживает изменение площади морского льда в Арктике в связи с установившейся в последнее время устойчивой тенденцией её уменьшения. Цепочка связей влияния изменения площади морского льда на характеристики струйных течений схематически может быть представлена следующим образом: уменьшение площади морского льда в Арктике → уменьшение разности температуры в атмосфере между высокими и низкими широтами → уменьшение скорости струйного течения → увеличение амплитуды колебаний

струйного течения и замедление скорости распространения волн Россби на восток (Masters, 2014). Эти процессы могут приводить к установлению довольно длительных погодных аномалий, сохраняющихся неделями (Petoukhov et al., 2013).

Представляет интерес на примере фактических данных наблюдений высотных струйных течений рассмотреть вопрос об их возможном влиянии на погодные аномалии. Разработанный нами метод позволяет определять широкий набор характеристик струйных течений верхней тропосферы по данным измерений геостационарных метеорологических спутников в полосах поглощения водяного пара (Ивангородский, Нерушев, 2014; Нерушев, Крамчанинова, 2011). Это даёт возможность исследовать статистическую связь параметров погодных аномалий с характеристиками струйных течений. Цель предлагаемой статьи — рассмотреть связь среднемесячных аномалий температуры воздуха в 2017–2019 гг. в Европе и на европейской территории России (ЕТР) с характеристиками струйных течений, определяемыми по данным зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения в полосе поглощения водяного пара 6,2 мкм, а также построить простую модель, связывающую аномальное поведение струйных течений с температурой верхней тропосферы и площадью арктического морского льда.

Используемые данные и методы исследования

Для анализа погодных аномалий в 2017–2019 гг. использовались данные измерений среднемесячной температуры приземного воздуха 147 метеорологических станций Европы и 53 станций ЕТР, размещённые на сайтах <https://rp5.ru> и <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>. Аномалии среднемесячной температуры приземного воздуха ΔT (далее — аномалии температуры) рассчитывались как отклонения среднемесячной температуры на станции от средней многолетней температуры за месяц (нормы), определённой за период 1961–1990 гг., данные о которой брались с сайта <https://meteoinfo.ru/climatcities>. В качестве аномалий струйных течений использованы отклонения среднемесячных значений их характеристик от средних многолетних, рассчитанных за период 2007–2016 гг. Конечно, использование существенно различных временных интервалов усреднения температуры и характеристик струйных течений представляется не совсем корректным и может вносить некоторые погрешности в расчёты аномалий. Однако мы были ограничены имеющимся в НИЦ «Планета» архивом пригодных для обработки данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI, который начинается с 2007 г. А поскольку задача статьи состоит в том, чтобы выяснить, насколько температурные аномалии связаны с рассчитанными таким способом аномалиями струйных течений, представляется, что использование несогласованных во времени интервалов усреднения не должно вносить существенных качественных изменений в результаты. В дальнейшем при анализе температурных аномалий в другие годы интервал усреднения значений характеристик струйных течений (2007–2016) мы планируем сохранить.

Струйные течения определяются на основе вычисления поля вектора горизонтальной скорости ветра в верхней тропосфере по перемещениям и эволюции атмосферных трассиров — неоднородностей концентрации водяного пара. Используемый метод, основанный на применении корреляционно-экстремальных алгоритмов, подробно изложен в работе (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Поле вектора горизонтальной скорости ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным измерений в канале водяного пара с центром на 6,2 мкм в узлах сетки с шагом 10 пикселей по трём последовательным снимкам, разделённым временным интервалом 15 мин. Результаты расчётов относятся к уровню максимума весовой функции радиометра для канала 6,2 мкм (~350 гПа). Абсолютная погрешность вычисления модуля горизонтальной скорости ветра разработанным методом не превышает 8 м/с (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Канал 6,2 мкм выбран по той причине, что максимум весовой функции радиометра SEVIRI для этого канала приходится на высоту около 8 км для условий средних широт, на которой в основном располагаются оси высотных струйных течений.

Для другого канала в полосе поглощения водяного пара 7,3 мкм максимум весовой функции радиометра расположен существенно ниже — на высоте 5–6 км. Поэтому для выявления струйных течений он менее информативен. Кроме того, для излучения, принимаемого в канале 7,3 мкм, более существенно влияние облаков.

После получения поля горизонтальной скорости ветра с шагом по времени 1 ч происходит поиск кандидатов в струйные течения. Алгоритм поиска автоматизирован и заключается в проверке выполнения ряда критериев, главный из которых — скорость ветра. Точки поля ветра, имеющие скорость $V \geq 30$ м/с, рассматриваются как входящие в струйное течение (Ивангородский, Нерушев, 2014). Полученный в результате расчётов массив областей анализируется и определяются следующие основные характеристики: средняя площадь областей струйного течения (S), максимальная скорость ветра (V_m) на оси, широта (φ) и долгота (λ) центра области струйного течения, максимальный градиент (сдвиг) горизонтальной скорости ветра на циклонической (G_c) и антициклонической (G_a) сторонах, а также эффективное время жизни струйного течения (τ). При этом области с размером менее 200×1000 км не учитываются как струйные течения. Под эффективным временем жизни (τ) понимается промежуток времени, в течение которого сохраняются в определённых пределах некоторые интегральные характеристики струйного течения (Ивангородский, Нерушев, 2014), а именно: максимальные значения относительного изменения S не превышают 40 %, абсолютные изменения φ и λ не превышают 10° . При одновременном превышении указанных значений считается, что струйное течение прекращает своё существование, и определяется характерное время его жизни. Определённые таким методом области струйного течения представляют собой, по существу, сечения струйного течения горизонтальной плоскостью на уровне ~ 350 гПа.

Полученные аномалии температуры ΔT и аномалии характеристик струйных течений ΔX , где X — указанные выше характеристики струйных течений, подвергались статистическому анализу.

Краткое описание аномалий температуры воздуха в 2017–2019 гг.

Рассматриваемые годы были аномально тёплыми как в Европе, так и на ЕТР. В *таблице* приведены общие характеристики аномалий температуры воздуха на этих территориях, полученные по данным всех рассмотренных станций.

Из 36 мес 2017–2019 гг. положительная аномалия температуры воздуха на ЕТР наблюдалась 33 мес, в Европе — 29 мес. В 2017 г. самыми тёплыми на ЕТР и в Европе были март и декабрь. В марте отмечена самая большая за год аномалия на ЕТР ($+9,3^\circ\text{C}$ в Нарьян-Маре), а в декабре — в Европе ($+6,6^\circ\text{C}$ в финском аэропорту Каяани). По данным Гидрометцентра РФ, средняя температура марта 2017 г. в Российской Федерации — самая высокая за всю историю регулярных метеорологических наблюдений в стране, т. е. за последние 127 лет (<https://meteo-info.ru/>). Аномально холодными в 2017 г. были май и июнь на ЕТР, в то время как в Европе в эти месяцы аномалии температуры были положительными.

В 2018 г. как на ЕТР, так и в Европе самым тёплым был январь (средние аномалии температуры: $+4,2^\circ\text{C}$ — на ЕТР и $+2,9^\circ\text{C}$ — в Европе). Аномально тепло на всей рассматриваемой территории было с июля по октябрь 2018 г., средние аномалии температуры составили от $+1,7$ до $+3,0^\circ\text{C}$. В 2019 г. холоднее обычного на ЕТР было в июле и августе, а в Европе эти месяцы были тёплыми. Аномально тёплыми в 2019 г. и в Европе, и на ЕТР были февраль, март, июнь и особенно декабрь. В декабре 2019 г. средняя аномалия температуры на ЕТР составила $+5,4^\circ\text{C}$, а в Европе — $+3,3^\circ\text{C}$. В этом же месяце отмечены и наибольшие положительные аномалии температуры за год: $+8,1^\circ\text{C}$ на ст. Котлас (Россия) и $+7,4^\circ\text{C}$ на ст. Соданкюля (Финляндия).

На *рис. 1* (см. с. 203) для месяцев с самыми большими среднемесячными аномалиями температуры представлено их пространственное распределение в Европе и на ЕТР в 2017–2019 гг.

Как видно из *рис. 1*, в марте 2017 г. и в Европе, и на ЕТР не было ни одной станции с отрицательной аномалией температуры воздуха. В мае 2018 г. положительная аномалия

температуры наблюдалась на всех станциях Европы. В декабре 2019 г. положительные аномалии температуры воздуха зарегистрированы на всех рассмотренных станциях Европы и ЕТР. Отметим одно важное обстоятельство, следующее из анализа *рис. 1*. Как в Европе, так и на ЕТР наибольшие положительные аномалии температуры отмечаются на северо-восточных территориях. В Европе — на территориях, расположенных севернее 45° с.ш. и восточнее 200° в.д., а на ЕТР — севернее 55° с.ш. и восточнее 350° в.д.

Характеристики аномалий среднемесячной температуры приземного воздуха на ЕТР (числитель) и в Европе (знаменатель) в 2017–2019 гг.

| Месяц | Аномалия среднемесячной температуры, °С | | | | | | | | |
|----------|---|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | 2017 г. | | | 2018 г. | | | 2019 г. | | |
| | сред. | макс. | мин. | сред. | макс. | мин. | сред. | макс. | мин. |
| Январь | $\frac{1,8}{-0,2}$ | $\frac{5,0}{6,1}$ | $\frac{-1,3}{-6,2}$ | $\frac{4,2}{2,9}$ | $\frac{10,0}{6,1}$ | $\frac{-0,8}{-0,5}$ | $\frac{1,9}{0,7}$ | $\frac{4,0}{3,0}$ | $\frac{-1,0}{-1,9}$ |
| Февраль | $\frac{2,6}{2,1}$ | $\frac{4,4}{4,7}$ | $\frac{0,2}{-0,7}$ | $\frac{-0,2}{-0,6}$ | $\frac{4,3}{6,7}$ | $\frac{-2,8}{-3,6}$ | $\frac{4,7}{3,3}$ | $\frac{7,3}{7,1}$ | $\frac{0,6}{-0,6}$ |
| Март | $\frac{4,4}{3,4}$ | $\frac{9,3}{5,9}$ | $\frac{2,0}{0,1}$ | $\frac{-2,9}{-0,9}$ | $\frac{3,5}{3,6}$ | $\frac{-7,5}{-3,7}$ | $\frac{2,9}{2,8}$ | $\frac{4,7}{5,4}$ | $\frac{1,0}{-0,7}$ |
| Апрель | $\frac{-0,1}{0,5}$ | $\frac{1,4}{3,5}$ | $\frac{-1,3}{-1,5}$ | $\frac{1,6}{3,4}$ | $\frac{4,9}{6,6}$ | $\frac{-0,9}{0,2}$ | $\frac{1,8}{1,9}$ | $\frac{4,0}{4,2}$ | $\frac{-0,2}{-0,6}$ |
| Май | $\frac{-1,7}{1,0}$ | $\frac{1,2}{4,4}$ | $\frac{-3,9}{-3,0}$ | $\frac{2,8}{3,3}$ | $\frac{4,9}{6,9}$ | $\frac{-0,7}{0,1}$ | $\frac{2,2}{0,1}$ | $\frac{3,8}{3,1}$ | $\frac{0,4}{-2,3}$ |
| Июнь | $\frac{-1,4}{1,9}$ | $\frac{1,7}{5,5}$ | $\frac{-3,4}{-2,0}$ | $\frac{0,6}{1,9}$ | $\frac{4,2}{3,9}$ | $\frac{-1,1}{-1,8}$ | $\frac{2,6}{3,2}$ | $\frac{6,3}{7,0}$ | $\frac{-1,8}{-0,8}$ |
| Июль | $\frac{0,4}{1,1}$ | $\frac{5,6}{4,4}$ | $\frac{-1,5}{-1,3}$ | $\frac{2,5}{2,6}$ | $\frac{5,6}{6,3}$ | $\frac{1,1}{-0,2}$ | $\frac{-1,1}{1,5}$ | $\frac{1,6}{5,5}$ | $\frac{-2,8}{-1,3}$ |
| Август | $\frac{2,2}{2,0}$ | $\frac{4,6}{5,3}$ | $\frac{0,3}{-0,7}$ | $\frac{2,3}{2,7}$ | $\frac{4,1}{5,7}$ | $\frac{0,0}{-0,2}$ | $\frac{-0,1}{2,2}$ | $\frac{3,5}{6,1}$ | $\frac{-2,6}{-0,1}$ |
| Сентябрь | $\frac{1,5}{0,8}$ | $\frac{4,4}{4,9}$ | $\frac{-0,7}{-1,6}$ | $\frac{3,0}{1,9}$ | $\frac{4,7}{6,3}$ | $\frac{1,7}{-0,9}$ | $\frac{0,8}{1,4}$ | $\frac{2,0}{5,9}$ | $\frac{-1,5}{-0,1}$ |
| Октябрь | $\frac{0,6}{1,1}$ | $\frac{2,7}{4,6}$ | $\frac{-1,0}{-0,7}$ | $\frac{2,1}{1,7}$ | $\frac{3,7}{3,8}$ | $\frac{-0,2}{-1,1}$ | $\frac{2,5}{1,5}$ | $\frac{4,8}{3,7}$ | $\frac{-1,7}{-3,1}$ |
| Ноябрь | $\frac{1,8}{1,0}$ | $\frac{6,1}{3,9}$ | $\frac{-4,0}{-1,2}$ | $\frac{0,5}{1,5}$ | $\frac{4,8}{6,7}$ | $\frac{-2,4}{-2,3}$ | $\frac{1,7}{2,2}$ | $\frac{3,7}{6,7}$ | $\frac{-1,5}{-2,4}$ |
| Декабрь | $\frac{5,3}{2,2}$ | $\frac{8,4}{6,6}$ | $\frac{1,0}{-0,6}$ | $\frac{1,0}{1,6}$ | $\frac{7,8}{4,7}$ | $\frac{-1,5}{-1,2}$ | $\frac{5,4}{3,3}$ | $\frac{8,1}{7,4}$ | $\frac{1,8}{0,2}$ |
| Год | $\frac{1,5}{1,4}$ | $\frac{9,3}{6,6}$ | $\frac{-4,0}{-6,2}$ | $\frac{1,5}{1,9}$ | $\frac{10,0}{6,9}$ | $\frac{-7,5}{-3,7}$ | $\frac{2,3}{2,0}$ | $\frac{8,1}{7,4}$ | $\frac{-2,8}{-3,1}$ |

Результаты расчётов и обсуждение

Рассмотрим связь среднемесячных температурных аномалий ΔT с характеристиками струйных течений для каждого года в отдельности на основе корреляционного анализа. Как показывают расчёты, значимые коэффициенты корреляции ΔT отмечаются, прежде всего, с аномалиями широты центра струйного течения $\Delta \varphi$. В ряде случаев наблюдается значимая связь ΔT с аномалиями площади ΔS и эффективного времени его жизни Δt . Здесь и далее в тексте под термином «значимый» будем понимать значимость на уровне доверительной вероятности 95 % и выше.

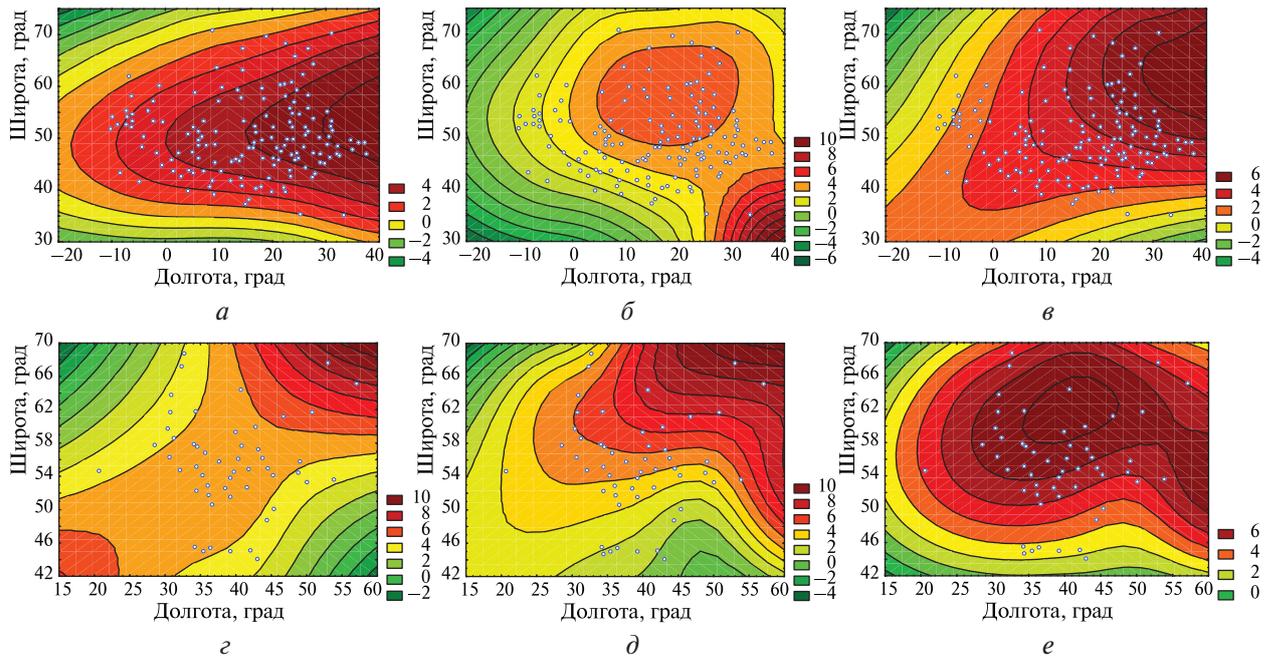


Рис. 1. Пространственное распределение аномалий температуры в градусах Цельсия в Европе в марте 2017 г. (а), мае 2018 г. (б), декабре 2019 г. (в) и на ЕТР в марте 2017 г. (з), январе 2018 г. (д) и декабре 2019 г. (е). Белыми точками отмечено положение метеостанций. Величина аномалий изображена цветовой шкалой

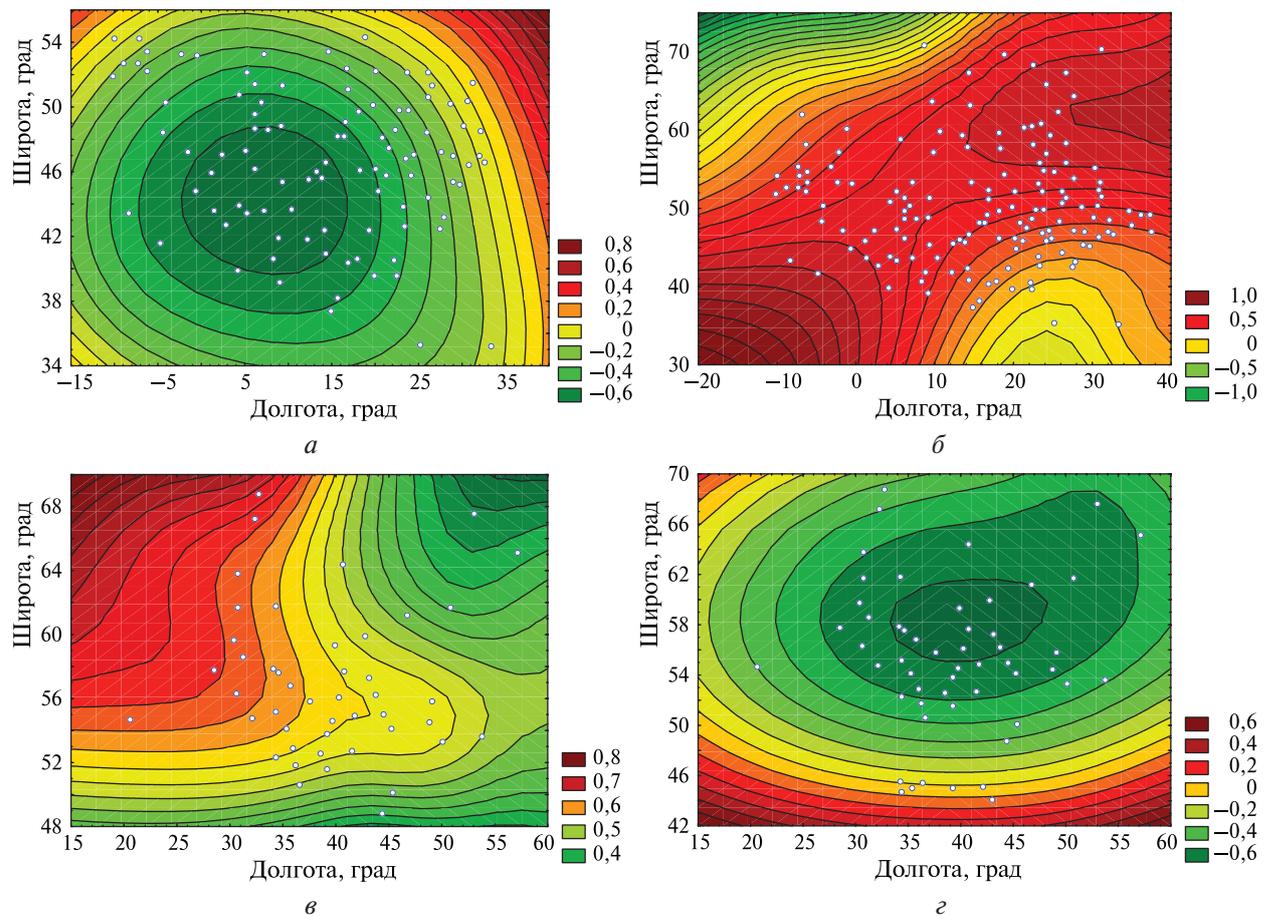


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между аномалиями характеристик струйных течений и аномалиями температуры для Европы: $R(\Delta T, \Delta \varphi)$ в 2017 г. (а) и $R(\Delta T, \Delta \tau)$ в 2018 г. (б); для ЕТР: $R(\Delta T, \Delta \tau)$ в 2018 г. (в) и $R(\Delta T, \Delta \varphi)$ в 2019 г. (з)

На *рис. 2* (см. с. 203) для примера представлено пространственное распределение коэффициентов корреляции между аномалиями характеристик струйных течений и аномалиями температуры в 2017–2019 гг. для Европы и ЕТР. Значения коэффициентов корреляции обозначены цветовой шкалой.

В 2017 г. для Европы выделяются значимые коэффициенты корреляции $R(\Delta T, \Delta \varphi)$ для 51 станции (34 %) с абсолютными величинами от 0,58 до 0,84. При этом для пяти станций, расположенных на широтах, больших 59° с. ш., $R(\Delta T, \Delta \varphi) > 0$, а для остальных станций на широтах, меньших 51° с. ш., $R(\Delta T, \Delta \varphi) < 0$. Для ЕТР практически все коэффициенты корреляции незначимы.

В 2018 г. примерно для 30 % станций как в Европе, так и на ЕТР, расположенных на широтах, больших 54° , характерны значимые $R(\Delta T, \Delta \tau) > 0$ от 0,58 до 0,78. Кроме того, для 51 % станций Европы отмечаются значимые $R(\Delta T, \Delta S) < 0$ с абсолютными значениями от 0,58 до 0,80.

В 2019 г. для подавляющего большинства станций на ЕТР с широтой $> 50^\circ$ (78 %) коэффициенты корреляции $R(\Delta T, \Delta \varphi) < 0$ и значимы с абсолютными значениями от 0,6 до 0,8. В Европе только для 12 % станций с широтой, большей 50° , отмечаются значимые $R(\Delta T, \Delta \varphi) < 0$ с абсолютными значениями 0,6–0,7.

Приведённые результаты позволяют заключить, что при смещении центра струйного течения на север относительно среднего многолетнего положения на значительной территории Европы и в северных районах ЕТР среднемесячная температура с большой степенью вероятности опускается ниже климатической нормы, и наоборот. Увеличение характерного времени жизни, а также уменьшение средней площади струйного течения относительно среднего многолетнего значения приводят в ряде случаев к увеличению температуры относительно климатической нормы в северных районах ЕТР и Европы.

Рассмотрим сезонную изменчивость аномалий широты центра струйного течения $\Delta \varphi$ в 2017–2019 гг., с которыми в основном связаны аномалии среднемесячных приземных температуры ΔT . Сезонные вариации аномалий широты центра струйного течения $\Delta \varphi$ в 2017–2019 гг. представлены на *рис. 3*.

Как следует из *рис. 3*, отрицательные аномалии порядка $2\text{--}3^\circ$ широты наблюдались в основном весной, а максимумы положительных аномалий от 4 до 8° широты — зимой и в конце лета — начале осени. Чем обусловлен такой временной ход смещения центра струйного течения? Как отмечено в работе (Нерушев и др., 2018), вариации широты центра струйного течения (φ) тесно связаны с вариациями температуры верхней

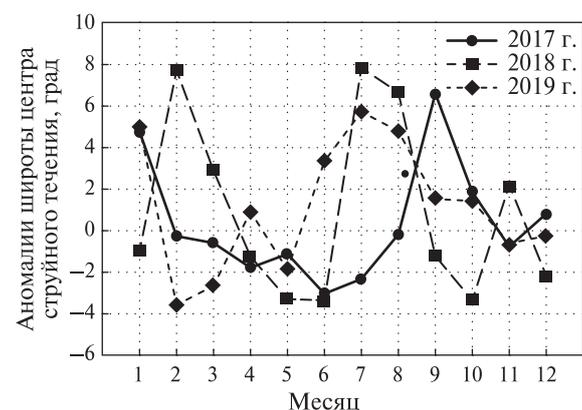


Рис. 3. Годовой ход аномалий широты центра струйного течения в 2017–2019 гг.

тропосферы (T_{tr}) и площади морского льда в Арктике (S_{ice}). Наибольшая связь φ прослеживается со средней температурой в широтной зоне $40\text{--}50^\circ$ на уровне 200 гПа. При этом вариации годового колебания T_{tr} и φ происходят преимущественно в фазе, а колебания S_{ice} и φ близки к противофазе, т. е. при уменьшении T_{tr} параметр φ сдвигается к югу от своего среднего многолетнего положения, а при уменьшении S_{ice} — к северу.

Рассмотрим сезонную изменчивость аномалий S_{ice} и T_{tr} в 2017–2019 гг. (*рис. 4*, см. с. 205). При построении *рис. 4* в качестве информации о температуре тропосферы использовались среднемесячные квазизональные (усреднённые по долготной области 70° з. д. — 70° в. д.) значения температуры по данным реанализа NCEP/NCAR (NCEP — *англ.* National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов США; NCAR — *англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США) (Kalnay et al., 1996). Сведения о ежемесячных значениях площади морского льда по данным NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное

управление океанических и атмосферных исследований, США) брались с сайта <ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/>. В качестве температурной нормы использовались усреднённые за период 1961–1990 гг. среднемесячные значения T_{tr} . В качестве нормы для площади морского льда — усреднённые данные за период 1979–2008 гг.

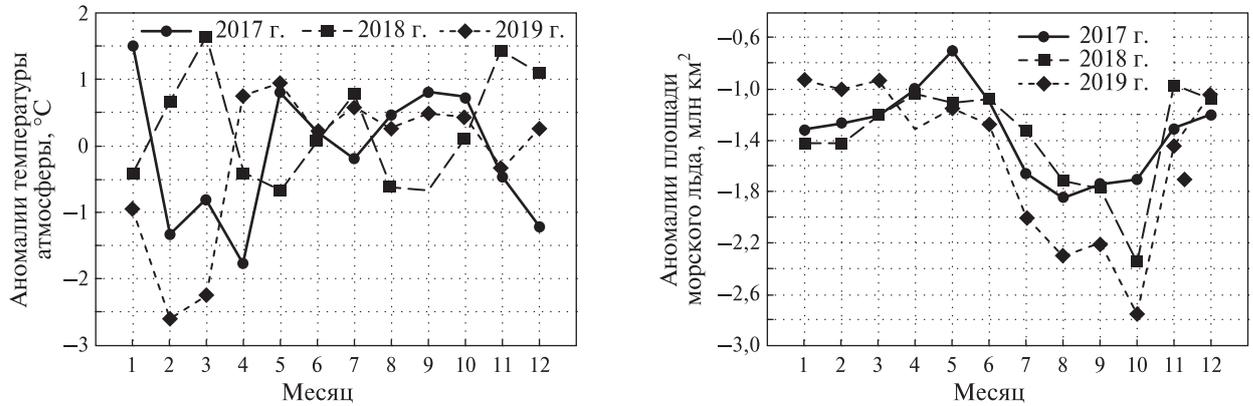


Рис. 4. Сезонная изменчивость аномалий температуры тропосферы на уровне 200 гПа в широтной зоне 40–50° с. ш. и аномалий площади арктического морского льда в 2017–2019 гг.

Как следует из рис. 4, максимальные изменения аномалий температуры происходят зимой и в начале весны, а вариации аномалий в диапазоне $\pm 1^\circ\text{C}$ — летом и осенью. Максимальные отрицательные аномалии площади льда наблюдаются в конце лета и в начале осени, именно в этот период отмечаются максимальные положительные аномалии широты центра струйного течения (см. рис. 3).

Обращает на себя внимание схожесть (однотипность) поведения аномалий температуры тропосферы в 2017 и 2019 гг. Причины отличия сезонного хода в 2018 г. неясны. Возможно, они связаны с квазидвухлетней цикличностью. Однако для проверки необходим анализ более обширного материала.

Отметим одно важное обстоятельство: аномалии площади арктического морского льда в течение всех сезонов 2017–2019 гг. были отрицательные. Таким образом, вариации S_{ice} должны вызывать сдвиг φ к северу от своего среднего многолетнего положения, т.е. положительные аномалии φ . С температурой верхней тропосферы значительно сложнее. В 2017 г. для 6 мес (январь, май, июнь, август–октябрь) $\Delta T_{tr} > 0$ и T_{tr} влияет на φ в том же направлении, что и S_{ice} . Для других 6 мес влияние T_{tr} и S_{ice} разнонаправленное. В 2018 г. для 5 мес (январь, апрель, май, август, сентябрь) влияние T_{tr} и S_{ice} на φ разнонаправленное. Для остальных 7 мес — однонаправленное. В 2019 г. только для 4 мес (январь–март, ноябрь) влияние T_{tr} и S_{ice} на φ разнонаправленное. Для остальных 8 мес — однонаправленное. В то же время важно подчеркнуть, что от того, как меняются от месяца к месяцу абсолютные величины аномалий T_{tr} и S_{ice} , зависит направленность их влияния на положение струйного течения.

Учитывая эти обстоятельства, можно сконструировать годовой ход среднемесячных аномалий широты центра струйного течения в 2017–2019 гг. под влиянием температуры верхней тропосферы и площади арктического морского льда. Алгоритм состоит в следующем. По данным реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) и сайта <ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/> вычисляются средние в широтной зоне 40–50° на уровне 200 гПа среднемесячные аномалии температуры верхней тропосферы ΔT_{tr} и среднемесячные аномалии площади арктического морского льда ΔS_{ice} . Далее для каждого месяца вычисляются приращения аномалий температуры тропосферы $D(\Delta T_{tr})$ и площади морского льда $D(\Delta S_{ice})$:

$$D_i(\Delta T_{tr}) = (\Delta T_{tr})_i - (\Delta T_{tr})_{i-1}, \quad D_i(\Delta S_{ice}) = (\Delta S_{ice})_{i-1} - (\Delta S_{ice})_i, \quad (1)$$

где $i = 2, 3, \dots, 12$ — номер месяца. При $i = 1$: $D_1(\Delta T_{tr}) = (\Delta T_{tr})_1$, $D_1(\Delta S_{ice}) = (\Delta S_{ice})_1$. Соответствующие приращения складываются и принимаются за сконструированные аномалии широты центра струйного течения $(\Delta_i \varphi)_{des}$ в условных единицах:

$$(\Delta_i\varphi)_{des} = D_i(\Delta T_{tr}) + D_i(\Delta S_{ice}). \quad (2)$$

На рис. 5 представлено сравнение среднемесячных аномалий широты центра струйного течения в 2017–2019 гг., рассчитанных по спутниковым данным и сконструированных по описанному выше алгоритму (1)–(2).

Сравнение представленных на рис. 5 кривых годового хода аномалий $\Delta\varphi$ позволяет заключить, что сконструированные значения $(\Delta\varphi)_{des}$ в целом улавливают особенности годового хода аномалий широты центра струйного течения, полученных на основе спутниковых измерений, особенно в 2019 г. В 2017 и 2018 гг. ситуация заметно хуже. Этим, в частности, можно объяснить отсутствие значимых коэффициентов корреляции $R(\Delta T, \Delta\varphi)$ в 2018 г. для станций Европы и ЕТР. Следует заметить, что величина абсолютных величин сконструированных аномалий не имеет принципиального значения. Конечно, такое качественное рассмотрение не претендует на исчерпывающее объяснение годового хода аномалий широты центра струйного течения в 2017–2019 гг. Наверняка играют роль и другие факторы, в частности волны Россби. Но представляется, что оно ухватывает одни из основных механизмов, влияющих на вариации широты центра струйного течения.

Стремительный прогресс в области дистанционного зондирования Земли из космоса открывает широкие перспективы изучения струйных течений с помощью новейшей спутниковой аппаратуры. Отметим здесь только два важнейших направления, связанных с новыми космическими системами. Так, устанавливаемый на европейских геостационарных метеорологических спутниках третьего поколения MTG (*англ.* Meteosat Third Generation) (<http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/MeteosatThirdGeneration/>) ИК-зондировщик IRS (*англ.* Infra-Red Sounder) позволит провести детальный анализ вертикальной структуры характеристик струйных течений. Создание гидрометеорологической космической системы «Арктика» на высокоэллиптических орбитах (Асмус и др., 2007) и размещение на таких спутниках целевой аппаратуры, аналогичной устанавливаемой на российских геостационарных метеорологических спутниках серии «Электро», позволит решить проблему получения информации о поле ветра, а следовательно, о характеристиках струйных течений в высоких широтах.

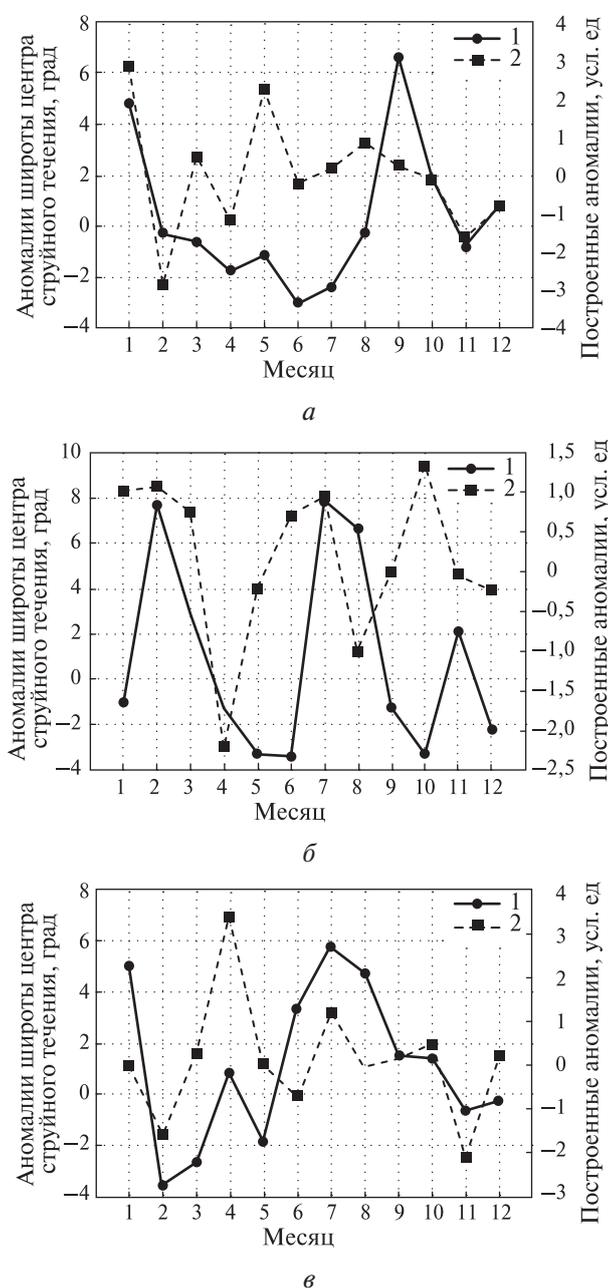


Рис. 5. Годовой ход среднемесячных аномалий широты центра струйного течения в 2017 г. (а), 2018 г. (б) и 2019 г. (в), полученных по спутниковым данным (1) и рассчитанных согласно изложенному выше алгоритму в условных единицах (2)

Заключение

Приведённые выше результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. На примере фактических данных наблюдений показана связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха в 2017–2019 гг. в Европе и на европейской территории России (ЕТР) с характеристиками высотных струйных течений, определяемыми по данным зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения в полосе поглощения водяного пара 6,2 мкм.
2. Значимые на уровне доверительной вероятности 95 % и выше коэффициенты корреляции аномалий среднемесячной приземной температуры отмечаются, прежде всего, с аномалиями широты центра струйного течения $\Delta\phi$, его средней площади ΔS и эффективного времени его «жизни» Δt .
3. При смещении центра струйного течения на север относительно среднего многолетнего положения на значительной территории Европы и в северных районах ЕТР среднемесячная температура с большой степенью вероятности опускается ниже климатической нормы, и наоборот. Увеличение характерного времени жизни, а также уменьшение средней площади струйного течения относительно среднего многолетнего значения приводят в ряде случаев к увеличению температуры относительно климатической нормы в северных районах ЕТР и Европы.
4. Предложен алгоритм расчёта годового хода среднемесячных аномалий широты центра струйного течения под влиянием изменения температуры верхней тропосферы и площади арктического морского льда, качественно отображающий основные особенности наблюдаемых по спутниковым данным вариаций широты центра струйного течения в 2017–2019 гг.

Авторы выражают благодарность коллегам из НИЦ «Планета», обеспечивающим передачу спутниковых данных в НПО «Тайфун». Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00831а).

Литература

1. Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Носенко Ю. И., Полищук Г. М., Селин В. А. Высокоэллиптическая космическая система для гидрометеорологического мониторинга Арктического региона Земли // Бюл. ВМО. 2007. Т. 56. № 4. С. 293–296.
2. Ивангородский Р. В., Нерушев А. Ф. Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 45–53.
3. Нерушев А. Ф., Крамчанинова Е. К. Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3–13.
4. Нерушев А. Ф., Вишератин К. Н., Ивангородский Р. В. Динамика высотных струйных течений по данным спутниковых измерений и их связь с климатическими параметрами и крупно-масштабными атмосферными явлениями // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 24–38.
5. Archer C. L., Caldeira K. Historical trends in the jet streams // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35(8). Art. No. L08803. 5 p. DOI: 10.1029/2008GL033614.
6. Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H. J. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer // Proc. National Academy of Sciences of the United States of America. 2014. V. 111(34). P. 12331–12336.
7. Francis J. A., Vavrus S. J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Iss. 6. Art. No. L06801. 5 p. DOI: 10.1029/2012GL051000.
8. Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R. Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability // Climate Dynamics. 2017. V. 48. P. 3869–3887. DOI: 10.1007/s00382-016-3307-0.
9. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K. C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D.

- The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project // Bull. American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
10. Masters J. The jet stream is getting weird // Scientific American. 2014. V. 311. No. 6. P. 68–75.
 11. Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H. J. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes // Proc. National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. V. 110(14). P. 5336–5341.
 12. Screen J. A., Simmonds I. Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes // Nature Climate Change. 2014. V. 4. P. 704–709.

The relationship of surface air temperature anomalies and the characteristics of high-altitude jet streams

A. F. Nerushev, K. N. Visheratin, L. K. Kulizhnikova, R. V. Ivangorodsky

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk 249038, Russia

E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

The relationships are discussed between monthly mean surface air temperature at 147 meteorological stations in Europe and 53 stations in the European territory of Russia (ETR) and the characteristics of high-altitude jet streams determined from the measurements of the SEVIRI radiometer on board European geostationary satellites in the water vapor channel of 6.2 microns. On the basis of statistical analysis, it is shown that the greatest correlation of the mean monthly surface temperature anomalies is observed with the center of jet stream latitude anomalies. A connection with the anomalies of the average area and the effective jet stream life is also noted. When the center of the jet stream is shifted to the north relative to the long-term average position, the monthly average temperature over a large territory of Europe and ETR with a high degree of probability is below the climatic norm, and vice versa. An increase in the characteristic life time, as well as a decrease in the average area of the jet stream relative to the average long-term value, in some cases leads to an increase in temperature relative to the climatic norm in the northern regions of the ETR and Europe. An algorithm is proposed for calculating the annual variation of the monthly mean anomalies of the jet stream center latitude under the influence of changes in the temperature of the upper troposphere and the area of the Arctic sea ice, which qualitatively reflects the main features of the variations of jet stream latitude observed from satellite data in 2017–2019.

Keywords: temperature anomalies, jet stream characteristics, upper troposphere, geostationary meteorological satellites, statistical analysis

Accepted: 16.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-199-209

References

1. Asmus V. V., Dyadyuchenko V. N., Nosenko Yu. I., Polishchuk G. M., Selin V. A., Vysokoellipticheskaya kosmicheskaya sistema dlya gidrometeorologicheskogo monitoringa Arkticheskogo regiona Zemli (Highly elliptical space system for hydrometeorological monitoring of the Arctic region of the Earth), *Byulleten' VMO*, 2007, Vol. 56, No. 4, pp. 293–296.
2. Ivangorodskii R. V., Nerushev A. F., Kharakteristiki struinykh techenii verkhnei troposfery po dannym izmerenii evropeiskikh geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov (Characteristics of the upper tropospheric jet fluxes inferred from the data of European geostationary meteorological satellites), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 45–53.
3. Nerushev A. F., Kramchaninova E. K., Metod opredeleniya kharakteristik atmosferykh dvizhenii po dannym izmerenii meteorologicheskikh geostatsionarnykh sputnikov (Method for Determining Characteristics of Atmospheric Motions from the Measurement Data of Meteorological Geostationary Satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 1, pp. 3–13.

4. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodskii R. V., Dinamika vysotnykh struinykh techenii po dannym sputnikovykh izmerenii i ikh svyaz' s klimaticheskimi parametrami i krupnomasshtabnymi atmosferynymi yavleniyami (Dynamics of High-Altitude Jet Fluxes Inferred from the Satellite Measurement Data and Their Connection with the Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 6, pp. 24–38.
5. Archer C. L., Caldeira K., Historical trends in the jet streams, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35(8), Art. No. L08803, 5 p., DOI: 10.1029/2008GL033614.
6. Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H. J., Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer, *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, Vol. 111(34), pp. 12331–12336.
7. Francis J. A., Vavrus S. J., Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, Issue 6, Art. No. L06801, 5 p., DOI: 10.1029/2012GL051000.
8. Hall R., Jones J., Hanna E., Scaife A., Erdélyi R., Drivers and potential predictability of summer time North Atlantic polar front jet variability, *Climate Dynamics*, 2017, Vol. 48, pp. 3869–3887, DOI: 10.1007/s00382-016-3307-0.
9. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Janowiak J., Mo K. C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Kung E., Salstein D., The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project, *Bull. American Meteorological Society*, 1996, Vol. 77, pp. 437–471.
10. Masters J., The jet stream is getting weird, *Scientific American*, 2014, Vol. 311, No. 6, pp. 68–75.
11. Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H. J., Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes, *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, Vol. 110(14), pp. 5336–5341.
12. Screen J. A., Simmonds I., Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes, *Nature Climate Change*, 2014, Vol. 4, pp. 704–709.