

Характеристики высотных струйных течений Северного и Южного полушарий по данным спутниковых измерений

А.Ф. Нерушев, Р.В. Ивангородский

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

Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости основных характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного и Южного полушарий за десятилетний период (2007–2016) на основе обработки результатов спутниковых измерений. Исходной информацией служили данные зондирования атмосферы в канале водяного пара 6,2 мкм радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения. Струйные течения определялись на основе вычисления поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров — неоднородностей концентрации водяного пара. Проанализирована межгодовая изменчивость основных характеристик струйных течений (средней площади, максимальной скорости ветра, географического положения центра струйного течения, градиентов (сдвигов) скорости ветра и др.), а также их годовой ход. Выявлены общие закономерности и существенные различия характеристик в Северном и Южном полушариях. Показано, что тенденция временной изменчивости характеристик струйных течений за рассматриваемый 10-летний промежуток времени практически одинакова в обоих полушариях, в то время как значения трендов заметно разнятся. При этом величины значимых трендов большинства характеристик в Южном полушарии существенно (в разы) больше.

Ключевые слова: струйные течения, Северное и Южное полушарии, линейные тренды, геостационарные спутники, верхняя тропосфера, поля ветра, атмосферные трассеры

Одобрена к печати: 15.06.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-299-307

Введение

Высотные струйные течения — неотъемлемый и очень важный элемент общей циркуляции атмосферы. В них сосредоточена основная кинетическая энергия воздушной оболочки Земли. Наблюдаемые в верхней тропосфере и стратосфере Северного и Южного полушарий высотные струйные течения оказывают существенное влияние на характеристики атмосферы и происходящие в ней процессы (Нерушев, 2014). В последнее время в связи с участвовавшими проявлениями аномальных погодных явлений, связанных, по мнению большинства ученых, с глобальным потеплением, заметно повысился интерес к высотным струйным течениям как одному из возможных факторов, влияющих на возникновение таких аномалий (см., например, (Мастерс, 2015; Hall et al., 2016) и обширную библиографию в них). Удобным инструментом получения информации о струйных течениях и определения их характеристик является зондирование атмосферы с геостационарных метеорологических спутников. Так, данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения (MSG, Meteosat Second Generation) в канале водяного пара 6,2 мкм позволяют получать информацию о характеристиках высотных струйных течений в верхней тропосфере в зоне обзора спутника ($\pm 70^\circ$ по широте и долготе от подспутниковой точки) с высоким временным разрешением ($\Delta t = 15$ мин).

Однако если струйным течениям Северного полушария уделяется в последнее время заметное внимание (Ивангородский, Нерушев, 2014; Калашник, Нерушев, Ивангородский,

2017; Нерушев, 2014; Hall et al., 2016), то струйные течения Южного полушария явно обделены им. Принимая во внимание определенную разницу климатических условий Северного и Южного полушарий, можно ожидать различия характеристик высотных струйных течений в них. Струйные течения, как существенный элемент общей циркуляции атмосферы, должны испытывать влияние глобальных изменений климатической системы Земли, а также оказывать определенное воздействие на погодные процессы. Поэтому, как нам представляется, важно детально изучить пространственно-временную изменчивость характеристик струйных течений на достаточно большом промежутке времени и выявить определенные закономерности этой изменчивости.

В настоящей статье на основе однородной спутниковой информации за десятилетний период (2007–2016) представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости основных характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного и Южного полушарий в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения. Выявлены общие закономерности, а также заметные отличия характеристик струйных течений Северного и Южного полушарий.

Исходные данные и используемые методы расчета

В качестве исходной информации использовались данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8 – Meteosat 10 за период с марта 2007 г. по декабрь 2016 г., поступавшие по каналам связи из Научно-исследовательского центра «Планета» в НПО «Тайфун» и занесенные в базу данных.

Струйные течения определяются на основе вычисления поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров — неоднородностей концентрации водяного пара (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Поле горизонтальной скорости ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным канала водяного пара с центром на 6,2 мкм в узлах сетки с шагом 10 пикселей по трем последовательным снимкам, разделенным временным интервалом 15 мин. Как показано в работах (Нерушев, Крамчанинова, 2011; Нерушев, Крамчанинова, Соловьев, 2007), для условий средних широт этот канал имеет максимум весовой функции на уровне около 350 гПа (приблизительно 8 км), эффективный излучающий слой атмосферы заключен между уровнями 200–500 гПа, а абсолютная погрешность вычисления модуля горизонтальной скорости ветра разработанным методом не превышает 8 м/с.

После получения поля горизонтальной скорости ветра с шагом по времени 1 ч выполняется автоматический поиск струйных течений в соответствии с их определением (Атмосфера, 1991; Воробьев, 1960, 1991; Погосян, 1960): области поля ветра, имеющие скорость $V \geq 30$ м/с и соответствующие размеры рассматриваются как струйное течение. Алгоритм поиска струйных течений подробно изложен в статье (Ивангородский, Нерушев, 2014). Полученный в результате расчетов массив областей анализируется, и определяются следующие

характеристики: количество (N) струйных течений с эффективным временем «жизни», большим некоторого минимального времени τ_{\min} ; средняя площадь 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 со стороны, обращенной к полюсу (G_p), и с противоположной стороны (G_{fp}); эффективное время «жизни» струйного течения (τ).

Под эффективным временем «жизни» τ понимается промежуток времени, в течение которого сохраняются в определенных пределах некоторые интегральные характеристики струйного течения (Ивангородский, Нерушев, 2014). Алгоритм нахождения τ состоит в сравнении последовательных спутниковых изображений с выявленными струйными течениями и проверки выполнимости ряда критериев, по которым струйное течение на двух последовательных спутниковых снимках, разделенных временным интервалом 1 ч, может быть идентифицировано как одно и то же. В качестве таких критериев были выбраны максимальные значения относительного изменения S в 40% и абсолютного изменения φ и λ на 10° . При одновременном превышении указанных значений считается, что струйное течение прекращает свое существование и определяется его характерное время «жизни».

Максимальные градиенты (сдвиги) горизонтальной скорости ветра рассчитываются так же, как в работе (Калашник, Нерушев, Ивангородский, 2017), но с учетом положения относительно полюсов:

$$G_i = \frac{V_m - V_0}{R_i}, \quad (1)$$

где i принимает значение p или fp (полюс или от полюса); $V_0 = 30$ м/с; R_i — минимальное расстояние от точки со скоростью V_m до изолии 30 м/с со стороны полюса или от полюса.

После получения рядов характеристик струйных течений с временным шагом $\Delta t = 1$ ч проводился их предварительный анализ на предмет устранения выбросов ($\pm 3\sigma$, где σ — среднеквадратическое отклонение от среднего значения), которые могут быть обусловлены как ошибками исходных спутниковых данных, так и ошибками расчетов. В точках выбросов значения характеристик струйных течений заменялись их средними значениями. Для последующего анализа формировались массивы среднесуточных и среднемесячных характеристик струйных течений с эффективным временем «жизни» $\tau \geq 12$ ч.

Результаты расчетов и обсуждение

Проанализируем вначале тенденции изменчивости среднемесячных характеристик струйных течений на десятилетнем интервале с помощью линейного тренда. Из восьми перечисленных выше характеристик только для трех (G_p , G_{fp} и τ) линейный тренд в Северном полушарии значимо отличен от нуля с вероятностью более 95%. В Южном полушарии

таких характеристик в два раза больше (S , V_m , ϕ , G_p , G_{fp} и τ). Отметим, что в Северном полушарии на 10-летнем интервале линейные тренды N и V_m не значимы, в то время как на 9-летнем интервале (2007–2015) они значимо отличны от нуля с вероятностью более 95%. Это обусловлено заметным уменьшением количества струйных течений в июне-сентябре и увеличением их скорости в августе-сентябре и декабре 2016 г. по сравнению со средними многолетними значениями.

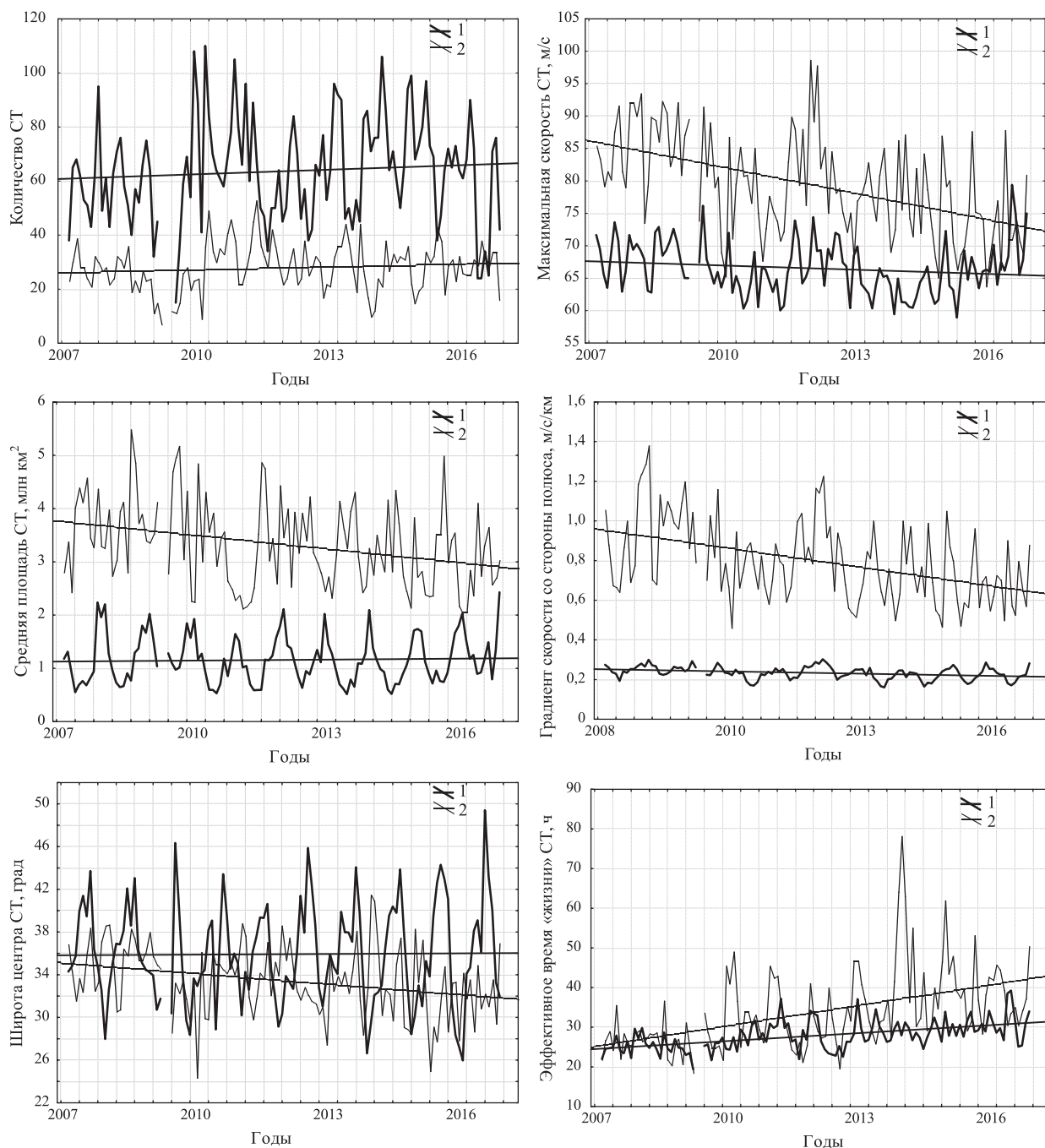


Рис. 1. Межгодовая изменчивость среднемесячных характеристик струйных течений в Северном (1) и Южном (2) полушариях в зоне обзора спутников. Прямые — линейные тренды

На рис. 1 представлено сравнение межгодовой изменчивости среднемесячных значений N , S , V_m , ϕ , G_p и τ в Северном и Южном полушариях в зоне обзора спутников. Для всех

характеристик в обоих полушариях характерны существенные сезонные вариации, происходящие, как правило, в противофазе. При этом их амплитуда для большинства характеристик больше в Южном полушарии. Тенденция временной изменчивости характеристик практически одинакова для обоих полушарий (за исключением S и ϕ , тренды которых в Северном полушарии не значимы). В то же время значения трендов заметно разнятся. Относительное уменьшение G_p и увеличение τ в Северном и Южном полушариях отличаются в 2–2,5 раза. На фоне слабого (3%) уменьшения V_m в Северном полушарии отмечается существенное (16%) ее снижение в Южном. Заметно уменьшилась (23%) площадь S в Южном полушарии при ее слабом росте (5%) в Северном. Среднее положение центра области струйного течения в Южном полушарии сместилось по широте в направлении экватора на 3° (относительное изменение 9%) при практически неизменном положении центра в Северном полушарии. Что касается количества струйных течений, то отмечается их слабый рост в обоих полушариях (при незначимых трендах).

Основной причиной такой временной изменчивости характеристик струйных течений, по крайней мере максимальной скорости и горизонтальных градиентов скорости, может быть глобальное потепление климата, в результате которого уменьшается разность температур экватор-полюс и, следовательно, следует ожидать меньшей разности температур теплых и холодных воздушных масс, при сближении которых формируются струйные течения.

Обращает на себя внимание заметное отличие величин N , S , V_m и G_p в Северном и Южном полушариях. На *рис. 2* в качестве примера представлены гистограммы распределения среднемесячных значений V_m в обоих полушариях. Модальные значения нормальных распределений (66,5 и 79,4 м/с), которыми хорошо аппроксимируются данные расчетов, отличаются в 1,2 раза, а среднеквадратические отклонения (4,0 и 7,8 м/с) — в два раза. Такое различие характеристик струйных течений Северного и Южного полушарий связано, по всей вероятности, с заметными различиями температуры воздушных масс этих полушарий: в Южном полушарии температура в высоких широтах на уровнях ~6–8 км в соответствующие времена года заметно ниже, чем в Северном, а в средних широтах различие меньше (Атмосфера, 1991). Это обусловлено, в том числе, разным распределением суши и водной поверхности. Для достоверного выявления причин значительного различия величин характеристик струйных течений и их трендов в Северном и Южном полушариях требуется проведение дополнительных исследований.

Годовой ход средних многолетних значений N , S , V_m и ϕ приведен на *рис. 3*. Для более наглядного представления учтено соответствующее соотношение между временами года в Северном и Южном полушариях (сдвиг по времени на полгода). Для всех указанных характеристик струйных течений отмечается практически идентичный хорошо выраженный годовой ход: максимальные значения количества струйных течений наблюдаются весной и осенью, а минимальные — летом; минимальная площадь — летом; максимальные значения скорости — летом и зимой; минимальные — весной; максимальный сдвиг центра струйного течения к полюсам — в конце лета — начале осени.

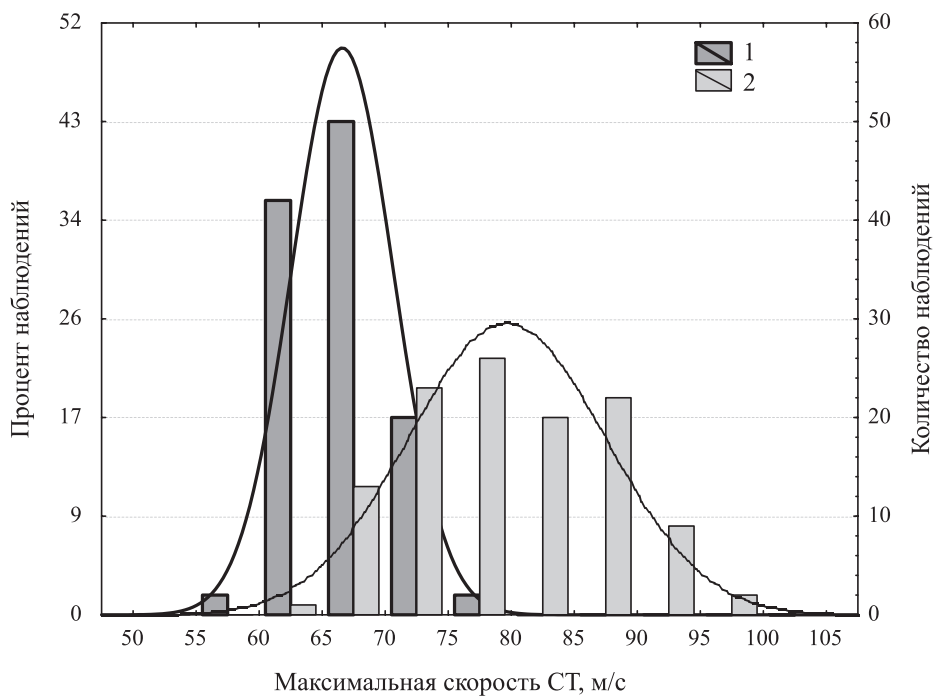


Рис. 2. Гистограммы среднемесячных значений максимальной скорости струйного течения в Северном (1) и Южном (2) полушариях

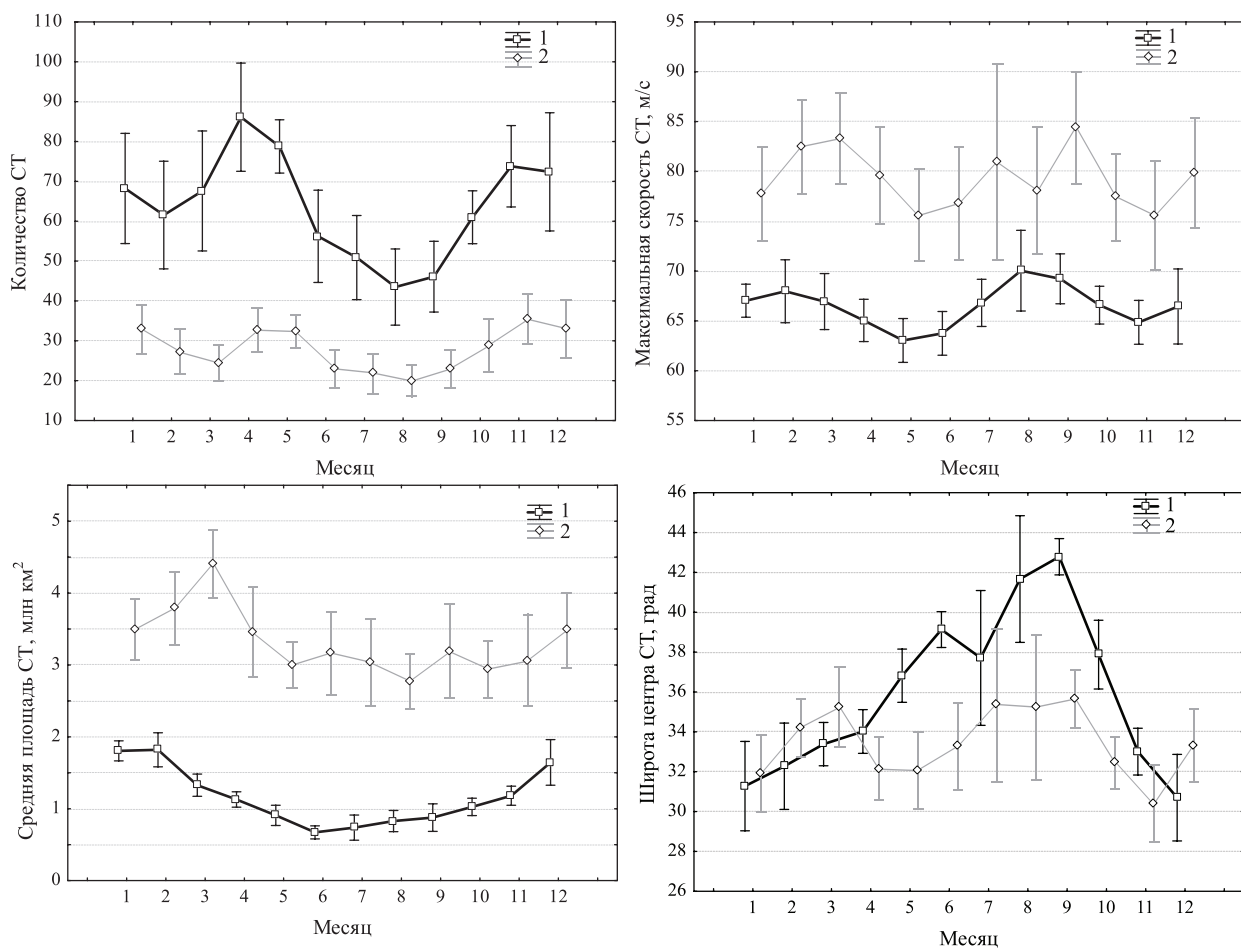


Рис. 3. Годовой ход средних многолетних среднемесячных характеристик струйных течений в Северном (1) и Южном (2) полушариях в зоне обзора спутников. Вертикальные отрезки — 95%-е доверительные интервалы. Знак широты центра струйного течения для Южного полушария изменён на положительный. Учтено соотношение между временами года в Северном и Южном полушариях

Как отмечено в статьях (Воробьев, 1960; Калашник, Нерушев, Ивангородский, 2017) важной особенностью струйных течений является горизонтальная асимметрия профиля скорости ветра. Для Северного полушария эта асимметрия выражается в том, что величина горизонтального сдвига скорости в циклонической области струи больше сдвига скорости в антициклонической области. Для Южного полушария — наоборот. С учетом положения струйного течения относительно полюсов (при квазизональном направлении струйного течения) коэффициент асимметрии профиля скорости для обоих полушарий имеет вид: $A_s = G_p / G_{fp}$, где G_p и G_{fp} вычисляются согласно формуле (1). На рис. 4 представлены гистограммы распределения среднемесячных значений коэффициента асимметрии A_s для Северного и Южного полушарий. Как видно, горизонтальная асимметрия профиля скорости существенно больше в Южном полушарии. Приведенные экспериментальные значения хорошо аппроксимируются нормальными распределениями с модальными значениями 1,7 и 3,2 и среднеквадратическими отклонениями 0,2 и 0,5 соответственно. Причина такого различия, на наш взгляд, та же, что отмеченная выше для максимальных скоростей струйных течений: существенные различия в температурных режимах воздушных масс Северного и Южного полушарий.

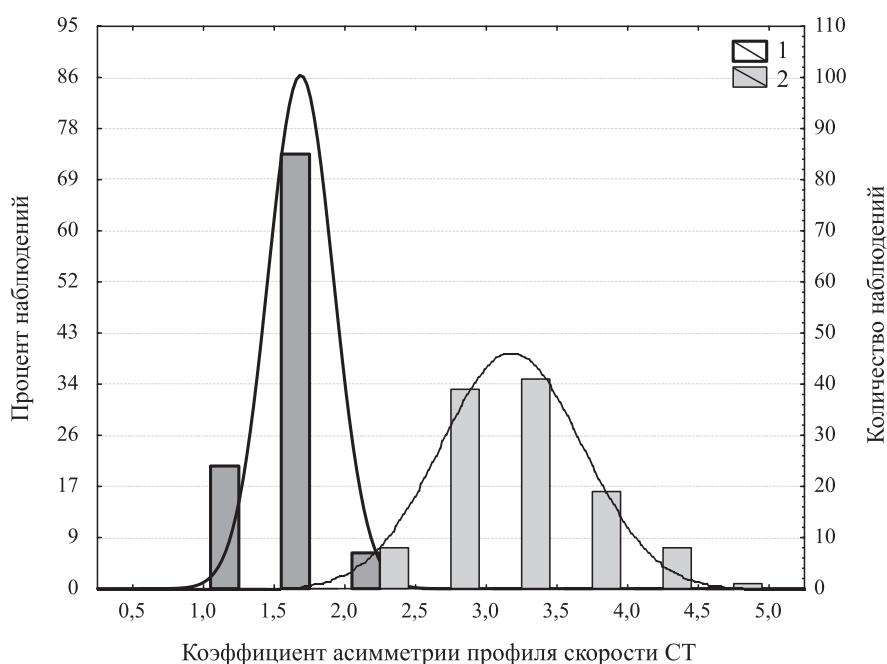


Рис. 4. Гистограммы среднемесячных значений коэффициента асимметрии горизонтального профиля скорости струйного течения в Северном (1) и Южном (2) полушариях

Заключение

Обработка данных зондирования атмосферы Земли радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения позволяет получать информацию о характеристиках струйных течений в верхней тропосфере в зоне обзора спутника. Использование длительных рядов таких данных дало возможность на основе однородного материала проследить изменчивость характеристик высотных струйных течений Северного

и Южного полушарий на различных временных масштабах и выявить общие закономерности и существенные различия. Основные из них состоят в следующем.

1. Все характеристики струйных течений в обоих полушариях испытывают существенные сезонные вариации, при этом их амплитуда для большинства характеристик больше в Южном полушарии.

2. Тенденция временной изменчивости характеристик струйных течений за рассматриваемый 10-летний промежуток времени практически одинакова в обоих полушариях, в то время как значения трендов заметно разнятся. При этом величина значимых трендов в Южном полушарии существенно (в разы) больше.

3. Среднемесячное количество струйных течений с эффективным временем «жизни» $\tau \geq 12$ ч при незначимых положительных трендах практически не изменилось за 10-летний промежуток в Северном полушарии и слабо возросло в Южном. Максимальная скорость струйных течений значительно (на 16%) уменьшилась в Южном полушарии и незначительно (3%) — в Северном. Существенно возросло эффективное время «жизни» струйных течений в обоих полушариях. Среднее положение области центра струйного течения осталось практически неизменным в Северном полушарии и сместилось на 3° по широте к экватору в Южном.

4. В обоих полушариях, с учетом соотношений между временами года, отмечается практически идентичный хорошо выраженный годовой ход средних многолетних значений основных характеристик струйных течений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Планета» Т.Л. Кормашовой и А.Н. Филинову за передачу данных измерений радиометра SEVIRI.

Литература

1. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
2. Воробьев В.И. Струйные течения в высоких и умеренных широтах. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 234 с.
3. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
4. 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.
5. Калашник М.В., Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. Характерные масштабы и горизонтальная асимметрия струйных течений в атмосфере Земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 179–187.
6. Мастерс Д. Струйное течение становится фатальным // В мире науки. 2015. № 2. С. 61–68.
7. Нерушев А.Ф. Струйные течения в атмосфере Земли // Земля и Вселенная. 2014. № 6. С. 16–30.
8. Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К. Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3–13.
9. Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К., Соловьев В.И. Определение характеристик атмосферных движений по данным многоволнового зондирования из космоса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 3. № 4. С. 442–450.
10. Погосян Х.П. Струйные течения в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 183 с.
11. 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. 2016. Vol. 48. Issue 11-12. P. 3869–3887. DOI: 10.1007/s00382-016-3307-0.

Characteristics of high-altitude jet fluxes of the Northern and Southern Hemispheres inferred from satellite data

A.F. Nerushev, R.V. Ivangorodskii

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk 249038, Russia
E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

Presented are the results of investigation of spatiotemporal variability of jet fluxes basic characteristics in the upper troposphere of the Northern and Southern Hemispheres based on processing of satellite data over the 2007–2016 ten-year period. The data of atmospheric soundings in the water vapor channel of 6.2 micrometers obtained by the SEVIRI radiometer of the European geostationary meteorological satellites of the second generation were used as the basic information. The jet fluxes were determined from computations of the wind field in the upper troposphere according to the motion of atmospheric tracers — heterogeneities of water vapor concentrations. Interannual variability of jet fluxes basic characteristics (average surface area, maximum wind speed, geographical location of jet flux centers, gradients (shifts) of wind speed, etc.) along with their annual trend were analyzed. Main laws and significant differences in the characteristics in the Northern and Southern Hemispheres were revealed. It was shown that the tendency of jet fluxes characteristics variability during the ten-year period considered was practically the same in both Hemispheres, but the trends are significantly different. At the same time, the values of significant trends of the majority of characteristics in the Southern Hemisphere were (by times) greater.

Keywords: jet fluxes, the Northern and Southern hemispheres, linear trends, geostationary satellites, the upper troposphere, wind fields, atmospheric tracers

Accepted: 15.06.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-299-307

References

1. *Atmosfera: Spravochnik* (Atmosphere: reference book), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 509 p.
2. Vorob'ev V.I., *Struinye techeniya v vysokikh i umerennykh shirotakh* (Jet fluxes in high-altitude and moderate latitudes), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960, 234 p.
3. Vorob'ev V.I., *Sinopticheskaya meteorologiya* (Synoptic meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 616 p.
4. Ivangorodskii R.V., Nerushev A.F., *Kharakteristiki struinykh techenii verkhnei troposfery po dannym izmerenii evropeiskikh geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov* (Characteristics of jet fluxes of the upper troposphere inferred from the measurement data of european meteorological satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 45–53.
5. Kalashnik M.V., Nerushev A.F., Ivangorodskii R.V., *Kharakternye masshtaby i gorizontalnaya asimmetriya struinykh techenii v atmosfere Zemli* (Characteristic scales and horizontal asymmetry of jet fluxes in the earth's atmosphere), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 179–187.
6. Masters J., *Struinoe techenie stanovitsya fatal'nym* (A wacky jet stream is making our weather severe), *V mire nauki*, 2015, No. 2, pp. 61–68.
7. Nerushev A.F., *Struinye techeniya v atmosfere Zemli* (Jet fluxes in the Earth's atmosphere), *Zemlya i Vselennaya*, 2014, No. 6, pp. 16–30.
8. 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.
9. Nerushev A.F., Kramchaninova E.K., Solov'ev V.I., *Opredelenie kharakteristik atmosferykh dvizhenii po dannym mnogovolnovogo zondirovaniya iz kosmosa* (Determination of Atmospheric Motion Characteristics from the Data of Multi-Wave Soundings from Space), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 3, No. 4, pp. 442–450.
10. Pogosyan Kh.P., *Struinye techeniya v atmosfere* (Jet fluxes in the atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960, 183 p.
11. 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*, 2016, Vol. 48, Issue 11–12, pp. 3869–3887. DOI: 10.1007/s00382-016-3307-0.