КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОСФЕРНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ПО ДАННЫМ РАДИОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.В. Хохлова, А.С. Лавров

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных,
Россия, 249035, г. Обнинск Калужской обл., ул. Королева, 6;
anna_x@meteo.ru, fliorcid@yandex.ru

Реферат. Тропосферные струйные течения являются элементом общей циркуляции атмосферы. Представляет интерес оценка климатических особенностей струйных течений в условиях современного климата. Климатические характеристики тропосферных струйных течений Северного полушария получены по радиозондовым данным примерно 400 аэрологических станций за период 30 лет (1985-2014 гг.). Идентификация струйного течения проводилась по наличию в профиле ветра пороговых значений скорости и вертикального сдвига ветра. В число рассчитанных климатических характеристик входят повторяемость, высота оси, максимальная и средняя скорость, мощность слоя, занятого струйным течением, и границы этого слоя. Приведены сезонные географические распределения полученных характеристик. Имеются указания на уменьшение максимальной скорости струйных течений и смещение к западу зон максимальной повторяемости.

Ключевые слова. Струйное течение, тропосфера, Северное полушарие, многолетние характеристики, радиозондовые измерения.

CLIMATIC CHARACTERISTICS OF TROPOSPHERIC JET STREAMS IN THE NORTHERN HEMISPHERE USING RADIOSONDE OBSERVATIONS DATA

A.V. Khokhlova, A.S. Lavrov

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center,
6, Koroleva str., 249035, Kaluzhskaya region, Obninsk, Russia;
anna_x@meteo.ru, fliorcid@yandex.ru

Abstract. Tropospheric jet streams are the elements of general circulation of the atmosphere. An assessment of climatic characteristics of jet streams under present-day climate is of interest. Climatic characteristics of tropospheric jet streams of the Northern Hemisphere are obtained from the radiosonde data from about 400 aerological stations over the 30 years period (1985-2014). The presence of above threshold speed values and vertical wind shear in the wind profile are used for the identification of a jet flow. Climatic characteristics include frequency, axis height, maximal and average speed, thickness of the layer occupied by the jet current and

the boundaries of this layer. Seasonal geographical distributions of the obtained characteristics are presented. There are indications of maximal jet speed decline and westward shifting of maximum frequency zones.

Keywords. Jet stream, troposphere, Northern hemisphere, long-term characteristics, radiosonde measurements.

Введение

Струйные течения, представляющие собой высотную узкую зону сильных ветров с большими вертикальными и боковыми сдвигами ветра, характерны для всего Земного шара. Они могут иметь тысячи километров в длину, сотни километров в ширину и несколько километров в толщину. Нижний предел скорости ветра вдоль оси составляет 28-30 м/с (100 км/ч), при этом вертикальный сдвиг ветра составляет 5-10 м/с на 1 км и боковой сдвиг — 5 м/с на 100 км. Преобладающим направлением тропосферных струйных течений является западное. Внетропические струйные течения чаще всего имеют ширину 700-1300 км, а толщину 6-10 км. Ось течения, на которой наблюдаются максимальные скорости ветра, располагается под тропопаузой. Максимум повторяемости и наибольшая интенсивность струйных течений в Северном полушарии отмечаются в период с октября по март. В умеренных широтах продолжительность непрерывного сохранения внетропических струйных течений может колебаться от нескольких дней в теплое время до 15-20 дней в холодное. Внетропические струйные течения отличаются большой подвижностью, а их интенсивность непрерывно изменяется. Струйное течение возникает в результате формирования высотных фронтальных зон с большими горизонтальными градиентами температуры (Богаткин, 2005; Погосян, 1972).

Знание сезонных и географических особенностей струйных течений представляет интерес не только для оценки их роли в системе общей циркуляции атмосферы, но и с прикладной точки зрения, поскольку их учет весьма важен в авиации. Струйные течения оказывают влияние на все летательные аппараты, находящиеся в их зоне. В их окрестности нередко наблюдается турбулентность ясного неба и болтанка.

Изучению тропосферных струйных течений уделяется значительное внимание. Исследуется связь струйных течений с характеристиками тропопаузы (Mapney 2011, 2017), высотными фронтами (Шакина, Иванова, Комасько, 2014), планетарными волнами (Smith, Scott, 2016), тропическими циклонами (Похил, Глебова, Смирнов, 2013). В ряде работ, выполненных в последние годы, сделаны оценки многолетних трендов струйных течений. Имеются указания на замедление скорости струйных течений в Северном полушарии, а также на смещение к полюсам и увеличение высоты (Allen, Sherwood, 2007; Archer, Caldeira, 2008). Следует отметить, что полученные разными авторами тенденции изменчивости имеют различный характер. В частности по данным работы (Pena-Ortiz et al., 2013) в период 1979-2008 гг. в Северном полушарии имело место смещение к полюсу и увеличение скорости струйных течений. Уделяется внимание разработке методов идентификации струйных течений и

определения их характеристик (Pena-Ortis et al., 2013; Ricus, 2018). Разработан метод идентификации струйных течений по спутниковым наблюдениям (Ивангородский, Нерушев, 2014). С помощью этого метода получены ряд результатов по климатологии струйных течений, в том числе, исследована повторяемость струйных течений в Северном и Южном полушариях (Нерушев, Ивангородский, 2017). Характерные климатические особенности струйных течений Северного полушария были приведены в работах (Погосян, 1972; Погосян, Туркетти, 1970).

Следует отметить, что подавляющее большинство современных зарубежных работ по климатологии струйных течений выполнено на основе численных моделей или данных различных реанализов, которые представляют собой композицию модельных данных и данных наблюдений с различных платформ. В связи с этим представляет определенный интерес исследование климатических характеристик и тенденций изменчивости струйных течений по данным радиозондовых наблюдений и сравнение с результатами наблюдений, полученных из других источников. Радиозондовые данные, благодаря хорошему вертикальному разрешению, позволяют изучить такие особенности струйных течений, которые сглажены или не отражены в модельных данных и спутниковых наблюдениях.

Целью настоящей работы является получение климатических характеристик тропосферных струйных течений и исследование их сезонных и географических особенностей на основе многолетних глобальных аэрологических наблюдений. Сопоставление с данными реанализов, а также исследование тенденций изменчивости представляет собой отдельную задачу. Поэтому в настоящей работе сравнение проведено только с климатическими особенностями географических распределений повторяемости струйных течений, полученных ранее по данным измерений. Сделанные оценки изменчивости имеют предварительный характер.

Данные и методы

Работа выполнена на основе многолетних глобальных аэрологических наблюдений и комплекса программных средств для обработки данных и представления результатов. Аэрологические наблюдения собраны в двух массивах, формируемых в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» из данных, поступающих по Глобальной системе телесвязи (ГСТ). Массивы являются частью Единого государственного фонда гидрометеорологических данных. В этих массивах хранятся данные наблюдений с более чем 900 аэрологических станций. Массивы охватывают глобальные аэрологические наблюдения с 1984 г. по настоящее время и содержат сведения о давлении, температуре и влажности воздуха, скорости и направлении ветра на высотах до 30 км. В процессе формирования архивных файлов данные аэрологического зондирования проходят процедуру комплексного контроля (Алдухов, Черных, 2013).

Для исследования струйных течений использованы данные радиозондирования около 400 аэрологических станций Северного полушария за 30-летний

период 1985-2014 гг. При этом характеристики тропосферных струйных течений определялись отдельно для каждой станции, то есть, в отдельных точках. Наличие данных в отдельных точках позволяет построить пространственные поля. Из всех аэрологических станций Северного полушария были отобраны станции с наиболее длинными рядами наблюдений и наименьшим количеством пропусков. Определение характеристик струйных течений было выполнено для каждого профиля радиозондирования. Согласно определению Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), тропосферное струйное течение идентифицируется при наличии на высотах выше 5 км скорости ветра не менее 28 м/с (100 км/час), а также наличии вертикальных сдвигов скорости ветра 5-10 м/с на 1 км и горизонтальных сдвигов скорости ветра не менее 5 м/с на 100 км. Для идентификации тропосферного струйного течения в каждом профиле использованы первые два из этих признаков на высотах от 5 до 16 км. При наличии в профиле скорости ветра струйного течения определяются его характеристики: максимальная скорость и высота оси (максимальной скорости ветра). Помимо этих основных характеристик аэрологические данные позволяют определить и другие величины, такие как мощность слоя, занятого струйным течением, его верхнюю и нижнюю границу и среднюю скорость в слое. Мощность слоя, занятого струйным течением, определялась как толщина слоя, в котором скорость ветра составляет не менее 28 м/с. Соответственно, нижняя и верхняя граница высоты слоя – как высоты, на которых, при наличии в профиле струйного течения, скорость ветра переходит через пороговое значение 28 м/с. Средняя скорость в этом слое рассчитывалась как

$$U = \frac{1}{\Delta P} \int_{P_2}^{P_1} v dP$$

где U – средняя скорость в слое, P_1 и P_2 – давление на нижней и верхней границе слоя, ΔP – разность давлений на нижней и верхней границе слоя, v – значения скорости ветра на промежуточных уровнях внутри слоя, занятого струйным течением. Аналогичным образом определены средние в слое компоненты скорости ветра. Таким образом были обработаны данные радиозондирования для 400 станций за 30 лет, всего это не менее нескольких миллионов профилей.

На рис. 1 приведена иллюстрация расчета характеристик струйного течения за отдельную дату. На рисунке даны вертикально-широтные разрезы средней за сутки измеренной скорости ветра для двух дат 2014 года: 15 января и 15 июля для диапазона долгот 135-145° в.д. Всего здесь представлены данные по 21 станции. На разрезах хорошо видно струйное течение: это области со скоростью ветра не менее 30 м/с. Характеристики струйного течения за эти даты по данным станции 47778 (Сиономисаки, Япония, отмечена пунктирной линией), расположенной на широте 33.45° с.ш., определенные по нашим расчетам, имеют следующие значения: за 15.01.2014 геопотенциальная высота оси 12250 гпм, максимальная скорость 97 м/с, мощность слоя

около 9 км; за 15.07.2014 струйное течение на этой станции не идентифицировано. Это соответствует наблюдаемому разрезу скорости ветра. Отметим наличие на разрезах множественной тропопаузы в области струйного течения, как в зимнее, так и в летнее время. Связь струйных течений с характеристиками тропопаузы является отдельным предметом исследования и в рамки данной работы не входит.

Рисунок 1. Вертикально-широтные разрезы скорости ветра за 15.01.2014 (вверху) и за 15.07.2014 (внизу) в диапазоне долгот 135-145° в.д.

Черными линиями отмечена тропопауза. Пунктирная линия проведена на широте станции 47778, с которой производится сравнение

После анализа отдельных профилей выполнено осреднение полученных характеристик для каждой станции за каждый месяц каждого года за весь исследуемый период с 1985 г. по 2014 г., а также за каждый календарный месяц за весь 30-летний период. Рассчитана повторяемость струйных течений. Повторяемость определялась как отношение количества случаев наличия струйного течения к общему количеству зондирований за данный месяц в процентах.

Часть массива, включающая данные по российским станциям, зарегистрирована как база данных в Роспатенте (Статистические характеристики..., 2015). Предварительные результаты анализа были опубликованы в работах (Никишин, Хохлова, 2015; Лавров, Хохлова, 2017).

Результаты

Полученный массив станционных среднемесячных характеристик струйных течений позволяет исследовать пространственно-временные распределения статистических характеристик струйных течений. В состав характеристик входят высота оси, мощность слоя, средняя скорость ветра в слое, направление средней скорости ветра, определяемое через средние компоненты, максимальная скорость ветра (одно значение за месяц), повторяемость струйных течений. Для ряда станций определены также верхняя и нижняя граница слоя, занятого струйным течением.

На основе массива среднемесячных станционных параметров получены климатические характеристики струйных течений в тропосфере за календарные месяцы года и сезоны, их средний годовой ход и межгодовая изменчивость для отдельных станций и регионов. Результаты в целом совпадают с основными сезонными и географическими особенностями струйных течений, известными из других источников, но имеются и отличия. Полученные материалы имеют значительный объем, поэтому ниже рассмотрены только многолетние средние характеристики струйных течений за январь и июль, то есть, за те месяцы года, когда интенсивность струйных течений максимальна и минимальна соответственно.

На рис. 2 показана повторяемость струйных течений. Здесь же для сравнения дано аналогичное распределение повторяемости в зимний сезон из классической работы Х.П. Погосяна и З.Л. Туркетти (Погосян, Туркетти, 1970). Зимой повторяемость максимальна в поясе широт 25-35° с.ш. Имеются три основные долготные зоны: западная часть Тихого океана, где повторяемость превышает 90% (110-150° в.д.), Северная Америка, где повторяемость составляет до 70% (80-120° з.д.), и южная часть Европы, где повторяемость равна 60-70% (0-60° в.д.).

Летом повторяемость значительно ослабевает, достигая не более 50-60% в тех же долготных зонах. В этих трех зонах наблюдается повышенная повторяемость практически до экватора, в том числе имеется зона с относительным максимумом (до 30%) на долготах 60-120° в.д. Широтный пояс смещается на север в область 30-40° с.ш. Кроме того, согласно ранним данным (нижняя часть рисунка) имел место более зональный характер распределения повторяемости. Изолиния 20% там практически совпадает с широтой 20° с.ш. По нашим данным (верхняя часть рисунка) изолинии имеют волнообразный характер, и это характерно для всех зимних месяцев.

Рисунок 2. Многолетнее географическое распределение повторяемости тропосферных струйных течений Северного полушария за календарные январь и июль в % (вверху) Для сравнения внизу дано многолетнее распределение повторяемости в зимний и летний сезоны в % по данным (Погосян, Туркетти, 1970)

В табл. 1 даны оценки географических координат зон максимальной повторяемости по нашим данным за 1985-2014 гг. и по более ранним данным (Погосян, Туркетти, 1970) для зимнего и летнего времени.

Таблица 1. Географические координаты зон максимальной повторяемости струйных течений

	Данные 1985-2014 г.		Более ранние данные (Погосян, Туркетти, 1970)	
	Северная широта в градусах	Долгота в градусах *)	Северная широта в градусах	Долгота в градусах*)
Зима	28-32	115-135	33-35	120-158
	29-32	-62...-115°	28-30	-50...-100
	28-29	2-60	27-28	5-78
Лето	43-45	40-90	45-46	70-90
	45-47	-50...-110	43-44	-58...-100

*) отрицательные значения соответствуют западной долготе.

По сравнению с более ранними распределениями повторяемости наши результаты показывают смещение зон максимальной повторяемости на 5-10 градусов долготы на запад как в зимнее, так и в летнее время, за исключением зоны максимальной повторяемости в Западном полушарии. Смещение по широте не имеет однозначного характера. Приведенные оценки являются предварительными и требуют уточнения.

На рис. 3 приведено географическое распределение многолетних средних скоростей и максимальных скоростей ветра. Средняя скорость ветра в слое в январе в географических зонах максимумов составляет 35-45 м/с, достигая значений выше 50 м/с в восточной части Тихого океана в окрестности региона 30° с.ш., 120-140° в.д. В экваториальной и полярной области средняя скорость составляет около 30 м/с. Летом (июль) практически во всем Северном полушарии средняя скорость в слое не превышает 35 м/с. Зимой максимальные скорости имеют место в тех же зонах, где наблюдается максимальная повторяемость, при этом по широте зоны максимальных ветров расположены на несколько градусов севернее, чем зоны максимальной повторяемости. Самые большие скорости, превышающие значения 90 м/с, имеют место в западной части Тихого океана. В других зонах максимальные скорости достигают и превышают 80 м/с. В летнее время пояс максимальных ветров смещается к северу, значения максимальных скоростей не превышают 60 м/с. Наибольшее значение скорости за весь исследуемый период составляет 147 м/с. Это имело место по данным станции 47778 (Сиономисаки, Япония) в ноябре 1985 года на высоте 11.5 км.

Рисунок 3. Многолетнее географическое распределение средней в слое скорости (вверху) и максимальной скорости струйных течений (внизу) за календарные январь и июль, м/с

Имеются отдельные подтверждения замедления скорости струйных течений. На рис. 4 показан многолетний временной ход максимальных значений скорости ветра за каждый месяц исследуемого периода по данным станции 47778. Из рисунка видно, что после наблюдаемого в 1985 г. наибольшего значения 147 м/с максимальные скорости несколько снизились.

Рисунок 4. Временной ход максимальных значений скорости ветра на оси струйного течения за каждый месяц периода 1985-2014 г., по данным станции 47778 (Сиономисаки, Япония)

На рис. 5 представлены многолетнее распределения высоты оси и мощности слоя за календарные январь и июль. Высота оси зимой располагается ниже 8 км в полярных широтах. Она увеличивается в сторону уменьшения широт до 13-14 км в экваториальной области в соответствии с широтными характеристиками высоты тропопаузы. В летнее время высота оси увеличивается до 8-9 км в полярных широтах и до 14-15 км в экваториальных широтах.

В зимний сезон средняя мощность слоя составляет от 1-2 км в регионах с небольшой повторяемостью, в том числе, в экваториальной области и в области севернее зоны максимумов Тихого океана, до 6-8 км в зонах максимальной повторяемости по широтам и долготам. В летнее время мощность слоя значительно уменьшается. При этом максимальные значения достигают 3-4 км в зонах максимальной повторяемости. В сравнении с зимой области с наибольшей мощностью слоя смещаются в сторону полюса.

Представляет интерес оценка высоты нижней и верхней границы струйных течений. На рис. 6 показан средний за весь исследуемый период годовой ход высоты оси, а также нижней и верхней границы для двух станций, расположенных в северо-западной части Тихого океана, то есть, в зоне максимальных струйных течений (Вадзима (Япония) и Владивосток (Россия)).

Как видно на рисунке, высота оси и границы слоя имеют годовой ход, который, несмотря на общие черты, различен для рассматриваемых двух станций. Высота оси максимальна летом, верхняя граница максимальна в зимний период. Наиболее сильно выраженный годовой ход имеет высота нижней границы. Для японской станции она изменяется от 6 км в зимний период до 10-11 км в летний.

Рисунок 5. Многолетнее географическое распределение средней высоты оси (вверху) и средней мощности слоя струйных течений (внизу) за календарные январь и июль, км

Рисунок 6. Многолетний годовой ход высоты оси (жирная линия), верхней и нижней границы струйных течений по данным станций Вадзима (Япония) и Владивосток

Заключение

Обнаруженные географические и сезонные особенности тропосферных струйных течений в целом совпадают с известными особенностями. Максимальные скорости и повторяемости струйных течений в зимний период

имеют место в широтном поясе 28-35° с. ш. Имеется три основные долготные зоны максимумов: западная часть Тихого океана, Северная Америка и южная часть Европы. Согласно предварительным оценкам, расположение максимальных повторяемостей сдвинулось по сравнению с более ранними данными примерно на 5-10 градусов долготы на запад. Смещение по широте имеет неоднозначный характер. Имеются отдельные указания на уменьшение максимальных скоростей струйных течений. Для более полного подтверждения замедления и смещения зон необходимо пространственное представление тенденций изменчивости и более детальный анализ, что является предметом дальнейших исследований.

Список литературы

Алдухов О.А., Черных И.В. 2013. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Том.1. Контроль качества и обработка данных. – Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 306 с.

Богаткин О.Г. 2005. Авиационная метеорология. – СПб. Изд. РГТМУ, 328 с.

Железнова И.В., Гущина Д.Ю. 2013. Перуанское атмосферное струйное течение: синоптический механизм и причины изменчивости. – Метеорология и гидрология, № 9, с. 55-70.

Ивангородский Р.В., Нерушев А.Ф. 2014. Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 11, № 1, с. 45-53.

Лавров А.С., Хохлова А.В. 2017. Статистические характеристики тропосферных струйных течений Северного полушария по радиозондовым данным. – В кн.: Труды 4 ЦНИИ МО РФ по материалам конференции «Моделирование параметров атмосферы в ракетно-космической технике», вып. 135, с. 106-110.

Латышева И.В., Е. П. Белоусова, А. С. Иванова, В. Л. Потемкин. 2007. Циркуляционные условия аномально холодной зимы 2005/06 г. над Сибирью. – Метеорология и гидрология, № 9, с. 36-40.

Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. 2017. Характеристики высотных струйных течений Северного и Южного полушарий по данным спутниковых измерений. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 14, № 7, с. 299-307.

Никишин А.В., Хохлова А.В. 2015. Статистические характеристики тропосферных струйных течений над территорией Российской Федерации по радиозондовым наблюдениям. – В сб.: Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных, вып. 180, с. 76-85.

Погосян Х. П. 1972. Общая циркуляция атмосферы. – Л., Гидрометеоиздат, 394 с.

Погосян Х.П., Туркетти З.Л. 1970. Атмосфера Земли. – М., Просвещение, 320 с.

Похил А.Э., Глебова Е.С., Смирнов А.В. 2013. Исследование взаимодействия тропических циклонов и струйных течений по данным расчетов на численных моделях. – Метеорология и гидрология, № 3, с. 5-16.

Статистические характеристики тропосферных струйных течений над территорией РФ. – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621675. Роспатент. Опублик. 20.12.2015. Хохлова А.В., Никишин А.В.

Шакина Н.П., Иванова А. Р., Комасько Н.И. 2014. Современные представления об атмосферном фронтогенезе. II. Некоторые результаты расчетов по реальным данным. – Метеорология и гидрология, №11, С. 5-15.

Allen R.J., Sherwood S.C. 2007. Utility of Radiosonde Wind Data in Representing Climatological Variations of Tropospheric Temperature and Baroclinicity in the Western Tropical Pacific. – J. Climate, vol. 20, pp. 5229-5243.

Archer K., Caldeira K. 2008. Historical trends in the jet streams. – Geophys. Res. Lett., issue 35. doi:10.1029/2008GL033614.

Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Santee M. L., Ray E.A., Pawson S., Schwartz M.J., Boone C.D., Froidevaux L., Livesey N.J., Read W.G., and Walker K.A. 2011. Jet characterization in the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS): applications to climatology and transport studies. – Atmos. Chem. Phys., vol. 11, pp. 6115-6137.

Manney, G. L., Hegglin, M. I., Lawrence, Z. D., Wargan, K., Millán, L. F., Schwartz, M. J., Santee, M. L., Lambert, A., Pawson, S., Knosp, B. W., Fuller, R. A., and Daffer, W.H. 2017. Reanalysis comparisons of upper tropospheric/lower stratospheric jets and multiple tropopause. – Atmos. Chem. Phys. Discuss., vol. 17, issue 18, pp. 11541-11566. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-400>.

Pena-Ortiz Cr., Gallego D., Ribera P., Ordonez P., Alvarez-Castro M.C. 2013. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century. – J. Geophys. Res., vol. 118, issue 7, pp. 2702-2713.

Rikus L. 2018. A simple climatology of westerly jet streams in global reanalysis datasets. Part 1: mid-latitude upper tropospheric jets. – Climate Dynamics, vol. 50, issue 7-8, pp. 2285-2310, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2560-y>.

Smith K.L., Scott R.K. 2016. The role of planetary waves in the tropospheric jet response to stratospheric cooling. – Geophys. Res. Letters, pp. 2904-2911.

Статья поступила в редакцию: 25.05.2018 г.

После переработки: 31.07.2018 г.