Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников

Р.В. Ивангородский, А.Ф. Нерушев

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

Изложен автоматизированный метод определения характеристик струйных течений (области с горизонтальной скоростью ветра V \geq 30 м/с), основанный на вычислении поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров. На основе обработки результатов измерений радиометра SEVIRI в канале водяного пара 6,2 мкм европейских геостационарных метеорологических спутников Meteosat-9 и Meteosat-10 за годичный период (2012–2013 гг.) исследованы пространственное распределение струйных течений в зоне обзора спутников и внутригодовая изменчивость их характеристик (площадь, максимальная скорость ветра на оси, эффективное время жизни и др.) в верхней тропосфере северного и южного полушарий. Под эффективным временем жизни понимается промежуток времени, в течение которого сохраняются в определенных пределах некоторые интегральные характеристики струйного течения. Определены области преимущественной локализации струйных течений, общие закономерности межсезонной изменчивости и отличия их характеристик в северном и южном полушариях. Выявлена практически полная идентичность межсезонной изменчивости рассматриваемых характеристик в обоих полушариях с учетом астрономического положения солнца и заметное отличие количества и средней площади струйных течений в северном и южном полушариях.

Ключевые слова: струйные течения, геостационарные спутники, верхняя тропосфера, поля ветра, атмосферные трассеры.

Введение

Струйные течения (СТ) являются существенным элементом динамики атмосферы и во многом определяют ее энергетику, распределение термодинамических параметров и газовых примесей в верхней тропосфере и стратосфере. Они могут быть также эффективным источником внутренних гравитационных волн (ВГВ), осуществляющих обмен энергией и импульсом между тропосферой и верхней атмосферой (Романова, Якушкин, 1995; Шакина, 1990; Plougonven et al., 2003). Струйные течения в атмосфере Земли можно условно разделить на высотные струйные течения и струйные течения нижних уровней. При этом наиболее интенсивные из них – высотные течения. Здесь мы будем рассматривать именно высотные СТ. Под струйным течением понимается сильный узкий поток с квазигоризонтальной осью, расположенный в верхней тропосфере или стратосфере и характеризующийся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра с наличием одного или более максимумов скорости ветра (Атмосфера,1991; Погосян, 1960). Характерные линейные размеры СТ обычно определяют по контуру горизонтальной скорости ветра в 30 м/с. СТ имеют тысячи километров в длину, сотни километров в ширину и несколько километров в толщину. Вертикальный сдвиг ветра составляет 5–10 м/с на 1 км, горизонтальный – 5 м/с на 100 км. Слева от оси струи, если смотреть по потоку, расположена циклоническая сторона СТ, справа – антициклоническая.

На фоне хорошо известных общих закономерностей пространственного распределения струйных течений на земном шаре (Атмосфера, 1991) их положение и характеристики (геометрические размеры, максимальная скорость ветра на оси, эффективное время жизни) испытывают существенные пространственно-временные вариации. Знание реального положения СТ и его характеристик является важным для решения ряда практических задач, в частности, для определения безопасных зон полетов в верхней тропосфере. Известно, что в зонах струйных течений из-за больших вертикальных и горизонтальных сдвигов ветра часто наблюдаются области повышенной турбулентности – так называемая турбулентность ясного неба. Полет самолета в турбулентной атмосфере сопровождается болтанкой. По данным рейсовых полетов и вертикального зондирования максимальная повторяемость болтанки в верхней тропосфере, вызванной турбулентностью, приходится на высоты 8–12 км (Богаткин, 2005).

Оперативная информация о СТ в верхней тропосфере с высоким пространственным и временным разрешением может быть получена на основе обработки данных зондирования атмосферы с геостационарных метеорологических спутников. В настоящей статье излагается автоматизированный метод выявления зон струйных течений в верхней тропосфере и определения их характеристик, основанный на вычисление поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров, и исследуются особенности их пространственно-временного распределения в пределах зоны обзора европейских геостационарных метеорологических спутников.

Автоматизированный метод определения характеристик струйных течений

Оперативное выявление зон струйных течений и определение их характеристик проводится на основе данных измерений радиометра SEVIRI с временным интервалом 15 мин, поступающих по каналам связи в НПО «Тайфун» из НИЦ «Планета». Информация всех 12 каналов радиометра заносится в базу спутниковых данных и используется в дальнейшем для расчетов полей ветра. Для нахождения струйных течений используется вычисление поля ветра в верхней тропосфере по перемещениям атмосферных трассеров (неоднородностей концентрации водяного пара) с помощью разработанного нами ранее метода (Нерушев, Крамчанинова, 2011) и нового программного обеспечения.

Суть используемого подхода состоит в определении кинематических характеристик случайного поля статистическими методами. При этом движение некоторого выделенного элемента объема сплошной среды разлагается на перенос (вектор скорости ветра V с составляющими V_x , V_y , V_z), вращение вокруг мгновенной оси, проходящей через центр элемента объема (rotV), и деформацию, обусловленную, например, диффузионными процессами с коэффициентом горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии, K_d. Применение корреляционно-экстремальных алгоритмов позволяет определить искомые характеристики.

Поле горизонтальной скорости ветра (V) в верхней тропосфере рассчитывается по данным канала водяного пара с центром на 6,2 мкм радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников Meteosat-9 и Meteosat-10. Этот канал имеет максимум весовой функции для условий средних широт на уровне около 350 гПа (приблизительно 8 км). При этом полуширина весовой функции составляет приблизительно 300 гПа (Нерушев и др., 2007). Таким образом, можно считать, что эффективный излучающий слой атмосферы заключен между уровнями 200–500 гПа для условий средних широт.

Вычисления полей скорости горизонтального ветра проводится для всего видимого диска Земли в области 60° ю.ш. -60° с.ш., 60° з.д. -60° в.д. в узлах сетки с шагом 10 пикселов по трем последовательным снимкам, разделенным временным интервалом 15 мин. После получения поля горизонтальной скорости ветра с шагом по времени 1 ч происходит автоматический поиск кандидатов в струйные течения. Алгоритм поиска заключается в проверке выполнения ряда критериев. Первый критерий отбора – скорость ветра. Точки поля ветра, имеющие скорость ≥ 30 м/с рассматриваются как содержащие струйное течение. Затем получившееся множество точек проверяется на связность. Под связной понимается область, у каждой точки которой есть хотя бы один сосед, принадлежащий данному множеству. Каждая точка поля ветра на квазипрямоугольной сетке с шагом в одну условную единицу имеет восемь соседей, то есть примыкающих к ней (граничащих с ней) ближайших точек, составляющих прямоугольную окрестность 3×3. При этом четыре точки (соседи по горизонтали и вертикали) являются более близкими соседями и находятся от центральной точки окрестности на расстоянии 1. Еще четыре точки (соседи по диагонали) являются менее близкими соседями и находятся от центральной точки окрестности на расстоянии $\sqrt{2}$. Соответственно, в обработке изображений рассматриваются два вида соседства и два соответствующих им вида связности: соседство "по кресту" и четверичная связность, соседство "по квадрату" и восьмеричная связность. В программе используется четверичная связность.

Каждой точке поля ветра присваивается произвольный номер, затем этот же номер присваивается соседним "по кресту" точкам. В итоге у каждой точки поля ветра есть свойство, определяющее её принадлежность к определённой области. Затем вычисляется размер полученных областей. При этом области с размером менее 200 км × 1000 км не учитываются как струйные течения, так как характерный размер струйного течения превышает тысячу километров в длину и несколько сотен километров в ширину. Изложенный алгоритм реализован в виде программных средств, написанных на языке C++.

Полученный в результате расчетов массив областей анализируется и определяются следующие характеристики СТ: площадь (S), максимальная скорость ветра (V_m), широта (φ) и долгота (λ) центра области СТ. Полученный результат в виде таблицы записывается в файл в формате CSV (Comma-Separated Values – значения, разделённые запятыми), предназначенном для представления табличных данных.

Широта и долгота центра CT определяется как среднее арифметическое между минимальным и максимальным значением соответствующей координаты. Помимо указанных выше характеристик на основе анализа выходного файла определяется характерное время «жизни» CT. Под характерным временем жизни (τ) понимается промежуток времени, в течение которого сохраняются в определенных пределах некоторые интегральные характеристики CT. Алгоритм нахождения τ состоит в сравнении последовательных спутниковых изображений с выявленными CT и проверки выполнимости ряда критериев, по которым CT на двух последовательных спутниковых снимках, разделенных временным интервалом 1 час, может быть идентифицировано как одно и то же. В качестве таких критериев были выбраны максимальные значения относительного изменения S на 40% и абсолютного изменения ϕ и λ на 10 град. При одновременном превышении указанных значений считается, что струйное течение прекращает свое существование и определяется характерное время «жизни» CT.

Пример отображения идентифицированных струйных течений в виде светлых областей различной яркости, наложенных на спутниковый снимок в канале водяного пара 6,2 мкм с нанесенными контурами материков и градусной сеткой, показан на *рис.* 1. Массив подобных изображений позволяет создавать анимационный фильм и визуально изучать пространственно-временную эволюцию струйных течений.

48



Рис. 1. Пример отображения выявленных областей струйных течений на спутниковом снимке в канале водяного пара 6,2 мкм (11.04.2013 г. 17:00 UTC)

Анализ результатов и обсуждение

Результаты определения СТ по данным измерений радиометра SEVIRI проверялись путем сравнения с прогностическими расчетами Гидрометцентра РФ, а также данными о СТ, размещаемыми на региональном сервере погоды Калифорнии Государственного университета Сан Франциско (www.sfsu.edu/), и показали вполне удовлетворительное согласие как по конфигурации СТ, так и по значениям V_m. Струйные течения могут заметно менять свою конфигурацию под действием целого ряда причин (Пальмен, Ньютон, 1973). Поэтому все указанные характеристики являются функциями времени. При этом СТ в процессе эволюции может существенным образом измениться: или исчезнуть, или практически потерять свою первоначальную конфигурацию. В этом смысле можно говорить о характерном времени «жизни» (т) СТ. При этом встает вопрос о том, что следует принять за минимальное время «жизни» (τ_{min}) CT, когда области со временем «жизни» $\tau \leq \tau_{min}$ не рассматриваются как СТ. Естественно ожидать, что количество СТ и их характеристики будут различаться при разных значениях τ_{min} . Как показывает анализ, наиболее сильно это проявляется в количестве СТ и характерном времени «жизни». Остальные характеристики зависят от т_{min} в меньшей степени. На *рис. 2* представлена зависимость годового количества СТ и характерного времени «жизни» от выбора минимального времени «жизни» СТ. Видно, что при изменении τ_{min} от 2 до 12 ч количество СТ уменьшается в 4 раза, а характерное время «жизни» возрастает практически в 3 раза.



Рис. 2. Зависимость годового количества (а) и характерного времени «жизни» (б) СТ в северном и южном полушарии от выбора минимального времени «жизни». Точки – расчет, кривые – аппроксимация

Учитывая это обстоятельство, будем в дальнейшем рассматривать характеристики СТ при значении $\tau_{min} = 12$ час. Однако следует заметить, что СТ со временем «жизни» $\tau \le 12$ ч могут вносить определенный вклад в генерацию волновых возмущений. Обобщенные сведения о среднегодовых статистических характеристиках струйных течений северного и южного полушарий приведены в *табл. 1.* Здесь и далее под термином «полушарие» подразумеваются видимые с геостационарного спутника области Земного шара. Для европейских геостационарных метеорологических спутников Meteosat-9 и Meteosat-10 это приблизительно ± 65⁰ по широте и долготе от подспутниковой точки (00⁰ широты, 00⁰ долготы).

Таблица 1. Среднегодовые статистические характеристики струйных течений в верхней
тропосфере северного (верхняя строка) и южного (нижняя строка) полушарий ($\tau_{min} = 12$
час, канал 6,2 мкм, общее количество СТ – 578 в северном и 361 – в южном полушарии)

Характеристика	<\$>, млн. км ²	< <i>V_m>, м/с</i>	<ф>, град	<,, град	т, час
Мин. значение	0,26	40	10	-52	13
	0,27	39	-56	-53	13
Макс. значение	5,46	117	63	54	139
	10,00	124	-11	54	172
Среднеарифм.	1,41	71	37	1	32
	3,23	77	-32	2	35
Сред. кв. откл.	1,29	20	14	31	26
	3,43	25	11	31	35

Из анализа *табл. 1* следует, что СТ образуются практически во всех видимых со спутника областях как северного (от 10^{0} до 63^{0} с.ш. и от 52^{0} з.д. до 54^{0} в.д.), так и южного (от 11^{0} до 56^{0} ю.ш. и от 53^{0} з.д. до 54^{0} в.д.) полушарий. При этом они преимущественно сосредоточены в областях с центрами (37 ± 14)⁰ с.ш., (1 ± 31)⁰ долготы в северном и (32 ± 11)⁰ ю.ш., (2 ± 31)⁰ долготы в южном полушарии. Максимальное время «жизни» СТ составляет

почти 6 суток в северном и более 7 суток – в южном полушарии, а максимальная скорость ветра на оси, соответственно, более 420 км/час и около 450 км/час. Отметим заметно большее (в 1,6 раза) годовое количество СТ в северном полушарии и существенно большую (в 2,3 раза) среднюю площадь СТ в южном.



Рис. 3. Сравнение межсезонной изменчивости характеристик СТ в верхней тропосфере северного и южного полушарий. Сезоны для южного полушария соответствуют астрономическому положению солнца. Знак широты центра СТ в южном полушарии (д) для удобства отображения изменен на противоположный

Проанализируем межсезонную изменчивость рассмотренных характеристик CT северного и южного полушарий. Учтем при этом разницу сезонов в обоих полушариях, т.е. зиме в северном полушарии соответствует лето в южном и т.д. Сезонные характеристики СТ северного и южного полушарий представлены на *рис. 3*. Обращает на себя внимание четко выраженный внутригодовой ход количества СТ и характерного времени «жизни», изменяющихся в противофазе как в северном, так и южном полушарии (*рис. 3a и 36*).

Анализ рисунков показывает практически полную идентичность межсезонной изменчивости рассматриваемых характеристик в обоих полушариях. Некоторое отличие наблюдается в межсезонной зависимости географического положения СТ. Этот факт убедительно свидетельствует о том, что главным фактором образования СТ является термический источник, обусловленный преобразованием солнечной энергии в системе атмосфера – подстилающая поверхность (Погосян, 1960). Заметные отличия в количестве СТ и существенное отличие площадей СТ связаны, по-видимому, с различием соотношения площадей суши и океана в северном и южном полушариях и с наличием в южном полушарии мощного циркумполярного вихря.

Сделаем несколько замечаний, касающихся расчетов характеристик СТ в верхней тропосфере по данным измерений с геостационарных метеорологических спутников. Известно, что для струйных течений характерна неоднородная структура поля ветра как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Для выявления вертикальной структуры поля ветра по данным расчетов крайне необходима высотная привязка векторов скорости ветра с привлечением диагностических или прогностических данных о трехмерных полях метеорологических параметров в узлах регулярной сетки как в северном, так и в южном полушариях.

Для оценки СТ как возможных источников внутренних гравитационных волн важно знать градиенты скорости ветра в зоне СТ, а также параметры завихренности и турбулентности. Указанные динамические характеристики атмосферы, в принципе, могут быть рассчитаны по данным измерений геостационарных метеорологических спутников на основе единой методологии (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Получение этих характеристик, а также анализ их пространственно-временного распределения на различных временных масштабах, будут являться предметом дальнейших исследований.

Литература

- 1. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
- 2. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. Учебник // СПб.: РГГМУ, 2005. 328 с.
- 3. *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.
- 4. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К., Соловьев В.И.* Определение характеристик атмосферных движений по данным многоволнового зондирования из космоса // Известия РАН, ФАО. 2007. Т. 3. № 4. С. 442–450.
- 5. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы: Пер. с англ. -Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 615 с.

- 6. Погосян Х. П. Струйные течения в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 183 с.
- 7. *Романова Н.Н., Якушкин И.Г.* Внутренние гравитационные волны в атмосфере и источники их генерации (обзор) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31, № 2. С. 163–187.
- 8. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 309 с.
- 9. *Plougonven R., Teitelbaum H., Zeitlin V.* Inertia gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as a given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. D21. P. 1–18.

Characteristics of the upper tropospheric jet fluxes inferred from the data of European geostationary meteorological satellites

R.V. Ivangorodsky, A.F. Nerushev

Research and Production Association "Typhoon" Obninsk 249038, Russia E-mail: nerushev@typhoon.obninsk.ru

An automatic method of determining the characteristics of jet fluxes (the regions with the horizontal wind speed $V \ge 30$ m/s) based on computations of wind fields in the upper troposphere inferred from the atmospheric tracers motion is presented. On the basis of processing the radiometer SEVIRI data in water vapor channel of 6,2 micrometers obtained on board the European geostationary meteorological satellites Meteosat-9 and Meteosat-10 during 2012–2013, studied were the spatial distribution of jet fluxes in the satellites surveillance zones and intrannual variability of their characteristics (the surface area, maximum wind speed along the axis, effective lifetime, etc.) in the upper troposphere of the Northern and Southern hemispheres. The effective lifetime means the time period when some jet fluxes integral characteristics are conserved within certain limits. The regions of the jet fluxes most probable localization, general regularities of their interseasonal variability and the differences in jet fluxes of the Northern and Southern hemispheres were determined. A practically total similarity of interseasonal variability of the characteristics considered with the account of the Sun astronomical position and a significant difference in the jet fluxes number and the surface area were found in both hemispheres.

Keywords: jet fluxes, geostationary satellites, upper troposphere, wind fields, atmospheric tracers.

References

- 1. Atmosfera: Spravochnik (Atmosphere: Reference Book), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 509 p.
- 2. Bogatkin O.G. *Aviatsionnaya meteorologiya* (Aviation meteorology), Saint-Petersburg: Izd-vo RGGMU, 2005, 328 p.
- 3. Nerushev A.F., Kramchaninova E.K. Metod opredeleniya kharakteristik atmosfernykh 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., Kramchaninova E.K., Solov'ev V.I. Opredelenie kharakteristik atmosfernykh dvizhenii po dannym mnogovolnovogo zondirovaniya iz kosmosa (Determination of characteristics of atmospheric motions from satellite multiwave remote sensing data), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 3, No. 4, pp. 442–450.
- 5. Palmen E. and Newton C. *Tsirkulyatsionnye sistemy atmosfery* (Atmospheric circulation systems), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 615 p.
- 6. Pogosyan Kh. P. *Struinye techeniya v atmosphere* (Jet fluxes in the atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960, 183 p.
- Romanova N.N., Yakushkin I.G. Vnutrennie gravitatsionnye volny v atmosfere i istochniki ikh generatsii (obzor) (Internal gravity waves in the atmosphere and their sources of power generation (review)), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 1995, Vol. 31, No. 2, pp. 163–187.
- 8. Shakina N.P. *Gidrodinamicheskaya neustoichivost' v atmosphere* (Hydrodynamical instability in the atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 309p.
- Plougonven R., Teitelbaum H., Zeitlin V. Inertia gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as a given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings, *Journal of Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. D21, pp. 1–18.