

Об использовании данных европейских геостационарных метеорологических спутников для оценок полей ветра в условиях санкционных ограничений

А. Ф. Нерушев, Р. В. Ивангородский

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

Рассмотрены возможности использования данных измерений европейских геостационарных метеорологических спутников для оценки полей ветра в верхней тропосфере при увеличении временного интервала поступления снимков в канале водяного пара с центром 6,2 мкм с 15 мин до 1 ч. Анализируется влияние вертикальных атмосферных движений различного пространственного масштаба, атмосферных волн и естественной эволюции неоднородности водяного пара на изменение характеристик излучающего слоя атмосферы. Показано, что при увеличении промежутка времени между снимками с 15 мин до 1 ч указанные процессы могут внести существенные ошибки в рассчитанные значения скорости ветра. Изложен алгоритм коррекции расчётов скорости ветра в верхней тропосфере при временном интервале поступления снимков 1 ч. Оценены ошибки вычисляемой скорости ветра при сравнении с расчётами при интервалах поступления снимков 15 мин. Приведены примеры рассчитанных значений полей ветра в верхней тропосфере по данным зондирования радиометром SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) за 2022 г.

Ключевые слова: поле ветра, верхняя тропосфера, геостационарные спутники, ошибки расчётов, алгоритмы коррекции

Одобрена к печати: 20.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-238-245

Введение

Данные зондирования атмосферы и земной поверхности с геостационарных метеорологических спутников в различных спектральных диапазонах давно и успешно используются во всём мире для решения различного рода фундаментальных и прикладных задач. Одно из важных направлений использования этих данных — оценка векторов ветра на различных высотах в тропосфере по перемещению атмосферных трассеров, в качестве которых выступают облака различного уровня и неоднородности концентрации водяного пара (см., например, работы (Нерушев, Крамчанинова, 2011; Holmlund et al., 2008; Menzel, 2001) и представленную в них обширную библиографию). Радиометры SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager), установленные на европейских геостационарных метеорологических спутниках второго поколения (*англ.* Meteosat Second Generation — MSG), позволяют получать изображения видимого диска Земли с временным интервалом 15 мин и пространственным разрешением в подспутниковой точке 1 км в видимой области и 3 км в инфракрасном (ИК) диапазоне.

Более 10 лет результаты измерений радиометра SEVIRI по радиорелейному каналу связи поступают из Научно-исследовательского центра «Планета» (НИЦ «Планета») в Научно-производственное объединение «Тайфун» и заносятся в базу данных. Она содержит информацию 12 каналов SEVIRI, начиная с 2007 г. по настоящее время. На её основе нами выполнена серия работ по методам расчётов и анализу полей ветра в верхней тропосфере, исследованию высотных струйных течений, зон турбулентности и их связи с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями (см., например, работы (Нерушев, Крамчанинова, 2011; Нерушев и др., 2017, 2018, 2021; Nerushev et al., 2022 и цитируемую литературу)).

Однако в связи с санкционными ограничениями Европейская организация спутниковой метеорологии EUMETSAT (*англ.* European Organisation for the Exploitation of Meteorological

Satellites) с конца марта 2022 г. существенно изменила режим передачи данных европейских геостационарных метеорологических спутников в НИЦ «Планета», увеличив временной интервал поступления снимков с 15 мин до 1 ч. В этой ситуации возникает необходимость выяснения возможности в дальнейшем использовать данные зондирования радиометра SEVIRI с интервалом 1 ч для оценок полей ветра в верхней тропосфере. Результаты исследований этого вопроса изложены ниже.

Краткое описание используемого метода оценки векторов ветра в верхней тропосфере

Подробное изложение метода оценки динамических характеристик атмосферы (вектора горизонтальной скорости ветра, коэффициента мезомасштабной турбулентной диффузии и завихренности) по данным зондирования с геостационарных метеорологических спутников, основанного на использовании в качестве трассеров неоднородностей поля концентрации консервативной примеси и применении корреляционно-экстремальных алгоритмов, содержится в работе (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Суть метода состоит в определении кинематических характеристик случайного поля статистическими методами. В дальнейшем будем рассматривать метод применительно к зондированию атмосферы в канале водяного пара 6,2 мкм и вычислению вектора горизонтальной скорости ветра. Данные, получаемые в канале водяного пара 6,2 мкм радиометра SEVIRI, могут интерпретироваться как изображения (снимки) двумерного случайного поля $U(x, y, t)$, под которым понимается собственное излучение атмосферы, принимаемое спутниковой аппаратурой. Здесь x, y — оси декартовой системы координат Oxy (положительное направление x — на восток, y — на север), t — время.

Канал 6,2 мкм радиометра SEVIRI имеет максимум весовой функций для условий средних широт на уровне приблизительно 350 гПа (~8 км), а полуширина весовой функции составляет 300 гПа (<http://www.eumetsat.int/>). Процедура отождествления выделенных с помощью двумерного оператора H областей поля U в моменты времени t_1 и t_2 заключается в нахождении глобальных экстремумов взаимных статистических характеристик (например, структурной функции) путём вариаций пространственных сдвигов. По сдвигам, при которых достигается глобальный минимум взаимной структурной функции, вычисляются компоненты горизонтальной скорости $V_x = \Delta x / \Delta t$, $V_y = \Delta y / \Delta t$, где Δx и Δy — сдвиги по осям x и y , $\Delta t = t_2 - t_1$.

На поле U оказывают влияние различные атмосферные процессы: вертикальные движения, атмосферные волны, а также естественная эволюция неоднородности водяного пара (эффект «незамороженности»). Как показано в работе (Нерушев, Крамчанинова, 2011), крупномасштабные упорядоченные вертикальные движения в безоблачной атмосфере с характерными скоростями $2 \cdot 10^{-2}$ м/с, а также мелкомасштабные вертикальные конвективные токи с характерными горизонтальными масштабами $L < 20-30$ км и характерными скоростями 1 м/с (Атмосфера..., 1991) не оказывают заметного влияния на излучение слоя атмосферы, регистрируемое спутниковым радиометром, при интервалах времени между спутниковыми снимками 15 мин.

Однако при изменении промежутка времени между снимками с 15 мин до 1 ч мелкомасштабные вертикальные конвективные токи за счёт перемещения столба атмосферы по вертикали могут заметно изменить регистрируемое радиометром излучение, учитывая существенный вертикальный градиент концентрации водяного пара в атмосфере (Атмосфера..., 1991).

По оценкам работы (Nappo, 2013), волновые возмущения разного пространственно-временного масштаба могут привести к перемещению вверх и вниз слоя атмосферы вблизи максимума весовой функции радиометра на величину, не превышающую 500 м. Поэтому они не могут оказать существенного влияния на поле U .

Одним из главных факторов, определяющих естественную эволюцию неоднородности водяного пара («незамороженность»), представляется мезомасштабная турбулентная диффузия. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии в верхней тропосфере меняется

в пределах от 10^4 до 10^6 м²/с (Нерушев, Крамчанинова, 2011). Как показывают оценки, она может вызвать расплывание выделенной области в горизонтальном направлении на 6–60 км при $\Delta t = 1$ ч, что может в сочетании с вертикальными движениями привести к ошибкам в расчётах скорости ветра. Вертикальная турбулентная диффузия, коэффициент которой не превышает 1–10 м²/с (Атмосфера..., 1991), не окажет какого-либо серьёзного влияния на перемещение по вертикали излучающего слоя атмосферы.

Особый случай представляет вращательное движение выделенной области поля U вокруг некоторого центра. Для получения адекватных оценок скорости поступательного движения должно выполняться следующее соотношение между интервалом съёмки (Δt) и периодом обращения (T) выделенной области вокруг центра вращения: $\Delta t \ll T$.

Существенное значение имеет размер оператора H (рабочего «окна»). Как показали численные эксперименты, наиболее подходящими величинами с точки зрения точности расчётов и времени счёта становится квадратное рабочее окно размером 64×64 пикселей и соответствующая область сканирования 128×128 пикселей.

Алгоритм коррекции результатов расчётов с временным интервалом 1 ч

Для решения поставленной задачи из имеющегося архива спутниковых данных в канале 6,2 мкм с временным интервалом $\Delta t = 15$ мин был сформирован вспомогательный массив данных с $\Delta t = 1$ ч на временном отрезке 2007–2021 гг. Расчёты по обоим массивам спутниковых данных проводились в области 30–60° с. ш., 60° з. д. – 60° в. д. в узлах сетки с шагом 1°. Ограничение по долготе (60° з. д. – 60° в. д.) и сверху по широте (60° с. ш.) обусловлено размерами видимой с высоты геостационарной орбиты спутника (36 тыс. км) области земного шара. Рассчитанные значения вектора скорости ветра (V) на краях области с координатами более 60° по широте и долготе отягощены большими погрешностями и в силу этого исключаются из рассмотрения. Ограничение снизу по широте (30° с. ш.) выбрано с точки зрения охвата области Атлантики, через которую проходят траектории внетропических циклонов.

Разработка алгоритма и его опробование проводились вначале для одномерного варианта на данных временной изменчивости модуля скорости ветра, усреднённой по широте и долготе всей расчётной области (V_{all}). Как показали расчёты, значения V_{all} при $\Delta t = 1$ ч ($V_{all}60$) в разы меньше скорости ветра при $\Delta t = 15$ мин ($V_{all}15$). При этом последняя имеет чётко выраженный годовой ход. Годовой ход $V_{all}60$ также заметен, но за счёт большого разброса значений имеет более сложный вид (рис. 1). Большой разброс значений $V_{all}60$ можно объяснить совокупным влиянием упомянутых выше процессов.

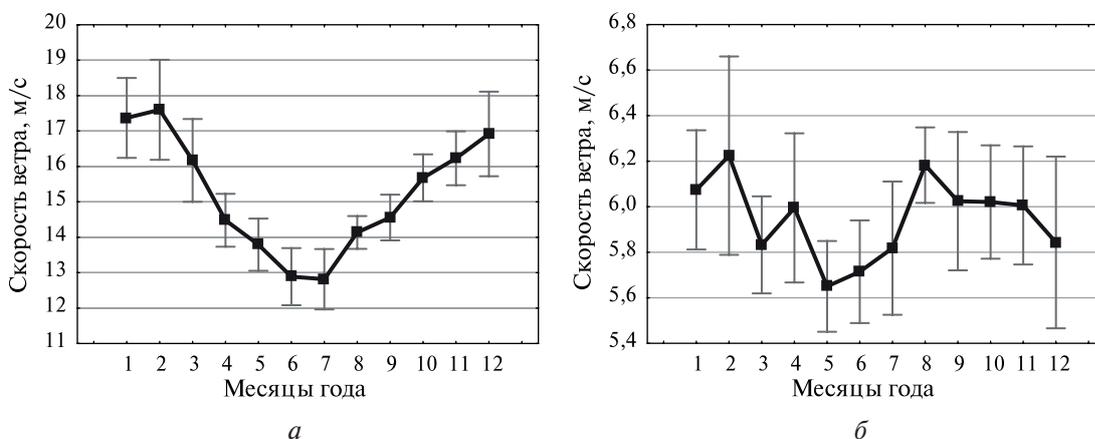


Рис. 1. Годовой ход средних многолетних (2007–2016) среднемесячных значений скорости ветра, усреднённой по площади всей области, при $\Delta t = 15$ мин (а) и $\Delta t = 1$ ч (б). Вертикальные отрезки — 95%-й доверительный интервал

Учитывая такую внутригодовую изменчивость средних многолетних среднемесячных значений скорости ветра, предположим, что скорректированные значения скорости ветра ($V_{all}60cor$) можно выразить в виде:

$$V_{all}60cor(j) = V_{all}60(j)R(j), \quad (1)$$

где $j = 1 \dots 12$ — номер месяца; R — корректирующий коэффициент, имеющий вид:

$$R(j) = \frac{\sum_{i=1}^{10} V_{all}15(i, j)}{\sum_{i=1}^{10} V_{all}60(i, j)}, \quad (2)$$

где $i = 1 \dots 10$ — номер года (от 2007 до 2016).

На *рис. 2* приведён корректирующий коэффициент, рассчитанный по соотношению (2) как функция месяца.

Заметим, что $R(j)$ по своему смыслу не зависит от года, для которого рассчитываются значения $V_{all}60cor(j)$ согласно формуле (1). В этом заключается основной смысл его введения. На *рис. 3* приведено сравнение межгодового хода среднемесячных значений $V_{all}60cor$ и $V_{all}15$ на временном отрезке 2017–2021 гг.

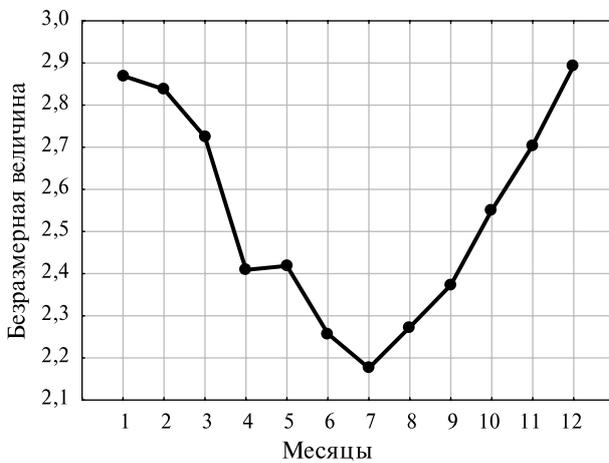


Рис. 2. Годовой ход корректирующего коэффициента

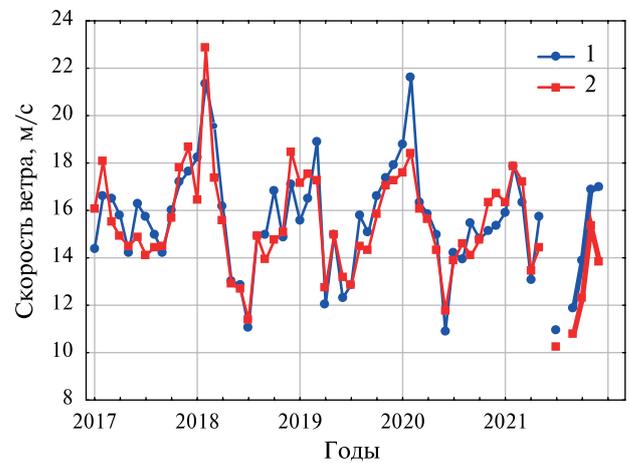


Рис. 3. Межгодовой ход среднемесячных значений скорости ветра V_{all} , рассчитанных с временным интервалом 15 мин (1) и 1 ч с коррекцией (2)

Среднеарифметическое значение разности ($V_{all}60cor - V_{all}15$) равно $-0,29$ м/с, среднеквадратическое отклонение (СКО) — $1,14$ м/с. Для величины $(V_{all}60cor - V_{all}15)/V_{all}15$ эти значения равны соответственно $-1,6$ и $6,9$ %. Значения $(V_{all}60cor - V_{all}15)/V_{all}15$ заключены в основном в интервале от -15 до 10 %. Значимый на уровне $0,05$ коэффициент корреляции равен $0,87$.

Рассмотрим далее вариант расчёта площадных значений скорости ветра $V(x, y, i, j)$, где (x, y) — координаты точки в прямоугольной проекции. Повторяя те же самые рассуждения, что и для одномерного случая, получим:

$$V60cor(x, y, i, j) = V60(x, y, i, j)R(x, y, j), \quad (3)$$

где корректирующий коэффициент будет иметь вид:

$$R(x, y, j) = \frac{\sum_{i=1}^{10} V15(x, y, i, j)}{\sum_{i=1}^{10} V60(x, y, i, j)}. \quad (4)$$

Здесь $V15$ и $V60$ — среднемесячные значения модуля скорости ветра, рассчитанные с $\Delta t = 15$ мин и $\Delta t = 1$ ч соответственно. Для получения векторного поля $\mathbf{V}(x, y)$ необходимо вычислять значения $R(x, y, j)$ отдельно для зональной и меридиональной компонент скорости

ветра. На рис. 4 в качестве примера приведено сравнение полей $V_{60\text{cor}}(x, y)$ и $V_{15}(x, y)$, рассчитанных с помощью формул (3) и (4) для июля 2020 г.

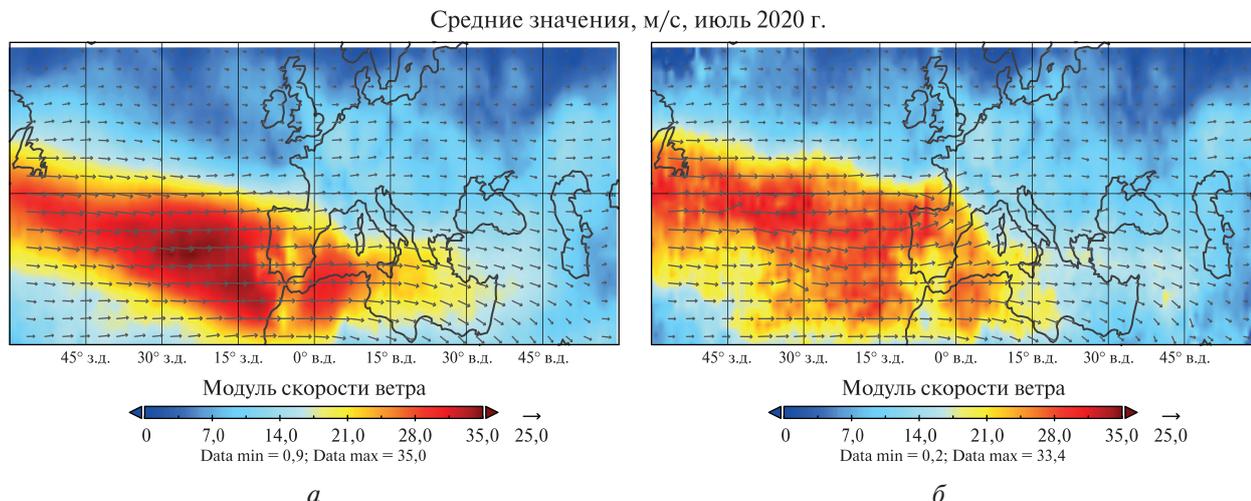


Рис. 4. Поля V_{15} (а) и $V_{60\text{cor}}$ (б) для июля 2020 г.

Среднеарифметические значения и СКО разности ($V_{60\text{cor}} - V_{15}$), усреднённые по всей площади рассматриваемой области, равны $-0,26$ и $3,05$ м/с. Гистограмма распределения разности ($V_{60\text{cor}} - V_{15}$) для июля 2020 г., построенная по 3600 точкам, хорошо описывается нормальным распределением, при этом 78 % величин разности не выходят за пределы ± 4 м/с. Более общую оценку отличия скорректированных площадных значений скорости ветра с $\Delta t = 1$ ч от значений с $\Delta t = 15$ мин даёт разность:

$$\Delta(x, y, j) = V_{m60\text{cor}}(x, y, j) - V_{m15}(x, y, j), \tag{5}$$

где

$$\left. \begin{aligned} V_{m60\text{cor}}(x, y, j) &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 V_{60\text{cor}}(x, y, i, j), \\ V_{m15}(x, y, j) &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 V_{15}(x, y, i, j). \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

Здесь i — номер года (от 2017 до 2021). На рис. 5 (см. с. 243) представлены гистограммы распределения величины $\Delta(j)$ для срединных месяцев всех четырёх сезонов.

Детальный анализ гистограмм для 12 мес показывает, что все они хорошо описываются нормальным распределением, средние значения которого меньше нуля и заключены в пределах от $-0,9$ до $-0,08$ м/с. При этом от 50 до 80 % разностей ($V_{m60\text{cor}} - V_{m15}$) лежат в пределах ± 2 м/с, а от 80 до 96 % — в пределах ± 4 м/с.

На рис. 6 (см. с. 243) в качестве примера приведены поля $V_{60\text{cor}}(x, y)$ для апреля и июля 2022 г., рассчитанные согласно формулам (5), (6).

Среднеарифметические значения модуля $V_{60\text{cor}}$ для апреля и июля, усреднённые по всей площади, равны соответственно $14,3$ и $13,6$ м/с, а СКО — $4,7$ и $9,3$ м/с. Указанные величины близки к значениям V_{all} для апреля и июля в 2017–2021 гг.

Для информации укажем, что согласно требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) погрешность определения горизонтальной скорости ветра (V) в свободной тропосфере для использования в численном прогнозе погоды должна находиться в пределах $1-8$ м/с, горизонтальное разрешение — $15-500$ км, а оперативность представления данных — $1-12$ ч. Здесь минимальные значения соответствуют идеальным требованиям, а максимальные — минимальным (https://space.oscar.wmo.int/variables/view/wind_horizontal).

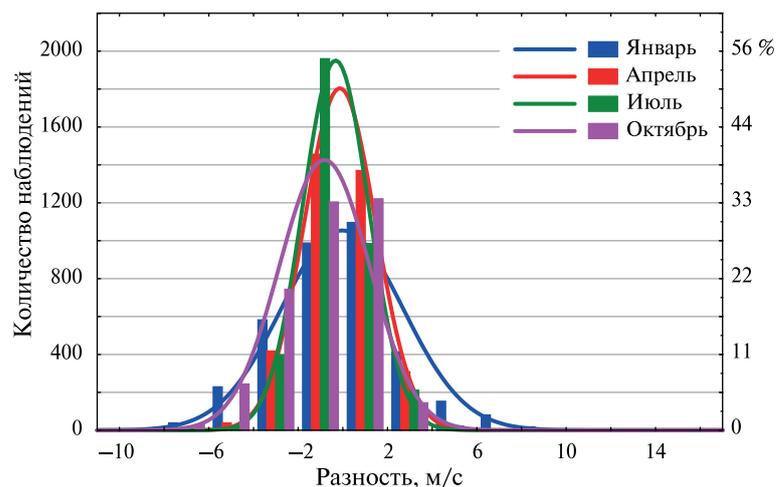


Рис. 5. Гистограммы распределения разности ($V_m60\text{сog} - V_m15$) для срединных месяцев сезонов. Кривые — нормальное распределение

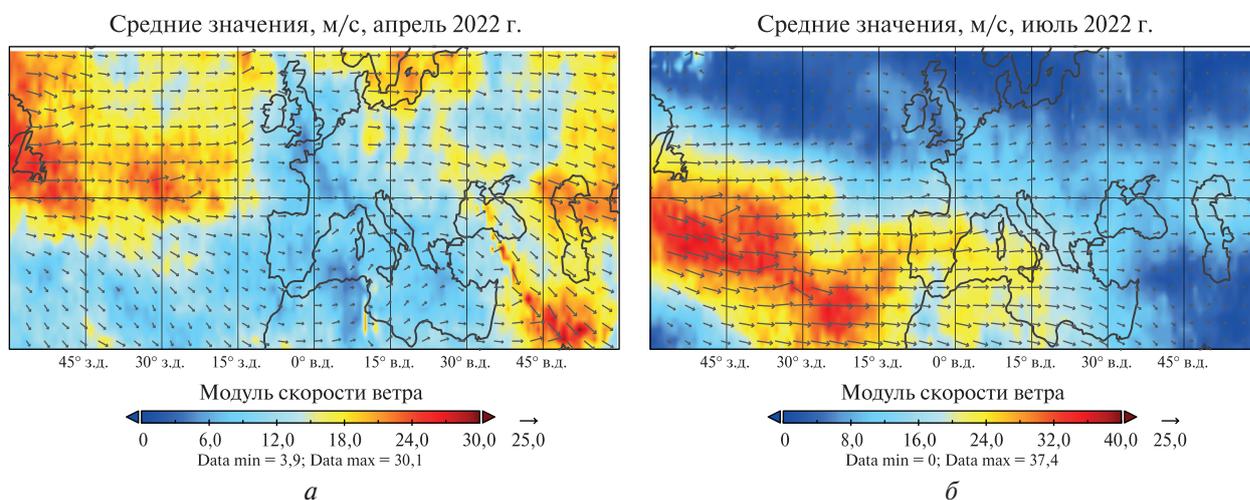


Рис. 6. Поля $V_{60\text{сog}}$ для апреля (а) и июля (б) 2022 г.

В последнее время в рамках Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК, *англ.* Global Climate Observing System — GCOS) сформулированы только идеальные требования к измерениям V для мониторинга климата практически во всех слоях атмосферы (от планетарного пограничного слоя до мезосферы): 2 м/с, 10 км, 60 мин. Учитывая приведённые выше оценки погрешности расчётов скорректированных значений модуля скорости ветра, можно считать, что они будут укладываться в интервал погрешности для использования в климатических исследованиях.

Заключение

Приведённые выше результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Атмосферные процессы, прежде всего вертикальные движения различного пространственного масштаба, атмосферные волны и естественная эволюция неоднородности водяного пара, приводят к существенным погрешностям оценок скорости ветра по данным измерений радиометра SEVIRI в канале водяного пара 6,2 мкм при увеличении интервала поступления снимков с 15 мин до 1 ч.
2. Предложен алгоритм коррекции результатов расчётов скорости ветра в верхней тропосфере при временном интервале поступления снимков 1 ч, оценены ошибки расчётов

скорости ветра. Отклонение вычисленных значений от результатов расчётов с интервалом поступления снимком 15 мин на временном интервале 2017–2021 гг. для более 80 % случаев не превышает ± 4 м/с, а для более 50 % — ± 2 м/с.

3. Полученные результаты позволяют продолжить использование данных измерений радиометра SEVIRI для климатических исследований с приемлемой точностью в условиях санкционных ограничений.

Работа выполнена в рамках темы 3.2 Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета (номер государственного учёта АААА-А20-120091590028-3).

Литература

1. Атмосфера: справ. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
2. 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.
3. Нерушев А. Ф., Вишератин К. Н., Ивангородский Р. В. Пространственно-временная изменчивость высотных струйных течений по данным спутниковых измерений // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 31–45. DOI: 10.7868/S0205961417060033.
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 крупномасштабными атмосферными явлениями // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 24–38. DOI: 10.31857/S020596140003365-2.
5. Нерушев А. Ф., Вишератин К. Н., Ивангородский Р. В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 401–413. DOI: 10.31857/S0002351521040088.
6. Holmlund K., Smet A., Gustafsson J., Elliott S., Dew G. Status Report on the Operational Deviation of Atmospheric Motion Vectors at EUMETSAT // Proc. 9th Intern. Winds Workshop. 14–18 May 2008, Annapolis, USA, 2008. P. 51. <https://www.eumetsat.int/media/5789>.
7. Menzel W.P. Cloud Tracking with Satellite Imagery: From the Pioneering Work of Ted Fujita to the Present // Bull. American Meteorology Society. 2001. V. 82. No. 1. P. 33–47.
8. Nappo C.J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. 2nd ed. Elsevier, 2013. 400 p.
9. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V. Satellite-derived estimations of the clear-air turbulence in the upper troposphere // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1040(1). Art. No. 012025. 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1040/1/012025.

On the use of data from European geostationary meteorological satellites for wind field assessments in conditions of sanctions

A. F. Nerushev, R. V. Ivangorodsky

Research and Production Association “Typhoon”

Obninsk 249038, Kaluga Region, Russia

E-mail: nerushev@rpatyphoon.ru

The possibilities of using measurement data from European geostationary meteorological satellites to assess wind fields in the upper troposphere with an increase in the time interval for the receipt of images in the water vapor channel with a center of 6.2 μm from 15 min. to 1 hour are considered. The influence of vertical atmospheric movements of various spatial scales, atmospheric waves and the natural evolution of water vapor inhomogeneities on the change in the characteristics of the radiating layer of the atmosphere is analyzed. It is shown that when increasing the time interval between images from 15 min. to 1 hour, these processes can induce significant errors in the calculated values of wind speed.

An algorithm for correcting the calculations of wind speed in the upper troposphere with a time interval of 1 hour for the receipt of images is outlined. Errors in the correction of the calculated wind speed values are evaluated, when compared with calculations at an interval of image receipt of 15 min.

Keywords: wind field, upper troposphere, geostationary satellites, calculation errors, correction algorithms

Accepted: 20.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-238-245

References

1. *Atmosfera* (Atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 509 p. (in Russian).
2. Nerushev A. F., Kramchaninova E. K., Method for Determining Atmospheric Motion Characteristics Using Measurements on Geostationary Meteorological Satellites, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 1104–1113, DOI: 10.1134/S0001433811090118.
3. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V., Spatiotemporal Variability of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, pp. 1076–1088, DOI: 10.1134/S0001433818090256.
4. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V., Dynamics of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements and Their Relationship with Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1198–1209, DOI: 10.1134/S0001433819090329.
5. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V., Statistical Model of the Time Variability of the Characteristics of High-Altitude Jet Currents in the Northern Hemisphere Based on Satellite Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 354–364, DOI: 10.1134/S0001433821040198.
6. Holmlund K., Smet A., Gustafsson J., Elliott S., Dew G., Status Report on the Operational Deviation of Atmospheric Motion Vectors at EUMETSAT, *Proc. 9th Intern. Winds Workshop*, Annapolis, USA, 2008, p. 51, <https://www.eumetsat.int/media/5789>.
7. Menzel W. P., Cloud Tracking with Satellite Imagery: From the Pioneering Work of Ted Fujita to the Present, *Bull. American Meteorology Society*, 2001, Vol. 82, No. 1, pp. 33–47.
8. Nappo C. J., *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, 2nd ed., Elsevier, 2013, 400 p.
9. Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V., Satellite-derived estimations of the clear-air turbulence in the upper troposphere, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022, Vol. 1040(1), Art. No. 012025, 7 p., DOI: 10.1088/1755-1315/1040/1/012025.