ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 494, № 2, с. 53–57

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ

УДК 551.551

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ НА ОПУСТЫНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

© 2020 г. Г. И. Горчаков[1,*], А. В. Карпов[1], Р. А. Гущин[1,2]

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 13.07.2020 г.
Поступило 24.07.2020 г.
После доработки 03.08.2020 г.
Принято к публикации 05.08.2020 г.

По данным измерений флуктуаций концентрации частиц аэрозоля и вертикальной компоненты скорости ветра на опустыненной территории в Астраханской области определены вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля. Нормированный поток или скорость выноса пылевого аэрозоля достигала 5 см/с. Установлено, что на вертикальный турбулентный поток аэрозоля заметно влияют конвективно обусловленные вариации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра. Показано, что дневной ход скорости выноса аэрозоля согласуется с дневным ходом турбулентного потока тепла. Получена зависимость массового потока пылевого аэрозоля от размера частиц с максимумом вблизи 1.5 мкм.

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, эмиссия пылевого аэрозоля, турбулентный поток аэрозоля, конвекция, скорость выноса аэрозоля, турбулентный поток тепла, массовый поток аэрозоля

DOI: 10.31857/S2686739720100047

На опустыненных территориях благодаря воздействию ветропесчаного потока на подстилающую поверхность в атмосферу выносится большое количество пылевого аэрозоля, который заметно влияет на радиационный режим атмосферы в глобальном масштабе. Для количественной оценки эмиссии пылевого аэрозоля с опустыненных территорий необходимы прямые измерения вертикальных потоков аэрозоля. Вынос аэрозоля в атмосферу обеспечивается турбулентными пульсациями вертикальной компоненты скорости ветра. Количественной характеристикой интенсивности переноса является вертикальный турбулентный поток аэрозоля

$$F(t,\tau) = \tau^{-1}\int_0^\tau f(t)dt = \tau^{-1}\int_0^\tau N'(t)w'(t)dt,$$

где t – время, τ – период осреднения, f – плотность турбулентного потока аэрозоля, $N'(t) = N(t) - \bar{N}$ и $w'(t) = w(t) - \bar{w}$, $N(t)$ и $w(t)$ – измеренные с шагом $\delta t \ll \tau$ концентрация частиц аэрозоля и вертикальная компонента скорости ветра, $\bar{N}$ и $\bar{w}$ – средние значения указанных величин (следует отметить, что в рассматриваемых случаях $\bar{w} = 0$).

Впервые прямые измерения вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля F на опустыненной территории были выполнены в Приаралье [1] с использованием [2] данных измерений распределения частиц пылевого аэрозоля по размерам в условиях всплесковой или перемежающейся (intermittent) сальтации [2–4], а также квазинепрерывной (almost non-intermittent) [2, 5] сальтации [6–8]. В XXI веке измерения функции распределения частиц по размерам или микроструктуры пылевого аэрозоля проводились нами на опустыненных территориях в Астраханской области [9].

Целью настоящей работы является исследование вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля в приземном слое атмосферы на опустыненной территории по данным синхронных измерений концентрации частиц пылевого аэрозоля и вертикальной компоненты скорости ветра в условиях квазинепрерывной сальтации. Режим сальтации контролировался с помощью фотоэлектрического счетчика [10], находящегося на удалении около 10 м от аппаратурного комплекса для измерения турбулентных потоков аэрозоля. Следует отметить, что вертикальные потоки пылевого аэрозоля обычно определяются

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Российский технологический университет, Москва, Россия*
**e-mail: gengor@ifaran.ru*

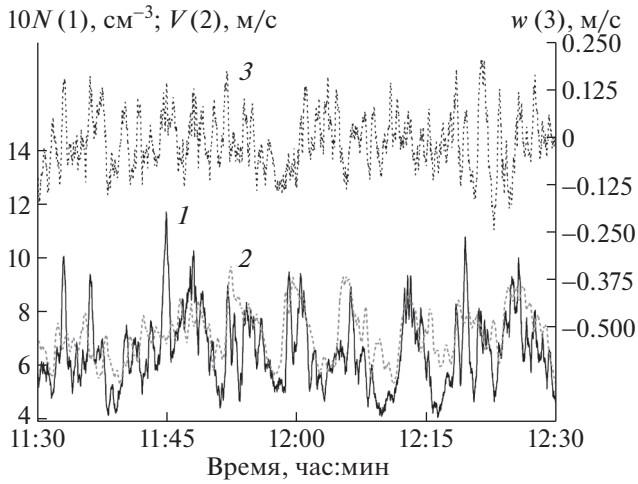

Рис. 1. Зависимость от времени (интервал осреднения 30 с) концентрации частиц пылевого аэрозоля (*1*), горизонтальной (*2*) и вертикальной (*3*) компонент скорости ветра по данным измерений на опустыненной территории 23.08.2011.

по данным градиентных измерений метеопараметров и концентрации аэрозоля [11–14].

При определении вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля использовались результаты измерений с временным разрешением 1 с концентрации частиц пылевого аэрозоля в диапазоне размеров от 0.5 до 5.0 мкм в приземном слое атмосферы на высоте 2 м с помощью фотоэлектрического счетчика ОЭАС – 05 [9] и вертикальной компоненты скорости ветра с временным разрешением 0.1 с с помощью акустической метеостанции Метео-2 (Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск) 23.08.2011 и 01.09.2011 в период с 10 до 18 часов в условиях квазинепрерывной сальтации [15].

В качестве примера на рис. 1 показаны вариации (период осреднения 30 с) концентрации частиц пылевого аэрозоля N(1), модуля горизонтальной компоненты скорости ветра V (2 на рис. 1) и вертикальной компоненты скорости ветра w(3) 23.08.2011 в период с 11:30 до 12:30, когда наблюдались сильно выраженные “низкочастотные” вариации компонент скорости ветра, обусловленные конвективными движениями в пограничном слое атмосферы. Коэффициент корреляции $R_{30}(N, V)$ между концентрацией частиц аэрозоля и горизонтальной компонентой скорости ветра равен 0.48 (погрешность определения коэффициента корреляции ΔR с доверительной вероятностью 0.95 равна 0.13). В рассматриваемом случае отчетливо видны согласованные квазипериодические вариации N и V, что свидетельствует о сильном влиянии конвективных структур на обусловленную процессом сальтации генерацию частиц пылевого аэрозоля на подстилающей поверхности. В частности, с 11:51 до 12:16 наблюдались квазипериодические вариации N и V с периодом примерно 6.3 мин. Отметим, что по данным наших измерений на опустыненной территории 23.08.2011 наблюдалась тесная корреляция ($R > 0.9$) между горизонтальной компонентой скорости ветра и концентрацией сальтирующих частиц [15] с размерами от 30 до 300 мкм. Подробная количественная информация о конвективной изменчивости концентрации аэрозоля и компонент скорости ветра может быть получена с помощью временного спектрального анализа.

Из рис. 1 следует, что спектр флуктуаций вертикальной компоненты скорости ветра w (3 на рис. 1) сдвинут в область более высоких частот по отношению к спектру флуктуаций горизонтальной компоненты скорости ветра, что приводит к заметному различию корреляционных связей концентрации частиц пылевого аэрозоля с горизонтальной и вертикальной компонентами скорости ветра. Коэффициент корреляции R_{30} (N, w) между концентрацией частиц аэрозоля и вертикальной компонентой скорости ветра в рассматриваемом случае оказался равным 0.36 (статистическая погрешность $\Delta R = 0.15$). Следует отметить, что “низкочастотные” вариации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, как правило, обусловлены суперпозицией различных конвективных движений. Поэтому неудивительно, что вариации вертикальной скорости ветра могут сравнительно часто происходить в противофазе с вариациями концентрации частиц аэрозоля.

На рис. 2 и 3 представлены результаты определения плотности вертикального турбулентного потока аэрозоля (время осреднения 180 с) по данным измерений концентрации пылевого аэрозоля N в диапазоне размеров от 0.5 до 5.0 мкм и вертикальной компоненты скорости ветра на высоте 2 м с временным разрешением 1 с в условиях квазинепрерывной сальтации на опустыненной территории в Астраханской области вблизи р. Волги 23.08.2011 и 01.09.2011 (кривые *1*). Видно, что наряду с “высокочастотными” вариациями вертикальной компоненты скорости ветра w на изменчивость плотности турбулентного потока пылевого аэрозоля f сильно влияют вариации концентрации частиц пылевого аэрозоля N с периодами примерно от 3 до 30 мин, характерными для изменчивости горизонтальной компоненты скорости ветра V, которая определяет интенсивность сальтации и, следовательно, интенсивность генерации пылевого аэрозоля на подстилающей поверхности [15]. Из рис. 2 и 3 следует, что 23.08.2011 и 01.09.2011 плотность потока аэрозоля f достигала примерно 15 см$^{-2}$ с$^{-1}$, а 01.09.2011 – 20 см$^{-2}$ с$^{-1}$, а средние турбулентные потоки аэро-

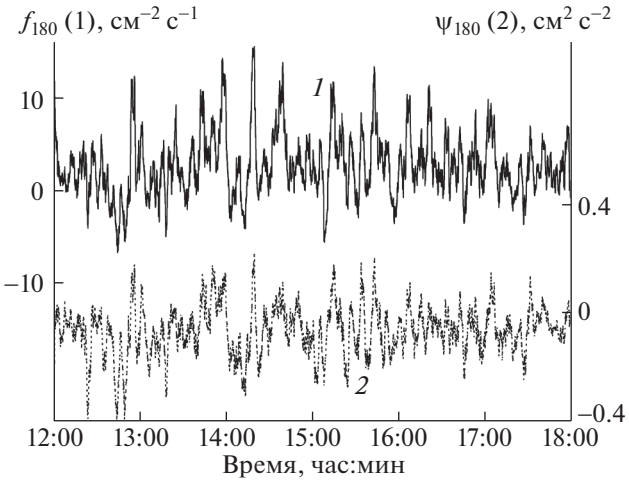

Рис. 2. Временная изменчивость плотности вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля f (*1*) и произведения ψ (*2*) вертикальной компоненты скорости ветра w и разности между горизонтальной компонентой скорости ветра V и пороговой скоростью сальтации V_0 по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской области 23.08.2011 (время осреднения 180 с).

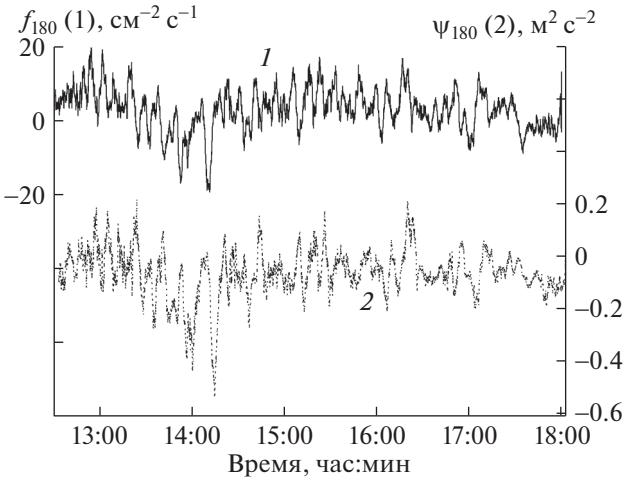

Рис. 3. Временная изменчивость плотности вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля f (*1*) и произведения ψ (*2*) вертикальной компоненты скорости ветра w и разности между горизонтальной компонентой скорости ветра V и пороговой скоростью сальтации V_0 по данным измерений на опустыненной территории в Астраханской области 01.09.2011 (время осреднения 180 с).

золя были равны 2.7 и 2.8 см$^{-2}$ с$^{-1}$, соответственно.

В [15] показано, что концентрация сальтирующих частиц пропорциональна $V - V_0$, где $V_0 \cong 5.0$ м/с – пороговая скорость сальтации. Поэтому для оценки воздействия конвективных структур на плотность турбулентного потока аэрозоля рассмотрим функцию $\psi(t) = [V(t) - V_0]w(t)$. На рис. 2 и 3 показаны осредненные за период 180 с вариации ψ 23.08.2011 и 01.09.2011 (кривые *2*). Нетрудно видеть, что вариации f и ψ сравнительно тесно коррелируют друг с другом. Коэффициент корреляции $R(f, \psi)$ 23.08.2011 оказался равным 0.81, а 01.09.2011 – примерно равным 0.88. Таким образом, временная изменчивость плотности вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля в значительной степени обусловлена конвективными структурами, определяющими вариации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра и, следовательно, процессами вертикального переноса в приземном слое атмосферы и генерации пылевого аэрозоля под воздействием сальтации.

Проанализирована корреляционная связь между плотностью вертикального турбулентного потока аэрозоля f и параметром ψ. Указанная связь аппроксимируется линейной регрессией

$$f = k\psi + b,$$

где, согласно данным измерений 23.08.2011 и 01.09.2011, коэффициент регрессии (размерность определяется параметрами f и ψ) $k = 30$ и 50 см$^{-4}$ с, соответственно, а $b = 4.6$ и 6.3 см$^{-2}$ с$^{-1}$.

Отсюда следует, что по данным измерений компонент скорости ветра и пороговой скорости сальтации можно прогнозировать “низкочастотные” (с периодами больше 3 мин) вариации плотности вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля. Следует иметь в виду, что значения вышеуказанных коэффициентов регрессии зависят от условий измерений и могут меняться в сравнительно широких пределах.

При оценке эффективности вертикального переноса аэрозоля целесообразно определить нормированный турбулентный поток аэрозоля или скорость выноса аэрозоля

$$w_a = \frac{F}{\bar{N}},$$

где $\bar{N}$ – среднее значение концентрации частиц аэрозоля.

На рис. 4 представлены результаты измерений нормированного вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля (1 на рис. 4) на опустыненной территории в Астраханской области (время осреднения 10 мин). Видно, что скорость выноса аэрозоля в полдень достигает 4–5 см/с. Отметим, что по данным предварительных измерений в Приаралье [1] скорость выноса пылевого аэрозоля иногда превышала 10 см/с.

По данным измерений флуктуаций вертикальной компоненты скорости ветра w и температуры

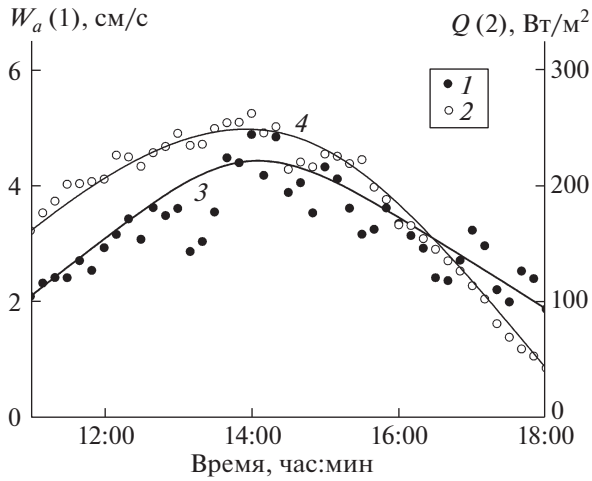

Рис. 4. Дневной ход скорости выноса пылевого аэрозоля (*1*) и турбулентного потока тепла (*2*) по данным измерений на опустыненной территории 23.08.2011 (*3* и *4* – сглаженные зависимости).

воздуха T были определены вертикальные турбулентные потоки температуры

$$q(t,\tau) = \tau^{-1}\int_0^{\tau} T'(t)w'(t)dt$$

и рассчитаны соответствующие значения потока тепла $Q = \rho c_p q$ (*2* на рис. 4), где ρ – плотность воздуха и c_p – его теплоемкость при постоянном давлении. Для оценки тенденции дневного хода w_a и Q были получены сглаженные временные зависимости указанных величин (*3* и *4* на рис. 4). Полученные результаты свидетельствуют о том, что конвективные процессы в пограничном слое атмосферы сильнее влияют на вариации турбулентного потока аэрозоля по сравнению с потоками тепла. Следует также отметить более быстрое убывание потока тепла в вечернее время, что обусловлено, главным образом, изменением режима пограничного слоя атмосферы.

По данным измерений функции распределения частиц пылевого аэрозоля по размерам и вертикальной компоненты скорости ветра были определены дифференциальные массовые потоки P_m пылевого аэрозоля для шести интервалов размеров частиц (в мкм): 0.5–0.7; 0.7–1.0; 1.0–1.5; 1.5–2.0; 2.0–3.0 и 3.0–5.0. Согласно данным измерений 23.08.2011 в период с 11 до 12 ч максимальное значение P_m наблюдалось при d = 1.5 мкм, где d – размер частиц аэрозоля. Для рассматриваемого периода времени зависимость $P_m(d)$ с удовлетворительной точностью аппроксимируется логонормальным распределением

$$P_m(d) = A\exp\{-\ln^2(d/d_0)/2\nu^2\},$$

где A = 18.5 мг/м^{3}с, d_0 = 1.5 мкм и ν = 0.94.

Были также определены дифференциальные счетные потоки пылевого аэрозоля. Согласно данным наших измерений максимальные значения дифференциального счетного потока пылевого аэрозоля достигаются в интервале размеров 0.5–0.7 мкм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской области в условиях квазинепрерывной сальтации определены вертикальные турбулентные потоки аэрозоля. Показано, что вынос пылевого аэрозоля с опустыненной территории обусловлен генерацией аэрозоля на подстилающей поверхности под воздействием сальтации и процессом вертикального переноса аэрозоля. Вариации вертикального турбулентного потока пылевого аэрозоля определяются конвективно обусловленной изменчивостью произведения вертикальной компоненты скорости ветра и разности между горизонтальной компонентой скорости ветра в приземном слое атмосферы и пороговой скоростью сальтации, что позволяет прогнозировать “низкочастотную” изменчивость плотности потока аэрозоля по данным измерений компонент скорости ветра и пороговой скорости сальтации. Установлено, что скорость выноса пылевого аэрозоля достигает примерно 5 см/с. Показано, что дневной ход скорости выноса аэрозоля согласуется с дневным ходом турбулентного потока тепла. Максимум дифференциального массового потока пылевого аэрозоля достигается для размера частиц 1.5 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.С. Голицына за полезные советы, а также О.Г. Чхетиани за обсуждение результатов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-17-00214).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A.* // Izvestia. Atmos. Ocean. Phys. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. 138–147.
2. *Горчаков Г.И., Шукуров К.А.* // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. Т. 39. № 1. 85–97.
3. *Stout Y.E., Zobeck T.M.* // Sedimentology. 1997. V. 44. № 5. P. 959–970.
4. *Davidson-Arnott R.G.D., Bauer B.O.* // Geomorphology. 2009. V. 105. P. 117–126.
5. *Liu D., Ishizuka M., Mikami M., Shao Y.* // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 18. P. 7595–7606.

6. *Bagnold R.A.* The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen. 1941. 265 p.
7. *Shao Y.* Physics and Modeling of Wind Erosion. New York: Springer, 2000.
8. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М. и др.* // ДАН. 2013. Т. 452. № 1. С. 669–676.
9. *Карпов А.В.* // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 844–849.
10. *Бунтов Д.В., Гущин Р.А., Даценко О.И.* // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 485–488.
11. *Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* // ДАН. 2009. Т. 426. № 3. С. 380–385.
12. *Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 1. С. 35–47.
13. *Fratini et al.* // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 2839–2854.
14. *Klose M., Shao Y.* // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 7309–7320.
15. *Горчаков Г.И. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 848–855.

VERTICAL TURBULENT FLUXES OF THE DUST AEROSOL OVER DESERTIFIED AREA

G. I. Gorchakov[a,#], A. V. Karpov[a], and R. A. Gushchin[a,b]

[a] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Russian Technological University, Moscow, Russian Federation*

[#]*e-mail: gengor@ifaran.ru*

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn July 13, 2020

Vertical turbulent fluxes of the dust aerosol over desertified area in Astrakhan oblast have been determined on the measurement data of the aerosol concentration and vertical wind velocity fluctuations. The vertical turbulent flux of the dust aerosol is markedly determined by the horizontal and vertical wind velocity variations. Dust aerosol uplift rate reached 5 cm/s. It is shown that daily variations of the aerosol uplift rate and the heat flux correlate well. The dependence of the mass flux of dust aerosol from the particle size has a maximum 1.5 μm.

Keywords: desertification, windsand flux, dust aerosol emission, turbulent aerosol flux, convection, aerosol uplift rate, turbulent heat flux, aerosol mass flux