

УДК 551.510

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ АЭРОЗОЛЯ И ТЕПЛА НА ОПУСТЫНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ПРИ ВСПЛЕСКОВОЙ ЭМИССИИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ

© 2024 г. Г. И. Горчаков<sup>1,\*</sup>, О. Г. Чхетиани<sup>1</sup>, А. В. Карпов<sup>1</sup>, Р. А. Гущин<sup>1</sup>, О. И. Даценко<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 30.10.2023 г.

Поступило 30.10.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принято к публикации 07.11.2023 г.

По данным измерений флуктуаций компонент скорости ветра, температуры воздуха и концентрации частиц аэрозоля на опустыненной территории в Астраханской области в условиях всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля определены вертикальные турбулентные пылевого аэрозоля и тепла. С использованием спектрального анализа охарактеризована временная изменчивость горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, температуры воздуха и концентрации частиц пылевого аэрозоля. Показано, что всплесковая эмиссия пылевого аэрозоля определяется низкочастотными конвективно обусловленными вариациями горизонтальной компоненты скорости ветра при превышении пороговой скорости сальтации. Выявлены существенные различия пространственно-временной изменчивости вертикального переноса тепла и пылевого аэрозоля. Рассчитаны 30-минутные средние значения потоков тепла (90–158 Вт/м<sup>2</sup>) и пылевого аэрозоля (7.2–27.5 см<sup>-2</sup>см<sup>-1</sup>), а также скорости выноса тепла (14–21 см/с) и пылевого аэрозоля (10–16 см/с).

*Ключевые слова:* опустынивание, ветропесчаный поток, перемежающаяся сальтация, эмиссия пылевого аэрозоля, турбулентный поток тепла, турбулентный поток аэрозоля, скорость выноса аэрозоля, скорость выноса тепла

DOI: 10.31857/S2686739724030154

### ВВЕДЕНИЕ

Пылевой аэрозоль (ПА) [1] прямо и косвенно влияет на радиационный режим атмосферы [2], процессы в биосфере [3] и на здоровье населения [4]. На опустыненных территориях (ОТ) пылевой аэрозоль образуется на подстилающей поверхности (ПП) под воздействием ветропесчаного потока [5]. Согласно существующим представлениям, частицы ПА выбиваются сальтирующими песчаными частицами (сальтация – скачкообразные перемещения песчинок) с подстилающей поверхности (процесс sandblasting [6]). Следует отметить, что существенную роль в процессе выноса частиц ПА с подстилающей поверхности (ПП) играют электрические процессы [7, 8].

Значительная часть пылевого аэрозоля поступает в атмосферу с опустыненных территорий

и благодаря дальнему переносу ПА распространяется на большие расстояния. Эффективность дальнего переноса зависит, в частности, от особенностей вертикального переноса и перемещения ПА в пограничном слое атмосферы непосредственно после эмиссии на ПП. В соответствии с градиентной гипотезой, в полуэмпирической теории турбулентной диффузии вертикальный перенос примесей описывается уравнением турбулентной диффузии [9, 10]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{dC}{dz} \right], \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация примеси,  $t$  – время,  $z$  – вертикальная координата и  $K$  – коэффициент турбулентной диффузии.

В конвективных условиях, которые часто реализуются на опустыненных территориях, коэффициент турбулентной диффузии для тепла отличается от коэффициента диффузии для примесей и количества движения, а при возникновении организованной конвекции [11] происходит контраградиентный перенос примесей.

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии наук, Москва, Россия  
\*E-mail: gengor@ifaran.ru

Кроме того, интенсивность эмиссии пылевого аэрозоля на опустыненных территориях является нелинейной функцией скорости ветра, что определяется нелинейной зависимостью интенсивности сальтации от скорости ветра [12].

Процессы переноса пылевого аэрозоля и тепла на ОТ до сих пор недостаточно изучены. Поэтому результаты экспериментальных исследований потоков тепла и аэрозоля представляют большой интерес. В [13, 14] представлены результаты определения вертикальных турбулентных потоков аэрозоля в условиях квазинепрерывной эмиссии ПА.

В настоящей работе представлены результаты определения турбулентных потоков аэрозоля и тепла при всплесковой или перемежающейся сальтации и, соответственно, всплесковой эмиссии [15] пылевого аэрозоля.

Турбулентные потоки тепла и аэрозоля определяются турбулентными пульсациями (флуктуациями) и конвективно обусловленными вариациями температуры воздуха, компонент скорости ветра и концентрации частиц пылевого аэрозоля. В следующем разделе приведены результаты измерений в условиях всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля в сентябре 2021 г. на опустыненной территории вблизи реки Волги в Астраханской обл. горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, температуры воздуха и суммарной концентрации частиц пылевого аэрозоля. Рассчитаны статистические характеристики вариаций указанных величин. Далее с использованием спектрального анализа охарактеризованы временная изменчивость компонент скорости ветра, температуры воздуха и концентрации частиц аэрозоля. Приведены 30-минутные средние значения измеренных величин и соответствующие параметры турбулентности.

В следующих разделах представлены результаты определения вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля и тепла.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ ВЕТРА, КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Синхронные измерения температуры воздуха, концентрации частиц аэрозоля и компонент скорости ветра проводились в августе-сентябре 2021 г. на опустыненной территории на высоте 3 м в течение 7 дней. В настоящей работе

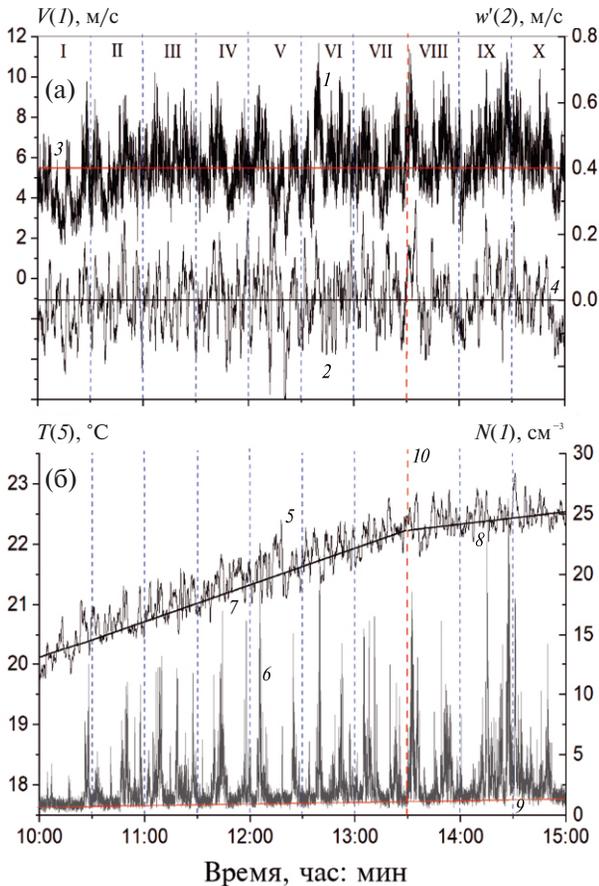
представлены результаты измерений выполненных в условиях всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля 09.09.2021 в период с 10:00 до 15:00. Горизонтальная и вертикальная компоненты скорости ветра, а также температура воздуха измерялись с частотой 10 Гц с помощью акустической метеостанции Метео-2 (Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск), а суммарная концентрация части пылевого аэрозоля в диапазоне размеров от 0.5 до 5.0 мкм с помощью фотоэлектрического счетчика частиц ОЭАС-05 (НИФХИ, г. Москва) с временным разрешением 1 с.

На рис. 1 а показана временная изменчивость горизонтальной компоненты скорости ветра  $V$  (кривая 1) и сглаженный временной ход (на интервале 1 мин) флуктуаций вертикальной компоненты скорости ветра (кривая 2)  $w'(t) = w(t) - \bar{w}$ , где  $w(t)$  и  $\bar{w}$  – результаты измерений вертикальной компоненты скорости ветра и ее среднее значение (в период с 10:00 до 15:00). Видно, что в рассматриваемый период времени преобладают “низкочастотные” конвективно обусловленные вариации  $V$ . Во временном ходе вертикальной компоненты скорости ветра доминируют более высокие частоты. На рис. 1 а (кривая 3) отмечена пороговая скорость сальтации  $V_0 \cong 5.5$  м/с и, следовательно, эмиссии пылевого аэрозоля, которая близка к среднему значению горизонтальной компоненты скорости ветра  $\bar{V} = 5.7$  м/с.

На рис. 1 б показана зависимость от времени наблюдаемой суммарной концентрации частиц пылевого аэрозоля  $N(t)$  (кривая 6) и сглаженный временной ход (на интервале 1 мин) температуры воздуха  $T(t)$  (кривая 5). Отчетливо видны резкие всплески  $N(t)$  (до  $15-25$  см<sup>-3</sup>) и в среднем медленно меняющейся концентрации фонового аэрозоля ( $9$  – тренд фоновой концентрации фонового аэрозоля). Отметим, что в период примерно с 12:00 до 13:30 наблюдалась квазипериодическая изменчивость концентрации фонового аэрозоля. В период проведения измерений наблюдался рост средней температуры воздуха со скоростью 0.61 град/час (7 на рис 1 б) в период с 10:00 до 13:30 и со скоростью 0.20 град/час (8 на рис. 1 б) в период с 13:30 до 15:00 ( $10$  – момент изменения скорости роста температуры).

Количественные характеристики временной изменчивости рассматриваемых величин далее определены с использованием спектрального анализа.

В табл. 1 приведены результаты расчетов статистических характеристик вариаций рассматриваемых нами величин. Вариации горизонтальной компоненты скорости ветра  $V$  отличаются



**Рис. 1.** Временная изменчивость 09.09.2021 в период с 10:00 до 15:00 по данным измерений на высоте 3 м горизонтальной компоненты скорости ветра ( $V$ ), турбулентных пульсаций ( $w'$ ) вертикальной компоненты скорости ветра (сглажены на интервале 50 сек), пульсации температуры воздуха ( $T$ ) – сглаженную на интервале 50 с и суммарной концентрации частиц пылевого аэрозоля ( $N$ ). Обозначения: 3 – пороговая скорость сальтации, 4 – начало отсчета для вертикальной компоненты скорости ветра, 7 и 8 – интервалы кусочно-линейной аппроксимации тренда температуры воздуха, 9 – концентрация фонового аэрозоля, 10 – момент излома кусочно-линейной интерполяции температуры, I–X – 30-минутные интервалы.

**Таблица 1.** Статистические характеристики вариаций компонент скорости ветра, температуры воздуха и суммарной концентрации пылевого аэрозоля (9.09.2021)

Параметры	$V$ , м/с	$w'$ , м/с	$T$ , °C	$N$ , см <sup>-3</sup>
Среднее	5.70	0.0	0.0	2.44
Станд. откл.	1.40	0.35	0.55	2.22
Максимум	11.7	2.90	3.20	26.3
Минимум	0.2	-2.13	-1.33	0.2
Кэф. вариаций	0.25	–	–	0.91
Асимметрия	0.13	0.24	1.05	3.40
Экссесс	0.09	1.06	1.15	16.3

малыми значениями асимметрии и эксцесса. Эмпирическая функция распределения  $V$  близка к нормальному распределению. Заметный эксцесс имеет место для вариаций  $w'$  и  $T'$ . В обоих случаях максимальные положительные отклонения от среднего заметно больше (по модулю) отрицательных отклонений. Сильно асимметрична и с большим эксцессом эмпирическая функция распределения концентрации аэрозоля. Следует иметь в виду, что заметный вклад в наблюдаемые концентрации вносит фоновый аэрозоль.

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ ВЕТРА, ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ

Важные количественные характеристики временной изменчивости измеренных нами величин можно получить методом спектрального анализа.

На рис. 2 представлены спектры флуктуаций (кривая 1)  $P(f) = fS(f)$ , где  $S$  – спектральная плотность мощности и  $f$  – частота, рассчитанные (Origin 2021) по данным измерений  $V(t)$  (а),  $w(t)$  (б),  $T(t)$  (в) и  $N(t)$  (г). Высокочастотная часть спектра  $P_V(f)$  (рис. 2 а) аппроксимируется степенной функцией в диапазоне частот примерно от 0.8 до 6.5 Гц  $P_V^{(2)}(f) = C_P^{(2)} f^{-k^2}$ , где  $k_V^{(2)} = 0.71$ , что близко к  $k = 0.67$  для режима локально изотропной турбулентности. На частотах  $> 0.8$  Гц спектр  $P_V(f)$  с удовлетворительной точностью аппроксимируется другой степенной функцией  $P_V^{(3)}(f)$  с показателем  $k_V^{(3)} = 0.45$ , что обусловлено определяющим вкладом конвективных движений в вариации  $V(t)$ . В спектре  $P_V(f)$  достаточно отчетливо выражены широкий максимум (5) в диапазоне частот 1–5 мГц (периоды 200 с – 1000 с) и максимум в диапазоне 10–20 мГц (7), а также слабо выраженные максимумы в диапазонах 15–45 мГц (8) и 50–80 мГц (9).

Высокочастотные участки спектров  $w'$  и  $T'$  с удовлетворительной точностью аппроксимируются (2 на рис. 2 б и 2 в) степенными спектрами с показателями  $k_w^{(2)} = 0.70$  и  $k_T^{(2)} = 0.71$ , а низкочастотные ( $f < 10$  мГц для  $w$  и  $f < 100$  мГц для  $T$ ) аппроксимируются степенными функциями с показателями  $k_w^{(3)} = -0.58$  и  $k_T^{(3)} = -0.61$  (падение мощности флуктуаций с уменьшением частоты).

Кроме этого, для оптимизации общей точности кусочно-степенной аппроксимации для  $w$  и  $T$  приходится вводить отдельную аппроксимацию

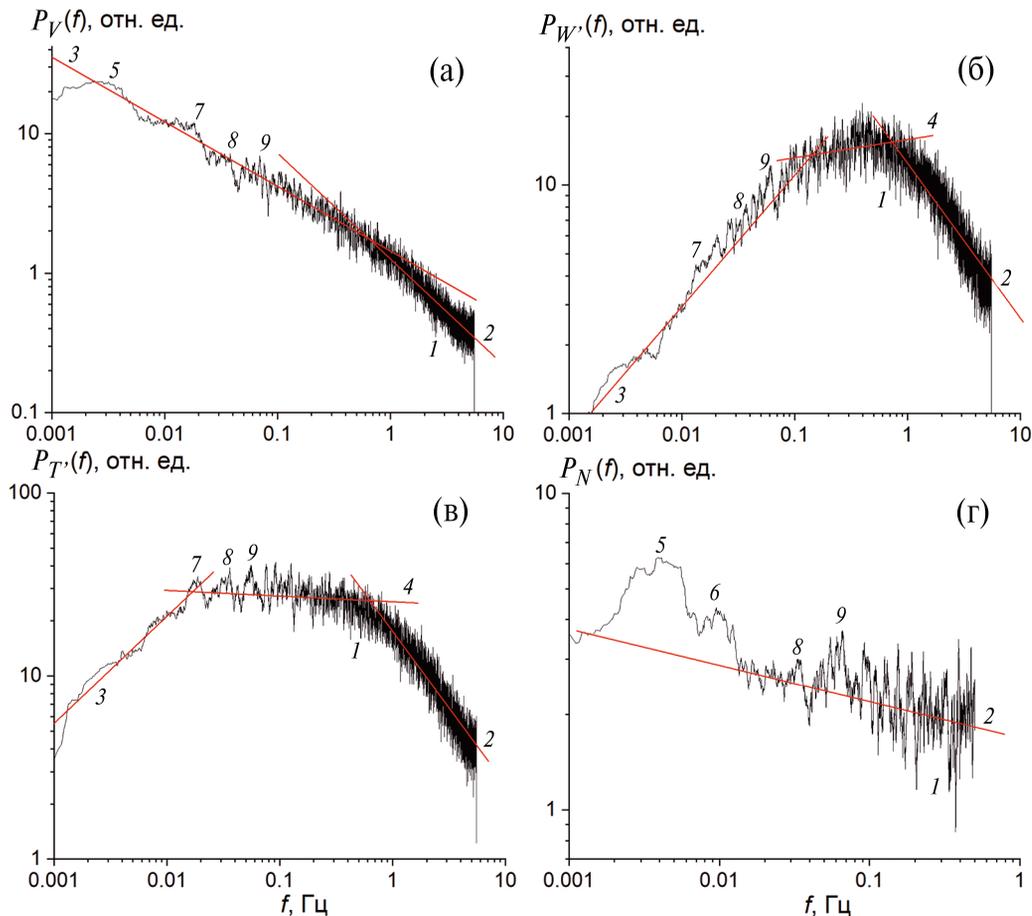
на “промежуточных” частотах с использованием степенных функций с показателями  $k_w^{(4)} = -0.1$  (рис 2 б) для диапазона частот примерно от 100 мГц до 0.8 Гц и  $k_T^{(4)} = -0.03$  (рис. 2 в) для диапазона примерно от 15 мГц до 0.5 Гц. Отметим также, что на спектре  $P_w(f)$  достаточно отчетливо выражен низкочастотный максимум (2–5 мГц) и конвективно обусловленные вариации (7, 8 и 9) в диапазоне частот от 10 до 100 мГц. На спектре  $P_T(f)$  отчетливы выражены максимумы (7, 8 и 9) на частотах примерно 18.36 и 54 мГц и слабо выражены максимумы в диапазоне частот  $f < 100$  мГц.

В спектре  $P_N(f)$  (1 на рис. 2 г), где максимальная частота  $f_{max} = 0.5$  Гц, весь представленный на рис. 2 г аппроксимируется степенной функцией  $P_N^{(2)}$  с показателем  $k_N^{(2)} = 0.11$ . Очень сильно

выражен низкочастотный (5 на рис. 2 г) максимум (частоты 2–6 мГц, периоды 160–500 с). Хорошо выражен максимум вблизи 100 мГц (6 на рис. 2 г) и максимум в диапазоне 0.04–0.08 Гц (9 на рис. 2 г).

Достаточно представительные оценки турбулентных потоков тепла и аэрозоля можно получить при сравнительно большом времени осреднения. С учетом сильно низкочастотной изменчивости анализируемых характеристик время осреднения было выбрано равным 30 минут.

С целью характеристики условий измерений для 30-минутных периодов были определены параметры турбулентности, включая дисперсии флуктуаций температуры воздуха  $\sigma_T^2$  и вертикальной компоненты скорости ветра  $\sigma_w^2$ , динамическая скорость (скорость трения)  $u_*$ ,



**Рис 2.** Спектральная плотность мощности турбулентных пульсаций горизонтальной компоненты скорости ветра (а), вертикальной компоненты скорости ветра (б) флуктуации температуры воздуха (в) и флуктуации суммарной концентрации частиц пылевого аэрозоля (г). Обозначение: 1 – рассчитанные спектры, кусочно-линейные аппроксимации в области “высоких” частот (2), “низких” частот (3) и в области “промежуточных частот” 1–5 мГц (5), вблизи 100 мГц (6) и в диапазоне от 100 до 10 мГц (7, 8 и 9).

масштаб Мони́на-Обуха  $L$ . В табл. 2 приведены также средние значения горизонтальной компоненты скорости ветра  $V$  и концентрации частиц пылевого аэрозоля  $N_a = N - N_{bd}$ , где  $N$  – наблюдаемые концентрации и  $N_{bd}$  – фоновые концентрации, которые определяются по данным измерений  $N$  между всплесками.

Анализ показал, что в первый 30-минутный период (10:00–10:30) имела место слабая генерация пылевого аэрозоля, так как средняя скорость ветра была заметно меньше пороговой скорости ветра. В течение последнего часа (14:00–15:00) режим генерации аэрозоля отличается от всплескового. Он был преимущественно квазинепрерывным. В период с 10:30 до 14:00 наблюдались заметные отклонения рассматриваемых параметров от их средних значений. В частности, в отдельные периоды заметно уменьшалась до (0.13–0.17 м/с) динамическая скорость. В период с 13:30 до 14:00 средняя концентрация пылевого аэрозоля увеличилась до  $1.06 \text{ см}^{-3}$ .

### ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ

Вертикальный турбулентный поток пылевого аэрозоля

$$F = \tau^{-1} \int_0^{\tau} g(t) dt = \tau^{-1} \int_0^{\tau} N'_a(t) w'(t) dt, \quad (2)$$

где  $N'_a(t) = N_a(t) - \bar{N}_a$  и  $\tau$  – период осреднения,  $g(t)$  – плотность потока аэрозоля.

Результаты определения плотности потока  $g(t)$  представлены на рис 3 а. В условиях всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля  $g(t)$  представляет собой последовательность всплесков. Значения 30-минутных средних плотности потока приведены в табл. 2. Они меняются в пределах от 7.2 (период 10:00–10:30) до  $27.5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  (период 14:00–14:30) и в среднем  $16 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Большой интерес представляет собой нормированные потоки или скорости выноса пылевого аэрозоля

$$W_N = \frac{F}{\bar{N}}, \quad (3)$$

где  $\bar{N}$  – средние 30-минутные концентрации пылевого аэрозоля.

Оказалось (табл. 2), что скорость выноса  $W_N$  меняется примерно от 11 (в период от 14:30 до 15:00) до 16 см/с (в среднем для 9.09.23  $13.7 \text{ см/с}$ ).

Для режима квазинепрерывной эмиссии пылевого аэрозоля [13, 14] были получены значения  $W_N = 4\text{--}5 \text{ см/с}$ .

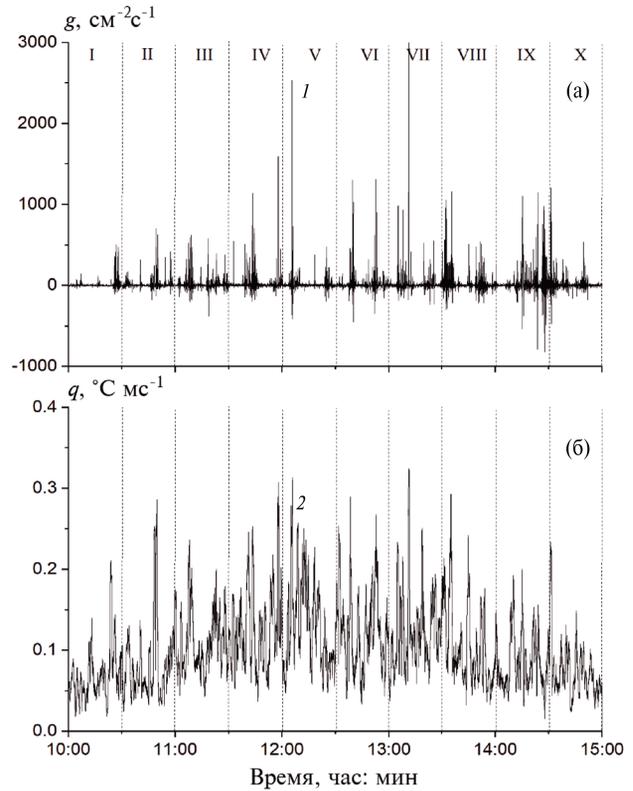


Рис. 3. Временная изменчивость плотности вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля (1) и потоков тепла (2).

Спектр потока пылевого аэрозоля представлен на рис. 4 а (кривая 1). В области “высоких” частот ( $f > 0.1 \text{ Гц}$ ) этот спектр аппроксимируется константой, а в области частот  $< 0.1 \text{ Гц}$  степенной функцией с показателем  $-0.58$ .

На спектре отчетливо выражен максимум (5) в диапазоне частот от 2–6 мГц, а также максимум (9 на рис. 4 а) в диапазоне 0.045–0.08 Гц.

Таким образом, при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля вертикальный перенос происходит, главным образом, на “высоких” частотах  $f$  больше примерно 0.05 Гц.

### ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА

В квазистационарных условиях вертикальный турбулентный поток тепла

$$Q = \frac{\rho c_p}{\tau} \int_0^{\tau} q(t) dt = \frac{\rho c_p}{\tau} \int_0^{\tau} T'(t) w'(t) dt, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $q$  – плотность потока температуры  $T'(t)w'(t)$ .

При заметных изменениях средней температуры целесообразно определять  $T'(t)$  из соотношений

$$T'(t) = T(t) - T_{tr}(t), \quad (5)$$

где  $T_{tr}(t)$  – сглаженный временной ход температуры воздуха.

Для периода времени от 10:00 до 15:00. 9.09.2021. сглаженный временной ход потока температуры (сглаженные на интервале  $\sim 1$  мин) показан на рис. 3 б (кривая 2), который в отличие от плотности вертикального потока пылевого аэрозоля является непрерывной функцией времени. Однако для получения устойчивых оценок потока тепла при наблюдаемой изменчивости  $q$  время осреднения при определении потоков тепла должно быть достаточно большим:  $Q$  для 30-минутных интервалов (табл. 2). Оказалось, что поток тепла 9.09.2021 варьировал пределах от 90 до 158 Вт/м<sup>2</sup>. Нормированный поток температуры или скорость выноса для вертикального турбулентного потока тепла будет определяться из отношения

$$W_H = \frac{Q}{\sigma_T}, \quad (6)$$

где  $Q$  – средние 30-минутные значения потока температуры. Величина  $W_H$  варьирует в пределах от 14 до 21 см/с, (в среднем 8.5 см/с), что по порядку величины согласуется с соответствующими значениями  $W_N$ .

Таким образом, нормированные турбулентные потоки тепла и пылевого аэрозоля или скорости выноса из приземного слоя атмосферы при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля согласуются друг с другом по порядку величины. На рис. 4 б представлена кусочно-степенная аппроксимация спектральной плоскости мощности  $P_q(f)$  турбулентного потока температуры (1). В области частот примерно от 0.8 до 5 Гц применима аппроксимация с показателем степени 0.64, а в области “низких” частот меньше примерно 0.15 Гц – с показателем  $-0.51$ . В “промежуточном” диапазоне частот показатель равен  $-0.08$ . На спектре  $P_q(f)$  заметно проявляются конвективно обусловленные максимумы в диапазоне частот от 0.015 до 0.15 Гц.

Диапазон частот, где наблюдаются наибольшие вклады в спектральную плотность мощности турбулентных потоков тепла и аэрозоля в значительной степени перекрываются, что обусловлено определяющим влиянием спектров флуктуаций вертикальной компоненты скорости ветра.

Представленные в табл. 2 результаты определения параметров турбулентности свидетельствует о том, что измерения вертикальных турбулентных потоков тепла и аэрозоля были выполнены в конвективных условиях.

**Таблица 2.** Концентрация пылевого аэрозоля, характеристики компонент скорости ветра, параметры турбулентности, потоки тепла и пылевого аэрозоля для 30-минутных интервалов.

Интервалы	10:00–10:30	10:30–11:00	11:00–11:30	11:30–12:00	12:00–12:30	12:30–13:00	13:00–13:30	13:30–14:00	14:00–14:30	14:30–15:00	Сред.
Параметры											
$\sigma_1^2, \text{ }^\circ\text{C}$	0.28	0.24	0.35	0.40	0.42	0.38	0.36	0.32	0.23	0.20	0.32
$\sigma_w^2, \text{ м}^2/\text{с}^2$	0.08	0.10	0.12	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11	0.11
$\bar{N}, \text{ см}^{-3}$	0.45	0.85	1.13	0.93	0.88	1.21	1.14	1.76	2.21	1.32	1.19
$\bar{V}, \text{ м/с}$	4.37	5.28	6.03	5.59	5.27	5.99	5.66	6.29	6.32	6.06	5.69
$u, \text{ м/с}$	0.21	0.13	0.22	0.15	0.17	0.16	0.21	0.15	0.17	0.13	0.17
$L, \text{ м}$	-9.1	-1.9	-7.5	-1.9	-3.0	-2.4	-5.6	-2.5	-4.5	-2.1	-4.1
$Q, \text{ Вт/м}^2$	90	100	134	157	158	151	150	128	107	90	126
$W_H, \text{ см/с}$	14	17	18.5	20.5	20	20	21	18.5	18	16.5	18.4
$F, \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	7.2	12	11.5	17.0	14	17	18.5	19	27.5	15	15.9
$W_N, \text{ см/с}$	16	15	10	18	16	14	16	11	12.5	11	13.9

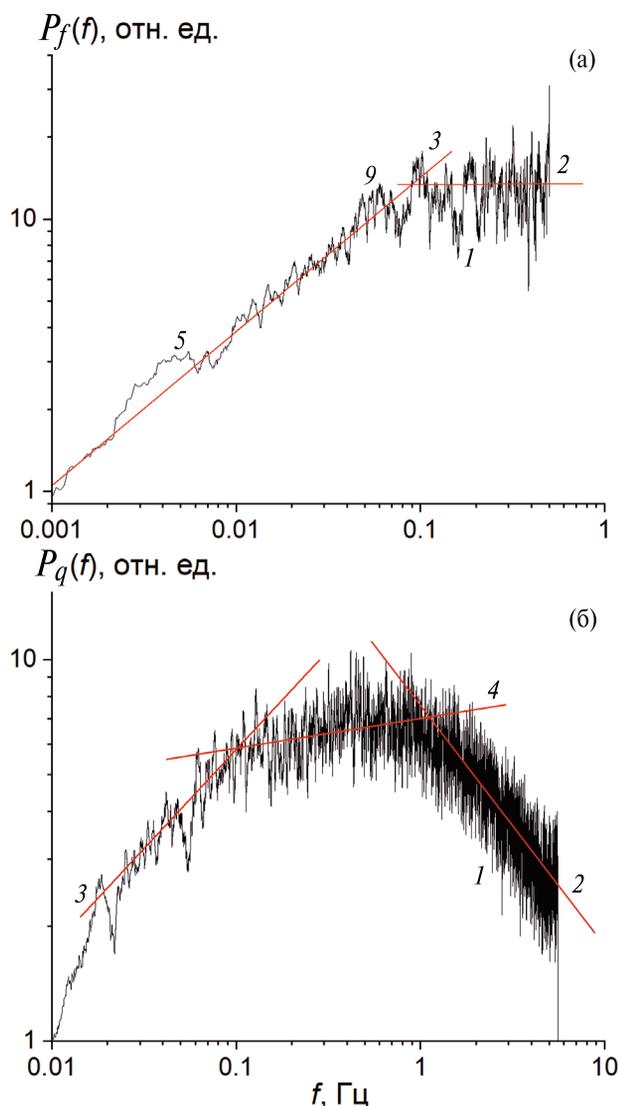


Рис. 4. Спектры турбулентных потоков пылевого аэрозоля (а) и тепла (б). Обозначения см. на рис. 2.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской обл. в приземном слое атмосферы на высоте 3 м флуктуаций температуры воздуха, компонент скорости ветра и концентраций частиц пылевого аэрозоля в диапазоне размеров частиц от 0.5 до 5.0 мкм определены вертикальные турбулентные потоки тепла и пылевого аэрозоля в условиях всплесковой сальтации и, соответственно, всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля.

Показано, что пространственно-временная изменчивость потоков тепла и пылевого аэрозоля в рассматриваемых условиях существенно

различна. Потоки пылевого аэрозоля возникают только при превышении скоростью ветра пороговой скорости сальтации.

С использованием спектрального анализа охарактеризована сложная многомасштабная изменчивость полей ветра, температуры воздуха и пылевого аэрозоля.

Рассчитаны средние 30-минутные турбулентные потоки тепла и аэрозоля.

Нормированные турбулентные потоки или скорости выноса тепла (14–21 см/с) и пылевого аэрозоля (10–16 см/с) на 30-минутных интервалах по порядку величины согласуются друг с другом.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.С. Голицына за полезные советы.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mahowald N., Albani S., Kok J.F., Engelstaeder S., Scanza R., Ward D.S., Flanner M.G. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system // *Aeolian Research*. 2014. V. 15. P. 53–71.
2. Miller R., Tegen I., Perlwitz J. Surface radiative forcing by soil dust aerosol and the hydrologic cycle // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. DO4203.
3. Krishnamurthy A., Moore J.K., Mahowald N., Luo C., Zender C.S. Impacts of atmospheric nutrient inputs on marine biogeochemistry // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. G01006.
4. Brunekreef B., Holgate S.T. Air Pollution and Health // *Lancet*. 2002. V. 360. P. 1233–1242.
5. Shao Y. *Physics and Modeling of Wind Erosion*. N. Y.: Springer, 2000. 393 p.
6. Alfaro S.C., Gaudichet A., Gomes L., Maille M. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 11239–11249.

7. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карнов А.В., Гушчин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В. Электризация ветропесчанного потока на опустыненных территориях // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 88–93.
8. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карнов А.В., Гушчин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В. Пылевая плазма ветропесчанного потока на опустыненных территориях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океаны. 2022. Т. 58. № 5. С. 543–553.
9. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
10. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics. NY: Wiley Intersci. Publ., 1998. 1326 p.
11. Sow M., Alfaro S.C., Rajot J.Z. Comparison of the size resolved dust emission fluxes measured over a Sahelian source with the Dust Production Model (DPM) predictions // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2011. V. 11. P. 11077–11107.
12. Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes, London: Methuen. 265. 1941.
13. Горчаков Г.И., Карнов А.В., Гушчин Р.А. Турбулентные потоки пылевого аэрозоля на опустыненной территории. Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494. С. 53–57.
14. Карнов А.В., Горчаков Г.И., Гушчин Р.А., Даценко О.И. Вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 5. С. 565–574.
15. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 85–97.
16. Gorchakov G.I., Koprov V.M., Shukurov K.A. Vertical turbulent aerosol fluxes over desertized areas // Izv. Atm. and Oceanic Physics. 2002. V. 38. Suppl 1. P. S138–S147.
17. Caughey S.J., Kaimal J.C. Vertical heat flux in the convective boundary layer. Q. J. R. // Meteorol. Soc. 1977. V. 103. P. 811–815.
18. Горчаков Г.И., Чхетиани О.Г., Карнов А.В. и др. Квазипериодическая эмиссия пылевого аэрозоля на опустыненной территории // Метеорология и гидрология. 2023. № 8. С. 62–72.

## TURBULENT FLUXES OF AEROSOL AND HEAT IN A DESERTIFIED AREA DURING INTERMITTENT EMISSION OF DUST AEROSOL

G. I. Gorchakov<sup>a,\*</sup>, O. G. Chkhetiani<sup>a</sup>, A. V. Karpov<sup>a</sup>, R. A. Gushchin<sup>a</sup>, O. I. Datsenko<sup>a</sup>

*Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn October 30, 2023*

<sup>a</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>\*</sup>E-mail: gengor@ifaran.ru

Based on fluctuations measurement results in the components of wind speed, air temperature and concentration of aerosol particles on a desertified area in the Astrakhan region under conditions of intermittent emission of dust aerosol, vertical turbulent fluxes of dust aerosol and heat were determined. Using spectral analysis, the temporal variability of the horizontal and vertical components of wind speed, air temperature and concentration of dust aerosol particles was characterized. It is shown that the intermittent emission of the dust aerosol is determined by low-frequency convective-induced variations in the horizontal component of wind speed when the threshold saltation speed is exceeded. Significant differences in the spatiotemporal variability of vertical heat transfer and dust aerosol were revealed. The 30-minute average values of heat fluxes (90–158 W/m<sup>2</sup>) and dust aerosol (7.2–27.5 cm<sup>-2</sup>cm<sup>-1</sup>), as well as the rate of heat removal (14–21 cm/s) and dust aerosol (10–16 cm/s).

*Keywords:* desertification, wind-sand flux, intermittent saltation, dust aerosol emission, turbulent heat flux, turbulent aerosol flux, aerosol removal rate, heat removal rate