На правах рукописи Картов.

Карпов Алексей Владимирович

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ НА ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ИФА им. А.М.Обухова РАН **Горчаков Геннадий Ильич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ОАО "НИФХИ им. Л.Я. Карпова" Загайнов Валерий Анатольевич

доктор физико-математических наук, Главный научный сотрудник ИПНГ РАН Вульфсон Александр Наумович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится "<u>10</u>" <u>апреля</u> 2014 г. в 11:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Автореферат разослан " 07 " марта 2014 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук

Мра Л.Д. Краснокутская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы определяется тем, что опустынивание является одним из важных факторов глобального изменения окружающей среды и климата, так как выносимый с поверхности пустынь минеральный аэрозоль существенно влияет на радиационный режим атмосферы. В настоящее время ведутся экспериментальные исследования процессов, происходящих на опустыненных территориях, включая процесс переноса песчинок и процесс выноса аэрозоля с подстилающей поверхности. Большинство экспериментов выполняется в лабораторных условиях, в основном, в ветровых каналах. Однако для понимания реальных процессов необходимы также экспериментальные исследования в естественных условиях.

Процессы переноса в ветропесчаном потоке давно привлекают внимание исследователей. Среди них определяющим является процесс сальтации (скачкообразное движение) песчинок под действием ветра. Длительные исследования на опустыненных территориях показали, что массовый поток песчинок или твердый расход при фиксированной скорости ветра меняется в широких пределах. Полный набор параметров, который позволил бы с достаточно высокой точностью восстанавливать параметры сальтации до сих пор не определен. Таким образом, необходимо дальнейшее исследование механизма сальтации с использованием прямых и обратных задач динамики сальтирующих песчинок.

Пол на воздействием сальтирующих песчинок подстилающей поверхности генерируются частицы минерального аэрозоля, который затем приземный И пограничный слои атмосферы. переносится В Олнако экспериментальных данных о вертикальных турбулентных потоках аэрозоля на опустыненных территориях и вариациях скорости выноса аэрозоля до сих пор недостаточно. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований механизма сальтации И процесса выноса минерального аэрозоля с подстилающей поверхности на опустыненных территориях.

Целью диссертационной работы экспериментальное является И теоретическое исследование процессов переноса частиц аэрозоля И ветропесчаном сальтирующих песчинок В потоке на опустыненных территориях.

Основные задачи диссертационной работы

- 1. Подготовка и проведение измерений параметров сальтации, характеристик аэрозоля и турбулентных пульсаций компонент скорости ветра на опустыненных территориях.
- 2. Восстановление траекторий сальтирующих песчинок по данным скоростной видеосъемки на опустыненных территориях.

- 3. Анализ вариаций концентраций сальтирующих песчинок в приповерхностном слое атмосферы на опустыненных территориях.
- 4. Разработка численной модели переноса сальтирующих песчинок.
- 5. Анализ влияния динамических параметров на траектории сальтирующих песчинок.
- 6. Разработка методики решения обратной задачи динамики невращающихся сальтирующих песчинок. Определение динамических параметров по наблюдаемым траекториям сальтирующих песчинок.
- 7. Разработка методики решения обратной задачи динамики для вращающихся сальтирующих песчинок.
- 8. Восстановление функций распределения частиц по размерам для фоновой и генерируемой на подстилающей поверхности компонент аэрозоля.
- 9. Определение вертикальных турбулентных потоков и скорости выноса аэрозоля на опустыненных территориях в Астраханской области корреляционным методом.
- 10. Проведение градиентных измерений концентрации частиц аэрозоля на опустыненной территории.
- 11.Сопоставление результатов измерений вертикальных турбулентных потоков, полученных с помощью корреляционного и градиентного методов.

<u>Научная новизна</u>

В диссертационной работе получен ряд новых научных результатов.

Восстановлены траектории сальтирующих песчинок по данным скоростной видеосъемки ветропесчаного потока на опустыненных территориях.

Получен вертикальный профиль концентраций сальтирующих песчинок на опустыненной территории в приповерхностном слое атмосферы от 0 до 40 мм с разрешением 2 мм.

По данным измерений на опустыненной территории впервые обнаружен максимум в спектре флуктуаций концентраций сальтирующих песчинок в диапазоне частот от 100 до 200 Гц.

Разработана численная модель переноса сальтирующих песчинок, адаптированная к решению обратных задач динамики сальтирующих песчинок опустыненных территориях учетом силы тяжести, на с силы аэродинамического сопротивления, силы Магнуса и вариаций горизонтальной приповерхностном и вертикальной компонент скорости ветра в слое атмосферы.

Решена обратная задача динамики сальтирующих песчинок на опустыненных территориях. Восстанавливаются вертикальные И горизонтальные компоненты скорости вылета песчинки, диаметр и начальная характеризующие вращения песчинки, скорость параметры, a также горизонтальную вертикальную И компоненты скорости ветра В приповерхностном слое атмосферы на отдельных участках траектории песчинки. Приведены примеры восстановления вышеуказанных параметров сальтации по данным скоростной видеосъемки на опустыненных территориях.

По данным измерений флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля на опустыненных территориях в Астраханской обл. восстановлены функции распределения частиц аэрозоля по размерам для фоновой и генерируемой на подстилающей поверхности компонент аэрозоля в диапазоне размеров частиц от 0.5 до 5.0 мкм.

С помощью корреляционного метода по данным синхронных измерений флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля и турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра определены вертикальные турбулентные потоки и скорость выноса аэрозоля с опустыненных территорий Астраханской обл.

По данным градиентных измерений счетных концентраций частиц аэрозоля определена скорость выноса аэрозоля с опустыненных территорий. Показано, что скорости выноса аэрозоля, полученные с помощью корреляционного и градиентного методов, удовлетворительно согласуются друг с другом.

Защищаемые положения

Предметом защиты являются следующие положения и результаты диссертационной работы:

- 1. Результаты комплексных измерений на опустыненной территории в Астраханской обл., включая: данные скоростной видеосъемки сальтирующих песчинок, результаты измерений дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля в приземном и приповерхностном слоях атмосферы в диапазоне размеров частиц 0.5– 5.0 мкм и результаты измерений турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра.
- 2. По данным скоростной видеосъемки траекторий сальтирующих обратная динамики невращающихся песчинок решена задача сальтирующих песчинок, позволяющая восстанавливать диаметр и компоненты начальной скорости вылета песчинки, также a компоненты скорости ветра для отдельных участков траектории песчинки.
- 3. Разработана методика решения обратной задачи динамики вращающихся сальтирующих песчинок, позволяющая дополнительно определять начальную скорость вращения песчинки по данным наблюдений группы 2-3 траекторий синхронно сальтирующих песчинок.
- 4. По данным синхронных измерений дифференциальных счетных пульсаций концентраций частиц аэрозоля И турбулентных вертикальной компоненты ветра опустыненных скорости на территориях Астраханской обл. определены В вертикальные турбулентные потоки аэрозоля и скорости выноса частиц аэрозоля (нормированные турбулентные потоки). Показано, что скорости выноса аэрозоля с подстилающей поверхности, полученные с

использованием корреляционного и градиентного методов удовлетворительно согласуются друг с другом.

5. Обнаружен отчетливо выраженный максимум в спектре плотности мощности флуктуаций концентраций сальтирующих песчинок в диапазоне частот примерно от 100 до 200 Гц (явление квазипериодической или "резонансной" сальтации).

<u>Научная ценность</u> диссертационной работы определяется тем, что в ней получены новые данные о выносе аэрозоля с опустыненных территорий, расположенных в России. Результаты измерения скорости выноса аэрозоля позволят более точно оценивать радиационные эффекты минерального аэрозоля в земной атмосфере. Методика и результаты решения обратной задачи динамики сальтирующих песчинок позволяют уточнить представления о механизме сальтации на опустыненных территориях.

Практическая значимость результатов диссертационной работы обусловлена тем, что они позволяют уточнить модели переноса аэрозоля и песчаной фракции в атмосфере, в том числе, с целью оценки влияния пустынь и полупустынь на окружающие территории и климат Земли в целом. Разработанные методики решения обратных задач и измерения вертикальных турбулентных потоков аэрозоля могут быть использованы другими исследователями при изучении процессов переноса в ветропесчаном потоке и выноса аэрозоля с подстилающей поверхности.

<u>Достоверность результатов</u> и выводов диссертационной работы обеспечивается большим объемом наблюдательных данных и согласием полученных результатов с существующими представлениями и результатами других авторов.

<u>Личный вклад автора</u>

Автор принимал активное участие в постановке и решении всех задач диссертационной работы.

Автором были выполнены измерения параметров микроструктуры аэрозоля, включая градиентные измерения концентрации аэрозоля, и турбулентных пульсаций компонент скорости ветра и температуры в 2005–2013 гг. на опустыненных территориях Астраханской области и Республики Калмыкия.

Автор также разработал численную модель динамики сальтирующих песчинок, подготовил программу автоматизированной обработки видеокадров и программы статистической обработки данных наблюдений.

Под руководством и при участии автора была создана и неоднократно модернизировалась полевая автомобильная лаборатория.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: Международные симпозиумы "Атмосферная радиация и динамика" (Санкт-Петербург 2009,

2011, 2013); VII и VIII Международные конференции "Естественные и антропогенные аэрозоли" (Санкт-Петербург 2010, 2012); Международная конференция "Турбулентность, динамика атмосферы и климата" (Москва, 2013); VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург 2012); XII Всероссийская конференция молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы" (Борок 2008); XV–XX Рабочие группы "Аэрозоли Сибири" (Томск 2008–2013), а также на семинарах в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Каждая глава состоит из краткого введения в рассматриваемую задачу, содержательной части и заключения в виде основных результатов по главе. Работа изложена на 136 страницах. Диссертация содержит 7 таблиц, 44 рисунка и список литературы из 129 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, основные задачи и защищаемые положения диссертационной работы, охарактеризованы научная новизна, достоверность результатов диссертационной работы, научная и практическая значимость работы и личный вклад соискателя, приведены сведения об апробации работы, публикациях и составе Z, CM Z, CM

публикациях и соста диссертационной работы.

первой B главе сформулированы основные задачи исследования ветропесчаного потока опустыненных территориях, на описана аппаратура для измерения дифференциальных флуктуаций счётных концентраций частиц аэрозоля, охарактеризованы методы и исследования средства процесса сальтации опустыненных на территориях, приведены сведения об аппаратуре измерения ДЛЯ метеорологических характеристик И турбулентности параметров В атмосферы, приземном слое полевой приведено описание автомобильной лаборатории И информация о полевых экспериментах на опустыненных территориях В Калмыкии и Астраханской области в 2005 – 2013 гг. Приведены примеры



Рис. 1. Кадры скоростной видеосъемки сальтирующих песчинок (заказник "Пески Берли", 16.08.2009).

кадров скоростной видеосъёмки (рис. 1) сальтирующих песчинок. Кратко охарактеризованы результаты полевых экспериментов на опустыненных территориях.

Во второй главе рассмотрены известные результаты исследований экспериментальных процесса сальтации В ветровых каналах опустыненных И на Приведены примеры территориях. восстановленных по данным скоростной видеосъёмки траекторий



Рис. 2. Примеры наблюдаемых траекторий сальтирующих песчинок (заказник "Пески Берли", 16.08.2009).

сальтирующих песчинок (рис. 2). Представлены результаты статистического анализа данных скоростной видеосъёмки. Получен вертикальный профиль счётной концентрации сальтирующих песчинок N в слое от 0 до 40 мм с разрешением по высоте 2 мм (рис. 3), который с удовлетворительной точностью аппроксимируется экспонентой

$$N(z) = N_0 \exp(-z/z_*),$$
 (1)

где масштаб высоты $z_* = 7$ мм и N_0 - константа.

По данным скоростной видеосъёмки обнаружены квазипериодические флуктуации концентрации сальтирующих песчинок, которые вносят заметный вклад в спектральную плотность мощности флуктуаций (рис. 4). Наблюдаемый в диапазоне частот примерно от 100 до 200 Гц максимум может быть обусловлен влиянием на интенсивность сальтации взаимодействия порывов ветра с мелкой рябью на песчаной поверхности.



Рис. 3. Вертикальный профиль концентрации сальтирующих песчинок в слое от 0 до 40 мм (заказник "Пески Берли", 16.08.2009).



Рис. 4. Спектральная плотность мощности флуктуаций (1) суммарной концентрации песчинок, 2 и 3 – степенные аппроксимации, 4 – мода квазипериодических вариаций концентрации (заказник "Пески Берли", 16.08.2009).

По данным синхронных измерений параметров сальтации и характеристик аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы получено

регрессионное соотношение между счетными концентрациями частиц аэрозоля на высоте 10 см и сальтирующих песчинок на высоте 3 см.

В третьей главе рассмотрена задача моделирования траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях.

Для траекторий песчинок с максимальной высотой полёта больше 4 – 5 мм анализировалось влияние на перемещение песчинки в воздухе силы тяжести \overline{F}_{g} и силы аэродинамического сопротивления \overline{F}_{D} :

$$m_p \overline{a}_p = \overline{F}_g + \overline{F}_D, \qquad (2)$$

где m_p и \bar{a}_p - масса и ускорение песчинки. В случае вращающихся песчинок необходимо учитывать также силу Магнуса \bar{F}_M :

$$a_p \overline{a}_p = \overline{F}_g + \overline{F}_D + \overline{F}_M.$$
(3)

Сила аэродинамического сопротивления

$$\overline{F}_{D} = \frac{1}{2} C_{p} \rho A \overline{V}_{p} | \overline{V}_{p} |, \qquad (4)$$

где ρ - плотность воздуха, $A = \frac{\pi D_p^2}{4}$ - площадь поперечного сечения песчинки в приближении однородных сферических частиц и D_p - эквивалентный аэродинамический диаметр песчинки, $\overline{V_p}$ – скорость перемещения песчинки относительного воздушного потока. При моделировании переноса песчинок использовалась, главным образом, аппроксимация

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \,\text{Re}_p^{2/3}), \qquad (5)$$

где $\operatorname{Re}_{p} = D_{p} |\overline{V}_{p}| v^{-1}$ - число Рейнольдса для песчинки и v - кинематическая вязкость. Сила тяжести $\overline{F}_{g} = m_{p} \overline{g}$, где \overline{g} - ускорение свободного падения, а масса песчинки $m_{p} = \frac{\pi D_{p}^{3} \rho_{p}}{6}$ (ρ_{p} - плотность вещества песчинки). При расчётах было принято значение $\rho_{p} = 2.65 \cdot 10^{3}$ кг/м³ (кварцевый песок).

Выражение для силы Магнуса имеет вид

$$\overline{F}_{M} = C_{m} \cdot \frac{\pi}{8} \rho D_{p}^{3} (\overline{\Omega} x \overline{V}_{p}), \qquad (6)$$

где $\overline{\Omega}$ - вектор, характеризующий скорость и направление вращения, и C_m - коэффициент.

Скорость вращения песчинки меняется с течением времени по экспоненте, поскольку

$$\frac{d\overline{\Omega}}{dt} = \frac{\pi D_p^3 \rho v \overline{\Omega}}{I},\tag{7}$$

где момент инерции

$$I = 0.1\pi m_p D_p^2.$$
 (8)

Задача переноса вращающихся сальтирующих песчинок решалась для случая, когда ось вращения песчинки перпендикулярна плоскости, содержащей

траекторию песчинки. Полагая, что траектория расположена в плоскости Охz, получим систему дифференциальных уравнений

$$\frac{d^{2}x_{p}}{dt^{2}} = \frac{1+\psi}{\tau_{p}} \left\{ (u - \frac{dx_{p}}{dt}) + 0.85 \frac{\left| \vec{\Omega} \right| D_{p} (w - \frac{dz_{p}}{dt})}{\left| \vec{V}_{p} \right|} \right\}$$
(9)

$$\frac{d^{2}z_{p}}{dt^{2}} = \frac{1+\psi}{\tau_{p}} \left\{ (w - \frac{dz_{p}}{dt}) - 0.85 \cdot \frac{\left| \vec{\Omega} \right| D_{p} (u - \frac{dx_{p}}{dt})}{\left| \vec{V}_{p} \right|} \right\} - g , \qquad (10)$$

которую решаем совместно с уравнением (7). Здесь $\tau_p = \frac{\rho_p D_p^2}{18\rho v}$, $\psi(\text{Re}_p) = 0.15 \text{Re}_p^{2/3}$,

а u и w – мгновенные значения горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, $\frac{dx_p}{dt}$ и $\frac{dz_p}{dt}$ - компоненты скорости песчинки, $\frac{d^2x_p}{dt^2}$ и $\frac{d^2z_p}{dt^2}$ компоненты её ускорения. Предполагается, что точка вылета песчинки с подстилающей поверхности совпадает с началом координат. Начальные условия: $\frac{dx_p}{dt}(x=0, z=0) = V_{ox}$ и $\frac{dz_p}{dt}(x=0, z=0) = V_{oz}$, где V_{ox} и V_{oz} - компоненты скорости вылета песчинки.

Вертикальный профиль горизонтальной компоненты скорости ветра на высоте $z \ge 2z_p$ задавался в виде логарифмического профиля

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0},\tag{11}$$

где константа $\kappa = 0.4$, u_* - «мгновенная» динамическая скорость, соответствующая анализируемому участку траектории песчинки. Анализ решений обратных задач динамики сальтирующих песчинок показал, что для рассматриваемых нами траекторий целесообразно ограничится фиксированным значением $z_0 = 1$ мм. В диапазоне высот от 0 до 2 мм нами использовалась линейная аппроксимация профиля u(z):

$$u_1(z) = \frac{\ln 2}{2} \times \frac{u_*}{\kappa} \times \frac{z}{z_0} \,. \tag{12}$$

В модели предусмотрена возможность вариаций горизонтальной компоненты скорости ветра путём скачкообразного изменения параметра u_* и вариаций вертикальной компоненты скорости ветра w путём «включения» на интервале времени от t_1 до t_2 прямоугольных импульсов w.

Рассмотренная выше система уравнений решалась методом Рунге – Кутта четвертого порядка.

С помощью разработанной модели проанализировано влияние вариаций компонент скорости вылета, диаметра и начальной скорости вращения, а также вариаций параметров, определяющих горизонтальную и вертикальную компоненту скорости ветра, на траектории сальтирующих песчинок. В качестве примера на рис. 5 показаны результаты расчетов траекторий невращающихся

сальтирующих песчинок с размерами от 50 до 500 мкм (модуль скорости вылета песчинки $V_0 = 1$ м/с, угол вылета $\alpha = 90^\circ$, $u_* = 0.4$ м/с, $z_0 = 1$ мм).

Влияние вариаций начальной скорости вращения на траекторию сальтирующей песчинки проиллюстрировано на рис. 6. ($D_p=250$ мкм, $V_0=1$ м/с, $\alpha=45^{\circ}$, $u_*=1.0$ м/с, $z_0=1$ мм)



Рис. 5. Влияние вариаций диаметра на траектории сальтирующих песчинок.

Разработанная модель позволяет учитывать вариации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра во время полета песчинки. На рис. 7. проиллюстрировано влияние на траекторию сальтирующей песчинки $(D_n = 100 \text{ мкм})$ $V_0 = 1 \text{ M/c},$ $\alpha = 45^{\circ}$. $u_* = 0.4$ м/с, $z_0 = 1$ мм; без изменения w(1), w=-0.2 M/c (2), +0.2 M/c (3),+0.3 м/с (4)) скачка вертикальной компоненты скорости ветра *w* в точке А начальной траектории.



Рис. 6. Влияние вариаций начальной скорости вращения ω на траектории сальтирующих песчинок.



Рис. 7. Влияние скачка вертикальной компоненты скорости ветра *w* после прохождения песчинки через точку "А" на траекторию сальтирующей песчинки.

B рассмотрена обратная четвертой главе задача динамики сальтирующей песчинки. По начальному участку траектории оцениваются вертикальная и горизонтальная компоненты скорости вылета сальтирующей песчинки с подстилающей поверхности. На втором этапе по более длинному участку траектории оцениваются эффективный аэродинамический диаметр D_p песчинки параметр характеризующий вертикальный И u_* . профиль горизонтальной компоненты скорости ветра. На последующих этапах оцениваются возможные изменения параметра и_{*} и вариации вертикальной компоненты скорости ветра *w*. После этого уточняются полученные оценки динамических параметров по наблюдаемой траектории.

На рис. 8а,6 приведены примеры траекторий (1 и 2) невращающихся сальтирующих песчинок. Модельная траектория 3 на рис. 8а ($D_p = 110$ мкм, $V_{ox} = 0.82$ м/с, $u_* = 0.93$ м/с, $z_0 = 1$ мм) удовлетворительно согласуется с



Рис. 8. Пример решения обратной задачи динамики сальтирующей песчинки: 1 и 2 – наблюдаемые траектории; 3 – модельная траектория с параметрами $D_p = 110$ мкм, $V_{0x} = 0.17$ м/с и $V_{0z} = 0.82$ м/с, $u_* = 0.93$ м/с, $z_0 = 1$ мм; 4 – модельная траектория с параметрами $D_p = 65$ мкм, $V_{0x} = -0.1$ м/с и $V_{0z} = 1.50$ м/с, $u_* = 0.69$ м/с, А – момент включения "прямоугольного импульса вертикальной скорости ветра" w = -1.0 м/с, В – момент выключения импульса.

наблюдаемой траекторией 1 (расстояния между соответствующими точками наблюдаемой и модельной траекторий не превышают 1 мм).

Наблюдаемую траекторию 2 (рис. 8б) не удается объяснить в предположении стационарности поля ветра в приповерхностном слое атмосферы. Удовлетворительно согласуется с наблюдаемой траекторией 2 модельная траектория 4 ($D_p = 65$ мкм, $V_{ox} = -0.1$ м/с, $V_{oz} = 1.50$ м/с, $z_0 = 1$ мм), для которой при постоянном значении $u_* = 0.69$ м/с пришлось учитывать наличие скачка вертикальной компоненты скорости ветра с амплитудой w = -1.0 м/с на участке траектории между точками А и В.

В ветровых каналах при оценке влияния эффекта Магнуса на траектории сальтирующих песчинок информации достаточно, поскольку известен вертикальный профиль скорости ветра. Для условий наблюдения траекторий на опустыненных территориях обратная задача динамики сальтирующей песчинки становится недоопределенной. Дополнительная информация в этом случае может быть получена при восстановлении траектории группы из двух – трёх синхронно сальтирующих песчинок.

Ha рис. 9. приведён пример восстановления траекторий трёх сальтирующих песчинок (1, 2 и 3), вылетающих с подстилающей поверхности практически синхронно (в пределах интервала около 5 мс). Наблюдаемая траектория 1 (рис. 9а) удовлетворительно согласуется с восстановленной траекторией 4 (D_p = 125 мкм, V_{ox} = 1.0 м/с, V_{oz} = 0.68 м/с, z_0 = 1 мм, u_* = 0.38 м/с), а траектория 2 (рис. 9б) с восстановленной траекторией 5 ($D_p = 115$ мкм, $V_{ox} = 0.81$ м/с, $V_{oz} = 0.65$ м/с, $z_0 = 1$ мм, $u_* = 0.38$ м/с). Отсюда следует, что для наблюдаемой траектории 3 (рис. 9в) на начальном участке полёта длительностью около 45 мс известен параметр $u_* = 0.38$ м/с. Модельная траектория 6 ($D_p = 112$ мкм, $V_{ox} = 0.09$ м/с, $V_{oz} = 0.53$ м/с, $z_0 = 1$ мм, $u_* =$ 0.38 м/с), которая на начальном участке хорошо согласуется с наблюдаемой траекторией 3, затем начинает сильно отклоняться от неё. Модельная



Рис. 9. Пример восстановления одновременно зарегистрированных трех траекторий (1, 2, 3). 4 – модельная траектория: $D_{\nu} = 125$ мкм, $V_{0x} = 1.0$ м/с и $V_{0z} = 0.68$ м/с, $u_* = 0.38$ м/с. 5 – модельная траектория: $D_p = 115$ мкм, $V_{0x} = 0.81$ м/с и $V_{0z} = 0.65$ м/с, $u_* = 0.38$ м/с. 6 – модельная траектория: $D_p = 112$ мкм, $V_{0x} = 0.09$ м/с и $V_{0z} = 0.53$ м/с, $u_* = 0.38$ м/с. 7 – модельная траектория: учтено вращение против часовой стрелки с частотой 450 Гц. 8 – модельная траектория: кроме вращения песчинки учтены изменения в точке A $u_* = 0.35$ м/с и w = -0.32 M/c.



траектория 7, при расчёте которой учтено вращение песчинки с частотой 450 Гц против часовой стрелки, согласуется с наблюдаемой траекторией на более длинном её участке. Наилучшим образом с наблюдаемой траекторией 3 согласуется модельная траектория 8, при расчёте которой было учтено не только вращение песчинки, но и изменения горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра ($u_* = 0.35$ м/с, w = -0.32 м/с) в точке A на (рис. 9в).

Пятая глава посвящена исследованию процесса выноса частиц аэрозоля с опустыненных территорий. На опустыненных территориях в Астраханской обл. выполнены измерения флуктуаций дифференциальных счётных

концентраций частиц аэрозоля (рис. 10) при воздействии ветропесчаного потока подстилающую на поверхность. Показано, что флуктуации концентрации частиц аэрозоля в разных диапазонах размеров сравнительно тесно коррелируют друг С другом (коэффициенты корреляции находятся в В диапазоне OT 0.747 ДО 0.912). диапазоне размеров частиц от 0.5 до 5.0 мкм восстановлены функции распределения размерам частиц по фоновой генерируемой И на



Рис. 10. Флуктуации счетных концентраций частиц аэрозоля с размерами 0.5-0.7 мкм (1) и 1.0-1.5 мкм (2) (заказник "Пески Берли", 14.08.07)

подстилающей поверхности компонент аэрозоля.

По данным синхронных измерений флуктуаций счетных концентраций частиц аэрозоля и турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра в приземном слое атмосферы восстановлены счётные вертикальные турбулентные потоки аэрозоля в квазистационарных условиях $F_i = \overline{N'_i w'}$, где N'_i - флуктуации концентрации частиц аэрозоля в *i*-ом диапазоне размеров и w' – пульсации вертикальной компоненты скорости ветра (черта обозначает осреднение по времени) и массовые потоки аэрозоля $\Phi_i = m_i F_i$, где m_i - соответствующие средние массы частиц аэрозоля (табл. 1).

Получен дневной ход скорости выноса или нормированного турбулентного потока частиц с подстилающей поверхности

$$W_a = \frac{\overline{N'w'}}{\overline{N}},\tag{14}$$

где \overline{N} и N' - средние значения и флуктуация суммарной счётной концентрации частиц аэрозоля. На рис. 11 представлены результаты определения W_a по данным измерений 23.08.2011 на песчаной территории вблизи р. Волга.

Табл. 1. Вертикальные счетные F_i и массовые Φ_i турбулентные потоки аэрозоля (песчаная территории вблизи р. Волга, 23.08.11), а также скорости выноса аэрозоля W_a .

| Время | Турбулентные потоки аэрозоля F _i , см ⁻² с ⁻¹ с размерами частиц: | | | | | | | Турбулентные потоки аэрозоля Φ_i , 10^{-2} мкг м ⁻² с ⁻¹ с размерами частиц: | | | | | | | Скорость |
|-------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | >0.5 мкм | 0.5- 0.7 МКМ | 0.7- 1.0 мкм | 1.0- 1.5 мкм | 1.5- 2.0 мкм | 2.0- 3.0 мкм | 3.0- 5.0 мкм | >0.5 мкм | 0.5- 0.7 мкм | 0.7- 1.0 мкм | 1.0- 1.5 мкм | 1.5- 2.0 мкм | 2.0- 3.0 мкм | 3.0- 5.0 мкм | аэрозоля W _a , см/с |
| 11:30 | 1.94 | 0.68 | 0.57 | 0.42 | 0.16 | 0.10 | 0.02 | 5.29 | 0.15 | 0.36 | 0.85 | 0.91 | 1.58 | 1.43 | 3.20 |
| 12:50 | 3.94 | 1.38 | 1.19 | 0.87 | 0.30 | 0.18 | 0.03 | 9.26 | 0.31 | 0.76 | 1.78 | 1.71 | 2.86 | 1.84 | 4.89 |
| 13:50 | 4.13 | 1.26 | 1.26 | 1.01 | 0.37 | 0.20 | 0.03 | 10.76 | 0.29 | 0.81 | 2.06 | 2.06 | 3.24 | 2.31 | 5.46 |
| 14:30 | 3.94 | 1.10 | 1.15 | 1.03 | 0.38 | 0.23 | 0.04 | 11.71 | 0.25 | 0.74 | 2.11 | 2.11 | 3.78 | 2.71 | 5.35 |
| 15:10 | 4.20 | 1.19 | 1.27 | 1.06 | 0.42 | 0.22 | 0.04 | 11.81 | 0.27 | 0.82 | 2.17 | 2.35 | 3.57 | 2.63 | 5.34 |
| 16:40 | 1.40 | 0.40 | 0.44 | 0.35 | 0.12 | 0.07 | 0.01 | 3.81 | 0.09 | 0.28 | 0.71 | 0.69 | 1.18 | 0.85 | 1.65 |
| 17:30 | 1.07 | 0.31 | 0.32 | 0.27 | 0.11 | 0.06 | 0.01 | 3.02 | 0.07 | 0.21 | 0.54 | 0.59 | 1.00 | 0.61 | 1.52 |

Разработана методика и подготовлен аппаратурный комплекс для определения скорости выноса аэрозоля градиентным методом

$$W_a^* = \frac{2\kappa U_* (N_2^{(g)} - N_1^{(g)})}{(N_2^{(g)} + N_1^{(g)}) \ln \frac{z_2}{z_1}},$$
(15)

где $\kappa = 0.4, U_*$ - динамическая скорость в приземном слое атмосферы, $N_2^{(g)}$ и $N_1^{(g)}$ - счётные концентрации частиц аэрозоля с размерами больше 0.5 мкм на высотах $z_1 = 0.5$ м и $z_2 = 1.5$ м. Пример результатов синхронных измерений (26.09.2013 на опустыненной территории вблизи р. Волга) скорости выноса частиц аэрозоля градиентным и корреляционным методами представлен на рис. 12. Видно, что результаты расчетов скорости выноса частиц аэрозоля с подстилающей поверхности градиентным и корреляционным методами методами удовлетворительно согласуются друг с другом. В среднем, определенные двумя разными методами скорости выноса аэрозоля различаются не более чем

на 30%. В отдельные моменты времени наблюдаются превышения скорости выноса аэрозоля, определяемой корреляционным методом (до двух крат).





Рис. 11. Дневной ход скорости выноса аэрозоля по данным измерений 23.08.2011 на песчаной территории вблизи р. Волга.

Рис. 12. Результаты сравнения расчетов скорости выноса аэрозоля корреляционным и градиентным методом по данным измерений 26.09.2013 на песчаной территории вблизи р. Волга.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- 1. Подготовлен аппаратурный комплекс измерения флуктуаций ДЛЯ дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля и турбулентных температуры пульсаций компонент скорости ветра И воздуха на опустыненных территориях.
- 2. Подготовлена передвижная полевая лаборатория для обеспечения экспедиционных измерений характеристик сальтации и параметров аэрозоля на опустыненных территориях.
- 3. Подготовлена система регистрации и обработки данных измерений в полевых условиях.
- 4. Подготовлен автоматизированный комплекс для измерения вертикальных турбулентных потоков аэрозоля градиентным методом.
- 5. Выполнены комплексные измерения характеристик аэрозоля, параметров сальтации и метеорологических параметров на опустыненных территориях в Астраханской обл., в том числе, в 2006 г. вблизи с. Хошеутово, в 2007 2009 гг. и в 2012 г. в Государственном заказнике «Пески Берли», и в 2010 2011 и в 2013 гг. на песчаной территории вблизи р. Волга.
- 6. Разработана методика восстановления траекторий сальтирующих песчинок по данным скоростной видеосъёмки с помощью цифровой камеры Casio Exilim EX-F1. Построены траектории сальтирующих песчинок по данным видеосъёмки в Государственном заказнике «Пески Берли» и на песчаной территории вблизи р. Волга.
- 7. Разработан алгоритм расчёта траекторий сальтирующих песчинок. Подготовлена программа и выполнены расчёты, позволившие оценить влияние вариаций входных параметров модели.
- 8. Разработана методика решения обратной задачи невращающихся сальтирующих песчинок.

- 9. Представлены результаты решения обратной задачи динамики невращающихся сальтирующих песчинок. По наблюдаемым траекториям с высотой полета больше 4-5 мм восстановлены динамические параметры сальтации песчинок: вертикальная и горизонтальная компоненты скорости песчинок подстилающей поверхности, эффективный вылета с аэродинамический диаметр песчинки, параметры, характеризующие вертикальные профили горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра на отдельных участках траектории сальтирующей песчинки.
- 10. Разработана методика решения обратной задачи динамики вращающихся сальтирующих песчинок по данным наблюдения траекторий для группы двух-трех синхронно сальтирующих песчинок, что позволяет дополнительно оценивать начальную скорость вращения песчинки.
- 11. Разработана методика И программа компьютерной обработки последовательности видеокадров большой длительности. По результатам изображений нескольких видеокадров обработки на тысячах В приповерхностном слое атмосферы толщиной около 40 мм получено вертикальное распределение концентрации сальтирующих песчинок с разрешением 2 мм. Предложена экспоненциальная аппроксимация профиля концентрации.
- 12. В спектре флуктуаций суммарной концентрации сальтирующих песчинок в слое от 0 до 40 мм обнаружен отчетливо выраженный максимум в диапазоне частот от 100 до 200 Гц.
- 13. Проанализированы результаты измерений флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля на опустыненных территориях в Астраханской обл.. Показано, что в диапазоне размеров от 0.5 до 5.0 мкм дифференциальные счетные концентрации частиц разных размеров тесно коррелируют друг с другом.
- 14. Восстановлены функции распределения частиц по размерам для фоновой компоненты аэрозоля и аэрозоля, выносимого с подстилающей поверхности. Предложены степенные аппроксимации указанных функций распределения.
- 15. Рассчитаны счетные и массовые вертикальные турбулентные потоки аэрозоля.
- 16. Получен дневной ход скорости выноса аэрозоля с подстилающей поверхности.
- 17. Показано, что скорости выноса аэрозоля, рассчитанные с помощью корреляционного и градиентного методов, согласуются друг с другом.

Список основных публикаций по теме диссертации

В рецензируемых журналах

1. **Карпов А.В.** Флуктуации микроструктуры грубодисперсного и субмикронного аэрозоля на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21, №10. С.844-849.

- 2. Горчаков Г.И., Ермаков В.И., Копейкин В.М., Исаков А.А., **Карпов А.В.**, Ульяненко А.В. Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // Доклады АН. 2006. Т. 410, №2. С. 259 262.
- 3. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Злобин И.А., Бунтов Д.В., Соколов А.В. Исследование динамики сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Доклады АН. 2013. Т. 452, №6. С. 669-676.
- 4. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Соколов А.В., Бунтов Д.В., Злобин И.А.. Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т.25, № 06. С. 501–506.

В сборниках и других изданиях

- 5. **Карпов А.В.**, Горчаков Г.И., Соколов А.В., Бунтов Д.В., Злобин И.А. Моделирование процесса переноса песчинок на опустыненных территориях в нижнем слое сальтации // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. Санкт-Петербург: ГГО, 2012. С. 110-111.
- 6. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.** Экспериментальные исследования массопереноса и электрических процессов в ветропесчаном потоке // Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.:ГЕОС, 2008. С. 261-278.
- 7. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., **Карпов А.В.**, Злобин И.А., Соколов А.В. Сальтация песчинок в приповерхностном слое атмосферы на опустыненных территориях // Естественные и антропогенные аэрозоли. VII. Сборник трудов. Санкт Петербург: СПбГУ, 2011. С. 293 298.
- 8. **Карпов А.В.** Флуктуации дифференциальных счетных концентраций грубодисперсного аэрозоля на опустыненной территории // Аэрозоли Сибири XIV. Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 25-26.
- данных синхронных измерений 9. Карпов А.В. Анализ турбулентных пульсаций скорости ветра и флуктуаций концентраций субмикронного и на опустыненной территории грубодисперсного аэрозоля // XII молодых «Состав международная конференция ученых атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Тезисы докладов. Борок: ГО «Борок», 2008. С. 90.
- Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Аношин Б.А., Бунтов Д.В., Глядков П.С. Полевой эксперимент Харабали-2008. Исследование механизма генерации аэрозоля на опустыненной территории // XV Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2008. С. 31.
- Горчаков Г.И., Карпов А.В., Курбатов Г.А. Турбулентные потоки субмикронного и грубодисперсного аэрозоля на опустыненной территории // XV Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2008. С. 31-32.
- 12. Карпов А.В., Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Курбатов Г.А. Функция распределения частиц по размерам и вертикальные турбулентные потоки на опустыненных территориях // Междунароный симпозиум стран СНГ

«Атмосферная радиация и динамика 2009». Тезисы докладов. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2009. С. 83.

- 13. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., **Карпов А.В.**, Курбатов Г.А., Бунтов Д.В., Глядков П.С., Коновалов И.Н. Экспериментальное исследование механизма генерации аэрозоля на опустыненной территории: полевой эксперимент «Харабали 2009» // XVI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2009. С. 4.
- 14. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Курбатов Г.А., Бунтов Д.В., Бунтов Г.В., Злобин И.А., Глазов А.А., Ксенафонтов А.А. Полевой эксперимент «Волга-2010»: исследования процессов переноса в ветропесчаном потоке // XVII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2010. С. 30.
- 15. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Злобин И.А., **Карпов А.В.**, Коновалов И.Н., Соколов А.В. Экспериментальное исследование траекторий сальтирующих песчинок в полевых условиях // XVII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2010. С. 31.
- 16. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Курбатов Г.А., Бунтов Д.В., Бунтов Г.В., Злобин И.А., Глазов А.А., Ксенафонтов А.А. Исследование динамических и электрических процессов в ветропесчаном потоке // VII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт Петербург: СПбГУ, 2010. С. 20.
- 17. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А., Соколов А.В. Экспериментальное исследование процессов переноса на опустыненных территориях // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2011). Тезисы докладов.. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2011. С. 124-125
- 18. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Бунтов Д.В., Злобин И.А., Соколов А.В. Исследование процесса переноса сальтирующих песчинок: эксперимент и численное моделирование // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН. 2011. С. 35-36.
- 19. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А., Злобин И.А. Полевой эксперимент «Волга-2011»: комплексное исследование процессов переноса в ветропесчаном потоке // XVIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2011. С. 36.
- 20. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Соколов А.В. Обнаружение эффекта резонансной сальтации на опустыненной территории // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2012. С. 40.
- 21. Карпов А.В. Скорость выноса субмикронного и грубодисперсного аэрозоля с опустыненных территорий: методика и результаты измерений // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2012. С. 41.
- 22. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Злобин И.А., Курбатов Г.А., Соколов А.В. Исследование процессов переноса в

ветропесчаном потоке на опустыненных территориях (2009-2011 гг.) // VIII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт - Петербург: СПбГУ, 2012. С. 23.

- 23. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Соколов А.В., Злобин И.А., Бунтов Д.В. Прямые и обратные задачи динамики сальтирующих песчинок // VIII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт Петербург: СПбГУ, 2012. С. 24.
- 24. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Соколов А.В. Оценка влияния эффекта Магнуса на траектории сальтирующих песчинок // VIII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт Петербург: СПбГУ, 2012. С. 26.
- 25. Карпов А.В. Измерение скорости выноса аэрозоля с опустыненных территорий // VIII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт Петербург: СПбГУ, 2012. С. 51.
- 26. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Бунтов Д.В., Курбатов Г.А. Турбулентные потоки аэрозоля на опустыненных территориях // Международная конференция "Турбулентность, динамика атмосферы и климата". Тезисы докладов. М.: ИФА им. А.М. Обухова РАН, 2013. С. 19.
- 27. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Бунтов Д.В. Процессы переноса в ветропесчаном потоке // Международная конференция "Турбулентность, динамика атмосферы и климата". Тезисы докладов. М.: ИФА им. А.М. Обухова РАН, 2013. С. 103.
- 28. Gorchakov G.I., **Karpov A.V.**, Kopeikin V.M., Buntov D.V., Kurbatov G.A. Transfer Process Investigation in Windsand Flux: New Results // International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics». Proceedings. Saint-Peterburg: SPSU, 2013. P. 72.
- 29. Горчаков Г.И., **Карпов А.В.**, Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А., Соколов А.В. Экспериментальное и теоретическое исследование механизма сальтации на опустыненных территориях // XX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН, 2013. С. 40.
- 30. **Карпов А.В.** Измерения турбулентных потоков субмикронного и грубодисперсного аэрозоля на опустыненной территории в Астраханской области // XX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск: ИОА СО РАН. 2013. С. 31.