

УДК: 551.510.522, 551.510.42, 551.515.6, 532.526.4, 532.527

## ОРГАНИЗОВАННАЯ ВАЛИКОВАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ И ПЕРЕНОС МИНЕРАЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

© 2019 г. Н. В. Вазаева<sup>1,2\*</sup>, О. Г. Чхетиани<sup>1</sup>, Л. О. Максименков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017 Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

\*e-mail: vazaevanv@ifaran.ru

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

Принята к печати 28.11.2018 г.

Проводится исследование мезомасштабной валиковой циркуляции и ее транспортных свойств в атмосферном пограничном слое (АПС). С использованием модели WRF–ARW рассматривается характерный эпизод 28 июля 2007 г. в Калмыкии, охваченный наблюдениями экспедиции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Отмечается развитие циркуляции, с существенной асимметрией по положительным и отрицательным компонентам поля скорости и спиральности. Квазидвумерные валиковые структуры отмечаются интенсификацией захвата и аккумуляции пыли, поднимающейся с подстилающей поверхности, и, наряду с интенсивными вихрями с вертикальной осью, являются существенным источником примесей в атмосфере. Захваченный мелкодисперсный аэрозоль способен переноситься на большие расстояния и образовывать аэрозольные слои.

**Ключевые слова:** атмосферный пограничный слой, мезомасштабная циркуляция, асимметрия, численное моделирование, спиральность, транспорт аэрозоля, аэрозольные слои.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555217-31>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Организованные движения в атмосферном пограничном слое (АПС) играют существенную роль в процессах переноса тепла, влаги, импульса, пыли и других субстанций. Особую роль здесь играют квазипараллельные валиковые структуры — упорядоченные спиралевидные вихри с горизонтальной осью или продольные валы. По оценкам [1, 2] квазипараллельные валиковые структуры обеспечивают от 20 до 60% всего тепло-массопереноса через АПС.

Возникновение продольных валов чаще всего является следствием гидродинамических неустойчивостей в АПС, в том числе и развития конвективной неустойчивости при умеренных ветрах (2–3.5 м/с) [3–7]. Квазидвумерные вихри могут распространяться на всю высоту АПС, достигая горизонтального масштаба (поперек вала) в 3–5 км и существовать на протяжении

нескольких дней [8–11]; а конвективное движение воздуха на границах валов при наличии достаточной влажности формирует облака, вытянутые в так называемые «облачные улицы» и хорошо визуализируемые на спутниковых снимках [6]. В случае отсутствия облаков валики могут регистрироваться с помощью SAR (satellite-borne synthetic aperture radar) радаров, позволяющих получить карты поверхностных ветров с разрешением 1 км [8, 12]. Угол между продольной осью валов и направлением геострофического ветра по наблюдениям обычно составляет 10°–20°. Линейная конвекция часто характерна для высоких широт, однако схожую полосчатую структуру можно наблюдать в пограничном слое развитого тропического урагана [1, 8, 13–17], в средней полосе России над однородным лесным пологом вследствие развития неустойчивости [18] и т. д.

Изучение механизма генерации валиков началось еще в 1960-х годах, когда был проведен

линейный анализ устойчивости нейтрально стратифицированного АПС [3, 19]. Упрощенный нелинейный анализ устойчивости был выполнен в [4, 20, 21]. По наиболее быстрорастущей моде предсказывались характеристики валиков—масштаб, связанные с длиной волны, угол ориентации валиков относительно геострофической скорости, значения компонент скорости в валиках, каскад энергии, влияние стратификации, бароклинности атмосферы [12]. Было получено объяснение механизму образования вторичной циркуляции, находящейся в равновесии с основным потоком. При этом реально наблюдаемые периоды валиков и соотношение их горизонтальных и вертикальных масштабов оказываются нередко много больше предсказанных теорией значений. Также есть трудности в определении амплитудных характеристик когерентных структур в АПС.

Детальное исследование валиковой циркуляции при различных условиях проводилось в [7, 22–24]. Анализ нелинейной задачи в диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 400 проводился в [25], где в качестве модели исследования использовалась квазидвумерная двухмасштабная численная модель мезомасштабных процессов. Такая модель является полезной основой для гидродинамических исследований, стабильно демонстрирует появление продольных вихрей и позволяет непосредственно сфокусироваться на изучении параметров когерентных структур. Подробное описание модели, варианты использования даны в [25]. Помимо квазидвумерной модели распространено прямое численное моделирование (DNS) [26, 27] и вихреразрешающее моделирование (LES) [28–34]. Получение адекватной картины распределения когерентных структур в DNS-моделировании [26, 27] затруднено — небольшие трехмерные возмущения приводят к неустойчивости и разрушению спиралевидных вихрей. LES-моделирование до недавнего времени [28, 29] также не приводило к явной картине валиковой циркуляции вследствие недостаточной детализации сетки и сложности «попадания» на неустойчивые моды. Благодаря развитию различных мезомасштабных моделей (WRF, RAMS и др.), в частности, включению новых параметризаций, стало возможным моделирование продольных вихрей в АПС [31–34], при определенном соотношении глубины пограничного слоя и масштаба длины Мони́на—Обухова, конвективные ячейки Рэлея—Бенара трансформируются в валиковую циркуляцию [30, 31, 33]. Есть опасность возникновения при детализи-

рованных расчетах т. н. сильно растущих «оптимальных возмущений» [12], приводящих к перманентной генерации стриков — короткоживущих, мелкомасштабных, расположенных близко к земле быстро чередующихся продольных валиков [12, 29, 35–37], устойчивость которых еще недостаточно изучена. Соответственно в данном исследовании LES-моделирование не проводится на мелкой сетке, а наилучшие результаты получаются при горизонтальном шаге сетки, равном 150–100 м. Такое требование также обусловлено ограничением расчетных машинных мощностей и необходимостью превышения размеров расчетной области размерам когерентных структур, что позволило проанализировать взаимное влияние различных типов неустойчивостей и отметить существование асимметрии полей скорости и спиральности внутри циркулирующих потоков и проследить путь захваченных валиками частичек пыли, стремящихся к образованию аэрозольных слоев.

Исследование продольных вихрей тесно связано с понятием спиральности — скалярного произведения поля скорости и завихренности [38–45], поскольку турбулентные движения в АПС обладают ненулевой спиральностью в связи с совместным действием турбулентного трения и силы Кориолиса.

В присутствии квазипараллельных валиковых структур в конвективном пограничном слое весьма заметным оказывается общее количество поднимаемой пыли [46–51], поскольку, развивающиеся на их фоне мезомасштабные и субмезомасштабные конвективные и вихревые движения могут приводить к локальным превышениям пороговой скорости ветра, и, как следствие, инициировать кратковременно в отдельных областях сальтацию пыли [52, 53] и последующий ее транспорт на большие расстояния. Когда скорость ветра превышает 5 м/с, тонкодисперсный аэрозоль легко переходит в атмосферу, поднимается на значительную высоту и может длительное время находиться в воздухе, что в итоге может приводить к образованию аэрозольных слоев.

Блестящий анализ взаимодействия вихрей с частицами был выполнен, в частности, Н.Е. Жуковским в 1911 г., при рассмотрении задачи о формировании снежных заносов и заилению рек [54]. Впоследствии вводились поправки на инерцию частицы [55], рассматривалась динамика частиц в вихревых течениях и особых точках [56, 57], концентрация частиц в пограничных слоях в каналах [58], гамильтонова

и стохастическая динамика частиц в течениях с закрученными вихревыми нитями [59]. Отмечалось, что спиральная структура течения интенсифицирует продольный транспорт примеси. Прямое численное моделирование полных уравнений атмосферного конвективного пограничного слоя в аридных условиях проводилось в [46, 60]. В рамках темы настоящей статьи представляют интерес исследования с использованием вихререзающего моделирования взвешенных пылевых слоев в когерентных структурах АПС [32, 34, 61, 62].

Процессы выноса, распределения и переноса аэрозоля, в особенности на аридных и семиаридных областях юга Европейской территории России, в большой степени определяют состав атмосферы и региональную изменчивость климата. Атмосферный пылевой аэрозоль оказывает значительное влияние на региональный и глобальный климат [63–65].

Адекватное описание данных о пространственных масштабах и других характеристиках когерентных структур; теоретическое и численное моделирование этих структур в АПС; развитие численных моделей, учитывающих процессы выноса аэрозольных частиц с подстилающей поверхности и их интенсивного переноса на дальние расстояния при участии валиковой циркуляции; формирование аэрозольных слоев в верхней части АПС; а также учет этих структур, процессов и факторов в моделях пограничного слоя, необходимы для успешного прогнозирования различных погодных явлений и представляются весьма актуальными.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ WRF-ARW И WRF-CHEM

Для исследования синоптической ситуации была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF (версия 3.9.1.1) — Weather Research and Forecasting [66, 67]. В частности, модуль WRF-LES для воспроизведения мезомасштабной вихревой циркуляции с хорошим разрешением и модель WRF-Chem для воспроизведения переноса на дальние расстояния аридного аэрозоля в верхних слоях АПС с учетом мезомасштабной вихревой циркуляции. В настоящее время открытая модель WRF является одной из наиболее универсальных и отлаженных открытых систем моделирования атмосферы. Она успешно и широко используется для метеорологического прогнозирования и исследова-

тельских целей в научных организациях и метеослужбах многих стран и продолжает непрерывно развиваться.

При расчетах использовались вложенные сетки. Вся расчетная область  $300 \times 225$  км рассчитывается на крупной сетке  $210 \times 138$  узлов по горизонтали с шагом 1620 м. Вложенная область детализованного расчета  $75 \times 50$  км считается на сетке  $556 \times 355$  узлов с шагом 540 м, вложенная область (для последующего LES-моделирования)  $75 \times 50$  км — на сетке  $742 \times 607$  узлов по горизонтали с шагом 180 м. По вертикали все области имеют 35 уровней до высоты 5000 м со сгущением в пограничном слое. В качестве начальных и граничных данных использованы поля реанализа GFS. Расчет начат за сутки до изучаемого момента. Одному шагу расчета по времени для крупной области соответствует 3 шага расчета по времени для вложенной области. Временной интервал между начальными полями метеопараметров глобального операционного анализа GFS на сетке  $1 \times 1$  градус равен 6 часам. Координаты центра расчетной области соответствуют  $45.33^\circ$  с. ш. и  $46.04^\circ$  в. д. Отметим, что мезомасштабная циркуляция начинает неплохо воспроизводиться на сетках с горизонтальным масштабом не более 500 м. В этом случае на поперечный размер структуры приходится 5–10 сеточных узлов, что позволяет воспроизводить их основные характеристики. Более детальное воспроизведение подобных движений в пограничном слое требует разрешения на порядок больше — 50 по горизонтали и 10 м по вертикали. В настоящее время это возможно сделать в рамках WRF-LES модели. В этой модели увеличение пространственного разрешения по горизонтальным координатам является более выгодным, чем увеличение вертикального пространственного разрешения. Уменьшение пространственного масштаба менее 50 м практически не улучшает никакие аспекты гидрометеорологических состояний [68]. В настоящем случае для мезомасштабных когерентных структур определено оптимальное пространственное разрешение примерно 100–180 м.

Для параметризации пограничного слоя использована схема Меллора–Ямады–Янича, промежуточная Shin-Hong scheme и LES параметризация; для параметризации приземного слоя используется теория Монины–Обухова; Rapid Radiative Transfer Model и Goddard short-wave (Two-stream multi-band scheme) выбраны для параметризации длинноволнового и коротковолнового излучения; для параметризации

турбулентности принята схема полной диффузии с использованием трехмерного метода Смагоринского и для LES-моделирования — схема простой диффузии с использованием двухмерного метода (коэффициент  $K$  определяется только с использованием горизонтальной деформации); Morrison double-Momentum scheme применена для параметризации микрофизики; Unified Noah land-surface model — для параметризации параметров земной поверхности.

WRF-Chem (версия 3.9.1.1) — версия модели WRF, которая позволяет воспроизводить характеристики газовых примесей, аэрозолей и других химических веществ совместно с метеорологическими полями в АПС [69]. Поток аэрозоля с подстилающей поверхности описывается с помощью схемы параметризации GOCART with UoC modifications dust scheme, описанной в [70–72]. При моделировании на WRF-Chem размер расчетной области должен покрывать всю протяженность квазидвумерных валов, для анализа воздействия валиковой циркуляции на характеристики эмиссии и транспортные свойства пыли. В настоящей работе горизонтальная сетка с пространственным разрешением 540 м позволяет получить результаты с достаточной степенью точности.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВАЛИКОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ ПОМОЩИ КВАЗИДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ И МОДЕЛИ WRF-ARW

Основные уравнения квазидвумерной модели для нелинейного режима развития вторичных вихревых структур в АПС, составляющие скорости среднего течения, стационарное решение на верхней границе, описание численной реализации и вычислительного алгоритма, ограничение на шаг по времени, описание кода программы на языке Fortran, описание начальных и граничных условий, уравнения для плотности энергии и спиральности валиковых структур, последовательность вычислений рассмотрены в [25]. Было отмечено развитие асимметрии продольной компоненты скорости с ростом числа Рейнольдса  $Re$  с увеличением экстремальных значений амплитуды отрицательной продольной компоненты скорости (против направления геострофического ветра) по сравнению с положительной амплитудой (по направлению ветра). А также увеличение асимметрии положительных и отрицательных значений спиральности (по и против направления геострофического ветра) с ростом  $Re$ . Амплитуды

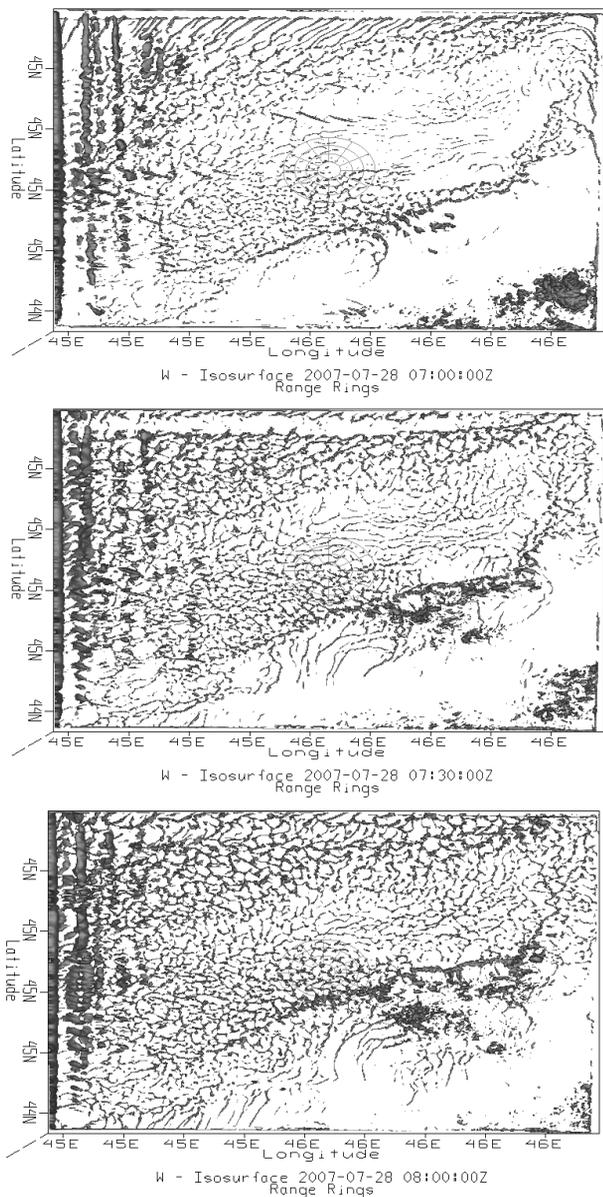
положительной составляющей спиральности превышают амплитуды отрицательной составляющей спиральности.

Модельные результаты по асимметрии подтвердились пространственно-временной разверткой данных акустического зондирования содарами для синоптической ситуации, наблюдаемой в Калмыкии 28 июля 2007 г (рис. 1) [5]. В 14:03 по московскому времени (10 UTC) наблюдается развитая мезомасштабная циркуляция. Точкой 1 обозначена точка измерения данных, угол отклонения валов от направления восток–запад:  $35^\circ$ , геострофический ветер направлен на восток–юго-восток. Пространственный период наблюдаемых облачных улиц меняется в диапазоне  $4 \div 7$  км. Высота центров валов —  $1000 \div 1100$  км. Результаты акустического зондирования по временному ходу продольной скорости вдоль валика и по высотно-временной развертке представлены на рис. 15, 16 в [25]. Хорошо видно преобладание области с отрицательными значениями продольной скорости, направленными примерно против направления геострофического ветра — наблюдается асимметрия продольной компоненты скорости. На рис. 17, 18 в [25] представлено распределение средней по высоте слою (по 29 уровням в слое 0–870 м) продольной скорости вдоль направления валов и гистограмма распределений значений продольной компоненты скорости в пределах высоты пограничного слоя на основе расчетных данных для  $Re = 300$ . Гистограмма распределений значений продольной компоненты скорости в пределах высоты пограничного слоя построена на основе расчетных данных для  $Re = 300$ .

Рассмотрим более подробно развивающуюся мезомасштабную циркуляцию в АПС. Для этого воспользуемся результатами численного моделирования в модели WRF-ARW. Особое внимание будем уделять пространственным ха-



Рис. 1. Облачные улицы над районом содарных измерений, снимок MODIS-AQUA 28 июля 2007 г., 14:03 (московское время).



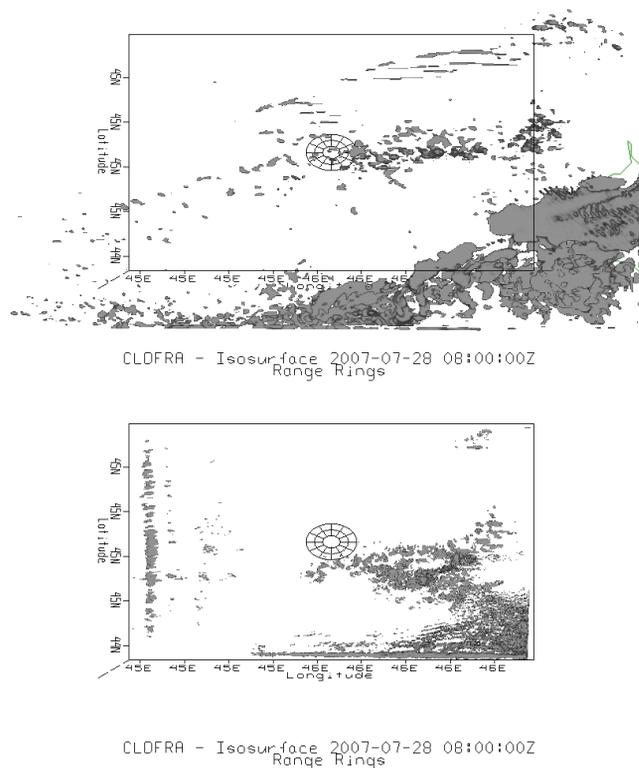
**Рис. 2.** Исоповерхности вертикальной компоненты скорости ветра,  $W = 1$  м/с, вид сверху. Концентрические окружности обозначают расположение точки наблюдений, высота области по вертикали примерно 3 км. Модель WRF-ARW 28 июля 2007 г., сверху вниз: 7UTC, 7:30 UTC и 8UTC.

рактическим получившихся структур: масштабу, периоду, асимметрии компонент скорости и спиральности.

По результатам численного моделирования на полях вертикальной скорости хорошо видна полосчатая структура — результат визуализации валиковой циркуляции (рис. 2).

Вытянутая структура облаков также подтверждает наличие валиков (рис. 3).

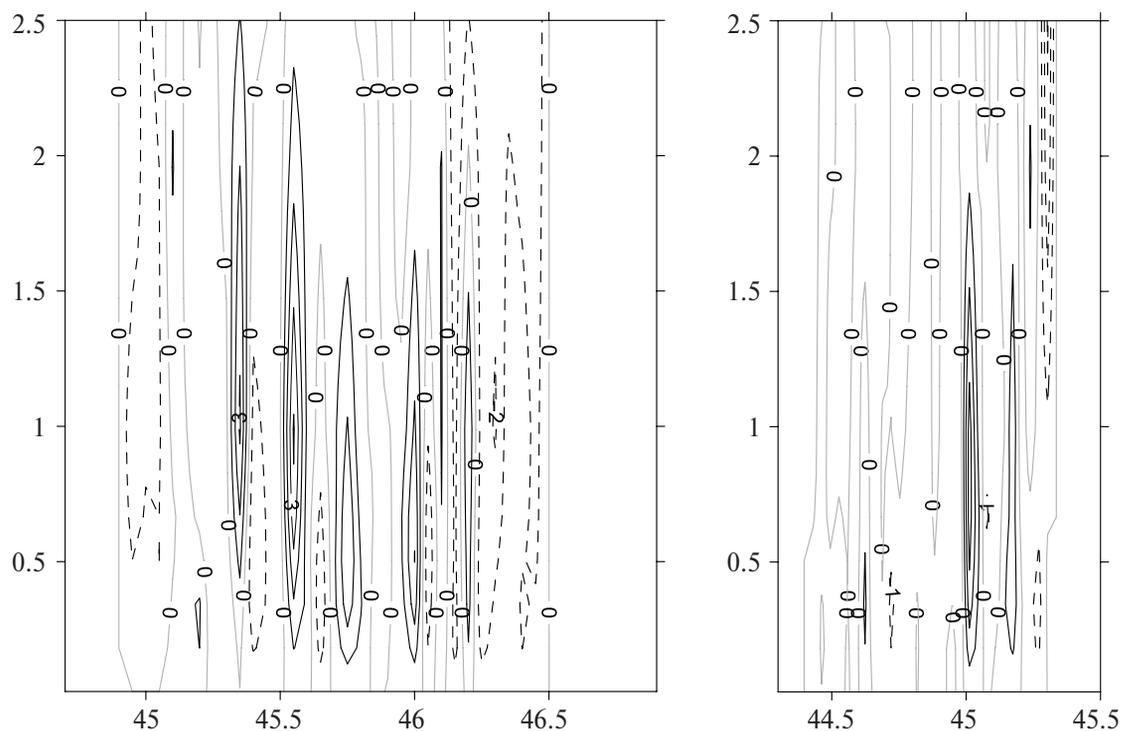
Пространственный период однонаправленных валиков оценивался по полям вертикальной скорости, построенных в широтном  $45.3^\circ$  с. ш.



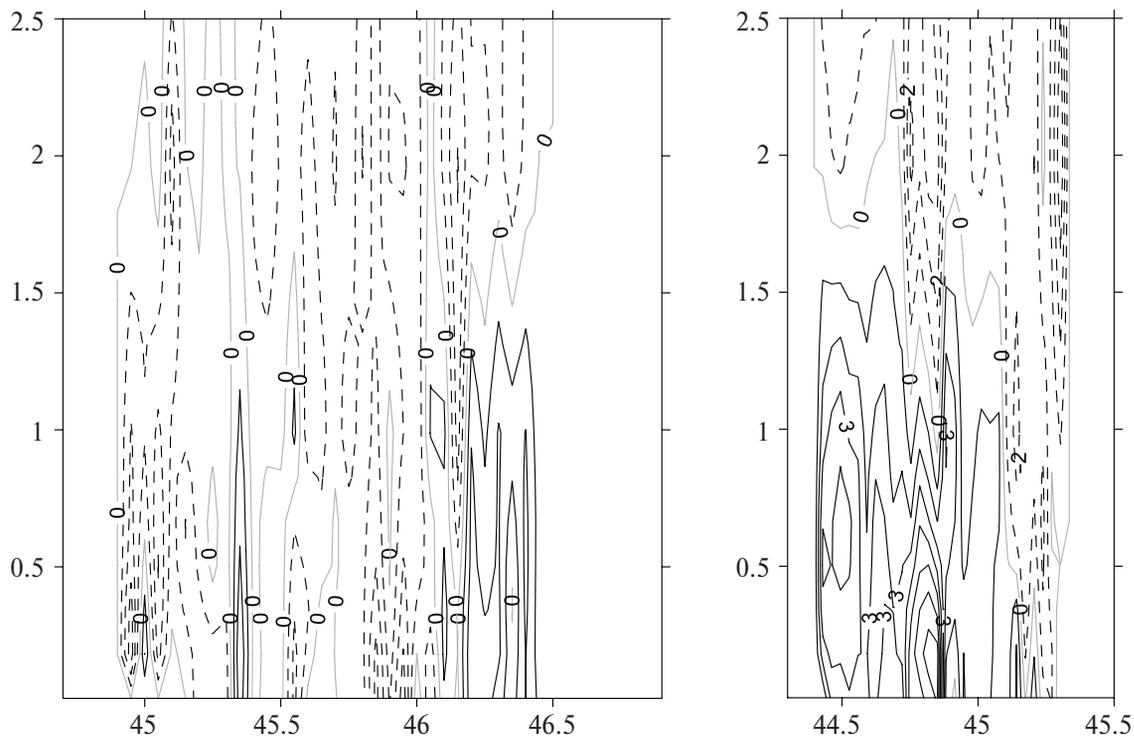
**Рис. 3.** Доля облачности над районом измерений, вид сверху. Концентрические окружности обозначают расположение точки наблюдений. Правый нижний угол расчетной области — высокая облачность, низкая — в верхней, центральной и нижней областях. Модель WRF-ARW 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки сверху вниз — 540 и 180 м соответственно.

и долготном  $46.04^\circ$  в. д. (рис. 4) разрезах, и составляет  $3 \div 5$  км. Горизонтальный масштаб в поперечном сечении —  $2 \div 3$  км, по вертикали квазидвумерные вихри могут распространяться на всю толщину экмановского пограничного слоя. Максимальная положительная и отрицательная скорость в широтном разрезе составляет 5.084 м/с и  $-4.448$  м/с соответственно; для долготного разреза — 5.692 м/с и  $-3.403$  м/с соответственно.

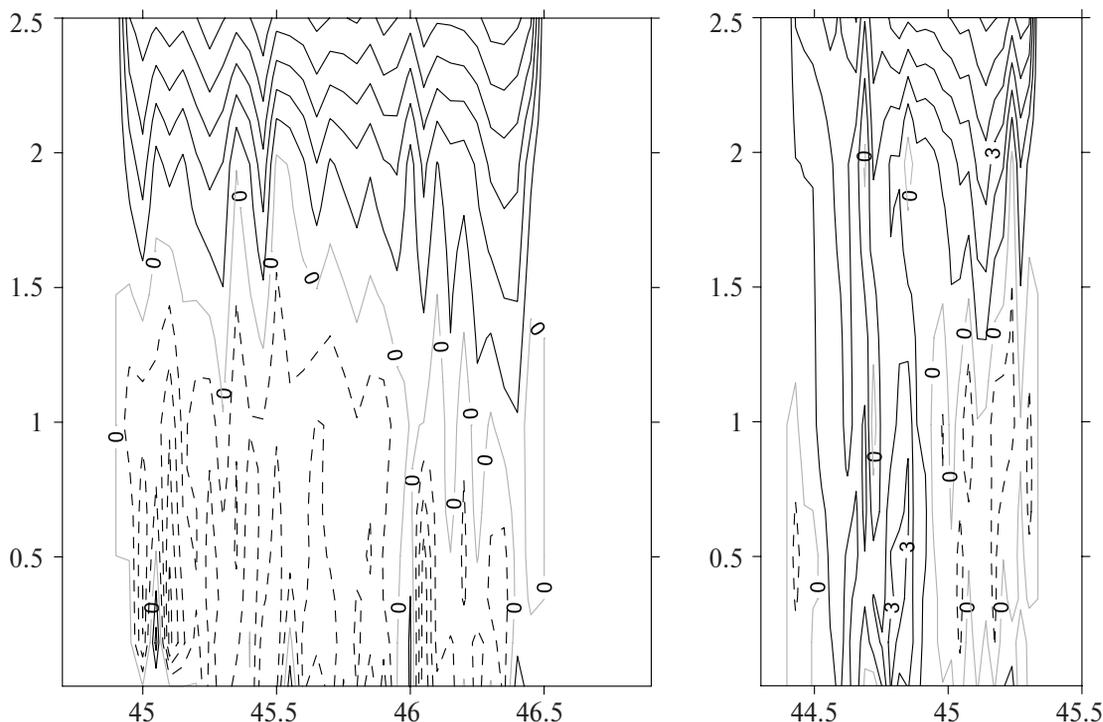
Для этих же сечений на рис. 5 и 6 представлены пространственные распределения горизонтальных компонент скорости ветра, направленных по осям, касательным к широте (рис. 5) и долготе (рис. 6). Отчетливо наблюдается асимметрия валов — для компоненты скорости, направленной касательно к широте максимальная положительная и отрицательная скорость в широтном разрезе составляет 2.831 м/с и  $-3.673$  м/с соответственно, асимметрия (разность модулей компонент скорости в области валика) горизонтальной скорости на этом сечении — 0.842 м/с; для долготного разреза мак-



**Рис. 4.** Пространственное распределение вертикальной компоненты скорости ветра по осям  $Y(\text{lat})Z$  и  $X(\text{lon})Z$ , интервал между контурами равен 1 м/с. Отрицательные значения показаны пунктирной линией, нулевые — серой сплошной. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки 180 м. По оси ординат — высота  $Z$  в км, по оси абсцисс — широта и долгота (слева направо) в градусах.



**Рис. 5.** Пространственное распределение по осям  $Y(\text{lat})Z$  и  $X(\text{lon})Z$  горизонтальной компоненты скорости ветра, направленных по оси, касательной к широте, интервал между контурами равен 1 м/с. Отрицательные значения показаны пунктирной линией, нулевые — серой сплошной. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки 180 м. По оси ординат — высота  $Z$  в км, по оси абсцисс — долгота и широта (слева направо) в градусах.

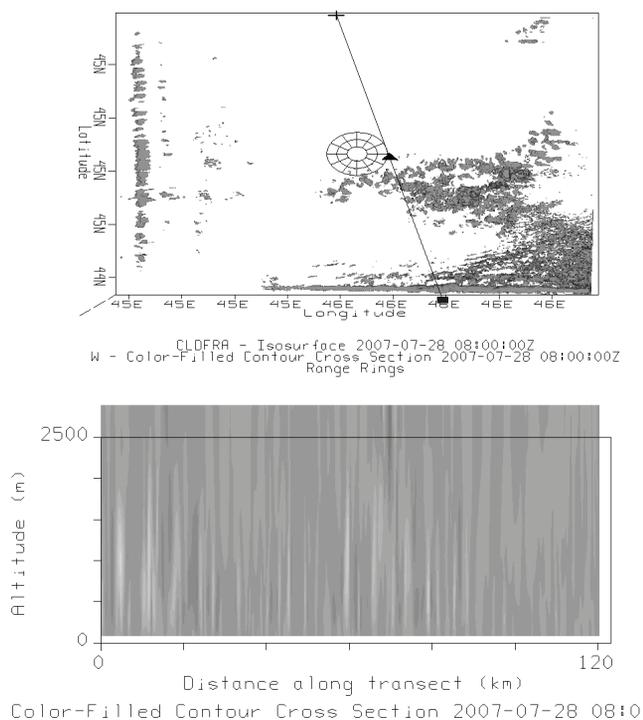


**Рис. 6.** Пространственное распределение по осям  $Y(lat)Z$  и  $X(lon)Z$  горизонтальной компоненты скорости ветра, направленных по оси, касательной к долготе, интервал между контурами равен 1 м/с. Отрицательные значения показаны пунктирной линией, нулевые — серой сплошной. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки 180 м. По оси ординат — высота  $Z$  в км, по оси абсцисс — долгота и широта (слева направо) в градусах.

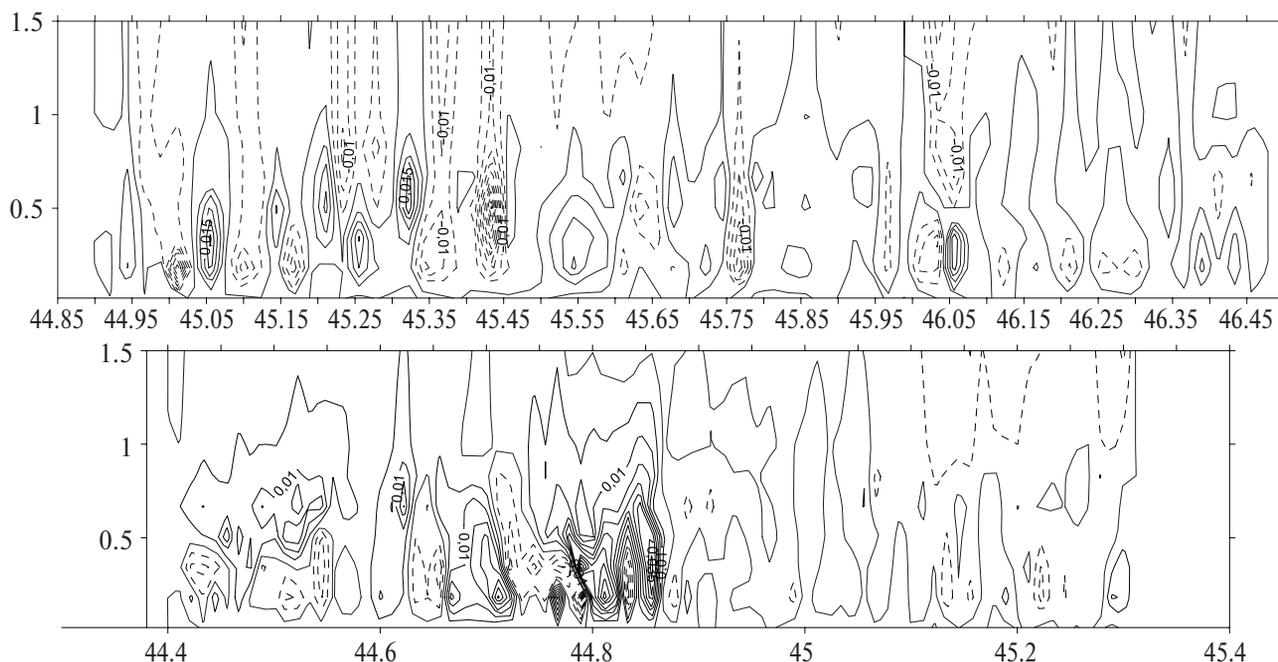
симальная положительная и отрицательная скорость равна 7.379 м/с и  $-3.908$  м/с соответственно, асимметрия — 3.471 м/с. Для компоненты скорости, направленной касательно

к долготе максимальная положительная и отрицательная скорость в широтном разрезе составляет 3.458 м/с и  $-4.242$  м/с соответственно, асимметрия горизонтальной скорости на этом сечении — 0.784 м/с; для долготного разреза максимальная положительная и отрицательная скорость равна 3.364 м/с и  $-1.716$  м/с соответственно, асимметрия горизонтальной скорости на этом сечении — 1.648 м/с. Обратный знак для асимметрии в долготном разрезе связан с преобладающим здесь вкладом от геострофического ветра, направленного на восток—северо-восток.

Для более наглядной демонстрации и упрощению оценки таких характеристик валиковой циркуляции, как асимметрия, использовались сечения, перпендикулярные оси валов. Одно из них представлено на рис. 7.



**Рис. 7.** Пространственное распределение вертикальной скорости по оси  $Z$  и по оси, приблизительно перпендикулярной оси валов (черная линия со стрелкой на верхнем рисунке). Диапазон изменения скорости примерно от  $-7$  м/с (темно-серый цвет на нижнем рисунке) до  $-6$  м/с (светло-серый цвет на нижнем рисунке). Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки 180 м. По оси ординат — высота  $Z$  в м, по оси абсцисс — расстояние вдоль наклонной кривой (верхний рисунок) в км. На верхнем рисунке представлена область расчета.



**Рис. 8.** Пространственное распределение по осям  $Y(\text{lat})Z$  и  $X(\text{lon})Z$  (сверху вниз) компоненты спиральности  $H$ , интервал между контурами равен  $0.01 \text{ м/с}^2$ . Отрицательные значения показаны пунктирной линией, нулевые — серой сплошной. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г., 8UTC. Шаг сетки  $180 \text{ м}$ . По оси ординат — высота  $Z$  в км, по оси абсцисс — долгота и широта (сверху вниз) в градусах.

Центры структур, согласно результатам моделирования, расположены примерно на высотах  $1000 \div 1200 \text{ м}$ .

В АПС в обычных условиях значимыми являются горизонтальные компоненты спиральности, существенно превосходящие ее вертикальную составляющую [42, 43, 45]:

$$\begin{aligned} H_x &= u \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ H_y &= v \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $u, v, w$  — компоненты скорости валика по осям координат  $x, y, z$ . Горизонтальные производные значительно меньше вертикальных (на 3–4 порядка), поэтому второй тип асимметрии — асимметрию спиральности проиллюстрируем по широтному разрезу для компоненты скорости  $H = H_x + H_y = v \frac{\partial u}{\partial z} - u \frac{\partial v}{\partial z}$  (рис. 8).

Максимальная положительная и отрицательная спиральность в широтном разрезе составляет  $0.0262 \text{ м/с}^2$  и  $-0.0558 \text{ м/с}^2$ , соответственно, преобладание отрицательной составляющей, асимметрия компоненты спиральности  $H$  на этом сечении —  $0.0206 \text{ м/с}^2$ . Максимальная положительная и отрицательная спиральность в долготном разрезе составляет  $0.0715 \text{ м/с}^2$  и  $-0.0382 \text{ м/с}^2$  соответственно, преобладание

положительной составляющей, асимметрия компоненты спиральности  $H$  на этом сечении —  $0.0333 \text{ м/с}^2$ . Значения спиральности оказываются близкими, к оценкам в [38] и полученным по данным акустического зондирования [45].

#### 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕЙ С ЧАСТИЦАМИ. КВАЗИДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Движение элементарного объема жидкости может быть описано уравнением Ланжевена:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$  — поле скорости в эйлеровой системе координат в точке  $\mathbf{X}$  в момент времени  $t$ ,  $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{X}, t)$  — шумовой член, отвечающий за молекулярную диффузию. Поле скорости состоит из двух членов:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v}'(\mathbf{x}, t), \quad (3)$$

где  $\mathbf{V}(\mathbf{x}, t)$  — крупномасштабное, а  $\mathbf{v}'(\mathbf{x}, t)$  — мелкомасштабное (турбулентное) поле скорости. Пренебрегая диффузией, получим уравнение переноса малых частиц:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{V}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v}'(\mathbf{x}, t) - V_g \mathbf{e}, \quad \mathbf{e} = (0, 0, 1).$$

Здесь включена скорость гравитационного оседания  $V_g$ , вектор. Для скорости оседания можно использовать соотношение, связывающее ее с размерами и плотностью частицы [73]

$$V_g(d) = \left( \frac{4\rho_p g d}{3\rho C_d(\text{Re}_t)} \right)^{1/2}, \quad \text{Re}_t = \frac{V_g d}{\nu}. \quad (4)$$

$C_d(\text{Re}_t) = \frac{24}{\text{Re}_t} (1 + 0.15 \text{Re}_t^{0.687})$  — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Рассмотрим влияние вихревых структур на процессы атмосферного переноса. В плоскости  $\{y, z\}$  структуры описываются функцией тока:

$$u_y = -\frac{\partial\psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial\psi}{\partial y}. \quad (5)$$

Скорость вдоль структуры не важна в данной постановке. Уравнения движения частиц:  $\frac{dY}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial Z}, \frac{dZ}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial Y} - V_g$ . Уравнение может быть представлено в форме:  $\frac{dY}{dt} = -\frac{\partial\psi^*}{\partial Z}, \frac{dZ}{dt} = \frac{\partial\psi^*}{\partial Y}$ , где  $\psi^* = \psi - V_g y$ .

Неявное решение

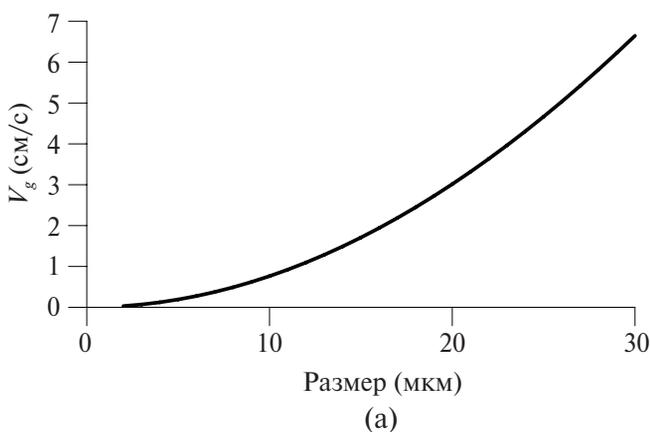
$$\psi^*(Y, Z) = \psi^*(Y_0, Z_0) = \text{const}, \quad (6)$$

где  $Y_0$  и  $Z_0$  — координаты частицы в момент времени  $t = 0$ . Для оценки эффекта крупномасштабных вихревых структур рассмотрим простейшее представление (постоянной) завихренности для валика:  $\Delta\psi = \omega = \text{const}, \psi = \frac{\omega}{2}(y^2 + (z-h)^2)$ .

Здесь полагаем, что центры горизонтальных валиков находятся на высоте  $z = h$ . Тогда уравнения движения частиц пыли:

$$\frac{dY}{dt} = -\omega Z + \omega h, \quad \frac{dZ}{dt} = \omega Y - V_g.$$

$$Y(0) = Y_0, \quad Z(0) = Z_0.$$



Откуда получим:

$$(Z-h)^2 + \left( Y - \frac{V_g}{\omega} \right)^2 = (Z_0-h)^2 + \left( Y_0 - \frac{V_g}{\omega} \right)^2. \quad (7)$$

Видно, что частицы, находящиеся в начальный момент времени в области  $(Z_0-h)^2 + \left( Y_0 - \frac{V_g}{\omega} \right)^2 \leq h^2$  не могут достичь поверхности и формируют таким образом слой, который движется вместе с потоком. Такие аэрозольные структуры могут наблюдаться в АПС [74].

На рис. 9 представлена скорость оседания  $V_g$  частиц пыли в зависимости от размера (результат расчета (4)) и время оседания  $\tau$  в часах с высоты 1 км в зависимости от размера. Частицы могут находиться в воздухе много часов, схожие результаты получены и с помощью численного моделирования на WRF-Chem и представлены в следующей части нашей статьи.

Рассмотрим перенос и захват частиц вихревыми структурами в АПС на основе полей скорости квазидвумерной модели [25] (число Рейнольдса — 250). Траектории движения частиц с медианным размером 6, 5 и 4 мкм пылевого аэрозоля показаны на рис. 10 в направлении, перпендикулярном оси валиков и на рис. 11 — вид сверху. По результатам такого совместного моделирования видно, что мелкодисперсные частицы долгое время удерживаются структурами и способны переноситься на большие расстояния. Оседание становится заметным примерно на расстояниях в 10 км.

Реальный характер движения частиц в атмосферном потоке более сложный из-за влияния частиц на турбулентные пульсации. Этот момент учитывается в модели WRF-Chem, что позволя-

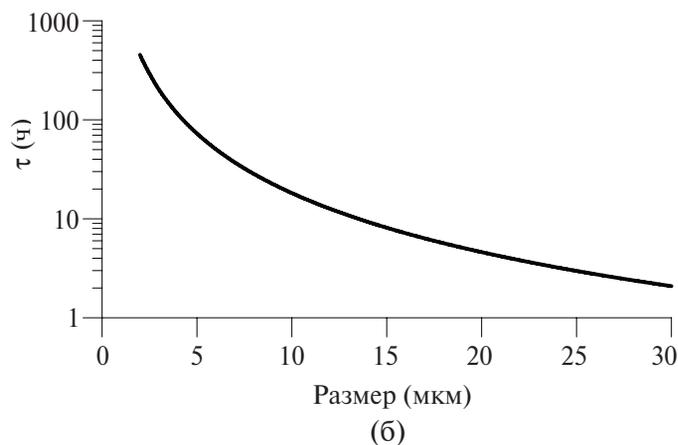
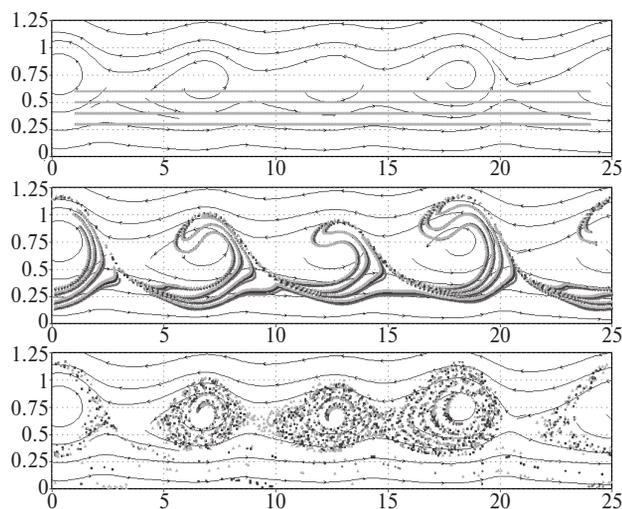


Рис. 9. а) Скорость оседания  $V_g$  частиц пыли и б) время оседания  $\tau$  с высоты 1 км в зависимости от размера частиц (результат расчета с учетом (4)).



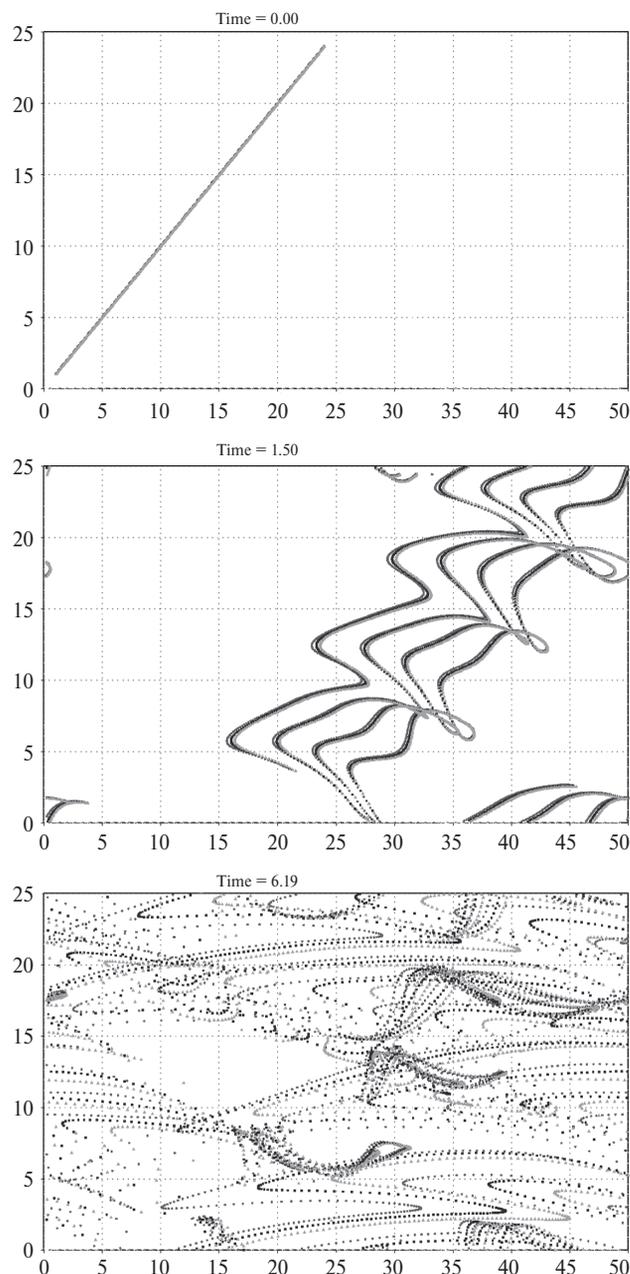
**Рис. 10.** Захват частиц аэрозоля квазидвумерными вихрями. Траектории движения частиц. Сверху вниз изображены три момента времени – начальный вброс частиц в поток, промежуточное движение, циркуляция уловленных частиц внутри валов. Темно-серыми кругами, черными квадратами и светло-серыми треугольниками обозначены, соответственно, частицы с медианным размером 6, 5 и 4 мкм. Направление, перпендикулярное оси валиков. По осям абсцисс и ординат – координаты в безразмерном виде, описание см. [25], моменты времени (сверху вниз): 0 ч, 1ч 45 мин, 35 ч 15 мин с момента начала расчета.

**Рис. 11.** Захват частиц аэрозоля квазидвумерными вихрями. Траектории движения частиц. Сверху вниз изображены три момента времени – начальный вброс частиц в поток, промежуточное движение, циркуляция уловленных частиц внутри валов. Темно-серыми кругами, черными квадратами и светло-серыми треугольниками обозначены, соответственно, частицы с медианным размером 6, 5 и 4 мкм. Вид сверху. Движение валиков происходит слева направо. По осям абсцисс и ординат – координаты в безразмерном виде, описание см. [25], моменты времени (сверху вниз): 0 ч, 1ч 30 мин, 6 ч 12 мин с момента начала расчета.

ет получить лучшее представление о характере подъема и переноса аэрозоля с подстилающей поверхности.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА WRF-CHEM

По результатам численного моделирования в WRF-Chem событие (валиковая циркуляция) наблюдалось приблизительно с 7UTC до 9UTC и оказалось сдвинуто по времени назад на 2–3 ч по сравнению с данными акустического зондирования в районе измерений (Калмыкия, 28 июля 2007 г.) и спутниковых изображений.



Анализировалась эмиссия аэрозолей в период действия квазидвумерных вихрей, поэтому блок подъема пыли работал только с 7UTC до 8UTC, а далее исследовалось эволюция облака пыли при наличие валиков в АПС. Для визуализации выбран момент времени на конец работы блока эмиссии – 8UTC.

Мезомасштабная валиковая циркуляция оказывает существенное влияние на процессы захвата и подъема частичек. Валики способны поднять пыль выше АПС, благодаря восходящим потокам воздуха. Эмиссия аэрозоля преимущественно происходит с поверхностей, расположенных под структурами. Направление

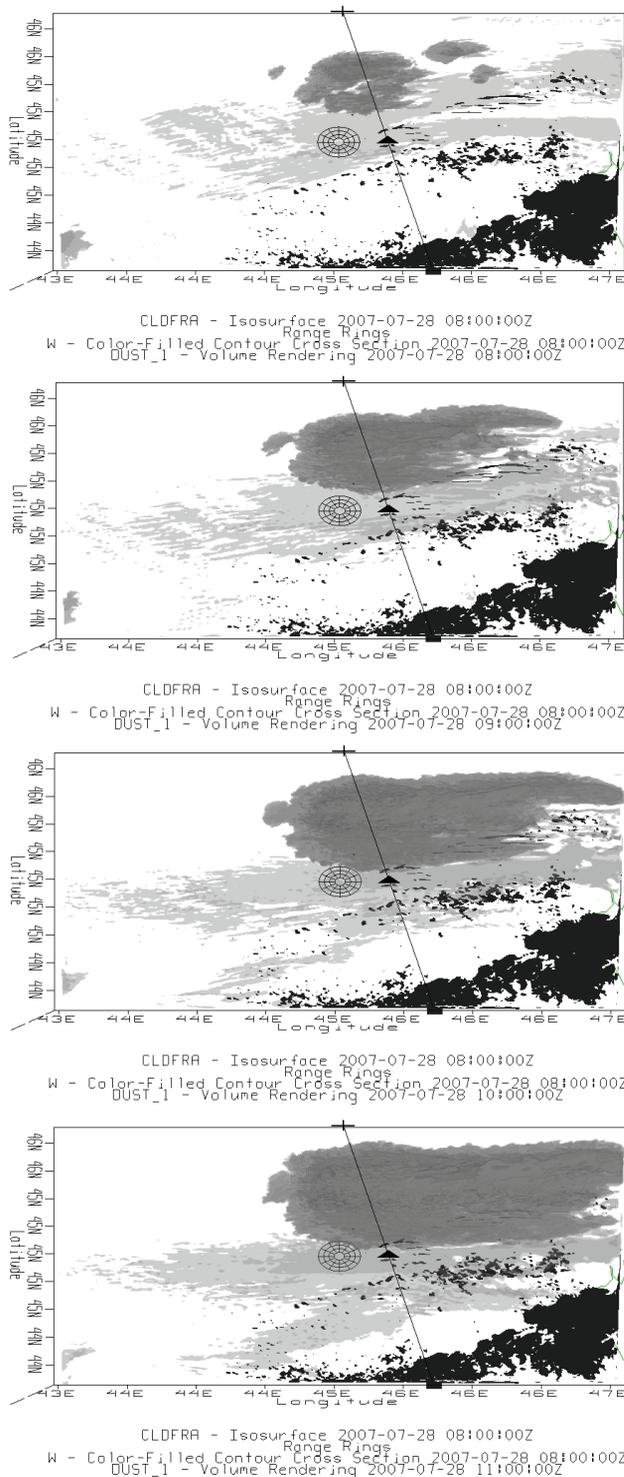
дальнейшего переноса пыли в значительной степени определяется углом отклонения валиков от геострофического ветра (см. рис. 12 для 8UTC и 9UTC) и достигает нескольких км, что видно по сдвигу пылевого облака.

Поднятое облако пыли трансформируется, вытягиваясь и перемещаясь вдоль валиков (рис. 12). Массовое содержание мелких частиц (с медианным размером до 5 мкм) сильно изменяется после разрушения валов: 0.495 мкг/кг сухого воздуха (8UTC), 0.0213 мкг/кг сухого воздуха (9UTC),  $5.4 \times 10^{-3}$  мкг/кг сухого воздуха (10UTC),  $2.2 \times 10^{-3}$  мкг/кг сухого воздуха (11UTC). В период действия валиковой циркуляции захваченные частицы долгое время находятся во взвешенном состоянии, образуя полосчатую структуру — аэрозольные слои.

Некоторое пространственное отклонение области подъема облака пыли может быть вызвано нелинейными эффектами в АПС, в частности, асимметрией скорости вихрей, расхождением размеров и периодов соседних валиков, наличием в АПС вторичной циркуляции различных пространственных масштабов — от крупномасштабных, мезомасштабных вихрей до мелкомасштабных стриков, расположенных у поверхности земли. Кроме того, исходные данные по эрозии почвы, необходимые в блоке расчета пыли в численной модели WRF-Chem в качестве начальных и граничных условий, для территории России имеют очень недостаточное расширение и требуют уточнения. Возможным путем решения этой проблемы является отказ от карт эродированности почв с последующим использованием различных методик расчета потоков эмиссии аэрозоля с подстилающей поверхности. Для условий Калмыкии перспективной является теория выноса аэрозоля при условии слабых ветров (до 4 м/с), когда высокий градиент температуры у быстро нагревающейся поверхности создает условия для формирования больших подъемных сил [75, 76]. Включение указанной модели эмиссии с поверхности полупустынных и пустынных зон в мезомасштабную модель WRF-Chem и получение результатов с хорошим разрешением является темой наших дальнейших исследований.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе развивающаяся мезомасштабная циркуляция в АПС детально исследовалась при помощи численного моделирования на модели WRF-ARW и WRF-Chem.



**Рис. 12.** Доля облачности (черным цветом) — для 8UTC; и массовое содержание минерального аэрозоля (в оттенках серого) — сверху вниз для 8UTC, 9UTC, 10UTC и 11UTC; над районом измерений, вид сверху. Концентрические окружности обозначают расположение точки наблюдений. Черная линия со стрелкой показывает направление, примерно перпендикулярное оси валиков. Модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г. Шаг сетки 540 м.

Особенности циркуляции неплохо воспроизводятся при расчетах с горизонтальным разрешением 540–180 м. Отмечается наличие асимметрии компонент скорости ветра и компонент спиральности, полученное ранее для квазидвумерной модели [25]. Для синоптической ситуации в Калмыкии в июле 2007 года асимметрия достигает значений примерно от 0.784 м/с до 3.471 м/с для горизонтальной скорости и от 0.0206 м/с<sup>2</sup> до 0.0333 м/с<sup>2</sup> для спиральности по широтному и долготному разрезам.

Моделирование захвата частиц пыли горизонтально ориентированными вихревыми структурами в квазидвумерной модели указывает на возможность захвата и длительного удержания частиц в окрестности максимальной концентрации завихренности. Долгоживущие вихревые циркуляционные системы в АПС оказываются не менее интенсивным источником транспорта примесей, чем интенсивные вихри с вертикальной осью. Частицы могут переноситься на большие расстояния — чем мельче частица, тем больше расстояние. Например, частицы с медианным размером 6 мкм начинают заметно оседать после 10-километрового «путешествия» в свободной атмосфере. Другие продолжают двигаться внутри вихрей, что приводит к образованию аэрозольных слоев.

Движение пылевых частиц в естественных условиях исследовалось с помощью модели WRF-Chem. Было получено подтверждение результатов о возможности захвата пылевых частиц организованными вихревыми структурами, продемонстрированными для простых моделей. Эмиссия аэрозоля происходит преимущественно под валами, наличие которых существенно интенсифицировало подъем пыли, в том числе, по высоте подъема. Валиковая циркуляция способна удерживать мелкодисперсный аэрозоль и образовывать взвешенные облака пыли — аэрозольные слои — протяженностью в несколько км. Подобные слои наблюдались, в частности, с борта самолета при лидарном зондировании [74].

**Источники финансирования.** Исследования выполнены при поддержке РФФИ: проекты 18-35-00600, 17-05-0116, а также Программ фундаментальных исследований Президиума РАН №№ 28, 51.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wurman J., Winslow J.* Intense Sub-Kilometer-Scale Boundary Layer Rolls Observed in Hurricane Fran. // *Science*. 1998. V. 280. № 5363. P. 555–557.
2. *Chou S.H., Ferguson M.P.* Heat fluxes and roll circulations over the western Gulf Stream during an intense cold-air outbreak. // *Boundary-Layer Meteorology*. 1991. V. 55. № 3. P. 255–281.
3. *Орданович А.Е., Паиковская Ю.В.* Влияние термической стратификации на устойчивость экмановского течения // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 1998. № 3. С. 71–75.
4. *Kaylor R.E., Faller A.* Instability of the stratified Ekman boundary layer and the generation of internal waves // *J. Atmos. Sci.* 1972. V. 29. № 3. P. 497–509.
5. *Гранберг И.Г., Крамар В.Ф., Кузнецов Р.Д., Чхетиани О.Г., Каллистратова М.А., Куличков С.Н., Артамонова М.С., Кузнецов Д.Д., Перепелкин В.Г., Погарский Ф.А.* Исследование пространственной структуры атмосферного пограничного слоя сетью доплеровских содаров // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 5. С. 579–587.
6. *Ertling D., Brown R.A.* Roll vortices in the planetary boundary layer. A review. // *Boundary-Layer Meteorol.* 1993. V. 65. № 3. P. 215–248.
7. *Brown R.A.* Longitudinal instabilities and secondary flows in the planetary boundary layer // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1980. V. 18. № 3. P. 683–697.
8. *Foster R.* Signature of large aspect ratio roll vortices in synthetic aperture radar images of tropical cyclones // *Oceanography*. 2013. V. 26. № 2. P. 58–67.
9. *Chou S.H., Atlas D.* Satellite estimates of ocean-air heat fluxes during cold air outbreaks // *Monthly Weather Review*. 1982. V. 110. № 10. P. 1434–1450.
10. *Hein P.F., Brown R.A.* Observations of longitudinal roll vortices during arctic cold air outbreaks over open water // *Boundary-Layer Meteorol.* 1988. V. 45. № 1–2. P. 177–199.
11. *Brümmer B.* Roll and cell convection in wintertime arctic cold-air outbreaks // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. № 15. P. 2613–2636.
12. *Foster R.C.* Structure and energetics of optimal Ekman layer perturbations // *Journal of Fluid Mechanics*. 1997. V. 333. P. 97–123.
13. *Morrison H., Curry J. A., Khvorostyanov V.I.* A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 6. P. 1665–1677.
14. *Foster R.C.* Why rolls are prevalent in the hurricane boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 8. P. 2647–2661.
15. *Ginis I., Khain A.P., Morozovsky E.* Effects of large eddies on the structure of the marine boundary layer under strong wind conditions // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 72. № 9. P. 3049–3063.
16. *Gao K., Ginis I.* On the equilibrium-state roll vortices and their effects in the hurricane boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 2016. V. 73. № 3. P. 1205–1222.

17. Ito J., Oizumi T., Niino H. Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones // Scientific reports. 2017. V. 7. № 1. P. 3798.
18. Гаврилов К.А., Морван Д., Ассару Г., Любимов Д.В., Мераджи С., Бессонов О.А. Численное моделирование когерентных структур при распространении примеси в атмосферном пограничном слое над лесным пологом // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 2. С. 34–45
19. Lilly D.K. On the stability of Ekman boundary flow // J. Atmos. Sci. 1966. V. 23. № 5. P. 481–494.
20. Foster R.C. An analytic model for planetary boundary roll vortices: / Ph. D. thesis, University of Washington. Seattle, 1996. 195 p.
21. Brown R.A. A secondary flow model for the planetary boundary layer // J. Atmos. Sci. 1970. V. 27. № 5. P. 742–757.
22. Михайлова Л.А., Орданович А.Е. Моделирование двумерных упорядоченных вихрей в пограничном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 29–42.
23. Stensrud D.J., Shirer H.N. Development of boundary layer rolls from dynamic instabilities // J. Atmos. Sci. 1988. V.45. № 6. P. 1007–1019.
24. Dubos T., Barthlott C., Drobinski P. Emergence and secondary instability of Ekman layer rolls // J. Atmos. Sci. 2008. V. 65. № 7. P. 2326–2342.
25. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Шестакова Л.В., Максименков Л.О. Нелинейное развитие структур в экмановском слое // Вычисл. мех. сплош. сред. 2017. Т. 10. № 2. С. 197–211.
26. Coleman G.N., Ferziger J.H., Spalart P.R. A numerical study of the turbulent Ekman layer // J. Fluid Mech. 1990. V. 213. P. 313–348.
27. Coleman G.N., Ferziger J.H., Spalart P.R. A numerical study of the convective boundary layer // Boundary-Layer Meteor. 1994. V. 70. № 3. P. 247–272.
28. Deardorff J.W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. № 1. P. 91–115.
29. Mason P., Thomson D. Large-eddy simulations of the neutral-static-stability planetary boundary layer. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1987. V.113 P. 413–443.
30. Salesky S.T., Chamecki M., Bou-Zeid E. On the nature of the transition between roll and cellular organization in the convective boundary layer // Boundary-layer meteorology. 2017. V. 163. № 1. P. 41–68.
31. Moeng C.H., Dudhia J., Klemp J., Sullivan P. Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model // Monthly weather review. 2007. V. 135. № 6. P. 2295–2311.
32. Ito J., Niino H., Nakanishi M. Large eddy simulation on dust suspension in a convective mixed layer // SOLA. 2010. V. 6. P. 133–136.
33. Ching J., Rotunno R., LeMone M., Martilli A., Kosovic B., Jimenez P.A., Dudhia J. Convectively induced secondary circulations in fine-grid mesoscale numerical weather prediction models // Monthly Weather Review. 2014. V. 142. № 9. P. 3284–3302.
34. Zhang Y., Hu R., Zheng X. Large-scale coherent structures of suspended dust concentration in the neutral atmospheric surface layer: A large-eddy simulation study // Physics of Fluids. 2018. V. 30. № 4. P. 046601.
35. Lin C.-L., McWilliams J., Moeng C.-H., Sullivan P. Coherent structures and dynamics in a neutrally stratified planetary boundary layer flow. // Phys. Fluids 1996. V. 8. P. 2626–2639.
36. Drobinski P., Carlotti P., Redelsperger J.-L., Banta R., Masson V., Newsom R. Numerical and experimental investigation of the neutral atmospheric surface layer // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. № 1. P. 137–156.
37. Hibino K., Ishikawa H., Ishioka K. Effect of a capping inversion on the stability of an Ekman boundary layer // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 2012. V. 90. № 2. P. 311–319.
38. Etling D. Some aspect of helicity in atmospheric flows // Beitr. Phys. Atmosph. 1985. V.58. № 1. P. 88–100.
39. Курганский М.В. О связи между спиральностью и потенциальным вихрем в сжимаемой вращающейся жидкости // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 12. С. 1326–1329.
40. Hide R. Superhelicity, helicity and potential vorticity // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1989. V. 48. № 1–3. P. 69–79.
41. Чхетиани О.Г. О спиральной структуре экмановского пограничного слоя // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 5. С. 614–620.
42. Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы // ДАН. 2005. Т. 403. № 5. С. 627–630.
43. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А., Крамар В.Ф., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д. Оценка спиральности в атмосферном пограничном слое по данным акустического зондирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 174–186.
44. Deusebio, E., Lindborg, E. Helicity in the Ekman boundary layer // J. Fluid Mech. 2014. V. 755. P. 654–671.
45. Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V. Turbulent Helicity in the Atmospheric Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorology. 2018. V. 168. P. 361–385.
46. Ponomarev V. M.: Micro-scale modelling of pollution dispersion in atmospheric boundary layer // Syst. Anal. Model. Sim. 1998. V. 30. P. 39–44.
47. Gorchakov G. I., Koprov B. M., Shukurov K.A. Arid aerosol transport by vortices // Izvestia. Atmos. Ocean. Phys. 2003. V. 39. № 5. P. 596–608.
48. Cakmur R.V., Miller R.L., Torres O. Incorporating the effect of small-scale circulations upon dust emission in

- an atmospheric general circulation model // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. № D7. D07201
49. *Takemi T., Yasui M., Zhou J., and Lichao Liu L.* Role of boundary layer and cumulus convection on dust emission and transport over a midlatitude desert area // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D11. D11203.
  50. *Marshall J.H., Parker D.J., Grams C.M., Johnson B.T., Grey W.M.F., and Ross A. N.* Observations of mesoscale and boundary-layer scale circulations affecting dust transport and uplift over the Sahara // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 6979–6993.
  51. *Klose M. and Shao Y.* Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2012. V. 12. P. 3263–3293.
  52. *Bagnold R. A.* *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, London: Methuen, 1941. 265 p.
  53. *Shao Y.* *Physics and modelling of wind erosion*, Boston: Kluwer Academic, 2000. 452 p.
  54. *Жуковский Н.Е.* О снежных заносах и заилении рек. — Собр.соч. в 7 томах. М. — Л. ГТТИ, 1949. Т. 3. С. 451–477.
  55. *Maxey M.R.* On the advection of spherical and non-spherical particles in a non-uniform flow // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 1990. V. 333. № 1631. P. 289–307.
  56. *Островский Л.А.* Динамика концентрации легких и тяжелых частиц в течениях жидкости // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1992. Т. 26. № 12. С. 1307–1314.
  57. *Raju N., Meiburg E.* Dynamics of small, spherical particles in vortical and stagnation point flow fields // *Physics of Fluids.* 1997. V. 9. № 2. P. 299–314.
  58. *Narayanan C., Lakehal D., Botto L., Soldati A.* Mechanisms of particle deposition in a fully developed turbulent open channel flow // *Physics of Fluids.* 2003. V. 15. № 3. P. 763–775.
  59. *Mezić I., Leonard A., Wiggins S.* Regular and chaotic particle motion near a helical vortex filament // *Physica D.* 1998. V. 111. № 1–4. P. 179–201.
  60. *Алоян А.Е.* Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Москва: Наука, 2008. 415 с.
  61. *Луценко С.В., Лебедев В.И., Лыкосов В.Н.* Моделирование процессов переноса почвенного аэрозоля в конвективном пограничном слое атмосферы. Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля» к 85-летию со дня рождения Г.В. Розенберга. Москва, 12–17 апреля, 1999: Труды конф-1999. — с. 216.
  62. *Ju T., Li X., Zhang H., Cai X., Song Y.* Comparison of two different dust emission mechanisms over the Horqin Sandy Land area: Aerosols contribution and size distributions, *Atmospheric Environment* (2018).
  63. *IPCC IV: Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* New York: Cambridge Univ. Press, 2007. 940 p.
  64. *Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С.* Климатология аэрозолей и облачность. Санкт-Петербург: ВВМ, 2008. 555 с.
  65. *Knippertz P., Stuu J.-B.W.* *Mineral Dust: A Key Player in the Earth System.* Springer, 2014. 510 p.
  66. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G.* A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note-475 + STR. June 2008. 125 p.
  67. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. В «80 лет Гидрометцентру России» сб. ст. 2010. С. 94–135. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010.
  68. *Talbot C., Bou-Zeid E., Smith J.* Nested mesoscale large-eddy simulations with WRF: performance in real test cases // *Journal of Hydrometeorology.* 2012. V. 13. № 5. P. 1421–1441.
  69. *Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B.* Fully coupled “online” chemistry within the WRF model // *Atmospheric Environment.* 2005. V. 39. № 37. P. 6957–6975.
  70. *Shao Y.* A model for mineral dust emission // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2001. V. 106. № D17. P. 20239–20254.
  71. *Shao Y.* Simplification of a dust emission scheme and comparison with data // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2004. V. 109. № D10. D10202.
  72. *Shao Y., Ishizuka M., Mikami M., Leys J.F.* Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2011. V. 116. № D8. D08203.
  73. *Wei L., Chen Q.* Calculation of drag force on an object settling in gas-solid fluidized beds // *Particulate science and technology.* 2001. V. 19. № 3. P. 229–238.
  74. *Golitsyn G.S., Granberg I.G., Andronova A.V., Ponomarev V.M., Zilitinkevich S.S., Smirnov V.V., Yablokov M.Y.* Investigation of boundary layer fine structure in arid regions: Injection of fine dust into the atmosphere // *Water, Air and Soil Pollution: Focus.* 2003. V. 3. № 2. P. 245–257.
  75. *Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 1. С. 35–47.
  76. *Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A., Kurgansky M.V., Lebedev V.A., Maximenkov L.O., Obvintsev Y.I.* Aerosol emission in the arid zones of Southern Russia // *Report Series In Aerosol Science № 201 (2017): Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting, Helsinki 2017,* P. 518–520.

## Organized Roll Circulation and Transport of Mineral Aerosols in the Atmospheric Boundary Layer

N. V. Vazaeva<sup>1,2\*</sup>, O. G. Chkhetiani<sup>1</sup>, L. O. Maksimenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS  
Pyzhevsky per., 3, Moscow 119017, Russia*

<sup>2</sup> *Bauman Moscow State Technical University  
\*ul. 2-ya Baumanskaya, 5, Moscow 105005, Russia  
e-mail: vazaevanv@ifaran.ru*

Received: 01.03.2018

Accepted: 28.11.2018

Investigation of roll circulations and its transport characteristics in the atmospheric boundary layer (ABL) is carried out. The case study in Kalmykia, 28 of July, 2007, where the equipment measurements have been conducted by A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, is analyzed with the use of WRF-ARW model. The evolution of the circulation with considerable asymmetry in the positive and negative velocity and helicity components is registered. The rolls is sign out by the intensification of the dust picking up and accumulation from underlying terrain, and along with intensive vortices with vertical axis become the significant source of atmospheric pollutants. Captured fine aerosols can be transported by long distances and form the aerosol layers.

**Keywords:** atmospheric boundary layer, mesoscale circulation, asymmetry, numerical simulation, helicity, aerosol transport, aerosol layers.