

УДК 532.517.4:551.551

О ТУРБУЛЕНТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

© 2023 г. О. А. Солёная^{а, *}, Е. А. Шишов^а, О. Г. Чхетиани^{а, б}, Г. В. Азизян^а, В. М. Копров^а

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^бИнститут космических исследований Российской академии наук, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117997 Россия
*e-mail: Solenaya.Oksana@gmail.com

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Проведены синхронные измерения завихренности и скорости в пограничном слое атмосферы с помощью оригинального 3-х компонентного акустического циркулиметра, разработанного в ИФА им. А.М. Обухова в 2019–2020 гг. Измерения выполнялись в летнее время на Цимлянской научной станции (в 2021, 2022 гг.) на высотах 1.75 и 30 м. Для разных реализаций турбулентная спиральность в среднем имеет отрицательные значения, что возможно связано с наличием местных (бризовых) ветров. Наблюдаемые спектры турбулентной спиральности демонстрируют наклон, близкий к $-5/3$, что соответствует переносу спиральности по спектру в сторону малых масштабов (прямому каскаду). Наблюдаются также наклоны спектра $-4/3$, а в области низких частот -1 , связанные с конвективной составляющей, со сдвигом ветра и субмезомасштабными структурами. Вычислены компоненты турбулентного потока вихря. Значения спиральности согласуются с измеренными ранее и теоретическими оценками, полученными для нейтральных условий.

Ключевые слова: циркуляция, завихренность, спиральность, приземный слой

DOI: 10.31857/S0002351523060111, **EDN:** OURINM

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к завихренности $\omega = \nabla \times \mathbf{u}$ где $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$, обусловлен рядом причин. Вихрь — наиболее типичная структурная единица турбулентного течения. Как известно, завихренность возникает в результате гидродинамических неустойчивостей, вблизи препятствий и неоднородностей рельефа и, трансформируясь, переносится в основное течение. Важной характеристикой этого процесса является тензор потока вихря, определяемый через средние взаимные произведения компонент скорости и вихря. Его изучение полезно при рассмотрении внутренней структуры различных течений. Исследованию потока вихря посвящены работы [Taylor, 1915; Новиков, 1972; Копров и др., 1994]. В теоретической заметке [Новиков, 1972], где рассматривались свойства потока вихря в неоднородном турбулентном течении, предполагалось, что статистические характеристики течения инвариантны относительно отражений в верти-

кальной плоскости и, следовательно, в температурно-стратифицированном течении над однородной поверхностью должны быть отличны от нуля только четыре недиагональные компоненты корреляционного тензора

$$\langle u_i(\mathbf{x}) \omega_j(\mathbf{x}) \rangle = \frac{\epsilon_{ikl}}{4\pi} \int_V \frac{r_l}{r^3} \langle \omega_k(\mathbf{x}') \omega_j(\mathbf{x}') \rangle d^3\mathbf{x}, \quad (1)$$

$$r_l = x_l - x'_l, \quad r = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|.$$

Это компоненты $\langle u_3 \omega_2 \rangle$, $\langle u_2 \omega_3 \rangle$, $\langle u_1 \omega_2 \rangle$, $\langle u_2 \omega_1 \rangle$. Угловые скобки означают вероятностное (статистическое) усреднение.

Однако в полевых измерениях [Koprov et al., 1988; Копров и др., 1994] были получены ненулевые значения и для диагональных компонент, сумма которых как раз представляет из себя плотность спиральности, определяемой как скалярное произведение скорости на завихренность:

$$H = u_1 \omega_1 + u_2 \omega_2 + u_3 \omega_3. \quad (2)$$

Важно отметить, что спиральность является псевдоскалярной величиной, т.е. меняет знак при зеркальном отражении. Здесь и далее мы используем правостороннюю систему координат: ось 1 на-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

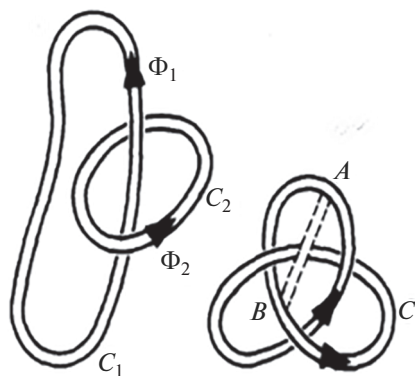


Рис. 1 Заузленность вихревых нитей.

правлена на восток, ось 2 — на север, ось 3 — вертикально вверх.

Гидродинамическое значение спиральности было продемонстрировано впервые в [Betchov, 1961; Moffatt, 1969]. Спиральность является мерой запутывания и связывания вихревых линий (рис. 1) а ее интеграл $H = \int_V \mathbf{u} \odot d\mathbf{V}$ — инвариантом для баротропных течений идеальной жидкости при наличии консервативных внешних сил [Moffatt, 1969]. Фактор спиральности, как и в целом, нарушение зеркальной симметрии, является достаточно важным в явлениях генерации и поддержания магнитного поля для объектов самых разных масштабов — от жидкого ядра Земли, Солнца и других звёзд до галактик и значим на ранних стадиях развития Вселенной [Shukurov and Subramanyan, 2021]. В атмосферной динамике это понятие стало применяться позже, в частности, при рассмотрении долгого времени жизни штормовых суперячеек [Lilly, 1986], экмановского слоя [Etling, 1985; Курганский, 1989; Hide, 1989; Чхетиани, 2001]. Сегодня спиральность довольно распространенное понятие в атмосферной динамике [Курганский, 2017; Курганский и др, 2018]. Для построения моделей и параметризаций атмосферного пограничного слоя (АПС), учитывающих вклад спиральности, необходима информация о ее спектральном распределении и характерных значениях при различных условиях [Курганский, 2017].

В основном, в литературе, также как и в нашей работе, под спиральностью понимается плотность спиральности

Для турбулентных течений наличие двух квадратичных инвариантов (энергии и спиральности) означает возможность существования двух видов каскадов: каскада спиральности параллельно с каскадом энергии в сторону малых масштабов и двойного совместного каскада, когда каскады энергии и спиральности реализуются на различ-

ных участках волновых чисел аналогично двумерной турбулентности [Копров и др., 2005]. Согласно [Brissaud et al., 1973] эти сценарии отличаются спектральными скейлингами (масштабной инвариантностью). В изотропной турбулентности параллельные каскады спиральности $H = \mathbf{u} \odot$ и энергии $E = \frac{1}{2} \mathbf{u}^2$ в сторону малых масштабов соответствуют спектрам

$$E(k) = \frac{1}{2} u_i(k) u_i^*(k) = C_e \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (3)$$

$$H(k) = u_i(k) \omega_i^*(k) = C_h \eta^{-1/3} k^{-5/3}, \quad (4)$$

а в случае совместного каскада, спектрам

$$E(k) = C_e \eta^{2/3} k^{-7/3}, \quad H(k) = C_h \eta^{2/3} k^{-4/3}, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}(k) = \sum_{|\mathbf{k}|=k} \mathbf{u}(\mathbf{k})$, $\boldsymbol{\Omega}(k) = \sum_{|\mathbf{k}|=k} \boldsymbol{\Omega}(\mathbf{k})$ — фурье-компоненты скорости и завихренности,

$\varepsilon = \nu \left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right\rangle$ — скорость диссипации турбулент-

ной энергии на единицу массы и $\eta = 2\nu \left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial \omega_i}{\partial x_k} \right\rangle$ — скорость диссипации спиральности, ν — кинематическая вязкость, $k = |\mathbf{k}|$ — волновое число.

В настоящей работе приведены результаты полевых измерений турбулентности, проведенных в 2021–2022 гг. в Цимлянске, которые позволяют оценить экспериментально спектр спиральности в пограничном слое. Полученные результаты показывают, что он в основном демонстрирует наклон, близкий к $-5/3$, что соответствует переносу спиральности по спектру в сторону малых масштабов. Это означает, что спиральность оказывает слабое влияние на мелкомасштабные движения. В то же время отметим, что существование потока спиральности одного знака ослабляет каскад энергии, связанный с модами другого знака [Kraichnan, 1973; Chen et al., 2003; Chkhetiani and Gledzer, 2017] и приводит к модификации напряжений Рейнольдса и эффективному уменьшению турбулентной вязкости [Белян и др., 1994; Чхетиани, 2001; Пономарев и Чхетиани, 2005]. Также для слабо конвективных условий отмечается спектр спиральности с наклоном $-4/3$, что может быть объяснено влиянием сдвига, субмезомасштабных структур и конвекцией.

2. ИЗМЕРЕНИЯ

Прямые методы измерения завихренности с помощью термоанемометрии реализуются исключительно в лабораторных условиях. Для измерения завихренности в реальной атмосфере был разработан ряд косвенных подходов, в частности, с измерениями циркуляции по контуру (см. в [Чхетиани и др., 2017]). Впервые экспери-

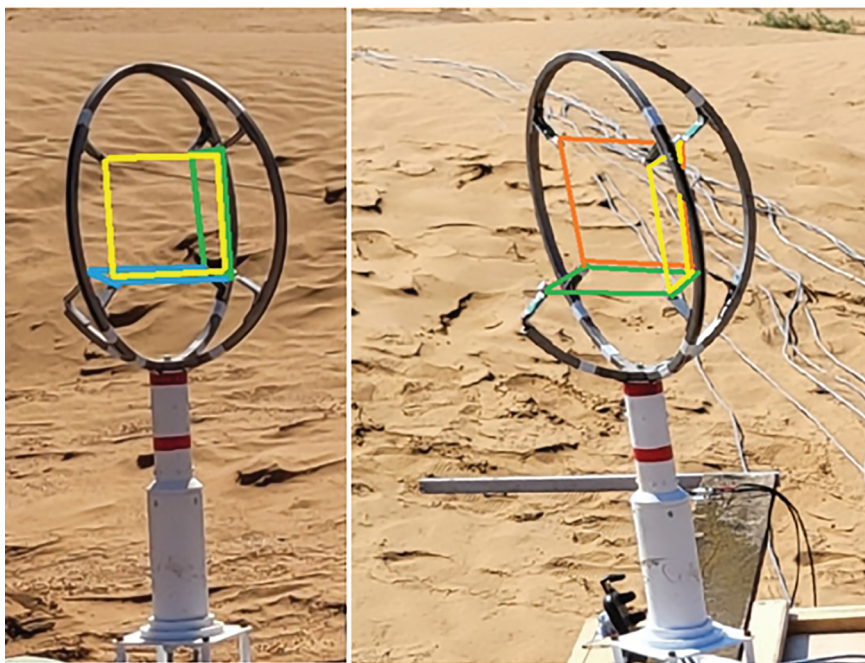


Рис. 2. Расположение и плоскости измерений циркулиметра. Оси направлены на север, запад и вертикально.

ментальные исследования циркуляции начаты в ИФА в 70-е гг. В.М. [Бовшеверов и др., 1971]. Далее были продолжены в 80-е гг. [Копров et al., 1988]. В сентябре 2004 г. на Звенигородской научной станции ИФА РАН впервые в мире были проведены непосредственные измерения турбулентной спиральности в АПС на высоте 48 м [Копров и др., 2005] и показана реализация прямого каскада спиральности с наклоном спектра близким к $-5/3$. В 2012, 2014 гг. был предложен и реализован оригинальный градиентный метод измерения циркуляции на базе акустических анемометров, расположенных в вершинах прямоугольного тетраэдра [Копров и др., 2015; Копров и др., 2018]. В частности, в 2012 г. на базе Цимлянской научной станции ИФА РАН были впервые проведены совместные измерения спиральности и потенциального. Базовый размер стороны тетраэдра составлял 5 м [Копров и др., 2015; Chkhetiani et al., 2018]. Нижнее основание измерительного тетраэдра располагалось на высоте 5 м. В 2014 г. аналогичные по методике измерения были выполнены в Цимлянске с тетраэдром размером 0.7 м. на высотах 3.5, 5, 13.5 и 25 м [Копров и др., 2018]. Анализ результатов измерений в 2012, 2014 гг. показал тесную связь наблюдаемой спиральности с параметрами устойчивости АПС и характеристиками локальных ветров [Копров и др., 2018; Chkhetiani et al., 2018].

В 2019–2020 гг. в ИФА впервые была предложена оригинальная пространственная схема 3-компонентного акустического циркулиметра (рис. 2), реализованная на новой элементной базе.

Методика заключается в измерении прохождения звукового сигнала по контуру. Принцип устройства датчика циркулиметра впервые был представлен в [Бовшеверов и др., 1971]. Принципиальная схема измерений представлена на рис. 3. Основными компонентами датчика (рис. 3) являются четыре преобразователя, два передатчика и два приемника, расположенные в углах квадрата со стороной L . Синусоидальный сигнал с генераторов Γ_1 и Γ_2 , испускаемый с частотами f_1 и f_2 , поступает каждым приемником. После усиления и детектирования с обоих приемников, мы получаем синусоидальный сигнал частоты биений $\Delta f = f_1 - f_2$. Фаза синусоиды на этой частоте содержит необходимую информацию. Разность фаз между двумя сигналами может быть записана как [Бовшеверов и др., 1971]:

$$\psi = \frac{2\pi f_1}{c_0^2} \Gamma + \frac{2\pi L}{2c_0 T_0} \left[f_1 (T'_{12} - T'_{11}) + f_2 (T'_{21} - T'_{22}) \right] + \frac{2\pi \Delta f}{c_0^2} L (v_{21} - v_{22}), \quad (6)$$

где Γ — циркуляция по квадратному контуру, L — длина стороны квадрата рамки, c_0 — скорость звука при средней температуре T_0 , T'_{ij} , v_{ij} — величины температуры и скорости усредненные вдоль ij -й стороны контура.

Как видно из (6), время прохождения, кроме циркуляции скорости ветра, зависит также и от неоднородностей температуры вдоль контура,

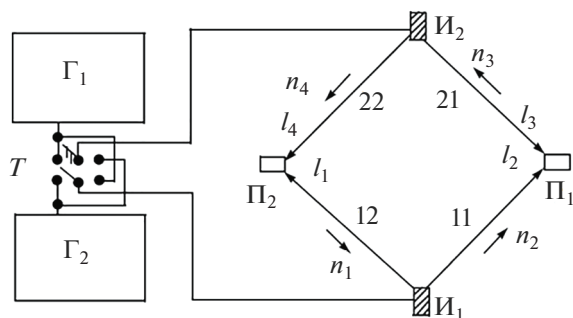


Рис. 3. Блок-схема датчика циркулиметра: Γ_1 и Γ_2 — генераторы синусоидальных сигналов на частотах f_1 и f_2 ; $И_1$ и $И_2$ — излучатели, $П_1$ и $П_2$ — приемники, T — переключатель, длинные стрелки изображают траектории звуковых лучей, а короткие — направление обхода, которое можно менять переключателем T .

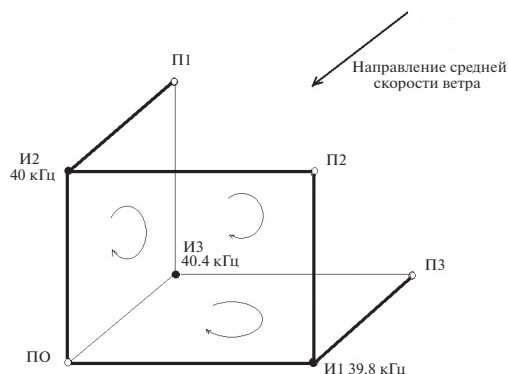


Рис. 4. Схема трехкомпонентного циркулиметра. Расположение излучающих и приемных микрофонов.

влияние которых можно оценить сравнением результатов для противоположных обходов [Копров и др., 1994]. Третье слагаемое в, пропорционально вертикальной компоненте скорости ветра $(v_{21} - v_{22}) = -w\sqrt{2}$ и дает очень незначительный вклад. Следовательно, можем считать циркуляцию прямо пропорциональной разности фаз ψ .

Другими источниками систематической ошибки в измерении спектра является осреднение завихренности по площади контура и пространственное разнесение точек измерения скорости и завихренности. Непосредственные оценки показывают, что влиянием этих факторов можно пренебрегать уже для пространственных масштабов в 2–3 раза и более превосходящих размер рабочего контура циркулиметра.

Схема трехкомпонентного циркулиметра с отметкой контуров, по которым рассчитывается циркуляция, показана на рис. 4. Особо отметим,

что циркуляционные контуры в новой схеме циркулиметра, в отличие от прежних используемых схем, “отвязаны” от рамок, на которых закреплены микрофоны. Измерения циркуляции оказываются менее чувствительными от ориентации по отношению к направлению ветра. Согласно исследованиям в [Копров, 1994] наилучшим по аэродинамике для старой схемы является расположение плоскости рамки циркулиметра в поперечном направлении к ветру. При продольном вертикальном или горизонтальном расположении рамки происходит искажение поля скорости на противоположных к ветру микрофонах. Величина занижения средней скорости на каждой из этих баз, составляет 1–2%.

Измерения циркуляции проводятся в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. В вершинах куба установлены малогабаритные пьезоэлектрические микрофоны имеющие добротность (в воздухе) порядка 20–25. Применяемые микрофоны имеют размеры примерно 10 мм в диаметре и 10 мм по высоте, поэтому при размерах квадрата, по которому измеряется циркуляция порядка 110 мм, их затеняющим влиянием на измеряемую циркуляцию можно пренебречь.

Остальные элементы конструкции циркулиметра, позволяющие разместить микрофоны по вершинам куба со стороной примерно 11 см, изготовлены из нержавеющей стали сечением 0.1×0.1 см, что также не должно сильно искажать набегающий воздушный поток. Кроме того искажение процесса измерений из-за деформации элементов конструкции из-за набегающего потока также будет незначительным, так как вся конструкция изготовлена из стали. Все описываемые микрофоны размещаются в пределах сферы диаметром примерно 30 см, расположенной на сравнительно тонком цилиндрическом основании. При этом вся электроника циркулиметра вынесена за пределы сферы.

В 3-компонентном циркулиметре сторона квадрата, как уже сказано выше, составляет 11 см. В то время, как изначально, в работе [Бовшеверов и др., 1971] представлены результаты, где была использована рамка со стороной 6 см, в исследованиях [Копров, 2005] сторона квадрата составляла 50 см. В упоминаемых измерениях использовались 1- и 2-х компонентные циркулиметры.

Частоты микрофонов 39.8, 40, 40.4 кГц. Здесь П0 — микрофон общий для всех квадратов. Электронные узлы прибора построены с применением интегральных микросхем фирмы Analog Device и простых цифровых схем серии CD 4000.

Измерения циркуляции в приземном слое атмосферы проводились на базе Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в 2021, 2022 гг. Циркулиметры вместе с анемометрами размещались на высотах 1.75 и 30 м в Цимлянске

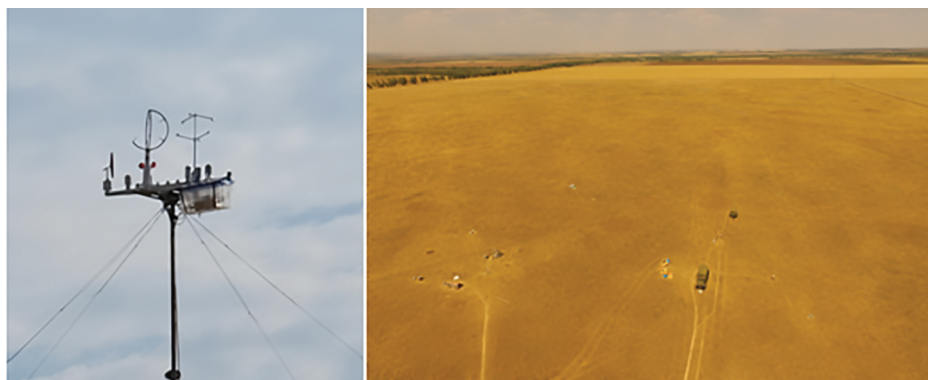


Рис. 5. Вид полигона и расположение приборов в Цимлянске 2021 г. Анемометр устанавливался на расстоянии 1 метр от циркулиметра. Измерения проводились: на высотах 1.75 и 30 м в 2021 г.; на высоте 30 м в 2022 г.

в 2021 г.; на высоте 30 м — в 2022 г. Временные ряды скорости измерялись с помощью анемометра uSonic-3 Omni фирмы Metek. Частота измерений 20 Гц. Циркулиметр располагался на расстоянии 1 метр от анемометра (рис. 5). При более близком расположении возникают помехи от взаимного влияния. Было получено 191 часов записи в Цимлянске в 2021 г., 136 часов записи в 2022 г.

Оси циркулиметра x , y ориентированы по сторонам света, ось z — вертикально вверх.

Полигон Цимлянской научной станции ИФА РАН располагается вдали от высоких строений в 3 км от обрывистого берега Цимлянского моря и представляет собой слабонаклоненный ровный участок степи и представляет практически идеальный полигон для исследований однородной турбулентности [Цванг, 1985; Копров, 2018].

Обработка результатов выполнена в пакетах IFA Lab, разработанном в ИФА, Matlab и Origin.

Измерения проводились при слабых и умеренных ветрах со слабо меняющимся направлением, что позволяет нам использовать гипотезу Тэйлора о замороженной турбулентности [Taylor, 1938] и ожидать тождественности частотных и пространственных наклонов спектра.

Ниже приводятся результаты измерений, выбранных для трех часовых и одной двухчасовой реализаций для измерений на Цимлянском полигоне. Одна часовая запись относится к условиям дневного слабо конвективного пограничного

слоя, а другие — к ночной устойчивой стратификации. Погодные условия для рассматриваемых интервалов показаны в табл. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по турбулентной спиральности получены в Цимлянске в 2022 г. на высоте 30 м. Рассматриваются два часовых интервала — дневной 11.08.22 12.00–13.00 и ночной 9.08.21 0.00–1.00, и один двухчасовой ночной интервал 12.08.22 3.00–5.00.

Согласно теореме Стокса циркуляция связана с вектором завихренности Ω формулой $\Gamma = \oint \mathbf{u} d\mathbf{l} = \iint_S \Omega_n ds = \Omega_n S$, где Ω_n — среднее значение проекции вектора Ω на нормаль к площадке, площадью S . Следовательно, из (6), получаем циркуляцию, а далее все компоненты завихренности.

Компоненты потока вихря рассчитаны для тех же часовых интервалов — дневного 11.08.22 12.00–13.00 и ночного 9.08.21 0.00–1.00.

Спектры временных вариаций энтропии и квадраты компонент завихренности на высотах 30 и 1.75 м показаны на рис. 6. Для сравнения также приведен наклон $-1/3$. Результаты рассчитаны для часового интервала 7.08.21 3.00–4.00 для устойчивой стратификации. Можно отметить спадание спектра вблизи частоты $f \approx 0.1$ Гц, что

Таблица 1. Погодные условия для рассматриваемых интервалов

Дата	Местоположение	Серия	Высота, м	Скорость ветра, м/с	Направление	Температура, (С)	Интервал
07.08.2021	Цимлянск	01	1.75/30	5	В	25.1	3.00–4.00
10.08.2022	Цимлянск	03	30	3	СВ	26.5	0.00–1.00
11.08.2022	Цимлянск	02	30	3	СВ	33.8	12.00–13.00
12.08.2022	Цимлянск	01	30	3	СВ	25.6	3.00–5.00

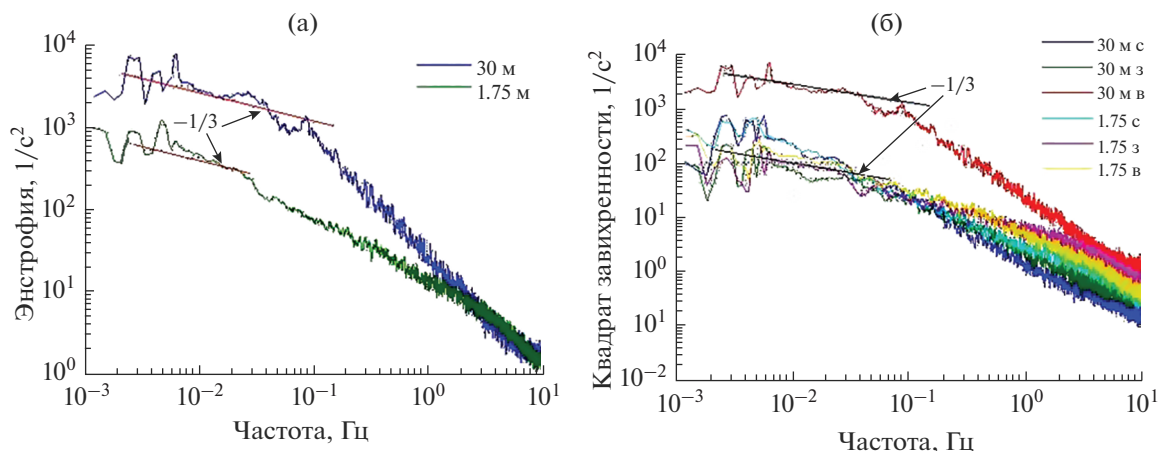


Рис. 6. а) Энтрофия на высотах 30 и 1.75 м. б) квадраты компонент завихренности на высотах 30 и 1.75 м, с — северная, з — западная, в — вертикальная. Цимлянск, 7.08.21 3.00–4.00. Устойчивая стратификация.

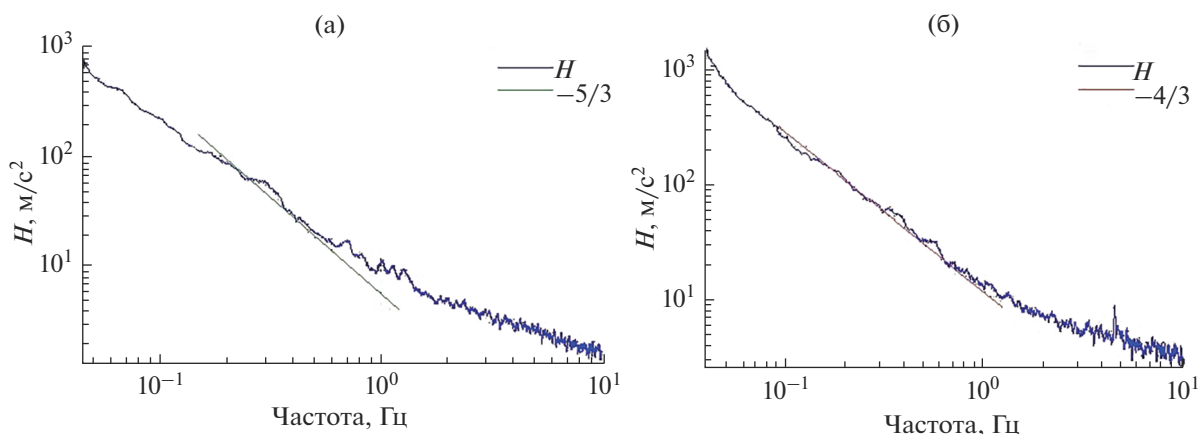


Рис. 7. Спектр горизонтальной спиральности а) для ночного интервала 10.08.22 0.00–1.00, б) для дневного интервала 11.08.2022 12.00–13.00.

примерно соответствует волновым числам, начиная с которых пульсации усредняются контурами.

На рис. 7 показаны спектры горизонтальной спиральности для ночного и дневного пограничного слоя для часовых интервалов. Для сравнения на рисунке показан наклон $-5/3$, что соответствует прямому каскаду спиральности — переносу в область малых масштабов. Наклон спектра дневного интервала ближе к $-4/3$. Наклон спектра энергии составляет $-5/3$, а не $-7/3$, как можно было бы ожидать для обратного каскада. Такой наклон спектра спиральности может быть объяснен влиянием сдвига, прохождением субмезомасштабных структур и влиянием конвекции на генерацию спиральности.

Наблюдаемый спектр спиральности с наклоном $-4/3$ может быть объяснен из размерностных оценок, рассматриваемых условий баланса спиральности при наличии температурной страти-

фикации. Баланс турбулентной спиральности H в пограничном слое атмосферы имеет вид [Пономарев и Чхетиани, 2005, Копров и др., 2005]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial \langle u_i u_k \rangle}{\partial x_k} \Omega_i - \langle u_i u_k \rangle \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_k} + 2f \frac{\partial E}{\partial x_3} + 2\beta g \langle \theta \omega_3 \rangle - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left\langle \frac{p}{\rho} \omega_k \right\rangle + \langle v_i v_k \omega_i \rangle - \frac{1}{2} \langle \omega_k v_i v_i \rangle \right) + \nu \Delta H - \eta. \quad (7)$$

Здесь: $\Omega_i = [\nabla \times \mathbf{V}]_i = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial V_k}{\partial x_j}$ — завихренность крупномасштабного (среднего) поля скорости $\mathbf{V}$, f — частота вращения Земли, $\beta = 1/\theta_0$ — параметр плавучести, g — ускорение силы тяжести, θ — пульсации температуры. В условиях, близким к нейтральной и устойчивой стратификации основным источником турбулентной спиральности является спиральность экмановского течения [Чхетиани, 2001; Пономарев и Чхетиани, 2005, Chkhetiani et al., 2018]. При не-

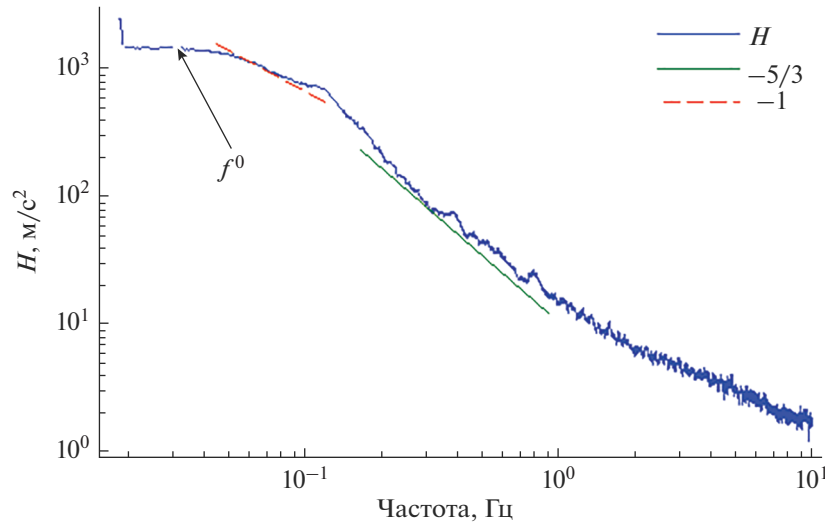


Рис. 8. Спектр горизонтальной спиральности для ночного интервала 12.08.22 3.00–5.00. Для сравнения приведены нулевой наклон, наклоны -1 и $-5/3$.

устойчивой стратификации становится важным вклад от конвективных движений. В балансе спиральности (7) – это член пропорциональный корреляции возмущений температуры и вертикальной завихренности $-\beta g \langle \theta \omega_3 \rangle$, отмеченный в [Lilly, 1986; Моисеев и Чхетиани, 1996] (см. также [Пономарев и Чхетиани, 2005, Chkhetiani et al., 2018, Agoua et al., 2021]). При относительно слабых ветрах такой источник, обусловленный термическими структурами, возникающими при повороте ветра одновременно с неоднородным прогревом поверхности [Шишов и др., 2021], может оказаться основным. В этом случае для спиральности в волновом k -пространстве имеем

$$\frac{\mathbf{u}_k \cdot \text{rot} \mathbf{u}_k}{\tau_k} \sim \beta g \theta_k \omega_{k3}. \quad (8)$$

Рассматривая пульсации как в основном изотропные можем оценить завихренность как $\omega_{k3} \approx k u_k$, $\tau_k \sim (k u_k)^{-1}$. То есть $\omega_{k3} \tau_k \approx a = \text{const}$. Для температурных возмущений имеем $\theta_k \sim N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-1/3}$ [Обухов, 1949], где N – скорость выравнивания температурных неоднородностей.

Соответственно $(\mathbf{u}_k \cdot \text{rot} \mathbf{u}_k)_i \sim \beta g a N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-1/3}$ откуда для спектра спиральности

$$H(k) = \frac{d\mathbf{u}_k \cdot \text{rot} \mathbf{u}_k}{dk} \sim \beta g a N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-4/3}. \quad (9)$$

Спектр горизонтальной спиральности для двухчасового интервала показан на рис. 8. Для сравнения показаны наклоны -1 и $-5/3$. Видно, что наклон спектра в инерционном диапазоне близок $-5/3$. На низких частотах можно отметить присутствие диапазона с “нулевым” законом спектра ($H(k) = u_*^2 k^0$, $u_* = (\langle u_1 u_3 \rangle^2 + \langle u_2 u_3 \rangle^2)^{1/4}$) в

прединерционной области, предложенным в [Ali and Dey, 2022].

На рис. 9 показано среднее значение косинуса угла между векторами завихренности и скорости, называемое также относительной спиральностью [Курганский, 1993] и составляет порядка -0.7 . Значение угла – 117 гр. Также приведено мгновенное значение косинуса, которое имеет довольно большой разброс значений.

На рис. 10 приведено значение спиральности для ночных и дневного интервалов. Видно что спиральность для всех рассмотренных интервалов имеет отрицательный знак.

Знак спиральности зависит от изменения угла между вектором скорости и компонентой скорости с высотой. Здесь уместно напомнить про представление спиральности, указанное в [Hide, 1976; Tan et al., 1994]:

$$H = |\mathbf{u}|^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u_1}{u_2} \right) = -|\mathbf{v}|^2 \frac{\partial \alpha}{\partial z}, \quad (10)$$

где $\alpha = \alpha(z)$ – это угол между вектором скорости и компонентой скорости $\mathbf{u}$, т.е. $\tan \alpha = u_2/u_1$, $|\mathbf{u}|^2 = u_1^2 + u_2^2$.

Как видно из (10), знак спиральности зависит только от изменения угла α по вертикали:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial z} < 0 &\rightarrow H > 0, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0 &\rightarrow H = 0, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial z} > 0 &\rightarrow H < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

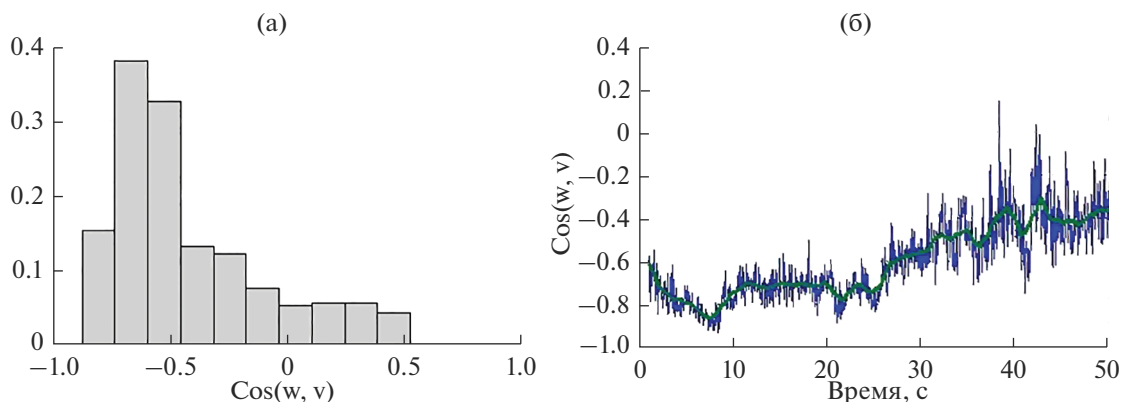


Рис. 9. а) Относительная частота усредненных значений косинуса угла между скоростью и завихренностью, б) временной ход косинуса угла между скоростью и завихренностью в течение минуты. Интервал 10.08.22 0.00–1.00. Зеленая линия – 2-минутное сглаживание.

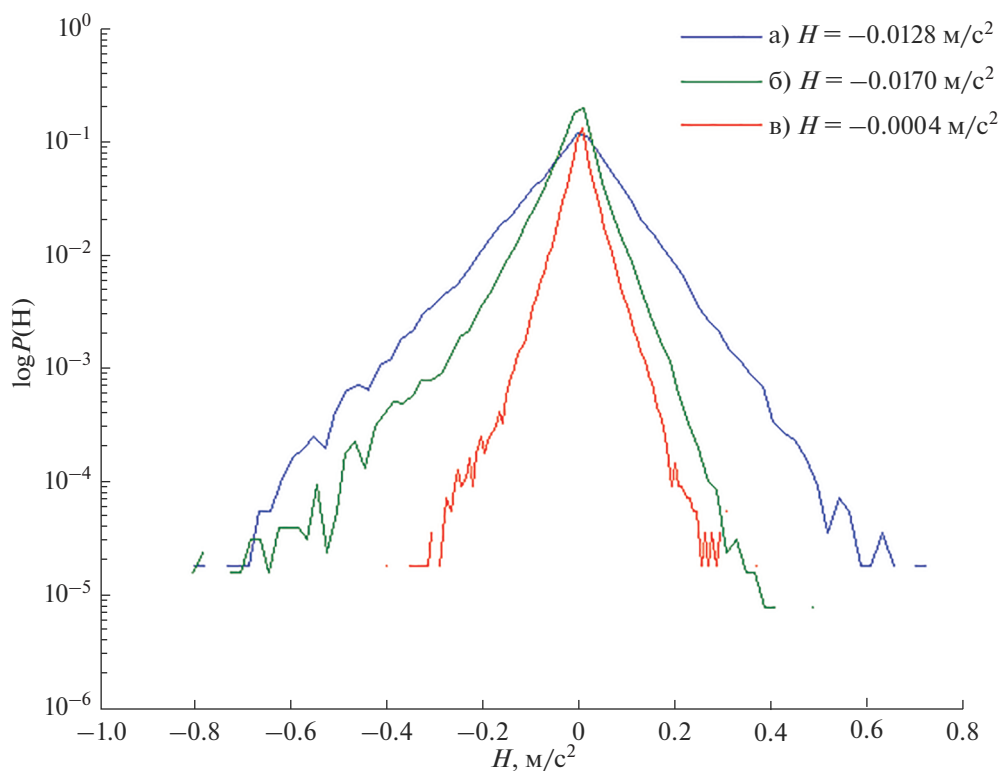


Рис. 10. Плотность вероятности горизонтальной спиральности а) 11.08.22 12.00–13.00, б) 12.08.22 3.00–5.00, в) 10.08.22 0.00–1.00.

При сдвиговом движении вектор ветра поворачивается против часовой стрелки с высотой, что означает, что спиральность потока отрицательна. Наоборот, спиральность положительна, когда вектор ветра вращается по часовой стрелке с высотой. И спиральность исчезает только если $\frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0$ т.е. угол α – постоянный.

Движение пограничного слоя атмосферы представляет собой сдвиговое течение. Из-за

влияния трения вращение вектора ветра с высотой в пограничном слое обычно происходит по часовой стрелке, т.е. $\frac{\partial \alpha}{\partial z} < 0$. Следовательно, в пограничном слое спиральность обычно положительна.

Отрицательное значение спиральности, возможно, объясняется наличием местных (бризовых ветров) для данного полигона, как и для измерений 2012 года [Chkhetiani et al., 2018].

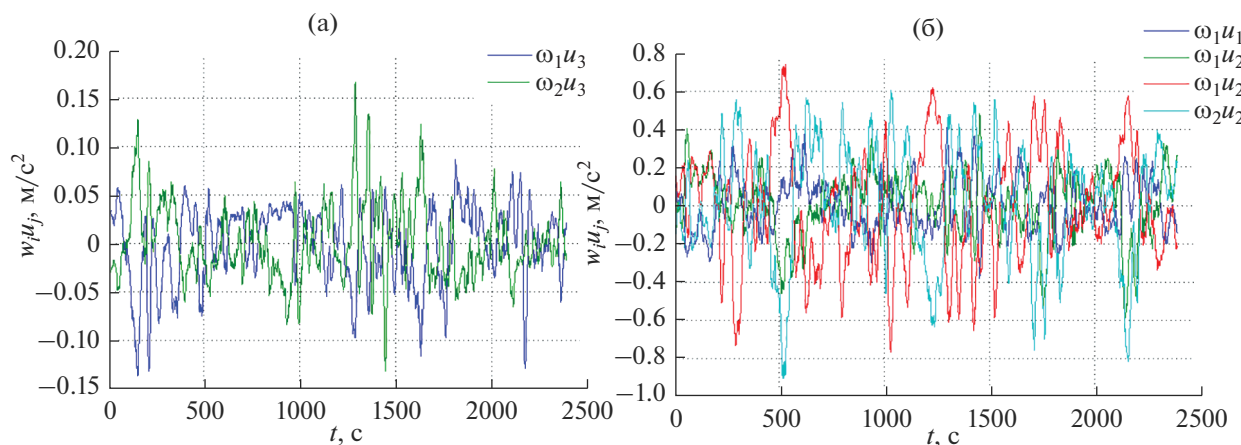


Рис. 11. Временной ряд 11.08 12.00–13.00 а) вертикальных и б) горизонтальных компонент тензора потока вихря. Усреднение 20 мин, сглаживание 10 с.

Значения спиральности рассчитывались при вычете 20 мин среднего из компонент, что соответствует исследованиям влияния окна осреднения в [Копров и др., 2015] и находятся в пределах -0.017 до -0.0004 м/с², что близко к экспериментальным значениям [Копров и др., 2005; Копров и др., 2015; Chkhetiani et al., 2018] и к теоретическим оценкам, полученным для условий нейтрального пограничного слоя [Копров и др., 2005; Пономарев и Чхетиани, 2005].

Плотность вероятности для спиральности ожидаемо имеет экспоненциальный характер.

В табл. 1, 2 приводятся значения компонент турбулентного потока вихря для горизонтальных компонент завихренности. На рис. 11 представлен ход компонент в течение часа. Видно, что мгновенные значения могут достигать почти минус единицы.

Таблица 2. Турбулентный поток вихря, интервал 11.08.22 12.00–13.00

	u_1	u_2	u_3
ω_1	-0.0009	-0.0018	-0.0036
ω_2	-0.0305	-0.0119	0.0002

Таблица 3. Турбулентный поток вихря, интервал 10.08.22 0.00–1.00

	u_1	u_2	u_3
ω_1	0.00182	0.00016	-0.00006
ω_2	0.00346	-0.00217	0.00057

4. ВЫВОДЫ

Разработана и опробована методика измерения всех компонент циркуляции и спиральности в полевых условиях. Спектры горизонтальной спиральности в инерционном интервале близки к спектру $-5/3$, что соответствует переносу спиральности по спектру в сторону малых масштабов. Косинус угла между векторами скорости и завихренности значительно отличается от нуля, что указывает на значимые значения спиральности в приземном слое (среднее значение угла порядка 117 град). Значения спиральности находятся в пределах -0.017 до -0.0004 м/с², что близко к теоретическим значениям, полученным для плотности турбулентной спиральности в пограничном слое, близком к нейтральному. Значения сдвинуты в отрицательную область, что возможно объясняется наличием местных бризовых ветров [Chkhetiani et al., 2018].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белян А.В., Моисеев С.С., Чхетиани О.Г. О турбулентной вязкости в спиральной турбулентности // Доклады АН. 1994. Т. 334. № 1. С. 34–36.
- Бовшеров В.М., Гурвич А.С., Кочетков А.Н., Ломадзе С.А. Измерение частотного спектра мелкомасштабной циркуляции скорости в турбулентном потоке // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 4. С. 371–376.
- Копров Б.М., Калугин В.В., Тиме Н.С. Турбулентный поток вихря // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 1. С. 13–17.
- Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы // Доклады РАН. 2005. Т. 403. № 5. С. 627–630.

- Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 637–647.
- Копров Б.М. Из истории исследований пограничного слоя в Институте физики атмосферы АН СССР Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 330–343.
- Копров Б.М., Копров В.М., Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А. Методика и результаты измерений турбулентной спиральности в стратифицированном приземном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 5. С. 525–537.
- Курганский М.В. Связь между спиральностью и потенциальным вихрем в сжимаемой вращающейся жидкости // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 12. С. 1326–1329.
- Курганский М.В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы (Адиабатические инварианты и их применение). СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 168 с.
- Курганский М.В. Спиральность в атмосферных динамических процессах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 147–163.
- Курганский М.В., Максименков Л.О., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. Вертикальный поток спиральности как индекс общей циркуляции атмосферы // Доклады РАН. 2018. Т. 479. № 4. С. 447–451.
- Моисеев С.С., Чхетиани О.Г. Спиральный скейлинг в турбулентности // ЖЭТФ. 1996 Т. 109(6). С. 357–370.
- Новиков Е.А. Поток вихря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 7. С. 459–462.
- Обухов А.М. Структура температурного поля в турбулентном потоке // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1949. Т. 13. № 1. С. 58–69.
- Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. Полуэмпирическая модель пограничного слоя атмосферы с параметризацией влияния турбулентной спиральности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 4. С. 464–480.
- Цванг Л.Р. Исследования атмосферной турбулентности на Цимлянкой научной станции Института Физики Атмосферы АН СССР // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 4. С. 339–348.
- Чхетиани О.Г. О спиральной структуре экмановского пограничного слоя // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 5. С. 614–620.
- Чхетиани О.Г., Копров Б.М., Копров В.М. Потоки завихренности и спиральности в атмосферном пограничном слое / Сб.: “Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере”. М.: ГЕОС. 2017. С. 39–57.
- Шишов Е.А., Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М. Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 286–297.
- Agoua W., Favier B., Delache A., Briard A., Bos W.J.T. Spontaneous generation and reversal of helicity in anisotropic turbulence // Physical Review E. 2021. V. 103. № 6. P. L061101.
- Ali Sk Z., Dey S. Discovery of the zeroth law of helicity spectrum in the pre-inertial range of wall Turbulence // Phys. Fluids 2022. V. 34. P. 071401.
- Betchov R. Semi-Isotropic Turbulence and Helicoidal Flows // Phys. Fluids. 1961. V. 4. P. 925–926.
- Brissaud A., Frisch U., Leorat J., Lesieur M., Mazur A. Helicity cascades in fully developed isotropic turbulence // Phys. Fluids. 1973. V. 16. P. 1363–1364.
- Chen Q., Chen S., Eyink G.L. The Joint Cascade of Energy and Helicity in Three-Dimensional Turbulence // Phys. Fluid. 2003. V. 15. P. 361–374
- Chkhetiani O.G., Gledzer E.B. Helical turbulence with small-scale energy and helicity sources and external intermediate scale noises as the origin of large scale generation // Physica A. 2017. V. 486. P. 416–433.
- Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V. Turbulent Helicity in the Atmospheric Boundary Layer // Bound. Lay. Meteo. 2018. V. 168. № 3. P. 361–385.
- Ertling D. Some aspects of helicity in atmospheric flows // Beitr. Phys. Atmos. 1985. V. 58. № 1. P. 88–100.
- Hide R. A note on helicity and potential vorticity // Geophys. Astro. Fluid. 1976. V. 7. № 1. P. 69–79.
- Hide R. Superhelicity, helicity and potential vorticity // Geophys. Astro. Fluid. 1989. V. 48. № 1–3. P. 69–79.
- Koprov B.M., Azizyan G.V., Kalugin V.V. Spectra of velocity circulation in the surface layer of the atmosphere // Bound. Layer Meteor. 1988. V. 42. № 1–2. P. 137–143.
- Kraichnan R.H. Helical turbulence and absolute equilibrium // J. Fluid Mech. 1973. V. 59(4) P. 745–752.
- Lilly D.K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II. Helicity and storm stabilization // J. Atmos. Sci. 1986. V. 42(2). P. 126–140.
- Moffatt H.K. The degree of knottedness of tangled vortex lines // J. Fluid Mech. 1969. V. 35(1). P. 117–129.
- Moffatt H.K. Magnetic field generation in electrically conducting fluids // Cambridge University Press. 1978. 344 p.
- Shukurov A., Subramanian K. Astrophysical magnetic fields: From galaxies to the early Universe. Cambridge University Press. 2021. 650 p.
- Tan Z, Wu R. Helicity dynamics of atmospheric flow // Adv. Atmos. Sci. 1994. V. 11(2). P. 175–188.
- Taylor G.I. Eddy motion in the atmosphere // Phil. Trans. Roy. Soc. A 1915. V. 215. P. 1–26.
- Taylor G.I. The spectrum of turbulence // Proc. Royal Soc. London. A. 1938. V. 164 (919). P. 476–490.

On Turbulent Helicity in the Surface Layer of the Atmosphere

O. A. Solenaya^{1, *}, E. A. Shishov¹, O. G. Chkhetiani^{1, 2}, G. V. Azizyan¹, and V. M. Koprov¹

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: Solenaya.Oksana@gmail.com*

Synchronous measurements of vorticity and velocity in the boundary layer of the atmosphere were carried out using the original 3-component acoustic circulator developed at the A.M. Obukhov Institute of Physical Physics in 2019–2020. The measurements were carried out in summer at the Tsimlyansk scientific station (in 2021, 2022) at altitudes of 1.75 and 30 m. For different realizations, turbulent helicity has negative values on average, which is possibly due to the presence of local (breeze) winds. The observed spectra of turbulent helicity exhibit a slope close to $-5/3$, which corresponds to the transfer of helicity along the spectrum towards small scales (direct cascade). Spectrum slopes of $-4/3$ are also observed, and in the low-frequency region -1 , associated with the convective component, wind shear, and submesoscale structures. The components of the turbulent vortex flow are calculated. The helicity values agree with the previously measured and theoretical estimates obtained for neutral conditions.

Keywords: circulation, vorticity, helicity, surface layer