

Содар для исследований микроструктуры приземного слоя атмосферы

В.Ф. Крамар¹, О.Г. Чхетиани¹, Н.В. Вазаева^{1,2}, М.А. Каллистратова¹, Р.Д. Кузнецов^{1,3},
С.Н. Куличков¹, В.С. Люлюкин¹, Д.Д. Кузнецов¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

³Финский метеорологический институт, г. Хельсинки

Введение

Действие звуковых локаторов – содаров, базируется на явлении рассеяния акустических волн слышимого диапазона атмосферными мелкомасштабными турбулентными неоднородностями. Физические основы теории этого явления были заложены А.М. Обуховым (Обухов 1941). Развитие теории рассеяния в работах В.И. Татарского (Татарский 1959, 1967) и А.С. Монины (Монин 1961) и её экспериментальное подтверждение (Каллистратова 1959, Каллистратова и Татарский 1960) привели к широкому применению содаров для измерений профилей скорости ветра и интенсивности турбулентности в атмосферном пограничном слое (АПС). Отметим, что современное развитие высокотехнологичных средств наземного дистанционного зондирования атмосферы, таких как сканирующие доплеровские радары и лидары (см., например, Farrell 2015, Smalikho and Banakh 2017), не уменьшает роли содаров в исследованиях турбулентности в АПС (Coulter and Kallistratova 1999).

Несколько зарубежных фирм производят коммерчески доступные моностатические содары и минисодары, работающие в диапазонах звуковых частот 1.0—2.0 кГц и 3.0—4.5 кГц, соответственно, и предназначенные, в основном, для измерений профилей скорости ветра (см., например, Bradley 2008). Кроме того, во многих научных институтах и университетах созданы специализированные содары для визуализации и фундаментальных исследований мезомасштабной структуры атмосферного пограничного слоя. Например, в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА) было разработано и изготовлено несколько поколений доплеровских содаров и минисодаров серии ЛАТАН (см. Каллистратова и др. 2018). Типичная максимальная высота зондирования для фирменных и исследовательских содаров составляет $z_{\max} \approx 600 - 800$ м при разрешении $\Delta z \approx 20$ м и "мертвой зоне" $z_{\min} \approx 30 - 40$ м, а для минисодаров $z_{\max} \approx 150 - 250$ м, $\Delta z \approx 5 - 10$ м и $z_{\min} \approx 10 - 15$ м. С помощью содаров ЛАТАН в ИФА были проведены исследования пространственного распределения когерентных вихревых структур (Гранберг и др. 2009), исследования спиральности (Вазаева и др. 2017), а также внутренних гравитационных волн в низкоуровневых струйных течениях (Каллистратова и др. 2017).

В последние годы, в связи с интересом к тонкой структуре приземного атмосферного слоя при решении астроклиматических задач, задач о распространении внутренних гравитационных волн (ВГВ), а также о завихренности и спиральности в приземных течениях, начали разрабатываться "сверх-минисодары", обладающие повышенной разрешающей способностью и минимизированной мертвой зоной. Так, в работе (Bonner et al. 2009) представлен однокомпонентный вертикальный моностатический минисодар SNODAR (Surface layer NOon-Doppler Acoustic Radar). SNODAR (несущая частота 5 кГц, высотный диапазон от 8 м до 200 м, вертикальное разрешение 1 м) использовался для измерений профилей интенсивности флуктуаций оптического показателя преломления в Антарктике. В работе (Argentini et al. 2012) представлен SLM-sodar (Surface Layer Mini-sodar). В этом однокомпонентном вертикальном доплеровском минисодаре (несущая частота 5 кГц, высотный диапазон от 2 м до 200 м, вертикальное разрешение 1 м) мертвая зона была уменьшена за счет применения бистатической схемы зондирования, т.е. схемы с раздельными

излучателем и приемником звука. SLM-sodar использовался в Антарктике для исследований ВГВ в мелком инверсионном слое над заснеженной поверхностью (*Petenko et al. 2016, 2018*).

SNODAR и SLM-sodar – это однокомпонентные вертикально-направленные локаторы, которые не способны измерять профили скорости и направления ветра, необходимые для исследований завихренности и спиральности течений в приземном слое атмосферы (*Chkhetiani et al., 2018*). Для таких исследований в ИФА создан доплеровский трех-компонентный минисодар, получивший название ВРМС – Высокого Разрешения Мини Содар (английская аббревиатура – HRMS).

В настоящей работе приведено описание конструкции ВРМС, результаты его полевых испытаний, а также предварительные результаты проведенных в 2017 – 2018 гг. с его помощью экспедиционных исследований тонкой структуры завихренных течений в приземном слое атмосферы.

Конструкция минисодара ВРМС

Блок-схема трех-компонентного доплеровского минисодара высокого разрешения ВРМС и фотография его антенн в шумозащитных экранах представлены на рис. 1. Зондирование проводится одновременно в 3-х направлениях: вертикальном и двух наклонных (под углом 30° к вертикали); наклонные направления развернуты по азимуту на 90° . Содар является бистатическим, т. е. каждая из его 3-х компонент содержит 2 отдельные антенны: одну для излучения зондирующего импульса, а вторая для приема рассеянного акустического сигнала. Излучающая и приемная антенны вплотную примыкают друг к другу, а их оси коллинеарны; поэтому можно считать, что их диаграммы направленности в значительной степени перекрываются, и весь цикл зондирования не отличается от моностатического содара. В качестве излучающей антенны используется блок из 3-х стандартных рупорных громкоговорителей LPA-50Н. Рассеянный сигнал принимается конденсаторным измерительным микрофоном DBX RTA-M, нагруженным на рупор, который установлен в фокусе параболического акустического зеркала диаметром 0.6 м.

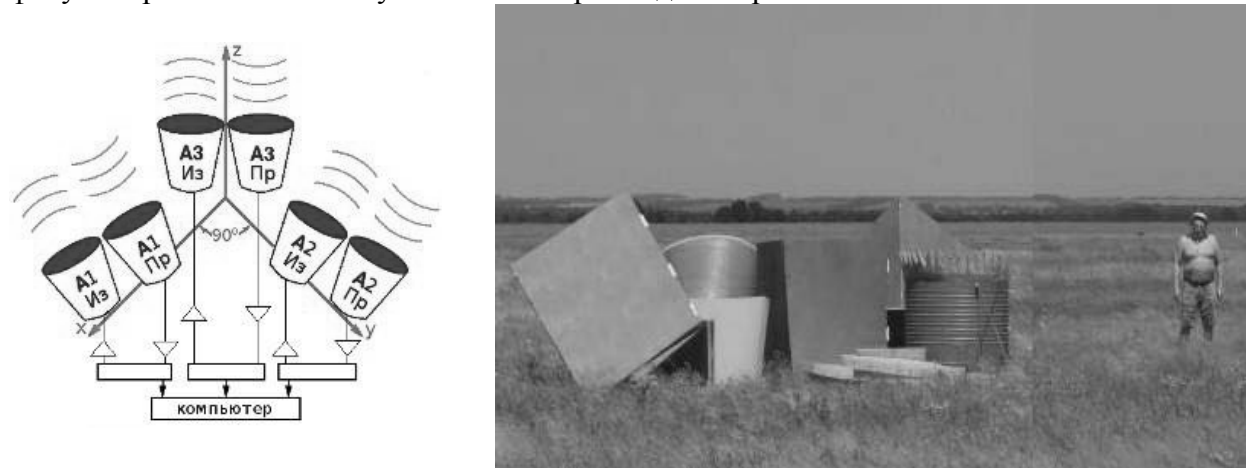


Рис. 1. Трех-компонентный доплеровский минисодар высокого разрешения ВРМС. Слева: упрощенная блок-схема. Справа: антенны ВРМС в шумозащитных экранах на Цимлянской научной станции ИФА, июль 1918 г. Цилиндрические синие экраны защищают приемные антенны от внешних акустических шумов и от просачивания излучаемого сигнала; треугольные призматические серые экраны подавляют боковые лепестки излучающих антенн.

Бистатическая конфигурация применена в ВРМС для уменьшения мертвой зоны содара, которая в моностатическом содаре определяется временем релаксации реверсивного электроакустического преобразователя при его переключении из режима излучения в режим приема. Рупорные электродинамические громкоговорители (в дальнейшем, "динамики"), являются наиболее эффективными электроакустическими преобразователями и поэтому широко применяются в содарах. Коэффициент полезного действия высокочастотных рупорных

динамиков достигает нескольких десятков процентов, и они обеспечивают обнаружение и измерение слабого рассеянного сигнала, уровень которого на 150-160 дБ ниже уровня зондирующего излучения. Обратной стороной этого преимущества электродинамических систем перед другими типами акустических излучателей является их высокая добротность, приводящая к долгому послезвучию по окончании короткого электрического радиоимпульса. Ни добротность систем, ни время релаксации промышленных динамиков не регламентируется в их описаниях. Однако экспериментально обнаружено (см. *Калистратова 1959б, Bonner et al. 2009*) что время релаксации составляет около 50 мсек, в результате чего при моностатической конфигурации невозможен прием эхосигнала с высоты менее чем 7-8 метров над антеннами содара (при скорости звука $c = 330 \text{ м с}^{-1}$). В реализованной бистатической схеме размеры "мертвой зоны" определяются только геометрическими размерами шумозащитных экранов и составляют около 3-х метров.

Количество аналоговых радиотехнических устройств в ВРМС сведено к минимуму: это только высокоэффективные усилители мощности TAS5630 и малошумящие микрофонные усилители SSM2019, обеспечивающие подключение микрофона с фантомным питанием. Все остальные функции выполняются компьютером. В качестве АЦП-ЦАП прибора используются компьютерные аудиоинтерфейсы (звуковые карты) высокого разрешения, аналогично тому, как это сделано в содаре ЛАТАН-3 (*Кузнецов 2007*).

В рабочем режиме каналы наклонных антенн работали одновременно на разных частотах, а старт вертикального канала был сдвинут на 0.5 с. При обработке эхо-сигналов проводилась их предварительная фильтрация с использованием различных комбинаций окон (прямоугольного, Hamming и Gaussian), а затем методом быстрого преобразования Фурье определялся доплеровский сдвиг частоты. Точность вычисления частоты при Фурье-анализе составляла около 0.2 Гц.

Системные параметры ВРМС:

Несущие частоты компонент звукового локатора, Гц	4500, 5000, 5500
Длительность зондирующего импульса, с	0.02
Период посылок импульсов, с	1
Диапазон зондируемых высот, м	3 – 45
Разрешение по высоте (со скользящим средним), м	1
Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра, м с^{-1}	0.5 – 20
Диапазон измерения вертикальной скорости ветра, м с^{-1}	0.1 – 10

Верификация минисодара ВРМС

Верификация данных ВРМС проводилась на Цимлянской научной станции (ЦНС) ИФА летом 2017 г. путем их сравнения с измерениями скорости ветра ультразвуковым термометром-анемометром марки USA-1 (соником) на 10-метровой мачте, расположенной на расстоянии 35 м от ВРМС. Линейные размеры области пространственного осреднения данных составляли около 0.1 м для соника и около 2 м для ВРМС.

Типичные примеры сопоставления временных ходов модуля скорости ветра и сравнения значений модуля скорости на высоте 10 м при 60-секундном осреднении приведены на Рис. 2. Вычисленные по всей выборке средние значения модуля скорости ветра, измеренные соником и ВРМС, практически совпадают и равны 2.7 м с^{-1} . Различие средней скорости между данными двух приборов составляет около 1 %, что говорит об очень хорошей сходимости результатов при осреднении по выборкам большого размера.

Соответствующие среднеквадратичные отклонения по всей выборке составляют 0.84 и 0.64 м с^{-1} для ВРМС и соника, соответственно.

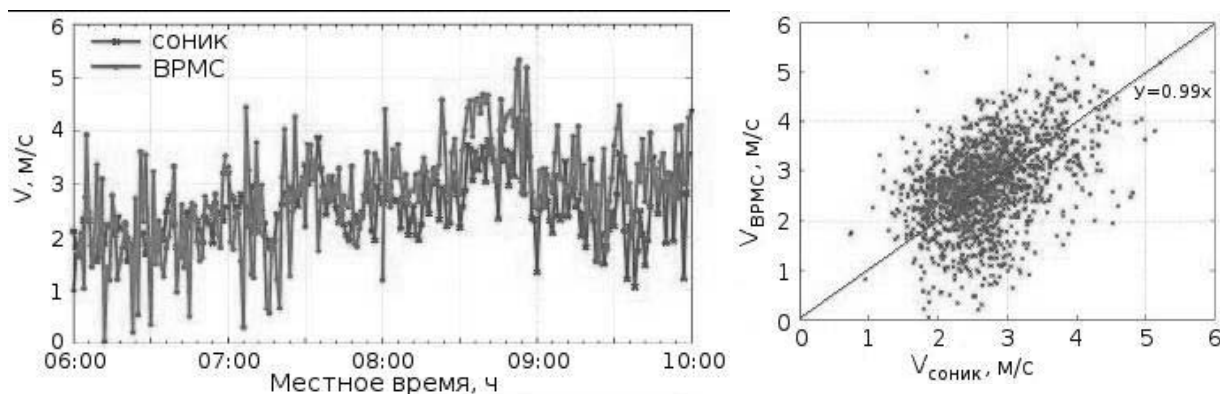


Рис. 2. Сопоставление результатов синхронных измерений модуля скорости ветра соником и ВРМС на высоте 10 м на Цимлянкой научной станции ИФА. Слева: временной ход скорости в утренние часы 26 июля 2017 г. Справа: сравнение значений модуля скорости, измеренных в течение суток 26 июля 2017 г. соником и ВРМС. Время осреднения сравниваемых данных – 60 секунд.

Из сравнения левой и правой части Рис. 2 видно, что при 60-секундном осреднении минисодар статистически точно измеряет скорость ветра, несмотря на ее большие вариации по величине и по темпу изменения. Однако, амплитуда вариаций скорости, измеренной минисодаром, несколько выше, чем измеренной соником, что требует дополнительного анализа. В целом, проведенные сопоставления позволяют считать результаты измерений скорости ветра минисодаром ВРМС статистически достоверными. Этот вывод согласуется с результатами многочисленных проверок отечественных и зарубежных доплеровских содаров и минисодаров (см., например, Кузнецов 2007, а также раздел 5.6.9 в книге Bradley 2008).

Тонкая структура поля ветра в приземном слое атмосферы

Наряду с так называемыми *роллами*, т.е. крупными (масштабы $\sim 1-3$ км) упорядоченными вихрями с горизонтальной осью, направленной примерно вдоль среднего направления геострофического ветра (Etling and Brown 1993, Гранберг и др. 2009), в АПС существуют когерентные структуры и заметно меньших масштабов ($\sim 100-300$ м) (Копров и др. 2000, Иванов и Бызова 2001, Anderson 2003, Koprov et al. 2004, Drobinski et al. 2004). На присутствие таких структур указывают и данные пульсаций скорости и температуры в пограничном слое, демонстрирующие спектральные зависимости с наклоном, близким к k^{-1} (Кадер 1988; Kader et al. 1989; Kader and Yaglom 1991). В отличие от роллов жизненный цикл этих структур намного меньше и составляет от 3 до 10 минут. Несмотря на их давнее наблюдение в численных моделях, уверенная и детальная экспериментальная регистрация таких структур в АПС отмечена относительно недавно (Drobinski et al. 2004, Calaf et al. 2013, Horiguchi et al. 2014, Li et al. 2016). По мнению авторов наблюдений именно с этими структурами связаны наблюдаемые спектры энергии с показателем -1 . В них просиходит до 25% диссипации турбулентной энергии. Эти структуры носят название также "крупномасштабных турбулентных структур" (по английски: VLSM-structures: «Very-Large-Scale Motions structures») и к их исследованиям прилагаются значительные усилия – (Shah and Bou-Zeid 2014, Wang et al. 2014, Fang and Porte-Agel 2015). Они, по видимому, ответственны за появление анизотропии в наблюдаемых спектрах (Elsinga, Marusic 2016) и требуют учета в схемах параметризаций АПС (Traumner et al. 2015; Wilson and Venayagamoorthy 2015). Физические механизмы усиления и поддержания таких структур обычно связывают со сдвиговыми неустойчивостями (Drobinski and Foster 2003), либо с их конвективной аналогией (Никитин и Чернышенко 1997), где роль температурного поля играют турбулентные напряжения Рейнольдса. Присутствие спиральности в пограничном слое может быть одним из источников интенсификации завихренности в таких структурах (Чхетиани 2005, Копров и др., 2005, Вазаева и др. 2017, Chkhetiani et al. 2018).

Данные измерений поля скорости ветра в приземном слое, проводившихся на Цимлянской научной станции методом акустического зондирования, использовались нами для визуализации и предварительного анализа когерентных образований типа VLSM-structures. Для детектирования структур различных масштабов выходные данные ВРМС подвергались последовательной фильтрации. Использовался метод скользящего среднего. Так, при анализе валиковой циркуляции поле вертикальной компоненты скорости осреднялось по 10-минутным интервалам. Для горизонтальных компонент скорости из результатов 10-минутного осреднения вычитались 30-минутные тренды. Для выделения субмезомасштабных структур, наблюдаемых в атмосферном приземном слое, выбирались 3-х – 5-ти минутные и 9-ти – 12-ти минутные осреднения, соответственно.

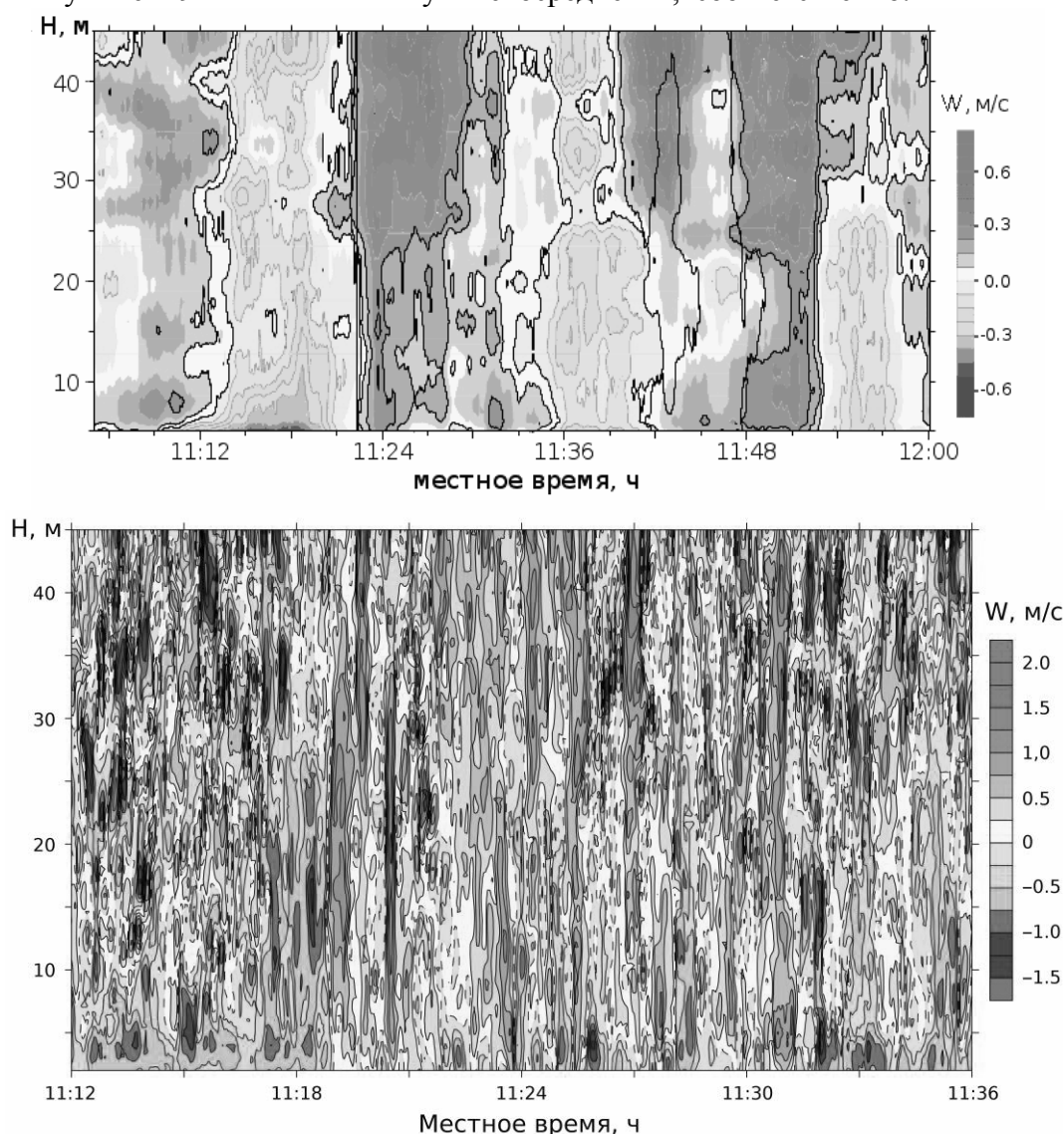


Рис. 3. Поле вертикальной компоненты скорости ветра W в приземном слое по данным ВРМС. 23 июля 2018 года, ЦНС. Вверху – 5-минутное осреднение данных; отчетливо выделяются вертикальные структуры. Внизу – фрагмент с 10-секундным осреднением.

На Рис. 3 приведен пример временной развертки вертикальной структуры вертикальной компоненты скорости W , полученной на ЦНС в дневное время в течение одного часа со скользящим 5-ти минутным осреднением. Отчетливо выделяется основной крупный временной масштаб 8 – 10 минут. Для детализации более мелких структур на Рис. 3 также показан фрагмент записи с 10-секундным осреднением. На этом фрагменте видны структуры с временными масштабами от 12 – 15 секунд до 100 секунд.

Для более полной характеристики мезомасштабных турбулентных структур и скорости ветра в АПС выше приземного слоя использовались данные многочастотного трех-компонентного доплеровского минисодара ЛАТАН-3М (Kouznetsov 2009, Каллистратова и др. 2017), работавшего на ЦНС синхронно с ВРМС. Минисодар ЛАТАН-3М работал в следующем режиме: потолок зондирования около 300 м, мертвая зона 15 м, разрешение по высоте и по времени 10 м и 5 с, соответственно. На Рис. 4 приведена эхограмма минисодара ЛАТАН-3М, диаграмма вертикальной компоненты скорости ветра, а также осредненные за 30 мин профили скорости и направления горизонтальной компоненты ветра, полученные днем 26 июля 2017 г. при ясном небе и слабом ветре. "Перьевая" форма эхо-сигнала, соответствующая термикам, и синхронные с "перьями" изменения направления вертикальной составляющей скорости ветра свидетельствуют о неустойчивой стратификации АПС и развитой конвекции в период измерений.

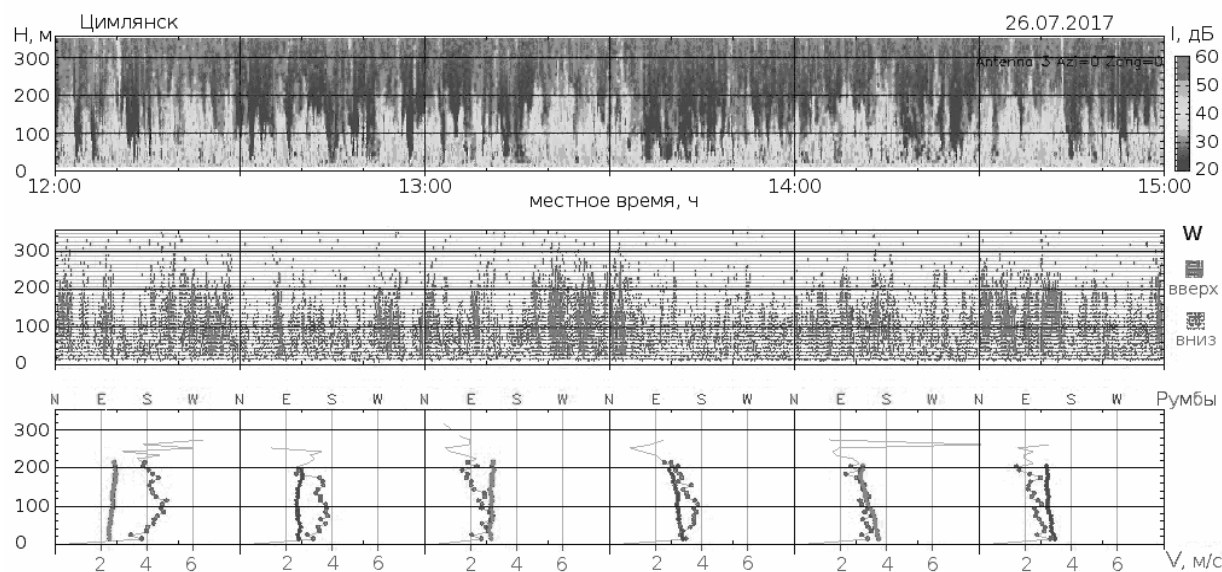


Рис. 4. Мезо-масштабная структура АПС по данным частотно-модулированного трехкомпонентного доплеровского минисодара ЛАТАН-3М, в координатах высота-текущее время. Верхняя панель - интенсивность эхо-сигнала сигнала в произвольных единицах, справа показана цветовая шкала в децибелах. Средняя панель - диаграмма вертикальной составляющей скорости. Нижняя панель - профили модуля горизонтальной скорости ветра и ее направления, осредненные за 30 мин. ЦНС, 26 июля 2017 г.

На Рис. 5 показан пример поля компонент скорости ветра в приземном слое, полученный в эти же сроки с помощью ВРМС. Основной временной масштаб 5-7 минут наблюдается во всех 3-х компонентах поля скорости.

По данным о скорости ветра, полученным с помощью ВРМС в течение полутора часов дневного времени 27 июля 2017 г., были проведены расчеты спиральности в приземном слое атмосферы. По определению, спиральность He равна скалярному произведению вектора скорости ветра $\mathbf{V}$ и завихренности поля скорости $\nabla \times \mathbf{V}$:

$$He = \mathbf{V} \cdot \nabla \times \mathbf{V}. \quad (1)$$

Основной вклад в спиральность вносят горизонтальные компоненты завихренности:

$$He(z) = -U \frac{\partial V}{\partial z} + V \frac{\partial U}{\partial z}, \quad (2)$$

где U и V – горизонтальные компоненты скорости. Вкладом в спиральность вертикальной составляющей ввиду ее малых (в 5-10 раз меньших) значений в условиях проведения экспериментов можно пренебречь (Konrov и др. 2005, Chkhetiani et al. 2018).

Методика вычисления спиральности по данным акустического зондирования детально изложена в работе (Вазаева и др. 2017). При вычислении спиральности

используется осредненное значение компонент скорости ветра. Для этой цели применялся прямоугольный скользящий фильтр. Временной интервал осреднения подбирался эмпирически и составлял в данном случае 5 минут. Профили скорости сглаживались аппроксимацией кубическими сплайнами с последующим вычислением производных от гладкого профиля.

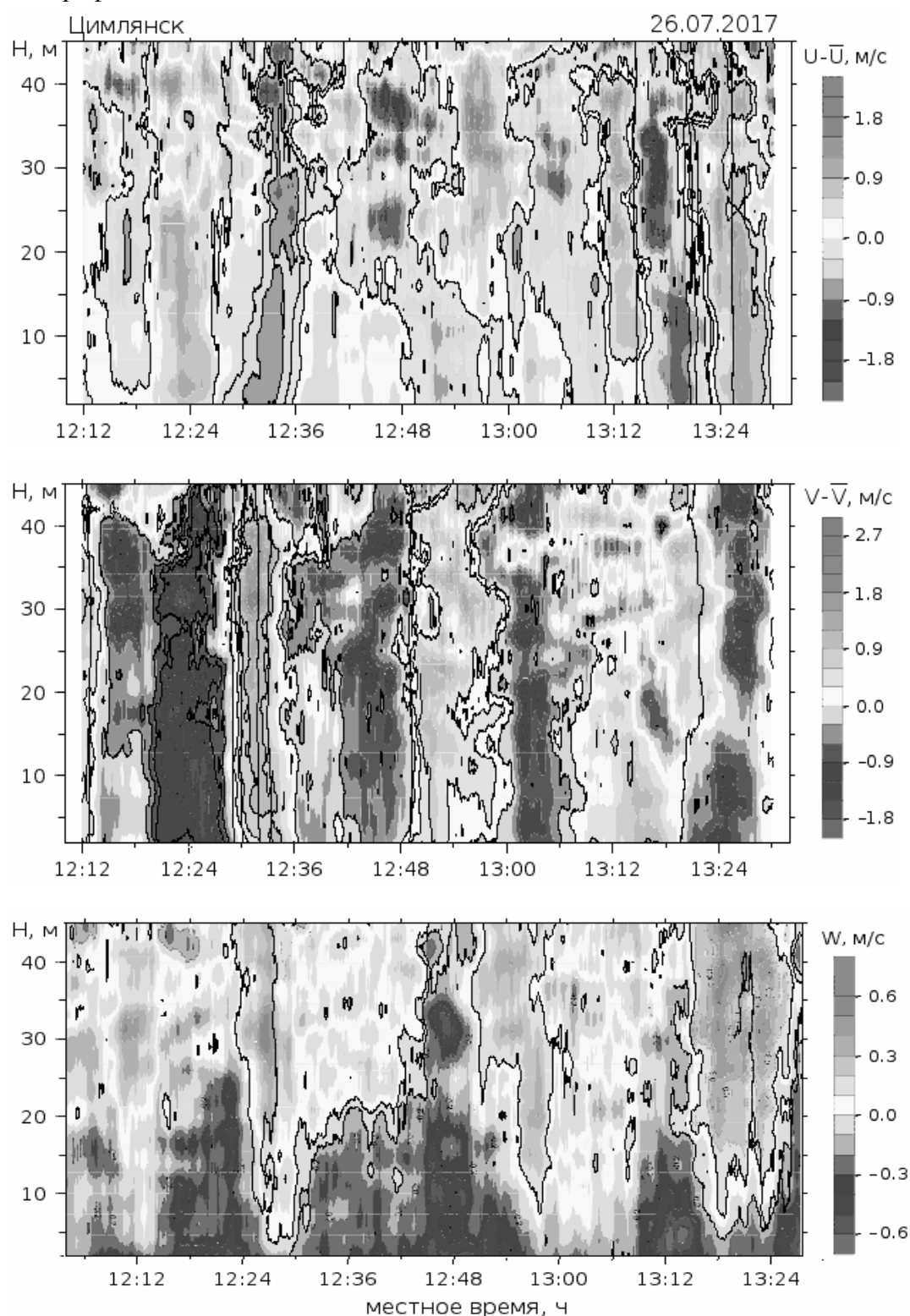


Рис. 5. Компоненты скорости ветра U (верх), V (середина) и W (низ) по данным ВРМС в приземном слое атмосферы. ЦНС, 26.07.2017. Справа - шкалы скорости. Время осреднения - 4 минуты. Из горизонтальных компонент вычтено среднее за 12 минут значение.

На Рис. 6 представлен пример временного хода вертикального распределения спиральности, рассчитанной по формуле (2) и данным ВРМС о компонентах скорости ветра в приземном слое. Можно отметить присутствие наклонных, поднимающихся структур в поле спиральности, возможно связанных с геометрией возникающих в приземном слое движений.

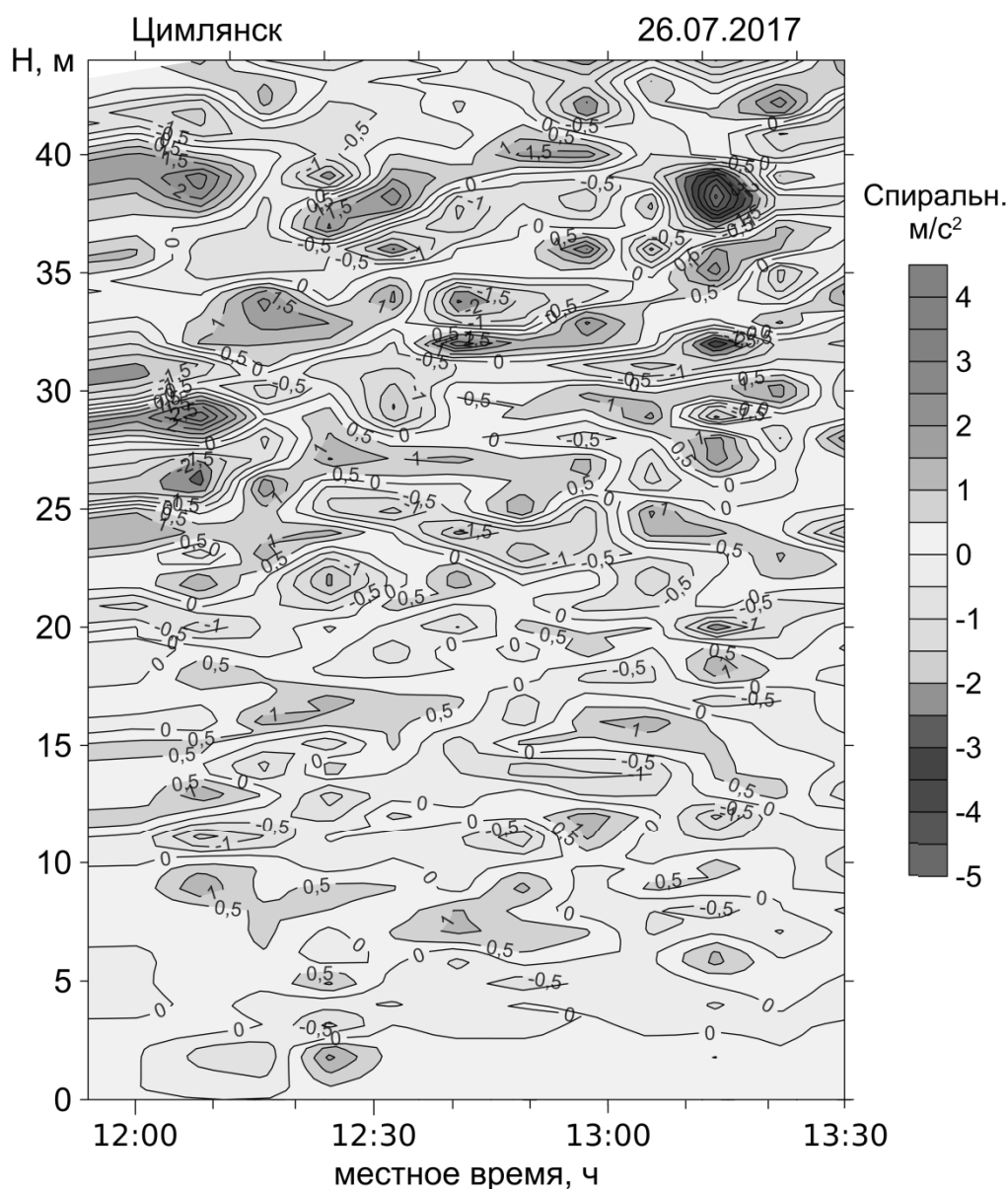


Рис. 6. Временной ход вертикального распределения спиральности по данным ВРМС о горизонтальных компонентах скорости ветра в приземном слое. ЦНС, 26.07.2017 г.

На Рис. 7 показан временной ход спиральности, осредненной по слою от 3-х до 45 м для того же периода измерений, что и на Рис 5 и 6. Здесь значения средней по слою спиральности несколько больше, чем ранее полученные значения $0.02\text{--}0.12\text{ м/с}^2$ (Вазаева и др. 2017). Это не удивительно, поскольку измерения проводились на более низких высотах, чем ранее, и именно на этих высотах происходит максимальная генерация спиральности в АПС (Chkhetiani et al. 2018)

Кроме того, были рассчитаны распределения вероятностей величины спиральности, средней по слою и на разных уровнях (5, 10 и 20 м), которые приведены на Рис. 8 (в процентах от числа событий). Отметим положительную асимметрию значений спиральности, как и должно быть в северном полушарии при отсутствии преобладающего действия местных ветров (Chkhetiani et al. 2018).

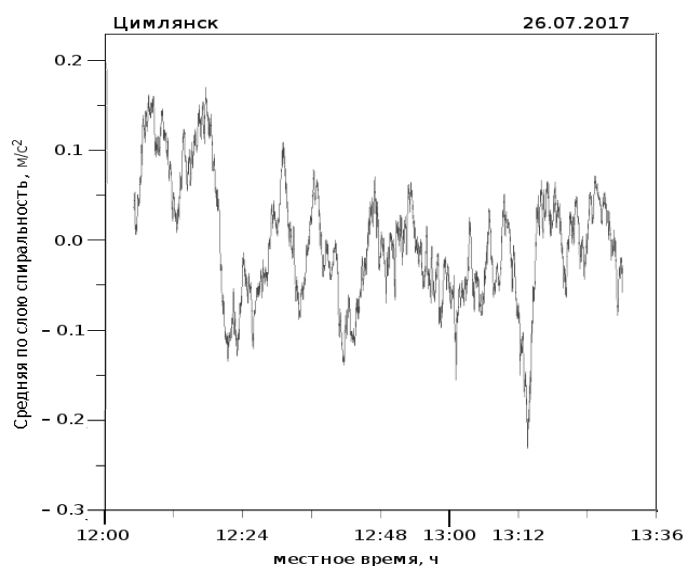


Рис. 7. Средняя по слою 3 – 45 м спиральность. ЦНС, 26.07.2017 г., 12:00 – 13:30.

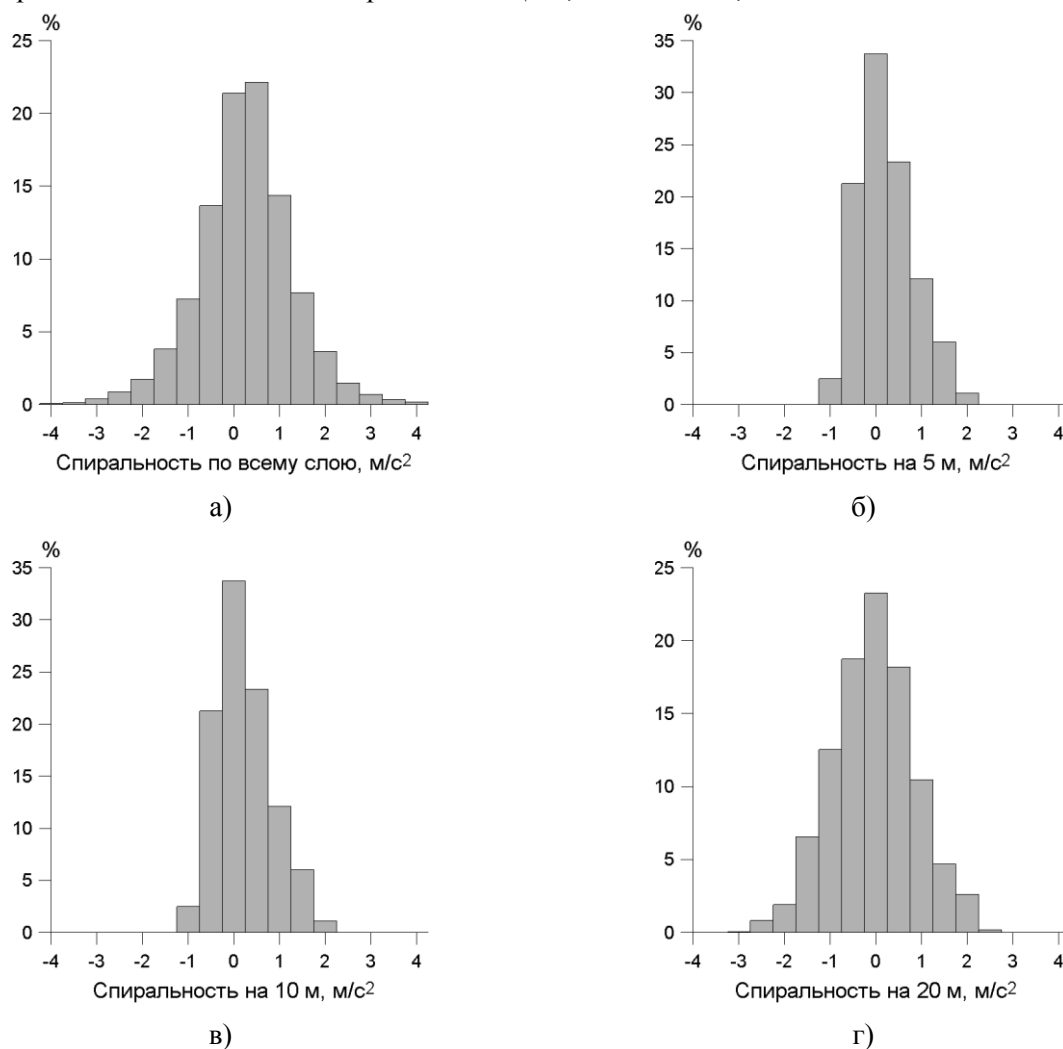


Рис. 8. Гистограммы распределения значений спиральности. а) – среднее по слою 3 – 45 м; б), в) и г) – на отдельных высотных уровнях: б) – 5 м; в) – 10 м; г) 20 м. ЦНС, 26.07.2017 г., с 12:00 до 13:30.

Заключение

Доплеровское акустическое зондирование дает возможность визуализировать тонкую структуру мезомасштабных турбулентных образований в поле ветра, и определять их пространственно-временные масштабы, а также рассчитывать значения спиральности. Созданный в ИФА им. А.М. Обухова РАН опытный экземпляр трехкомпонентного минисодара высокого разрешения (ВРМС) позволил впервые провести такие дистанционные исследования в пределах приземного слоя атмосферы. Значение этих исследований определяется тем, что завихренность воздушного течения и его спиральность генерируются именно в этом, прилегающем к подстилающей поверхности слое. В то же время, экспериментальных данных о величине спиральности в приземном слое атмосферы чрезвычайно мало. Существенно, что по данным ВРМС удастся не только рассчитать спиральность на фиксированных уровнях, как при измерениях с помощью циркулимента, но и получить среднюю спиральность по всему слою, либо по его отдельным частям.

Оригинальная конструкция ВРМС, использующая отдельные акустические антенны для излучения и приема звука, позволила уменьшить мертвую зону локатора и охватить измерениями диапазон высот от 3-х до 45-ти метров при разрешающей способности около одного метра по высоте и одной секунды по времени. Сопоставления с измерениями скорости ветра акустическим анемометром показали достоверность и хорошую точность данных ВРМС.

Данные о высотном распределении компонент скорости ветра, полученные во время испытаний ВРМС на Цимлянкой научной станции ИФА, были использованы для расчета величины спиральности при развитой конвекции. Приведены примеры пространственно-временного распределения спиральности в приземном слое, временного хода спиральности, осредненной по всему приземному слою, а так же пример распределения вероятностей значений спиральности на дискретных высотах. По предварительным данным, в приземном слое при неустойчивой стратификации преобладает положительная спиральность с абсолютными значениями в диапазоне $0.01 - 0.20 \text{ м с}^{-1}$.

В целом, дистанционные измерения спиральности в приземном слое, определенные по данным акустического зондирования, согласуются с локальными измерениями, полученными с помощью циркулимента.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проекты №№ 17-05-0116, 18-05-00576, 18-35-00600, и Программ фундаментальных исследований Президиума РАН №№ 2, 51, 56. Содарные измерения в 2017-2018 гг проводились при поддержке грантов РФФИ по проектам №№ 16-05-01072 и 16-05-00704. Авторы выражают признательность Максименкову Л.О. за полезные дискуссии.

Литература

1. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 174-186.
2. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45 № 5. С. 579-587.
3. Иванов В.Н., Бызова Н.Л. Когерентные структуры в пограничном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 2001. № 1. С. 5-25.
4. Кадер Б.А. Трехслойная структура неустойчиво-стратифицированного приземного слоя атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 12. С. 1235-1250.
5. Каллистратова М.А. Экспериментальное исследование рассеяния звука в турбулентной атмосфере // Доклады Академии Наук СССР. 1955. Т. 125. № 1. С. 69-72.
6. Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И. Конвективные структуры приземного слоя воздуха. Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С.44-54.

7. *Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г.* Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы. Доклады Академии Наук. 2005. Т. 403. № 5. С. 627-630.
8. *Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Юшков В.П., Кузнецов Д.Д.* Синхронные наблюдения волн Кельвина-Гельмгольца на мезомасштабной сети дистанционного зондирования АПС в Московском регионе // (Настоящий сборник) 2018.
9. *Никитин Н.В., Чернышенко С.М.* О природе организованных структур в пристенных турбулентных течениях // Механика жидкости и газа. 1997. № 1. С. 24-30.
10. *Чхетиани О.Г.* Интенсификация завихренности в турбулентных течениях со спиральностью // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 161-171.
11. *Петенко И.В., Шурыгин Е.А.* Радиосодарный комплекс для дистанционных синхронных измерений скорости ветра, температуры и ее флуктуаций // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 8. С. 771- 773.
12. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. / М.: Наука. 1967. 548 с
13. *Anderson P.S.* Fine-scale structure observed in a stable atmospheric boundary layer by sodar and kite-borne tetheredsonde // Boundary-Layer Meteorology. 2003. V. 107. No. 2. P. 323–351
14. *Argentini S., Pietroni I., Mastrantonio G., Petenko I., Viola A.* Use of a high-resolution sodar to study surface-layer turbulence at night // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 143. No. 1. P. 177–188.
15. *Bradley S.* Atmospheric acoustic remote sensing. / CRC Press. 2008. 265 p.
16. *Calaf M., Hultmark M., Oldroyd H.J., Simeonov V., Parlange M.B.* Coherent structures and the k^{-1} -spectral behaviour // Phys. Fluids. 2013. V. 25. No. 12. P. 125107.
17. *Carper M.A., Porte-Agel F.* The role of coherent structures in subfilter-scale dissipation of turbulence measured in the atmospheric surface layer // Journal of Turbulence. 2004. V. 5. P. 32-32.
18. *Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V.* Turbulent helicity in the atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 2018. V. 168. No. 3, pp 361–385
19. *Drobinski P., Carlotti P., Newsom Rob K., Banta R. M., Foster R. C., Redelsperger J.L.* The Structure of the Near-Neutral Atmospheric Surface Layer // J. Atm. Sci. 2004. V. 61. No. 6. P. 699-714
20. *Drobinski P., Foster R.C.* On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 2003. V. 108. No. 2. P. 247–256
21. *Elsinga G. E., Marusic I.* The anisotropic structure of turbulence and its energy spectrum // Phys. Fluids. 2016. V. 28. Iss. 1. P. 011701.
22. *Etling D., Brown R.A.* Roll vortices in the planetary boundary layer: A Review // Boundary-Layer Meteorol. 1993. V. 21. No. 3. P. 215-248.
23. *Fang, J., Porte-Agel, F.* Large-eddy simulation of very-large-scale motions in the neutrally stratified atmospheric boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 2015. V. 155. No. 3. P. 397-416.
24. *Foster R.C., Levy G.* The contribution of organized roll vortices to the surface wind vector in baroclinic conditions // J. Atm. Sci. 1998. V.55, No. 8. P. 1466-1472.
25. *Horiguchi M., Hayashi T., Adachi A., Onogi S.* Stability dependence and diurnal change of large-scale turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer observed from a meteorological tower // Boundary-Layer Meteorol. 2014. V. 151, No. 2. P. 221-237.
26. *Hutchins N., Chauhan K., Marusic I., Monty J., Klewicki J.* Towards reconciling the large-scale structure of turbulent boundary layers in the atmosphere and laboratory // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 145, No. 2. P. 273-306.
27. *Kader B.A., Yaglom A.M., Zubkovskii S.L.* Spatial correlation functions of surface-layer atmospheric turbulence in neutral stratification // Boundary-Layer Meteorol. 1989. V. 47. Nos. 1- 4. P. 233-249.
28. *Kader B.A., Yaglom A.M.* Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification // In Turbulence and Coherent Structures (pp. 387-412). Springer Netherlands. 1991.
29. *Kallistratova M.A.* Acoustic and radioacoustic remote sensing studies in CIS (Former USSR) // Int. J. Remote Sensing. 1994. V. 15. No. 2. P. 251-266.
30. *Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D., Kramar V.F., Kuznetsov D.D.* Profiles of vertical wind speed variances within nocturnal low-level jets observed with a sodar // J. Atmos. Oceanic Technol. 2013. V. 30. No. 9. P. 1970–1977.
31. *Koprov B.M., Koprov V.M., Makarova T.I., Golitsyn G.S.* Coherent structures in the atmospheric surface layer under stable and unstable conditions // Boundary-Layer Meteorol. 2004.V.111. No. 1. P.19-32.
32. *Kouznetsov R.D.* The multiple-frequency sodar with high temporal resolution // Meteorol. Zeitschrift. 2009. V. 18. No. 2. P. 169–173.

33. *Li D., Katul G.G., Gentile P.* The k^{-1} scaling of air temperature spectra in atmospheric surface layer flows // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2016. V. 142. Iss. 694. P. 496-505.
34. *Metzger M., McKeon B.J., Holmes H.* The near-neutral atmospheric surface layer: turbulence and non-stationarity, Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2007. V. 365. Iss. 1852. P. 859-876.
35. *Shah S., Bou-Zeid E.* Very-large-scale motions in the atmospheric boundary layer educed by snapshot proper orthogonal decomposition, Boundary-Layer Meteorol. 2014. V. 153. No. 3. P. 355-387.
36. *Tisler P., Vihma T., Pirazzini R., Palo T., Kouznetsov R.* Properties and temporal variability of summertime temperature inversions over Dronning Maud Land, Antarctica // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2017. V. 143, Iss. 702, P. 582-595.
37. *Traumner K., Damian T., Stawiarski C., Wieser A.* Turbulent structures and coherence in the atmospheric surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 2015. V. 154. No. 1. P. 1-25.
38. *Wang G., Bo T., Zhang J., Zhu D., Zheng X.* The critical frequency of the large-scale vortices and the background turbulence in desert area // Atmos. Research. 2014. V. 143. P. 293-300.
39. *Wilson J.M., Venayagamoorthy S.K.* A Shear-Based Parameterization of Turbulent Mixing in the Stable Atmospheric Boundary Layer, J. Atmos. Sci. 2015. V. 72. No. 5. P. 1713-1726.