

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.511.6:621.371

Сравнение результатов совместных измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами Stream Line и ЛРВ

И.Н. Смалихо[✉], В.А. Банах, И.А. Разенков, А.А. Сухарев,
А.В. Фалиц, А.М. Шерстобитов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 2.06.2022 г.;
после доработки 23.06.2022 г.;
принята к печати 15.08.2022 г.

Импульсный когерентный доплеровский лидар (ИКДЛ) ЛРВ, созданный в Лаборатории распространения волн ИОА СО РАН, тестировался в двух экспериментах, проведенных в 2021 г. на Базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН и на побережье оз. Байкал. В экспериментах также был задействован ИКДЛ Stream Line серийного производства фирмы HALO Photonics (Великобритания). Сравнительный анализ оценок средних горизонтальной и вертикальной скоростей ветра, полученных на основе данных измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, показал хорошее согласие результатов (коэффициент корреляции оценок равен 0,98 при 30-минутном усреднении данных).

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, скорость ветра; coherent Doppler lidar, wind velocity.

Введение

Импульсный когерентный доплеровский лидар (ИКДЛ) является в настоящее время наилучшим техническим средством для получения оперативной информации о ветровых полях в пограничном слое атмосферы (ПСА). Существуют различные типы ИКДЛ (см., например, [1]). Благодаря интенсивному развитию рынка телекоммуникаций в последнее десятилетие созданы новые оптико-электронные компоненты лидаров на основе разнообразных оптических волокон, полупроводниковые и волоконные лазеры и многое другое. Массовое производство этих изделий привело к существенному снижению их стоимости. Использование полупроводниковых лазеров и квантовых волоконных усилителей позволяет сегодня создавать компактные и надежные лидарные системы, в частности полностью волоконный (all-fiber) ИКДЛ [2–15]. Такие лидары, как правило, работают на длине волны около 1,55 мкм, что удовлетворяет требованию безопасности для глаз. Отличительной особенностью лидаров является высокая частота следования импульсов (от 5 до 50 кГц). Это дает возможность

использовать большое число посылок зондирующих импульсов в атмосферу для аккумуляции данных при получении оценок спектров мощности лидарного сигнала (корреляционных функций комплексного сигнала), а следовательно, получать результаты с требуемыми точностью и временным разрешением при очень низком отношении сигнал-шум. Описание существующих дизайн схем для 1,5-микронных оптоволоконных ИКДЛ и их основные параметры даны, в частности, в [14, 15].

Ранее в экспериментах по изучению ветровой турбулентности в ПСА нами использовался лишь один ИКДЛ – оптоволоконный ИКДЛ Stream Line (серийный прибор производства фирмы HALO Photonics, Великобритания [5]). Во время экспериментов с этим лидаром применялось как коническое сканирование зондирующим пучком, так и измерения при фиксированном вертикальном направлении оси зондирующего пучка. В результате получились исходные данные, из которых извлекалась информация о векторе скорости ветра и параметрах ветровой турбулентности в ПСА [16, 17]. Однако использование в эксперименте еще одного ИКДЛ позволило бы значительно расширить возможности по изучению динамики ПСА. В связи с этим в Лаборатории распространения волн (ЛРВ) ИОА СО РАН был разработан новый ИКДЛ, которому мы дали название «лидар ЛРВ».

Лидар ЛРВ является аналогом лидара Stream Line. Макет лидара ЛРВ был создан в 2019 г.

* Игорь Николаевич Смалихо (smalikh@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru); Артем Андреевич Сухарев (sukharev@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru); Артем Михайлович Шерстобитов (shram@iao.ru).

и затем были успешно проведены его тестовые испытания [18]. В 2021 г. нами была представлена усовершенствованная версия лидара ЛРВ (установлено новое сканирующее устройство, смонтирован внешний корпус лидара, что позволило эксплуатировать лидар в любых погодных условиях в летний период, загружено новое программное обеспечение в компьютер лидара и сделан ряд других изменений, способствовавших улучшению работы лидара). В связи с этим требовалось новое тестирование лидара ЛРВ, использующего коническое сканирование зондирующим пучком, в совместном с лидаром Stream Line эксперименте в различных атмосферных условиях.

В настоящей статье представлены результаты лидарных экспериментов, выполненных нами в 2021 г. на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН и на побережье оз. Байкал. Цели этих эксперименты включали, в том числе, тестирование лидара ЛРВ и сопоставление его данных с измерениями скорости ветра лидаром Stream Line.

1. Лидары Stream Line и ЛРВ

Ниже приведены основные параметры имеющихся у нас ИКДЛ Stream Line и ЛРВ.

1.1. Лидар Stream Line

Во время работы лидар Stream Line через приемо-передающий телескоп диаметром $D_t = 7,5$ см посылает в атмосферу импульсы излучения на длине волны $\lambda = 1,5$ мкм длительностью $\tau_p = 170$ нс с энергией в импульсе $E_p = 14$ мкДж; частота следования импульсов $f_p = 15$ кГц. Зондирующее излучение может фокусироваться на любое расстояние начиная с расстояния $F = 300$ м вплоть до полной коллимации зондирующего пучка ($F = \infty$). Фокусировка на короткие расстояния F позволяет многократно увеличить отношение сигнал-шум SNR (здесь и далее мы определяем SNR как отношение средней мощности когерентно детектируемого эхо-сигнала к средней мощности шумов детектора в частотной полосе пропускания $B = 50$ МГц) в окрестности перетяжки зондирующего пучка по сравнению со случаем $F = \infty$.

Для каждой посылки зондирующего импульса в атмосферу из регистрируемых приемной системой лидара отсчетов сигнала получают последовательно комплексного лидарного сигнала (как функцию от времени или расстояния от лидара) в частотной полосе пропускания $B = 50$ МГц (что соответствует шагу по дальности $c/(2B) = 3$ м, c – скорость света). Воспользовавшись временным окном шириной $T_w = 120$ нс, из таких последовательностей путем аккумуляции (усреднения) соответствующих данных по N_a посылкам зондирующего импульса в атмосферу рассчитываются корреляционные функции комплексного лидарного сигнала для различных расстояний от лидара. Описание алгоритма оценивания SNR дано в [19]. Из корреляционных функ-

ций с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) получают спектры мощности лидарного сигнала с произвольно заданным числом спектральных каналов [19]. По положению максимума спектра определяется доплеровский сдвиг частоты, который пропорционален радиальной скорости V_r (проекции вектора скорости ветра на ось зондирующего пучка). Лидар с $\tau_p = 170$ нс и $T_w = 120$ нс формирует зондируемый объем с продольным размером $\Delta z = 30$ м [19].

В комплект лидара Stream Line входит сканирующее устройство, позволяющее применять различные геометрии измерения путем изменения направления оси зондирующего пучка. В частности, с помощью конического сканирования можно получить исходные лидарные данные (массив оценок радиальной скорости под различными азимутальными углами), из которых затем определяются три компоненты вектора скорости ветра на различных высотах в ПСА.

1.2. Лидар ЛРВ

Основные параметры лидара ЛРВ следующие: длина волны зондирующего излучения $\lambda = 1,55$ мкм; диаметр телескопа $D_t = 5$ см; зондирующий пучок коллимирован ($F = \infty$); длительность импульса τ_p может задаваться от 100 до 1000 нс (в большинстве наших экспериментов $\tau_p = 200$ нс); энергия в импульсе $E_p = 30$ мкДж (при $\tau_p = 200$ нс); частота следования импульсов $f_p = 10$ кГц; частотная полоса пропускания в используемом в этом лидаре АЦП $B_0 = 250$ МГц (расстояние между отсчетами реального лидарного сигнала $c/(2B_0) = 0,6$ м), промежуточная частота (разность частот зондирующего и опорного излучения) $f_{int} = 80$ МГц. Для различных расстояний от лидара, воспользовавшись определенным временным окном (например, шириной $T_w = 128$ нс), БПФ и аккумуляцией оценок спектров мощности лидарного сигнала (доплеровских спектров), по N_a посылкам зондирующего излучения в атмосферу получаем спектры, каждый из которых состоит из 32 спектральных каналов шириной $\Delta f = 125$ МГц/32 $\approx 3,9$ МГц. Применяемый алгоритм позволяет получать до 390 доплеровских спектров для различных расстояний от лидара (например, если спектры измерены с шагом 9,6 м, то максимальная дальность зондирования составляет $\sim 3,5$ км).

Полученные доплеровские спектры представляют собой исходные данные измерений лидаром ЛРВ. Прежде чем оценить из спектра радиальную скорость V_r , применяется Фурье-интерполяция для уменьшения ширины спектрального канала в 64 раза (до 0,061 МГц или, с учетом соотношения Доплера, 0,047 м/с). После этого радиальная скорость оценивается по положению максимума в доплеровском спектре. Более подробное описание этой процедуры дано в [20], где используются исходные данные измерений лидаром Windcube 200s.

Таким образом, лидар ЛРВ с заданными параметрами формирует зондируемый объем примерно того же размера Δz , что и лидар Stream Line.

У последней модификации лидара ЛРВ имеется также новый сканер, позволяющий во время измерений изменять направление зондирующего пучка произвольным образом, в том числе осуществлять коническое сканирование зондирующим пучком. Так как при достаточно высоком SNR достоверность измерений скорости ветра лидаром Stream Line не вызывает сомнений (что следует из проведенных ранее экспериментов), для тестирования возможностей измерения скорости ветра конически сканирующим лидаром ЛРВ мы воспользовались данными экспериментов, в которых были одновременно задействованы лидар Stream Line и модифицированная версия лидара ЛРВ.

2. Эксперимент на БЭК ИОА СО РАН

Возможности измерения скорости и направления ветра в ПСА конически сканирующим лидаром ЛРВ тестировались в совместном с лидаром Stream Line эксперименте, проведенном на территории Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН (56°06'51.41" с.ш., 85°06'03.22" в.д.) в августе 2021 г. Лидары Stream Line и ЛРВ были установлены на расстоянии 2,5 м друг от друга (рис. 1).



Рис. 1. Лидар ЛРВ (слева) и лидар Stream Line (справа) во время эксперимента на БЭК ИОА СО РАН

Летом 2021 г. непрерывные измерения лидаром Stream Line на БЭК ИОА СО РАН начались 1 июля и закончились 30 августа. Так как основной целью этих измерений было изучение ветровой турбулентности ПСА, применялась стратегия измерений, предложенная в [17]. Сначала осуществляется одно коническое сканирование при угле места $\varphi = 60^\circ$ в течение времени $T_{sca} = 1$ мин. Затем угол места быстро (за время около $\delta t = 15$ с) изменяется на $\varphi = 90^\circ$ (зондирующий пучок направлен строго вертикально вверх) и лидар измеряет в течение времени $T_{vert} = 500$ с. После изменения угла места с 90° на 60° снова применяется коническое сканирование. Эта процедура многократно повторялась в течение длительного времени. Продолжительность одного цикла данной процедуры измерения составляет

$T_c = T_{scan} + \delta t + T_{vert} + \delta t \approx 10$ мин. Для аккумуляции исходных данных лидара мы использовали по $N_a = 7500$ посылок зондирующих импульсов в атмосфере. В этом случае для ИКДЛ Stream Line с частотой следования импульсов $f_p = 15$ кГц продолжительность измерения радиальной скорости составляет $\delta t = N_a / f_p = 0,5$ с, число лучей при коническом сканировании $M_s = T_{scan} / \delta t = 120$.

С помощью описанной выше стратегии измерений лидаром Stream Line из полученных массивов оценок радиальной скорости можно определить спектральную плотность вертикальной компоненты вектора скорости ветра $S(f)$ (измерения при $\varphi = 90^\circ$) и среднюю скорость ветра U (измерения при $\varphi = 60^\circ$) [17]. Информация о скорости U требуется для оценивания параметров ветровой турбулентности (скорости диссипации турбулентной энергии ϵ и дисперсии вертикальной компоненты вектора скорости ветра σ_w^2) из спектра $S(f)$ (способ получения оценок и расчет погрешностей описаны в [17]).

Использование в эксперименте одновременно двух ИКДЛ, один (лидар 1) из которых измеряет только при фиксированном вертикальном положении оси зондирующего пучка, а другой (лидар 2) использует только коническое сканирование зондирующим пучком, позволило существенно улучшить точность определения средней скорости ветра (из измерений лидаром 2) и параметров ветровой турбулентности (из измерений лидарами 1 и 2). В качестве лидаров 1 и 2 можно было бы взять лидары Stream Line и ЛРВ соответственно, но для этого необходимо было удостовериться в репрезентативности оценок средней скорости ветра из измерений конически сканирующим лидаром ЛРВ.

Во время измерения лидаром ЛРВ (совместно с лидаром Stream Line, в соответствии с описанной выше стратегией измерения) на БЭК ИОА СО РАН в августе 2021 г. применялось только коническое сканирование зондирующим пучком при угле места $\varphi = 60^\circ$. Для аккумуляции данных использовалось по $N_a = 10000$ посылок зондирующего импульса в атмосферу и, следовательно, время дискретизации данных (для SNR и V_r) $\delta t = N_p / f_p = 1$ с (напомним, что для этого лидара $f_p = 10$ кГц). Продолжительность одного конического сканирования лидаром Stream Line в этом эксперименте). По сравнению с измерениями лидаром Stream Line, где временной интервал Δt последовательности оценок скорости $\hat{U}(n\Delta t)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$ – номер цикла), получаемых из данных каждого сканирования, составляет ~ 10 мин, в измерениях лидаром ЛРВ такой временной интервал $\Delta t \approx T_{scan} = 1$ мин.

На рис. 2 (цв. вкладка) приведен пример распределения SNR (усредненные оценки, полученные из измерений за время одного конического сканирования) и скорости ветра (оценки из данных одного конического сканирования) по высоте $h_k = k\Delta R \sin\varphi$ и времени $t_n = n\Delta t$, где $k = 1, 2, 3, \dots$; $\varphi = 60^\circ$; $\Delta R = 18$ м и $\Delta t = 10$ мин в случае лидара Stream Line; $\Delta R = 9,6$ м и $\Delta t = 1$ мин в случае лидара ЛРВ.

На рис. 2, *a* показано пространственно-временное распределение отношения сигнал-шум $SNR(h_k, t_n)$ для лидара Stream Line. Благодаря фокусировке зондирующего излучения на расстояние 300 м высотные профили отношения сигнал-шум имеют максимум примерно на этом же расстоянии в период времени с 00:00 до 09:00 (когда измерения проводились в ясную погоду). Несмотря на то, что энергия зондирующего импульса у лидара ЛРВ более чем в 2 раза выше, чем у лидара Stream Line, на высотах более 150 м SNR лидара ЛРВ, наоборот, в несколько раз ниже (на рис. 2, *a* не приведено $SNR(h_k, t_n)$ для ЛРВ). Тем не менее из измерений лидаром ЛРВ (также как и лидаром Stream Line) при $SNR \geq -24$ дБ удается получить несмещенную оценку вектора скорости ветра с помощью метода фильтрованной синусоидальной оценки [1]. Из визуального сопоставления данных на рис. 2, *б* и *в* следует хорошее согласие результатов измерения скорости ветра двумя лидарами.

На рис. 3 (цв. вкладка) представлены двумерные распределения и временные ходы угла направления ветра на высоте 300 м, восстановленные из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ в тот же день, что и для данных на рис. 2. Здесь мы также видим хорошее согласие результатов измерений этими ИКДЛ.

Согласно данным рис. 2, *a*, SNR варьируется от -20 до 15 дБ в атмосферном слое 150–350 м (следует отметить, что при $SNR > 0$ дБ имеет место отражение зондирующего излучения от облака), составляя в среднем -9 дБ. Это достаточно высокое значение, чтобы считать оценки скорости ветра практически без инструментальной погрешности. В этом же атмосферном слое (150–350 м) значения SNR для лидара Stream Line за предыдущий день (22.08.2021 г., измерения в ясную погоду) варьируются в пределах от -24 до -2 дБ, составляя в среднем -14 дБ. Таким образом, лидарные измерения внутри рассматриваемого атмосферного слоя 22 августа были выполнены при SNR в среднем на 5 дБ меньше, чем среднее SNR 23 августа 2021 г. На рис. 4 показаны гистограммы SNR, при построении каждой из которых использовалось по 1870 значений распределения $SNR(h_k, t_n)$ ($150 \text{ м} \leq h_k \leq 350 \text{ м}$, $0 \leq t_n \leq 24 \text{ ч}$).

На рис. 5 (цв. вкладка) представлены распределения скорости ветра $\hat{U}(h_k, t_n)$, восстановленные из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ 22 и 23 августа 2021 г. Упомянутое выше различие средних значений SNR в 5 дБ сказалось на степени совпадения их результатов. Если визуальное сравнение распределений $\hat{U}(h_k, t_n)$ на рис. 5, *в* и *г* указывает на их хорошее согласие, то отличие распределений скоростей ветра на рис. 5, *а* и *б* является более наглядным, особенно для измерений до полудня, когда SNR принимало минимальные значения, что вызвало ухудшение точности лидарных оценок скорости ветра. Для определения скорости ветра из массива сильно зашумленных оценок радиальной скорости, полученных из измерений лидаром

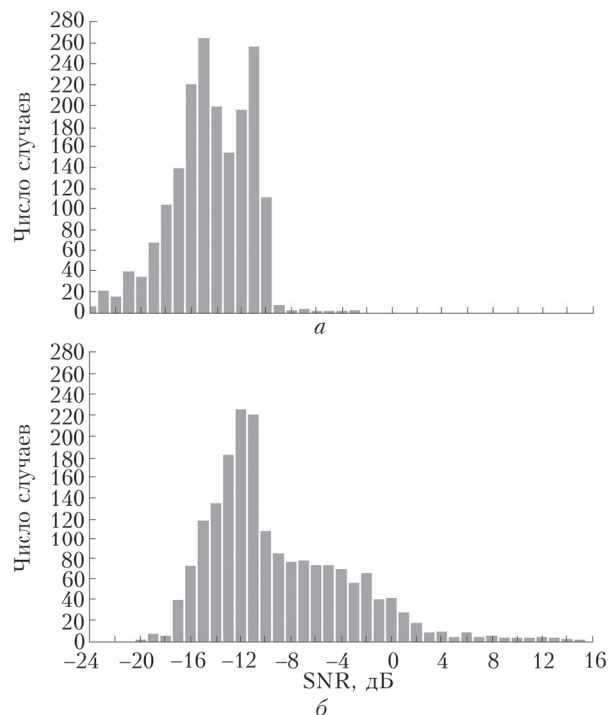


Рис. 4. Гистограммы отношения сигнал-шум при измерении лидаром Stream Line на БЭК ИОА СО РАН 22 (*a*) и 23 (*б*) августа 2021 г. в атмосферном слое 150–350 м

за одно коническое сканирование, необходимо применение фильтрованной синусоидальной подгонки [1].

Для большей наглядности на основе данных рис. 5 мы построили временные ходы скорости ветра (рис. 6). Так как лидарные измерения 22 августа 2021 г. были проведены при более низких значениях SNR, чем 23 августа, из-за инструментальной погрешности оценивания скорости мы наблюдаем в 1-й день в вариациях, представленных на рис. 6, «дриблинг» с более высокой амплитудой случайных отклонений (особенно это касается лидара ЛРВ, для которого не используется фокусировка зондирующего пучка), чем во 2-й день измерений. Следует также отметить, что случайные отклонения оценок скорости ветра обусловлены, кроме инструментальной погрешности, турбулентными вариациями ветра. Влияние турбулентности оказывается наибольшим в дневное время (12:00–18:00), когда солнце существенно нагревает поверхности Земли (см. данные для 22 августа на рис. 6).

В предложенном в [17] методе оценивания параметров ветровой турбулентности из лидарных измерений спектральной плотности скорости вертикального ветра $S(f)$ требуется информация о средней скорости ветра U . Так как, чтобы получить $S(f)$, используются соответствующие данные, измеряемые лидаром в течение 30 мин, величина U рассчитывается как среднее по последовательности оценок скорости ветра $\hat{U}(n\Delta t)$ в пределах этого 30-минутного интервала. Поскольку в измерениях лидаром Stream Line шаг по времени $\Delta t = 10$ мин, усреднение проводится по четырем оценкам $\hat{U}(n\Delta t)$ [17]. В случае лидара ЛРВ $\Delta t = 1$ мин и, следовательно, чтобы

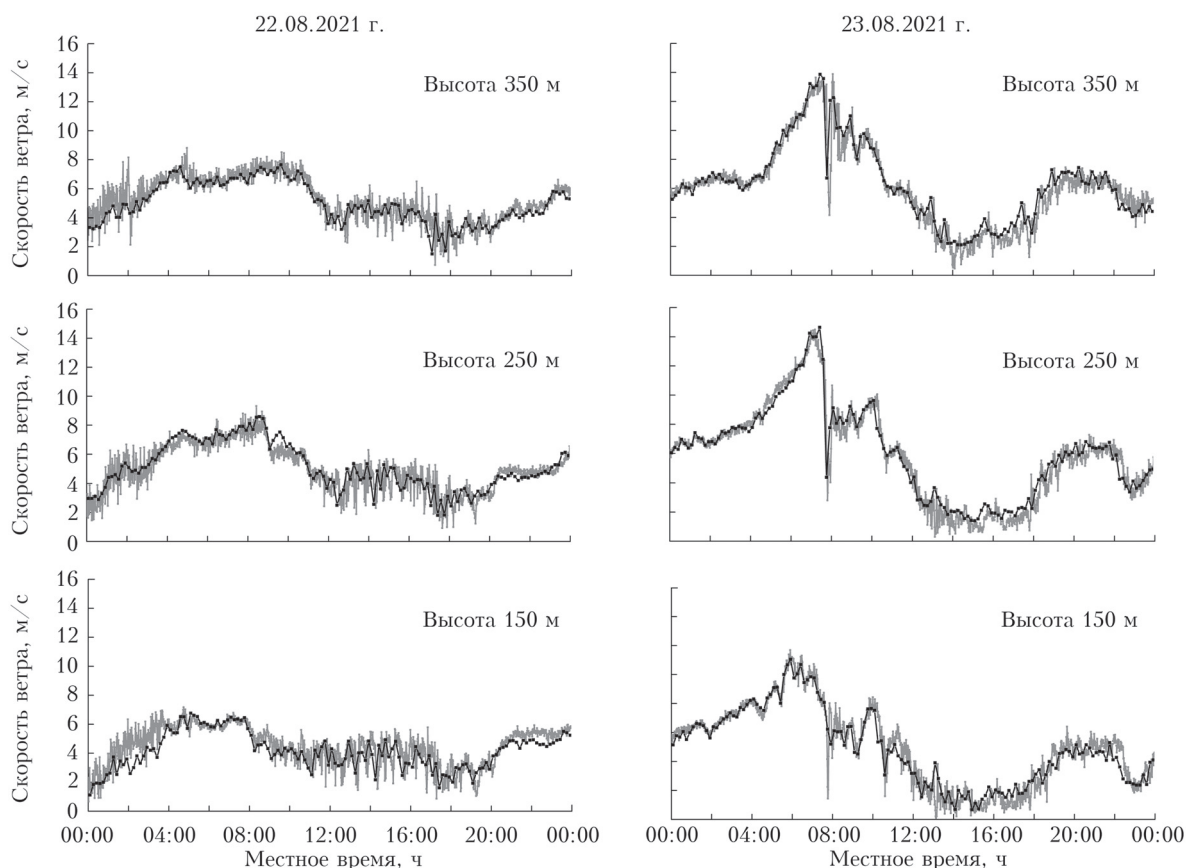


Рис. 6. Временные вариации скорости ветра, восстановленные из измерений лидаром Stream Line (черные кривые) и лидаром ЛРВ (серые кривые) на БЭК ИОА СО РАН в течение двух суток начиная с 00:00 22 августа 2021 г. на различных высотах

рассчитать среднюю скорость ветра U , необходимо усреднить 31 оценку $\hat{U}(n\Delta t)$ в пределах 30-минутного интервала.

Воспользовавшись прямоугольным временным окном шириной 30 мин для скользящего усреднения показанных на рис. 6 временных ходов $\hat{U}(n\Delta t)$, мы получили временные ходы для средней скорости ветра $U(n\Delta t)$ с временным шагом $\Delta t = 10$ мин (рис. 7). Здесь мы видим значительно меньшее различие в результатах, получаемых из совместных измерений лидарами Stream Line и ЛРВ, чем на рис. 6.

Воспользовавшись данными рис. 5 для атмосферного слоя 150–350 м, их 30-минутным усреднением и интерполяцией по высоте, мы получили по 1400 оценок средней скорости, которые обозначим, как U_1 (измерения лидаром Stream Line) и U_2 (измерения лидаром ЛРВ). Сравнение оценок U_1 и U_2 , получаемых из одновременных измерений на одной и той же высоте, показано на рис. 8. Анализируя результаты сравнения, мы нашли, что коэффициент корреляции лидарных оценок средней скорости ветра U_1 и U_2 составляет 0,98. Коэффициенты линейной регрессии ($U_2 = aU_1 + b$, см. прямую линию на рис. 8) $a = 0,998$ и $b = -0,016$ м/с. Расхождение оценок средней скорости $\beta = \langle (U_2 - U_1) \rangle_E = -0,02$ м/с

и $\mu = \sqrt{\langle (U_2 - U_1)^2 \rangle_E} = 0,42$ м/с, где оператор $\langle \dots \rangle_E$ означает усреднение по всем 1400 парам (U_1, U_2) , показанным на рис. 8 в виде кружочков. В предположении, что оценки U_1 и U_2 статистически независимы и их погрешность одинакова, погрешность оценки средней скорости ветра из измерений лидаром ЛРВ $\mu/\sqrt{2} = 0,3$ м/с. Такая точность оценки средней скорости является вполне достаточной для определения параметров ветровой турбулентности из измерений спектра $S(f)$, если истинная средняя скорость ветра не меньше 1,5 м/с.

С 14 по 24 августа 2021 г. на БЭК ИОА СО РАН одновременно работали два ИКДЛ. В лидаре Stream Line применялась его обычная стратегия, когда попеременно осуществлялось коническое сканирование и измерение с фиксированной в вертикальном направлении осью зондирующего пучка. В лидаре ЛРВ применялось только коническое сканирование зондирующим пучком. Результаты совместных измерений скорости ветра этими лидарами 22 и 23 августа проанализированы выше. Кроме того, мы провели такой же анализ для остальных дней измерений и получили примерно те же значения коэффициента корреляции оценок U_1 и U_2 , коэффициентов линейной регрессии a и b , параметров расхождения β и μ . Таким образом, тестирование усовершенствованной

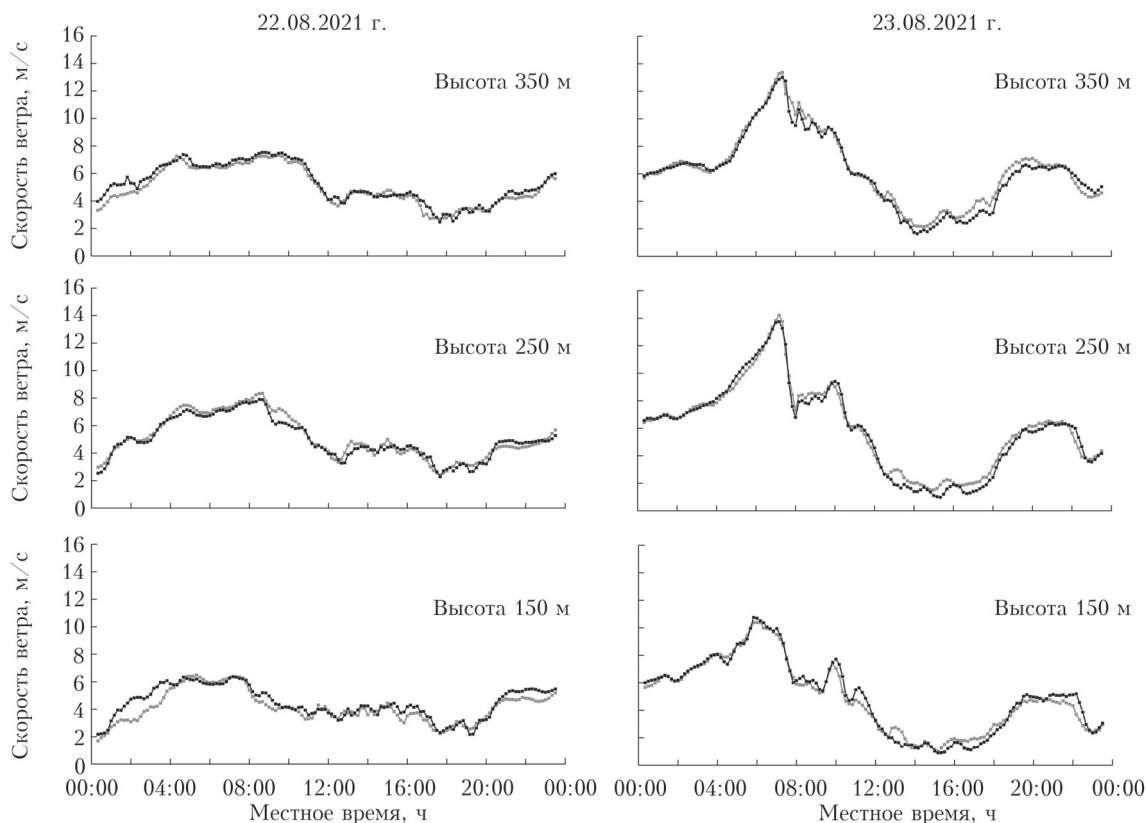


Рис. 7. Временные ходы средней скорости ветра, полученные из данных на рис. 6 с использованием для скользящего усреднения 30-минутного временного окна

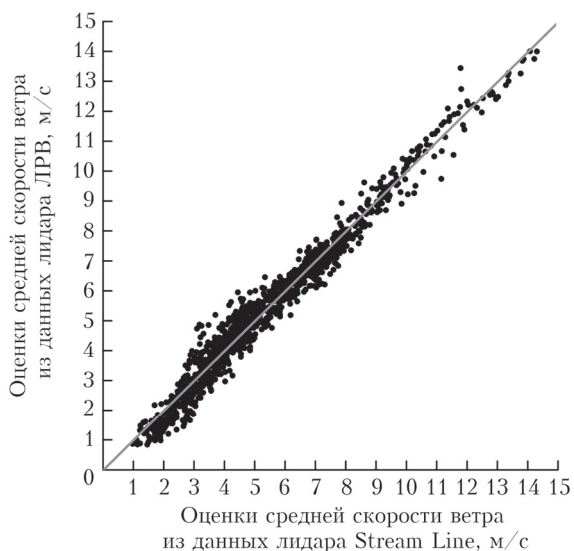


Рис. 8. Сравнение оценок средней скорости ветра из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ (кружочки) на БЭК ИОА СО РАН в течение двух суток с 22 по 23 августа 2021 г. в атмосферном слое 150–350 м; прямая – результат линейной регрессии

версии лидара ЛРВ в совместном эксперименте с лидаром Stream Line, достоверность данных измерений которым многократно доказана на практике, показало, что лидар ЛРВ позволяет получать информацию о скорости ветра с достаточно высокой точностью и может быть использован в даль-

нейших экспериментах вместе с лидаром Stream Line, когда лидар ЛРВ измеряет только при коническом сканировании, а лидар Stream Line – только при фиксированном вертикальном направлении зондирующего пучка.

3. Эксперимент на побережье оз. Байкал

С целью исследования турбулентно-волнового взаимодействия в устойчиво стратифицированном ПСА, со 2 по 21 сентября 2021 г. нами был проведен эксперимент в прибрежной зоне оз. Байкал на стационаре Астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в п. Листвянка Иркутской области (52°50'47" с.ш., 104°53'31" в.д.). Также как и в летних измерениях на БЭК ИОА СО РАН, в этом эксперименте были задействованы два ИКДЛ: лидар Stream Line и лидар ЛРВ. В отличие от месторасположения БЭК ИОА СО РАН, где устойчивая температурная стратификация в ПСА в летний период реализуется, как правило, в ночное время, на побережье оз. Байкал (в месте проведения эксперимента) из-за сильного влияния на состояние атмосферы большого водоема устойчивая стратификация наблюдается большую часть суток, в том числе в дневное время в ясную погоду (согласно нашим многочисленным измерениям температурным профилометром МТР-5), в результате чего часто формируется низкоуровневое струйное течение (НСТ) и возникает внутренняя гравитационная волна (ВГВ) [21].

В отличие от эксперимента на БЭК ИОА СО РАН, на побережье оз. Байкал во время измерения лидаром Stream Line зондирующий пучок постоянно находился в фиксированном вертикальном положении, а лидар ЛРВ (установленный в нескольких метрах от лидара Stream Line), как и ранее, непрерывно конически сканировал зондирующим пучком под углом места $\varphi = 60^\circ$. Исходными данными измерений лидаром Stream Line (записывались в текстовые файлы во время измерений через каждый час) являются массивы оценок отношения сигнал-шум $SNR(h_k, t_m)$ и вертикальной компоненты вектора скорости ветра $V_{z1}(h_k, t_m)$ (индекс «1» означает измерение лидаром Stream Line), где высота $h_k = h_0 + k\Delta h$, $k = 0, 1, 2, \dots$; $\Delta h = 18$ м; время $t_m = t_0 + m\delta t$, $m = 0, 1, 2, \dots$, $t = 0,5$ с. Исходные данными лидара ЛРВ (записывались в бинарные файлы во время измерений через каждый час) — доплеровские спектры, из которых по положению спектрального максимума мы получали массивы оценок радиальной скорости для различных расстояний от лидара с шагом 9,6 м и различных азимутальных углов конического сканирования с разрешением 6° (продолжительность одного конического сканирования $T_{scan} = 1$ мин). Из этих массивов для каждого сканирования с помощью метода фильтрованной синусоидальной подгонки [1] мы оценивали скорость ветра $\hat{U}(h_l, t_n)$, угол (на горизонтальной плоскости) направления ветра $\theta_V(h_l, t_n)$ и вертикальную компоненту вектора скорости ветра $V_{z2}(h_l, t_n)$ (индекс «2» означает измерение лидаром ЛРВ), где высота $h_l = h_0 + l\delta h$, $l = 0, 1, 2, \dots$, $\delta h =$

$= 8,3$ м; время $t_n = t_0 + nT_{scan}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер конического сканирования.

К сожалению, во время эксперимента на побережье оз. Байкал часто шли дожди, из-за чего происходило вымывание атмосферного аэрозоля и лидарное отношение сигнал-шум сильно падало. Как следствие, пригодными для анализа оказались не более 30% исходных данных, измеренных лидарами (из результатов измерений в течение 20 дней эксперимента мы смогли воспользоваться только данными с достаточно высоким SNR, полученными за семь дней). Тем не менее этого оказалось достаточно для апробации описанной выше стратегии измерения одновременно двумя ИКДЛ и сопоставления оценок вертикальной компоненты вектора скорости ветра из измерений лидарами Stream Line и ЛРВ.

На рис. 9 (цв. вкладка) приведен пример пространственно-временных распределений $\hat{U}(h_l, t_n)$, $\theta_V(h_l, t_n)$ и $V_{z2}(h_l, t_n)$, полученных из измерений лидаром ЛРВ в течение полных суток 7 сентября 2021 г. Согласно данным рис. 9, а в этот день НСТ присутствовало в ПСА дважды: с 00:00 до 09:00 и с 21:00 до 24:00. Тем не менее в этот день не было ВГВ, которая зачастую возникает внутри НСТ при резком изменении направления ветра с высотой (не наблюдается на рис. 9, б).

Наряду с $V_{z2}(h_l, t_n)$ было также получено пространственно-временное распределение вертикальной скорости ветра $V_{z1}(h_k, t_m)$ из измерений лидаром Stream Line при угле места $\varphi = 90^\circ$ в этот день (7.09.2021 г.) (рис. 10). Для прямого сравнения $V_{z2}(h_l, t_n)$ с $V_{z1}(h_k, t_m)$ мы выбрали данные на вы-

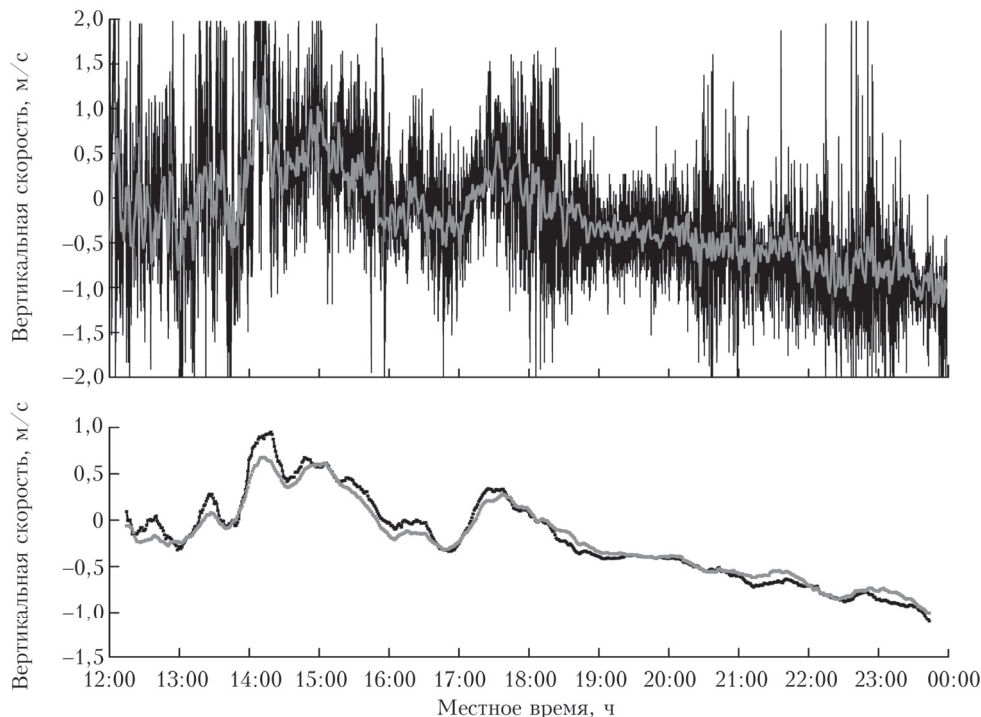


Рис. 10. Временные вариации вертикальной компоненты вектора скорости ветра на высоте 400 м, полученные из измерений лидаром Stream Line при вертикальном направлении зондирующего пучка (черные кривые) и лидаром ЛРВ при коническом сканировании зондирующим пучком (серые кривые) на побережье оз. Байкал 7 сентября 2021 г. На верхнем рисунке представлены временные ряды с шагом 0,5 с (Stream Line) и 1 мин (ЛРВ лидар), из которых с использованием 30-минутного прямоугольного временного окна получены соответствующие кривые на нижнем рисунке

соте $h = 400$ м в пределах временного интервала 12:00–24:00, когда отношение сигнал-шум в измерениях лидаром Stream Line было максимальным. На верхнем графике рис. 10 представлены временные ходы $V_{z1}(t_m)$ и $V_{z2}(t_n)$ с шагами по времени 0,5 с и 1 мин. По значительным вариациям черной кривой в период 12:00–16:00 можно судить о довольно сильной ветровой турбулентности. Благодаря временному (в течение 1 мин) и пространственному (длина окружности основания конуса конического сканирования на высоте 400 м равна 1451 м) осреднению вертикальной скорости, измеряемой лидаром ЛРВ, случайные вариации серой кривой значительно меньше, чем черной. Мы воспользовались прямоугольным временным окном шириной 30 мин для скользящего усреднения $V_{z1}(t_m)$ и $V_{z2}(t_n)$. Результаты такого усреднения приведен на нижнем графике, где видно, что они в основном довольно хорошо согласуются (коэффициент корреляции 0,98), за исключением временных интервалов, когда интенсивность турбулентности была особенно высока.

Рассмотрим другой пример, а именно измерения 20 сентября, когда до 14:00 была низкая облачность, а после того как облака ушли, в условиях устойчивой температурной стратификации ПСА

сформировалось низкоуровневое струйное течение. На рис. 11 (цв. вкладка) представлены пространственно-временные распределения $\hat{U}(h_i, t_n)$, $\theta_V(h_i, t_n)$ и $V_{z2}(h_i, t_n)$, полученные из измерений лидаром ЛРВ в этот день. Видно, что в промежуток времени 17:00–18:00 имело место резкое изменение направления ветра с высотой в 200-метровом прилегающем к Земле атмосферном слое. При этом возникла ВГВ, которую можно увидеть на рис. 11 в распределениях горизонтальной $\hat{U}(h_i, t_n)$ и вертикальной $V_{z2}(h_i, t_n)$ скоростей ветра в течение примерно часа начиная с 17:00 местного времени. На рис. 11, б видно резкое изменение направление ветра (почти на противоположное) за 10 мин, с 22:30 до 22:40 местного времени. После 22:40 в 500-метровом прилегающем к Земле слое скорость ветра достигала максимального значения 27 м/с.

Воспользовавшись данными на рис. 11, в и результатами измерения лидаром Stream Line в этот же день, сравним временные ходы вертикальной скорости ветра $V_{z1}(t_m)$ и $V_{z2}(t_n)$ на высоте 300 м, где отношение сигнал-шум (для лидара Stream Line) было максимальным (верхний график на рис. 12).

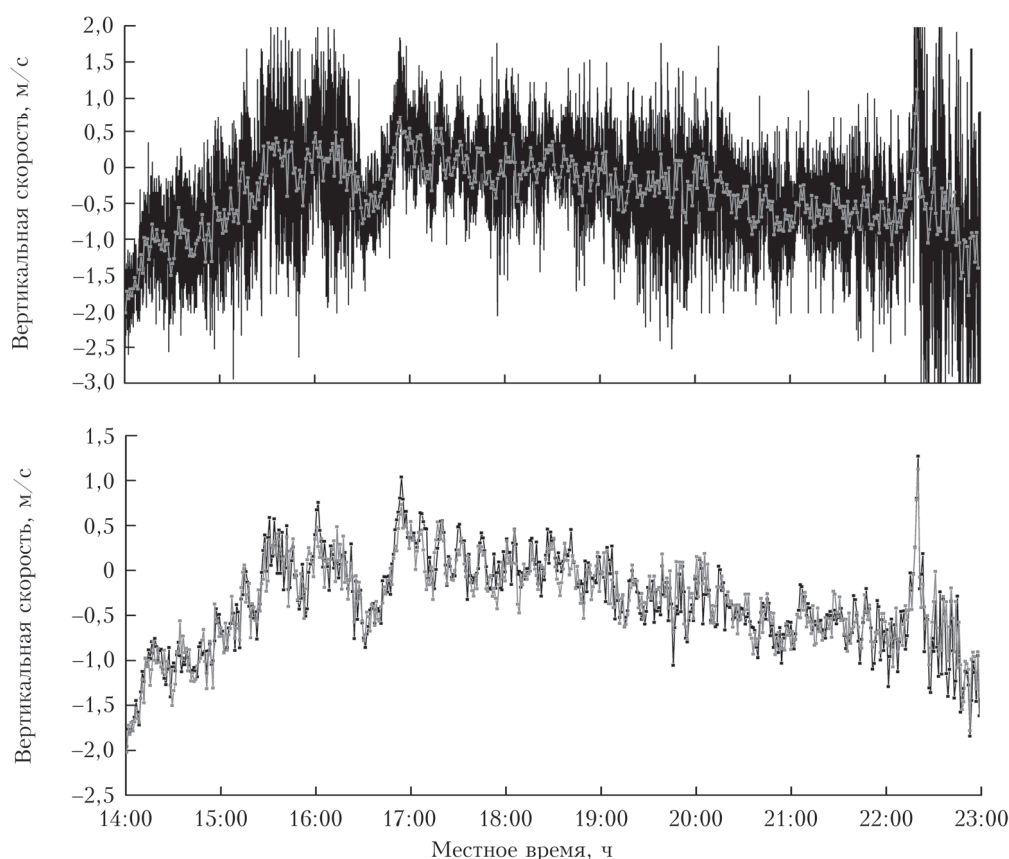


Рис. 12. Временные ходы вертикальной компоненты вектора скорости ветра на высоте 300 м, полученные из измерений лидаром Stream Line при вертикальном направлении зондирующего пучка (черные кривые) и лидаром ЛРВ при коническом сканировании зондирующим пучком (серые кривые) на побережье оз. Байкал 20 сентября 2021 г. На верхнем рисунке представлены временные ряды с шагом 0,5 с (Stream Line) и 1 мин (ЛРВ лидар). С помощью 1-минутного усреднения данных, показанных на верхнем рисунке черной кривой, получен результат, представленный на нижнем рисунке, где для сравнения приведена та же самая, что и на верхнем рисунке, серая кривая (без дополнительного временного усреднения)

После усреднения $V_{z1}(t_m)$ с помощью прямоугольного временного окна шириной 1 мин мы получили новый временной ход $\bar{V}_{z1}(t_n)$, который вместе с $V_{z2}(t_n)$ приведен на нижнем графике рис. 12. Видно довольно хорошее согласие $\bar{V}_{z1}(t_n)$ и $V_{z2}(t_n)$ (коэффициент корреляции 0,92), в том числе при прохождении ВГВ в интервале времени 17:00–18:00. Как показал проведенный нами анализ, амплитуда колебаний этой гравитационной волны $A_z \approx 0,3$ м/с, частота (период) ВГВ $f_v = 0,014$ Гц ($T_v = f_v^{-1} = 12$ мин). При этом согласно данным рис. 11, а амплитуда колебаний ВГВ для скорости ветра $A_x \approx 1$ м/с.

Заключение

Модифицированный (в частности, были установлены новые корпус и сканер, усовершенствовано программное обеспечение для внутреннего компьютера лидара) импульсный когерентный доплеровский лидар ЛРВ, разработанный в ИОА СО РАН, способен работать в любых атмосферных условиях непрерывно в течение продолжительного времени (до месяца и более). Лидар ЛРВ был протестирован в экспериментах вместе с ИКДЛ Stream Line, проведенных на БЭК ИОА СО РАН и на побережье оз. Байкал летом и осенью 2021 г. Сравнительный анализ результатов совместных измерений средних горизонтальной и вертикальной скоростей ветра показал хорошее согласие (коэффициенты корреляции результатов измерений этими лидарами равен 0,98), в том числе при наличии в ПСА внутренней гравитационной волны (при временном окне скользящего усреднения шириной 1 мин коэффициент корреляции оценок вертикальной компоненты вектора скорости ветра равен 0,92). Экспериментально установлено, что измерения средней скорости ветра конически сканирующим лидаром ЛРВ при $\text{SNR} \geq -24$ дБ в течение 30 мин дают погрешность не более 0,3 м/с.

Результаты работы убедительно указывают на возможность получения достоверной оперативной информации о ветре из измерений лидаром ЛРВ и на применимость этого ИКДЛ в долговременных экспериментальных исследованиях динамики ПСА, в том числе в исследованиях НСТ и ВГВ.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-17-00170-П) в части создания комплекса программ оценивания скорости ветра из лидарных данных и статистического анализа результатов сравнительных измерений двумя лидарами и в рамках госзадания ИОА СО РАН в части создания лидара ЛРВ и использования инфраструктуры Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.

2. *Ando T., Furuta M., Tanaka H., Nagashima M., Kameyama S., Suzuki J., Hirano Y.* Development of low cost all-fiber coherent Doppler lidar (CDL) system // Proc. of the 13th Coherent Laser Radar Conference. Kamakura, Japan. 2005. P. 170–173.
3. *Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S.* Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // Appl. Opt. 2007. V. 6, N 11. P. 1953–1962.
4. *Ando T., Kameyama S., Hirano Y.* All-fiber coherent Doppler lidar technologies at Mitsubishi Electric Corporation // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2008. V. 1. P. 012011. DOI:10.1088/1755-1307/1/1/012011.
5. *Pierson G., Davies F., Collier C.* An analysis of performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // J. Atmos. Ocean. Technol. 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.
6. *Parmentier R., Boquet M., Cariou J.P., Sauvage L.* Windcube™ pulsed lidar compact wind profiler: Overview on more than two years of comparison with calibrated sensors at different location // Proc. of the 15th Coherent Laser Radar Conf., Toulouse, France, 2009. P. 267–270.
7. *Dolfi-Bouteyre A., Augere B., Valla M., Goulard D., Fleury D., Canat G., Planchat C., Gaudo T., Besson C., Gilliot A., Cariou J.-P., Petilon O., Lawson-Daku J., Brousmiche S., Lugan S., Bricteux L., Macq B.* Aircraft wake vortex study and characterization with 1.5 μm fiber Doppler LiDAR // J. Aerosp. Lab. 2009, AL01-07, P. 1–14.
8. *Dolfi-Bouteyre A., Canat G., Valla M., Augere B., Besson C., Goulard D., Lombard L., Cariou J.P., Durecu A., Fleury D., et al.* Pulsed 1.5-μm LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2009. V. 15. P. 441–450.
9. *Kameyama S., Sakimura T., Watanabe Y., Ando T., Asaka K., Tanaka H., Yanagisawa T., Hirano Y., Inokuchi H.* Wind sensing demonstration of more than 30 km measurable range with a 1.5 μm coherent Doppler LIDAR which has the laser amplifier using Er:Yb:glass planar waveguide // Proc. SPIE. 2012. V. 8526. P. 85260E. DOI: 10.1117/12.977330.
10. *Jia X., Sun D., Xie S., Wu X.* Development of 1.55 μm coherent lidar for wind and wake vortex sensing // Proc. 18th Coherent Laser Radar Conf. Boulder, USA. 2016. P. P12.
11. *Cariou J.P., Thobois L., Germon Q., Dolfi-Bouteyre A., Durecu A.* Development of a high power Doppler Wind Lidar for measuring wind and EDR along aircraft approaches // Proc. 18th Coherent Laser Radar Conf. Boulder, USA. 2016. P. M7.
12. *Jiqiao Liu, Weibiao Chen, Xiaolei Zhu, Xiaopeng Zhu, Xin Zhang, Yuan Liu, Wei Shi.* Development of 1.5 μm all-fiber pulsed coherent Doppler wind lidar // Proc. 18th Coherent Laser Radar Conf. Boulder, USA. 2016. P. M16.
13. *Boquet M., Royer P., Pureur V., Cariou J.P., Smith M.* Long range off-shore wind assessment by high power scanning lidars // Proc. 18th Coherent Laser Radar Conf. Boulder, USA. 2016. P. T2.
14. *Wu S., Liu B., Liu J., Zha iX., Feng C., Wang G., Zhang H., Yin J., Wang X., Li R., Gallacher D.* Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar // Opt. Express. 2016. V. 24, N 10. DOI: 10.1364/OE.24.00A762.

15. *Vasiljevic N., Lea G., Courtney M., Cariou J.P., Mann J., Mikkelsen T.* Long-Range WindScanner System // *Remote Sens.* 2016. V. 8. P. 896. DOI: 10.3390/rs8110896.
16. *Smalikho I.N., Banakh V.A.* Measurements of wind turbulence parameters by a conically scanning coherent Doppler lidar in the atmospheric boundary layer // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 11. P. 4191–4208.
17. *Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Sherstobitov A.M.* Estimating the parameters of wind turbulence from spectra of radial velocity measured by a pulsed Doppler lidar // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 2071. DOI: 10.3390/rs13112071.
18. *Banakh V.A., Nadeev A.I., Razenkov I.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Sherstobitov A.M.* Test results of a pulsed coherent Doppler lidar created at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. CID: 11208 5K. [11208-323]. P. 112085K-1-112085K-9. DOI: 10.1117/12.2540944.
19. *Смалихо И.Н., Банах В.А., Holzäpfel F., Rahm S.* Оценивание параметров самолетных вихрей из массива радиальных скоростей, измеренных когерентным доплеровским лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 8. С. 742–750.
20. *Stephan A., Wildmann N., Смалихо И.Н.* Эффективность метода МФАС для определения вектора скорости ветра из измерений лидаром Windcube 200s // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 725–733; *Stephan A., Wildmann N., Smalikho I.N.* Effectiveness of the MFAS method for determining the wind velocity vector from Windcube 200s lidar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 555–563.
21. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere on the coast of Lake Baikal // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 10. P. 5239–5248. DOI: 10.5194/amt-9-5239-2016.

I.N. Smalikho, V.A. Banakh, I.A. Razenkov, A.A. Sukharev, A.V. Falits, A.M. Sherstobitov. **Comparison of the results of joint measurements with Stream Line and LRV coherent Doppler lidars.**

A pulsed coherent Doppler lidar (PCDL) developed at the Wave Propagation Laboratory of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (LRV lidar) was tested in two experiments carried out in 2021 at the Basic Experimental Observatory of Institute of Atmospheric Optics SB RAS and on the coast of Lake Baikal. In those experiments, a serial Stream Line PCDL (HALO Photonics, Great Britain) was also involved. The comparative analysis of estimates of the average horizontal and vertical wind speeds from measurements with Stream Line and LRV lidars showed a good agreement between the results (the correlation coefficient of the estimates is 0.98 with a 30-minute averaging of the data).

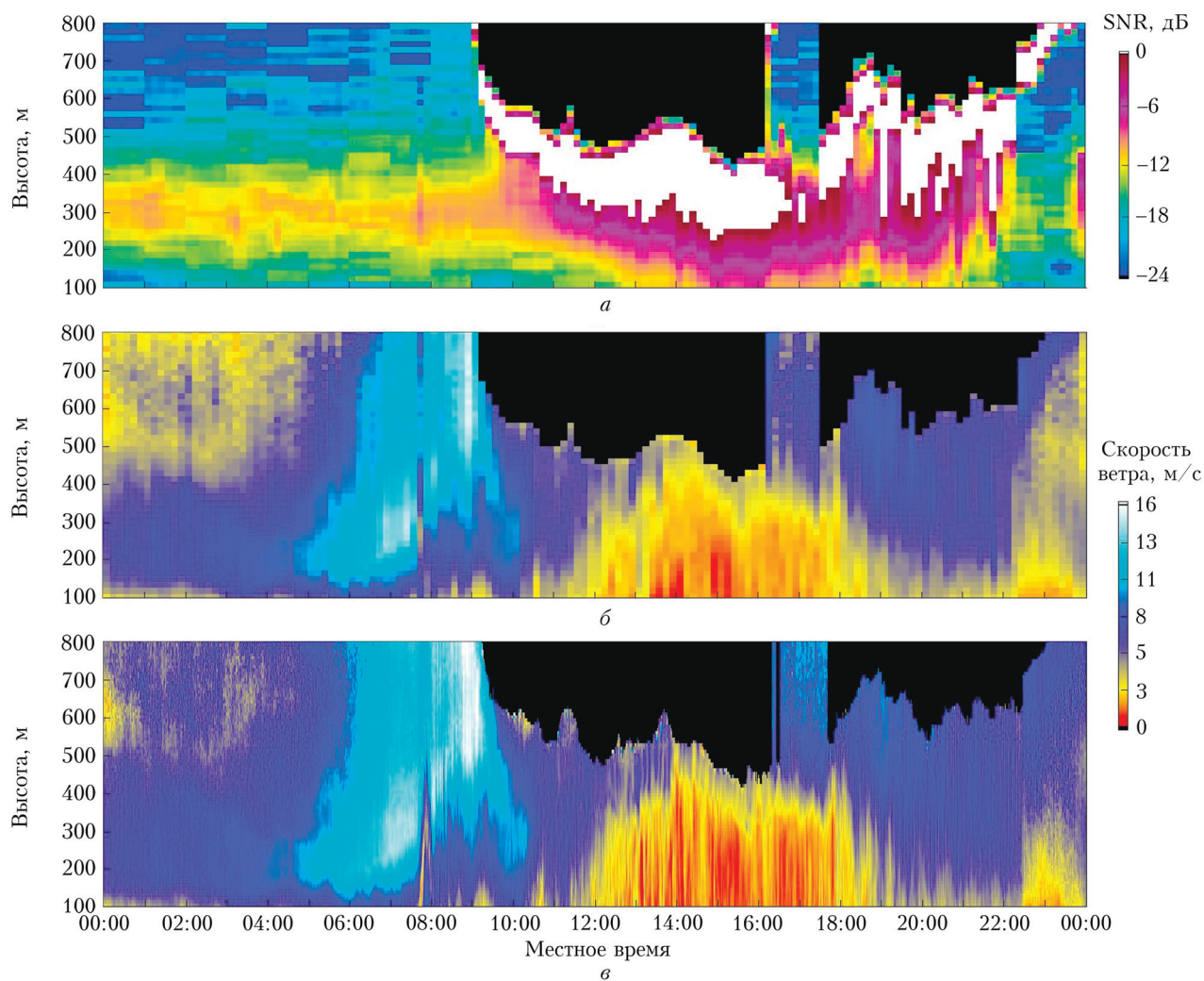


Рис. 2. Распределения по высоте и времени отношения сигнал-шум (*a*) и скорости ветра (*б*, *в*), восстановленные из измерений лидаром Stream Line (*a*, *б*) и лидаром ЛРВ (*в*) на БЭК ИОА СО РАН 23 августа 2021 г. Белый цвет на (*a*) указывает на отражение зондирующего излучения от облаков, черный цвет – на то, что $\text{SNR} < -24$ дБ, при котором приемлемая оценка вектора скорости ветра не представляется возможной

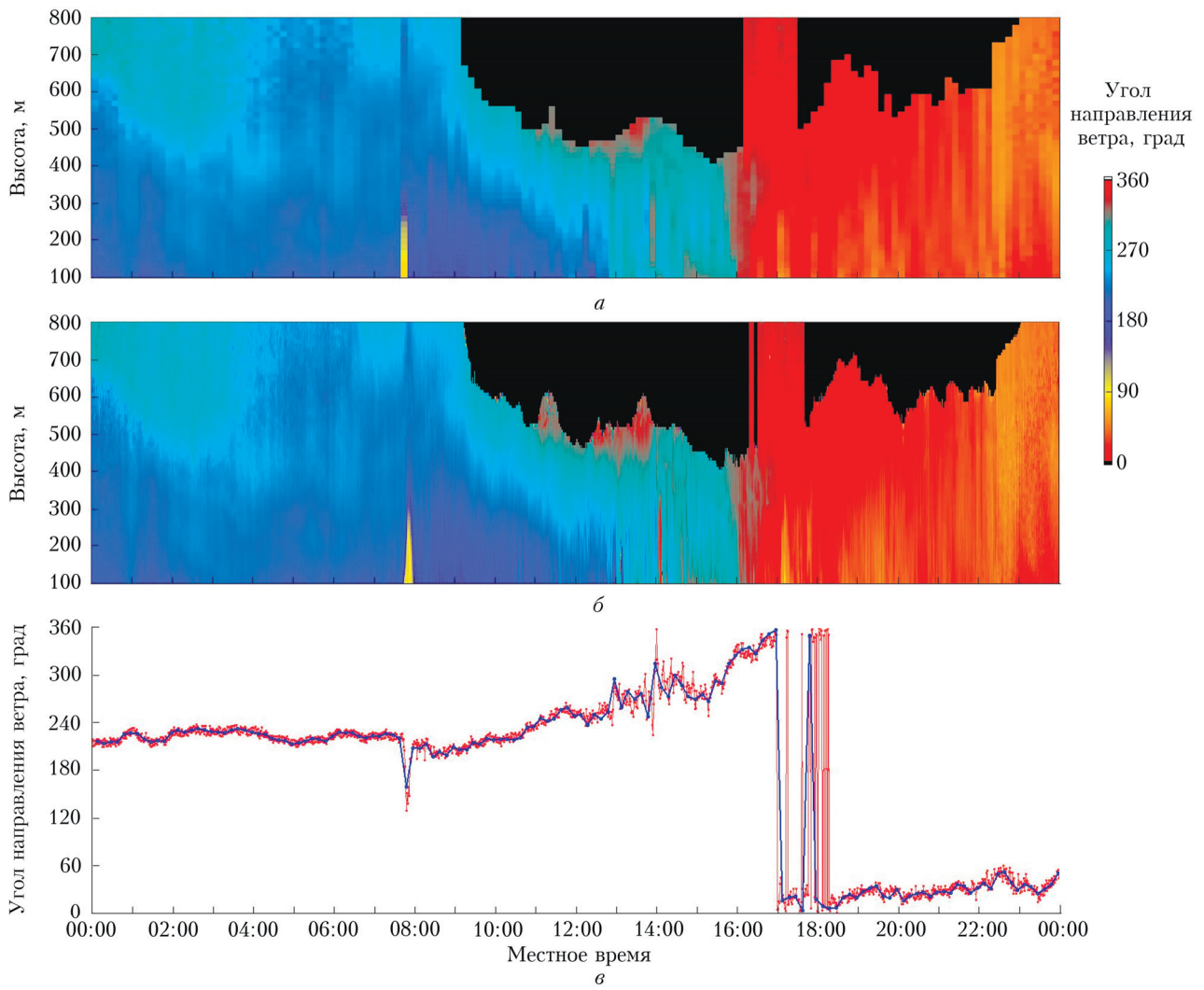


Рис. 3. Распределения по высоте и времени (*a*, *б*) и временные ходы на высоте 300 м (*в*) угла направления ветра, восстановленные из измерений лидаром Stream Line (*a*, синяя кривая на графике (*в*)) и лидаром ЛРВ (*б*, красная кривая на графике (*в*)) на БЭК ИОА СО РАН 23 августа 2021 г.

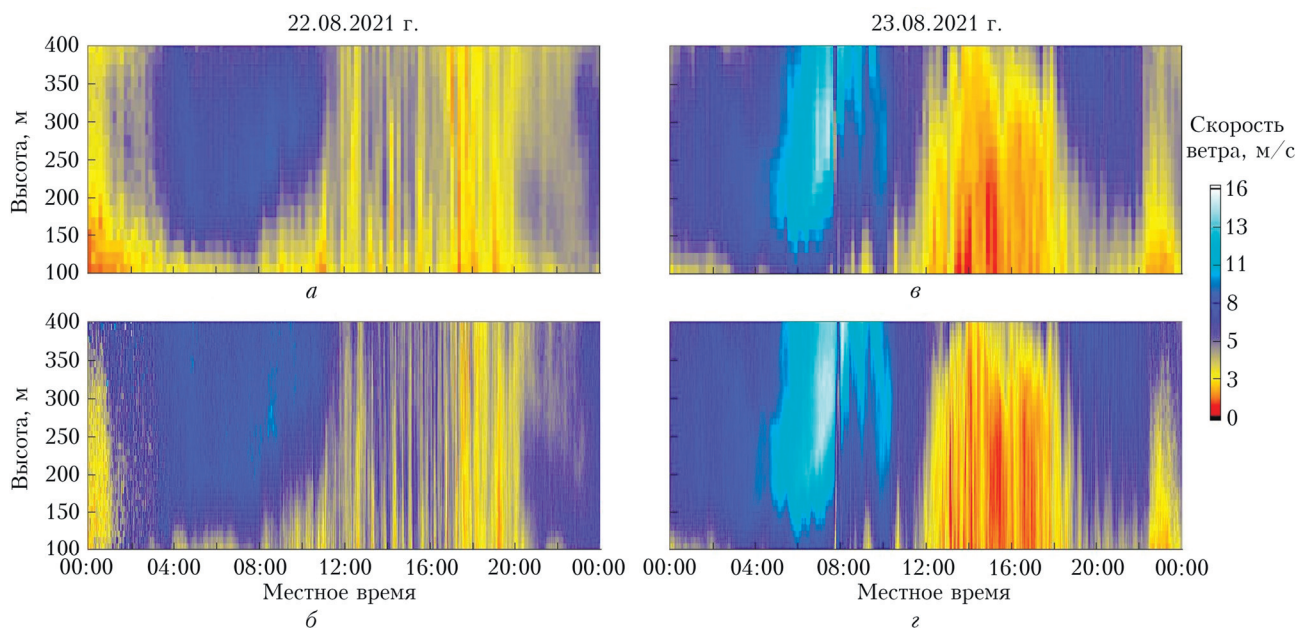


Рис. 5. Распределения скорости ветра по высоте и времени, восстановленные из измерений лидаром Stream Line (а, в) и лидаром ЛРВ (б, г) на БЭК ИОА СО РАН 22 (а, б) и 23 августа 2021 г. (в, г)

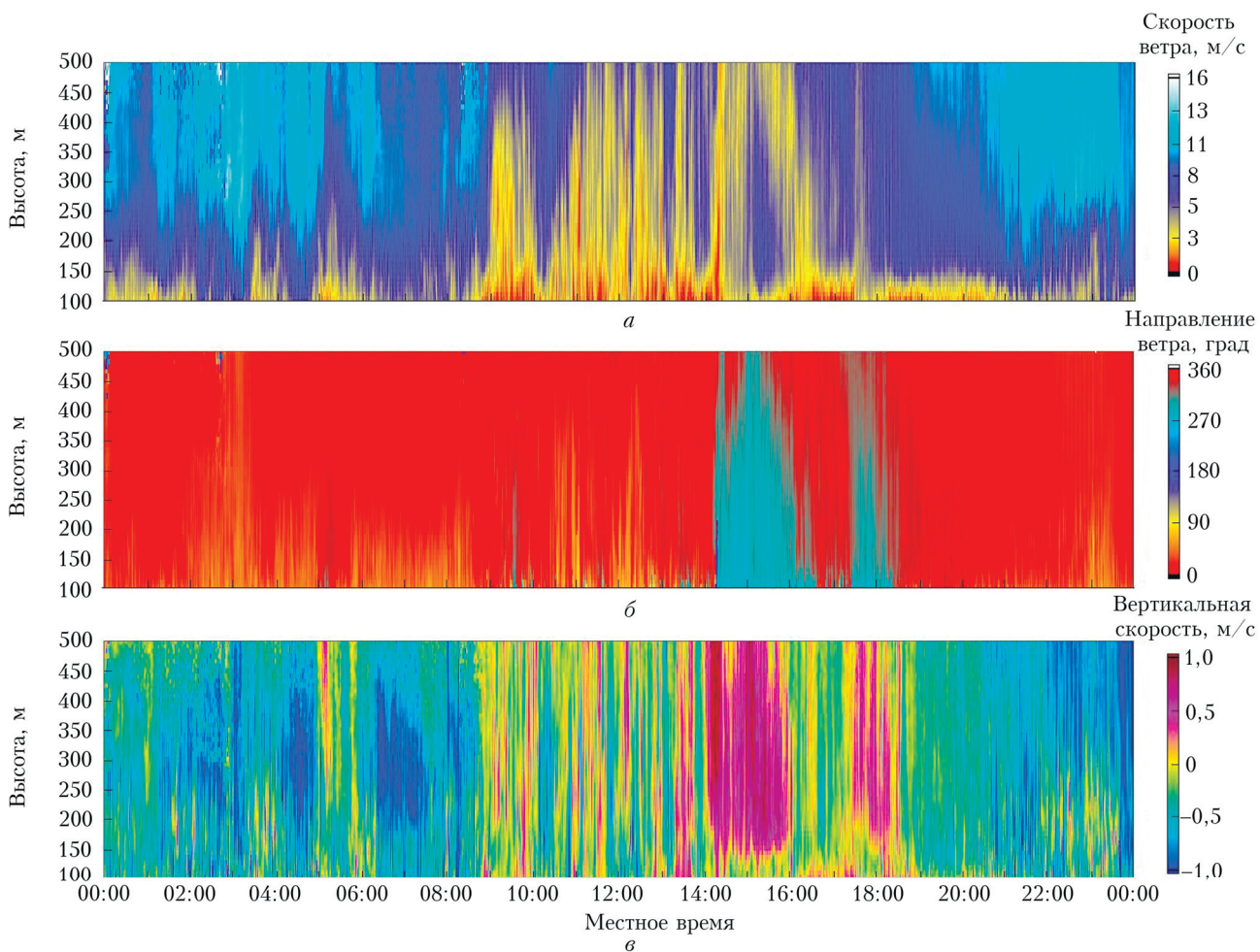


Рис. 9. Распределения скорости ветра (а), угла направления ветра (б) и вертикальной компоненты вектора скорости ветра (в) по высоте и времени, восстановленные из измерений лидаром ЛРВ на побережье оз. Байкал 7 сентября 2021 г.

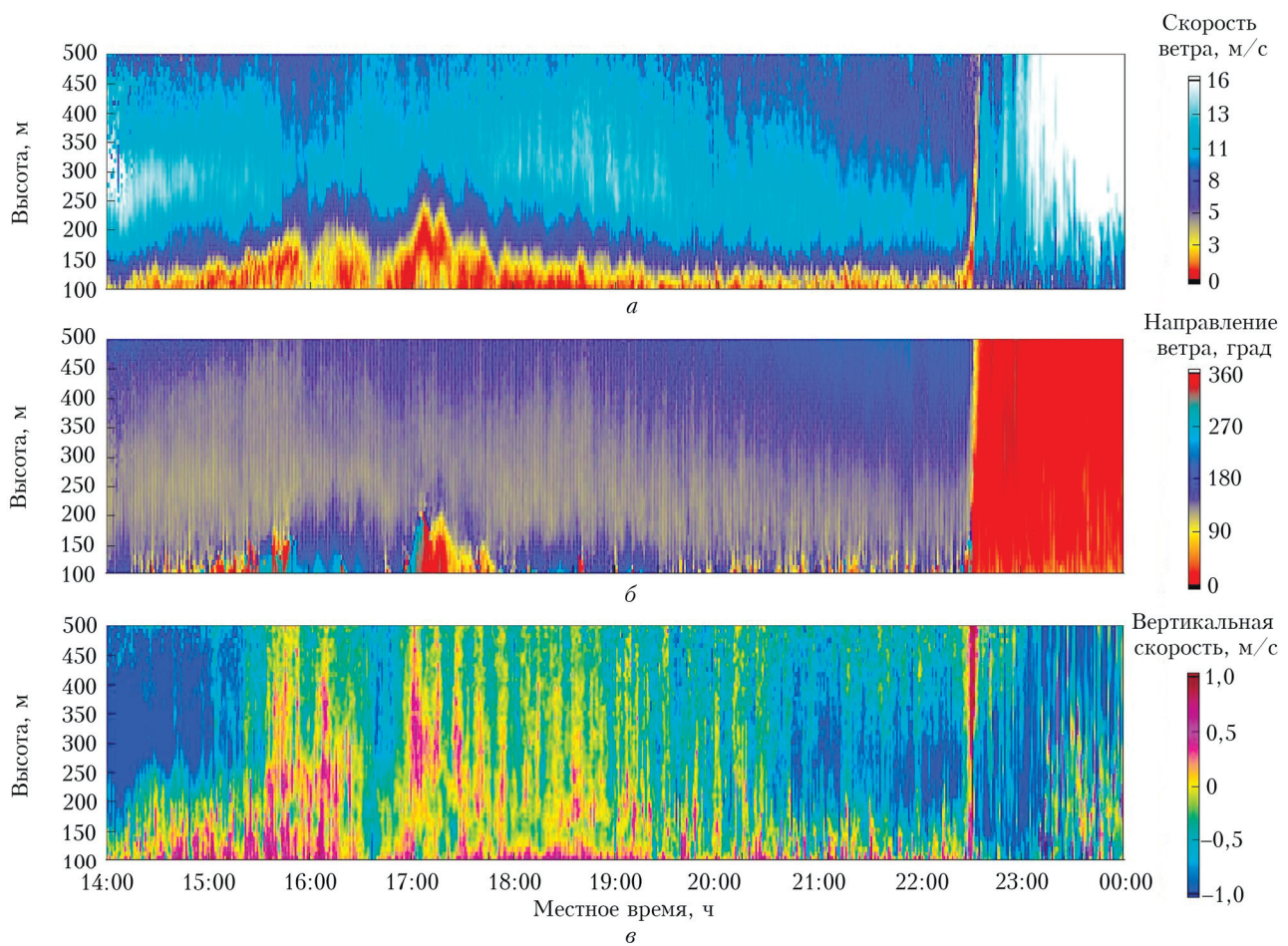


Рис. 11. Распределения скорости ветра (*a*), угла направления ветра (*b*) и вертикальной компоненты вектора скорости ветра (*v*) по высоте и времени, восстановленные из измерений лидаром ЛРВ на побережье оз. Байкал 20.09.2021 г.