

Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений

М.В. Сапунов¹, И.Н. Мельникова¹, В.К. Донченко¹,
Д.А. Самуленков¹, А.Д. Кузнецов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: mikecf@mail.ru

² Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 195196, Россия
E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

В статье представлены результаты сравнения данных ветрового зондирования, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений. Лидарные измерения вертикальных профилей скорости и направления ветра были проведены в Ресурсном центре «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ в центре Санкт-Петербурга в течение 2014–2015 гг. Высота лазерного зондирования ветра ограничена характеристиками доплеровского лидара и состоянием атмосферы и составляет в среднем 1,5–2 км, максимум – 6 км. Полученные результаты сравниваются с данными аэрологических измерений, выполненных на аэрологической станции в п. Воейково. Расстояние между пунктами измерений – 25 км. Сравнение проводится в предположении однородности поля ветра в таких масштабах. В большинстве случаев отмечено хорошее совпадение вертикальных профилей ветра, полученных обоими методами. Однако выявлены причины и даны объяснения случаям, когда результаты резко отличаются либо на больших высотах, либо, наоборот, в приземном слое.

Ключевые слова: доплеровский лидар, скорость ветра, направление ветра, радиозонд, вертикальный профиль, метеопараметры

Одобрена к печати: 23.11.2015
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-149-160

Введение

На данный момент недостаточно средств измерений вертикальных профилей характеристик ветра, особенно над населенными пунктами. В настоящее время самым распространенным средством измерений вертикального профиля ветра является аэрологическое радиозондирование, проводимое на аэрологических станциях. Однако большинство из них расположено за городской чертой, и получаемые в этом случае данные охватывают небольшую зону по пространству. Кроме того, при радиозондировании запуск радиозондов обычно производится 1–2 раза в сутки, что слишком редко для задач, рассматривающих динамику переноса загрязнений. Учитывая, что изменчивость ветра бывает весьма велика (ветер может измениться за несколько минут), подобный способ определения вертикальных профилей ветра не всегда эффективен для отслеживания суточной динамики атмосферы. Для более частых измерений следует использовать иные технические средства. Одним из них является доплеровский лидар. Однако для того, чтобы рекомендовать этот метод измерения профиля ветра для использования в оперативной практике, необходимо провести валидацию результатов лидарных измерений. Одним из возможных способов проведения валидации является сравнение данных лидарных измерений с результатами такого сертифицированного средства измерения вертикального профиля ветра, каким является аэрологический радиозонд.

Методика лидарного измерения вертикального профиля ветра

Импульсный доплеровский ветровой лидар позволяет получать данные о вертикальном профиле характеристик ветра. Он установлен в Ресурсном центре “Обсерватория экологической безопасности” научного парка СПбГУ на Васильевском острове в центре Санкт-Петербурга. Благодаря тому, что лидар работает в инфракрасном диапазоне, имеет небольшую мощность и расположен над крышами домов, он безопасен для использования в городских условиях.

Лидар обладает сканирующей системой, позволяющей изменять направление излучения по азимуту, выделяя конус с заданным углом, и по зенитному углу, охватывая при этом полукруг в плоскости максимальной скорости ветра. Соответственно используются два режима сканирования: конусный и секторный (рис. 1, 2). При конусном режиме меняется азимутальный угол φ , а зенитный угол θ остается постоянным (Ахметьянов и др., 2013). При секторном режиме меняется зенитный угол, а азимутальный угол, который определяет плоскость максимальной скорости ветра, остается постоянным.

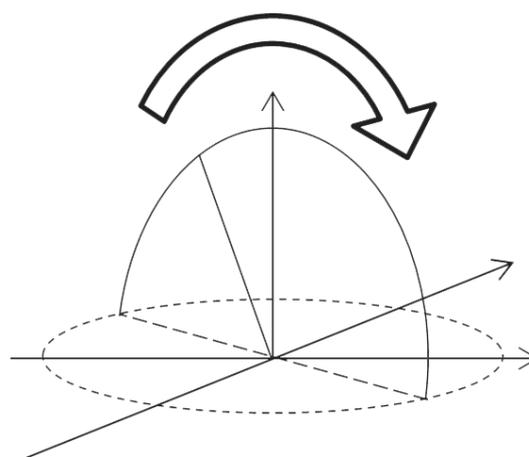
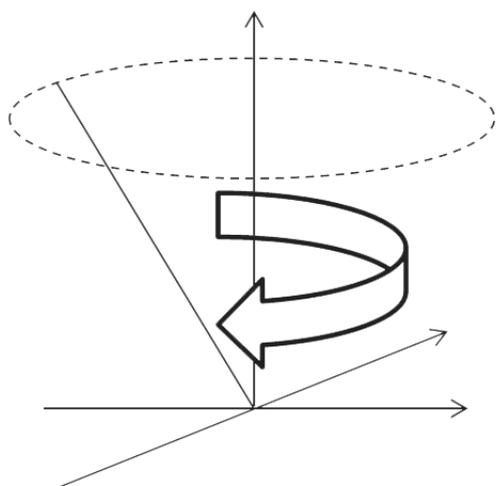


Рис. 1. Конус сканирования ветрового лидара Рис. 2. Сектор сканирования ветрового лидара

Время сканирования выбирается в зависимости от стабильности или изменчивости параметров ветра, так как при измерении происходит усреднение параметров ветра внутри объема конуса или полукруга зондирования. Фиксированный зенитный угол конуса сканирования определяет пространство (объем) усреднения параметров ветра. Для оптимального выбора этих параметров необходимо провести специальное исследование методического характера.

Полученная при проведении лидарного зондирования информация может быть представлена разными способами: цветная карта с градациями цвета (рис. 3) и такое же изображение секторного сканирования (рис. 4) или вертикальные профили параметров ветра. Цветную диаграмму конусного сканирования можно наложить на географическую карту, задавая координаты расположения и ориентации лидара.

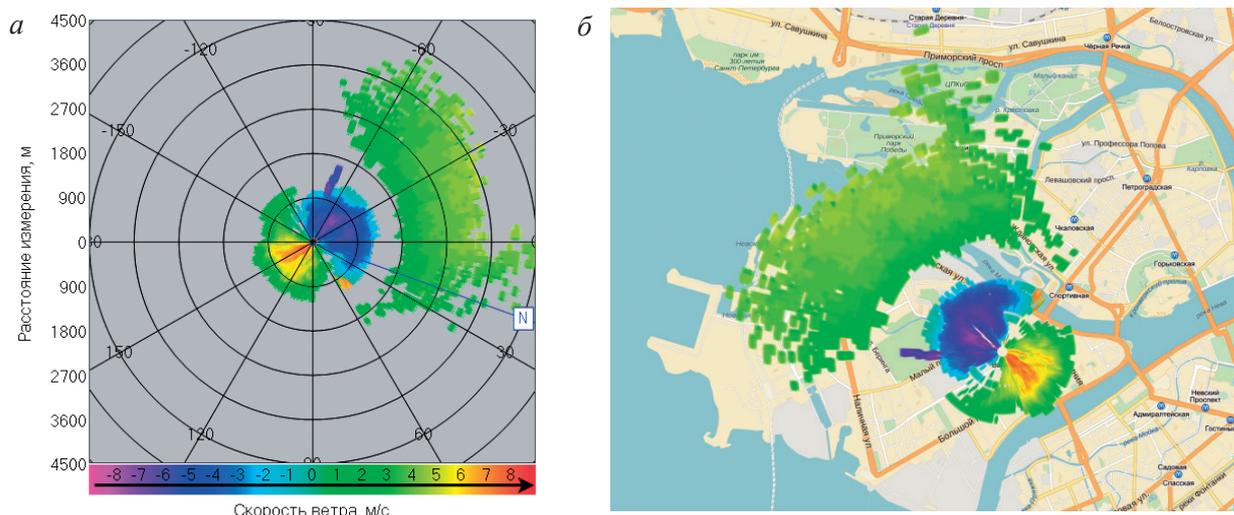


Рис. 3. Цветная карта конусного режима сканирования – а, на географической карте – б (22 июня 2015 15:07)

На рис. 3б представлена карта г. Санкт-Петербурга с наложенной на нее проекцией диаграммы конусного сканирования. Градации цвета обозначают скорость ветра. Положительное направление ветра – от фиолетового цвета к красному. На диаграмме (рис. 3) большему расстоянию соответствует большая высота.

Рис. 4 показывает результат секторного режима сканирования скорости ветра. Отметим, что на изображении как секторного сканирования, так и конусного сканирования, имеются пробелы в представлении информации по высоте. Они означают, что в этих точках лазерный отраженный сигнал был недостаточно мощный (Банах, 2013).

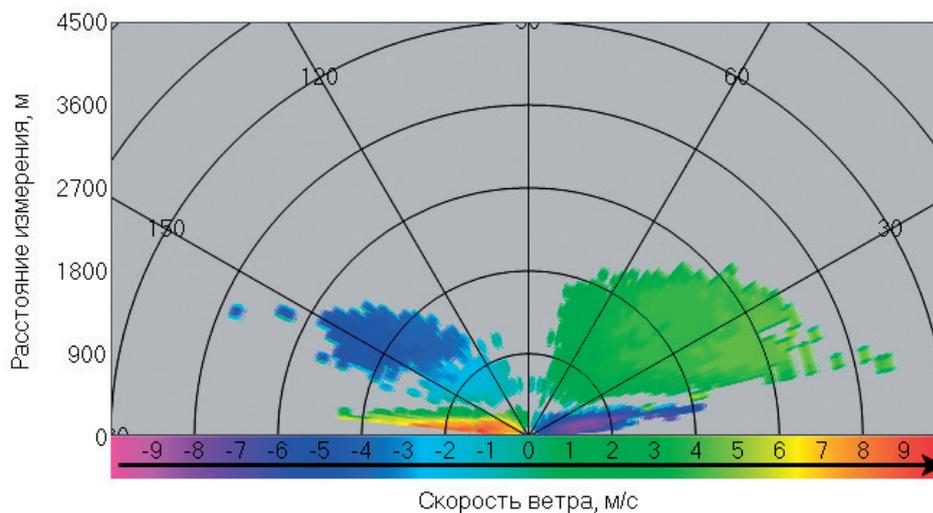


Рис. 4. Цветная карта проекции секторного режима сканирования (22 июня 2015 15:07)

Области слабого сигнала соответствуют малому количеству аэрозольных частиц, вносящих вклад в обратное рассеяние лазерного пучка, что не позволяет принять надежный сигнал для этих высот. В тот же день проводились измерения вертикального профиля содержания аэрозолей (Самуленков и др., 2015), результаты показаны на рис. 5.

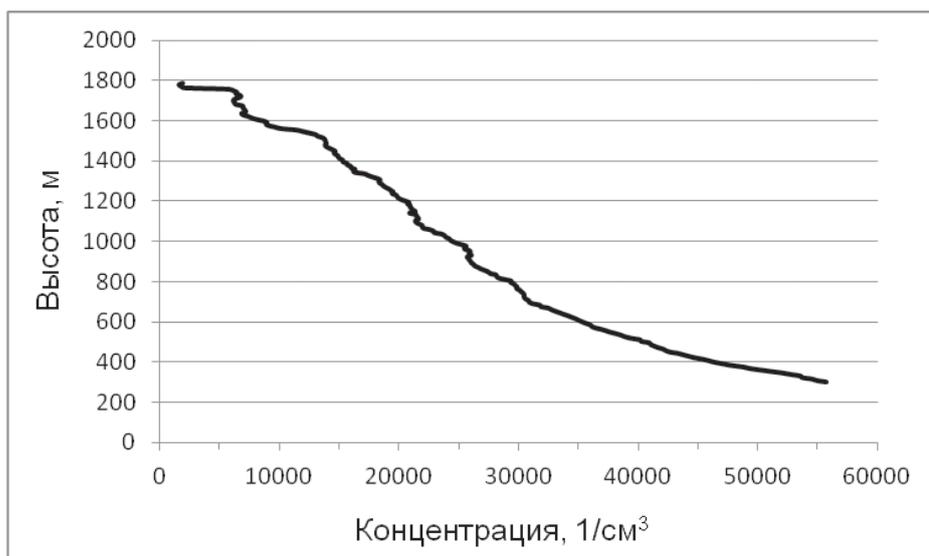


Рис. 5. Концентрация аэрозольных частиц (22 июня 2015 14:28)

Выше 1800 м содержание аэрозолей составляет несколько десятков частиц в см^3 . В ряде случаев оказывается, что более высокие слои атмосферы обладают большей оптической плотностью, так как в них присутствуют облака, способствующие формированию надежного сигнала на высотах, превышающих высоту шапки загрязнений над городом толщиной в среднем до 1,0 – 2,5 км.

Анализируя цветные карты конусного и секторного режима сканирования совместно, можно выявить зоны турбулентности и инверсии поля ветра, а также нижнюю границу облаков. О зонах турбулентности свидетельствует неравномерное распределение цвета на карте, а о зонах инверсий – изменение цвета из диапазона углов, соответствующего одному направлению, на цвет диапазона, соответствующего другим направлениям (Банах, 2013). В представленном примере (рис. 3а) видно, что проекция вектора скорости ветра на ось луча лазера выше 300 м изменяет свой знак на противоположный. Это также видно на карте (рис. 3б), показывающей проекцию диаграммы конусного сканирования. Однако здесь следует учитывать, что из-за помех в виде крыш зданий минимальный угол для конусного сканирования, составляет приблизительно $h=90^\circ - \theta=13^\circ$.

Второй вид представления информации – это вертикальные профили скорости и направления ветра. Для получения такой информации используется конусный режим сканирования. Результатирующими данными являются вертикальные профили 3-х характеристик ветра: горизонтальная и вертикальная составляющие скорости ветра, а также направление горизонтальной составляющей. При этом производится усреднение характеристик ветра в параллельных сечениях объема конуса по пространству. Если задать меньший вертикальный угол, то усреднение произойдет по большей площади, высота детектирования будет меньше, но вертикальная дискретность отсчета параметров окажется выше. И, наоборот, при большем зенитном угле усреднение производится по меньшей площади сечений конуса, зато будет доступна большая высота детектирования, но с меньшей дискретностью отсчетов измеряемых параметров ветра по высоте. Зависимость площади усреднения характеристик ветра, величини-

ны шага вертикального зондирования и высоты зондирования от зенитного угла конуса зондирования показаны на *рис. 6*. Оптимальный выбор тех или иных установок для режимов сканирования (зенитный угол, скорость сканирования) определяется оператором путем анализа порога ошибки, рассчитываемого программой обработки лидарного сигнала (Мишина, 2012).

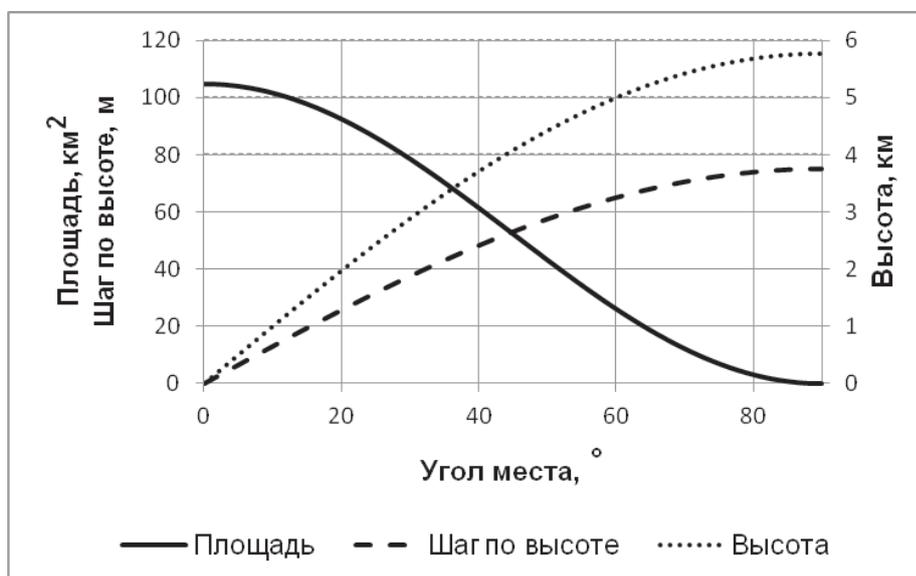


Рис. 6. Параметры конусного сканирования

На *рис. 7* приведен пример измерения вертикальных профилей ветра (22 июня 2015 15:07). Результат измерения представляет собой три графика: горизонтальная скорость ветра, ее направление и вертикальная скорость ветра.

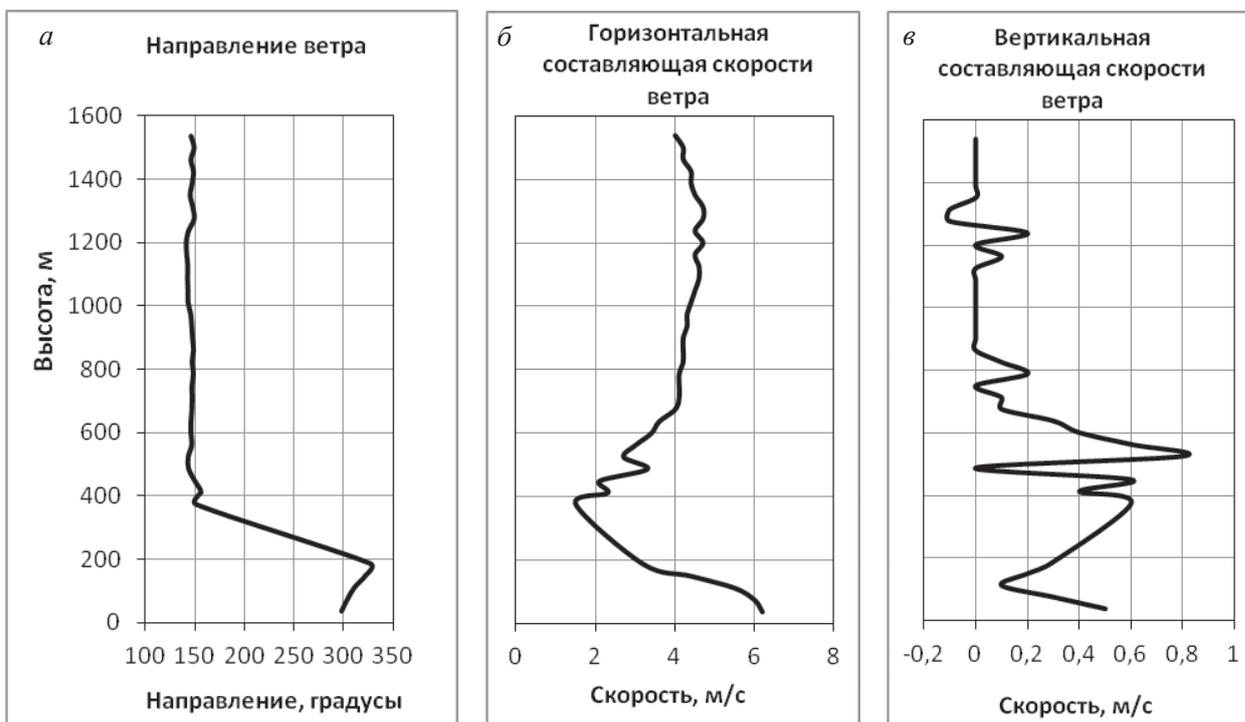


Рис. 7. Вертикальные профили горизонтальной (а и б) и вертикальной (в) компонент скорости ветра (22 июня 2015 15:07)

В представленном случае видно, что скорость ветра уменьшается на высоте поворота ветра (от 190 до 380 м) до 1,8 м/сек, затем, при стабильном направлении, медленно увеличивается, достигая в среднем 4,2 м/с на высотах от 700 до 1550 м. При этом поворот ветра составляет 176 градусов. Направление вертикального потока воздушных масс определяет знак скорости на третьем графике, если он положительный то поток восходящий, и, наоборот, если отрицательный – нисходящий. На всем протяжении зондирования вертикальная составляющая скорости ветра претерпевала слабые флуктуации и не превышала 0,82 м/с.

Вертикальные профили ветра, полученные с помощью радиозонда

В настоящей работе в качестве средства измерения для сравнения полученных лидарных данных используются результаты аэрологических зондов (Фридзон, Ермошенко, 2009), регулярно, дважды в сутки, запускаемых в поселке Воейково Ленинградской области. Подобные измерения позволяют получить вертикальные профили направления и скорости ветра на высотах от поверхности земли до 35–40 км с переменной дискретностью по высоте от 50 до 350 м (Горелик, Костарев, Черников, 1962). Эти данные аэрологического зондирования поступают во Всемирную Метеорологическую Организацию (WMO) и хранятся в свободном доступе.

Определение скорости и направления ветра при радиозондировании осуществляется путем измерения с помощью аэрологического радиолокатора координат радиозонда в различные моменты времени с дальнейшим расчетом пройденного им расстояния между каждыми двумя пеленгациями и затраченного на это времени. После получения данных о длине пути и времени прохождения вычисляется скорость зонда, которую полагают равной скорости ветра. Направление ветра определяется по изменению направления вектора перемещения радиозонда в горизонтальной плоскости между двумя пеленгациями (Фридзон, Ермошенко, 2009).

С учетом того факта, что радиозонд все время поднимается вверх, данная методика позволяет рассчитывать только средние скорости и направление ветра в слоях атмосферы, проходимых радиозондом за период времени между двумя пеленгациями. Следует подчеркнуть, что данная методика осреднения данных измерений отличается от той, которая свойственна лидарным измерениям, где осреднение данных о радиальных скоростях осуществляется в пределах зондируемого объема воздуха.

Сравнение результатов ветрового зондирования

Для сравнения результатов было отобрано 138 лидарных измерений ветровых характеристик, для которых имелись синхронные данные, полученные на основе радиозондовых измерений в п. Воейково. Основным критерием сравнения был выбран коэффициент корреляции (Ва-

силъев, Мельникова, 2009). В этом случае для проведения расчетов необходимо иметь точки с измерениями, совпадающими по высотам. Для этого данные радиозонда интерполировались по высотам ветрового лидара. Результаты анализа представлены в *табл. 1*, показывающей количество измерений с коэффициентом корреляции, превышающим определенное заданное значение.

Таблица 1. Количество совпадений в зависимости от коэффициентов корреляции на всех высотах зондирования

Коэффициент корреляции	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
Больше, количество (проценты)	79 (57,2%)	79 (57,2%)	72 (52,2%)	67 (48,6%)	61 (44,2%)	54 (39,1%)	48 (34,8%)	44 (31,9%)	30 (21,7%)	11 (8,0%)
Меньше, количество (проценты)	59 (42,8%)	59 (42,8%)	66 (47,8%)	71 (51,4%)	77 (55,8%)	84 (60,9%)	90 (65,2%)	94 (68,1%)	108 (78,3%)	127 (92,0%)

Для визуального сравнения построены графики, на которых изображены данные полученные радиозондом и ветровым лидаром. На *рис. 8, 9* по результатам проведенного анализа показаны примеры совпадения (11.09.2014) и несовпадения на подавляющем количестве уровней по высоте за исключением слоя 300–600 м (11.03.2014) горизонтальной скорости ветра.

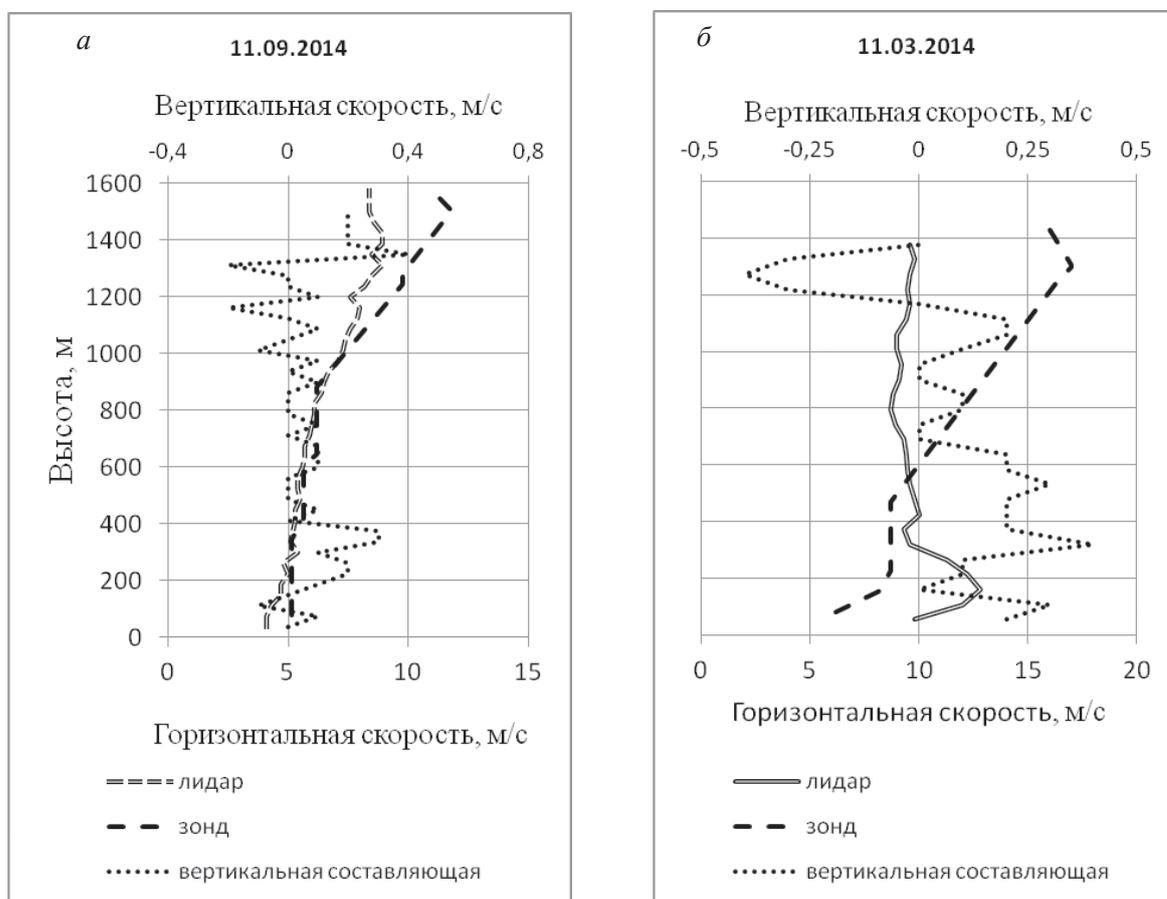


Рис. 8. Измерения горизонтальной скорости ветра по лидарным и радиозондовым измерениями: случай совпадения (а) и несовпадения (б)

На рис. 8 видно, что расхождения показаний лидара и радиозонда увеличиваются на тех высотах, где можно отметить изменчивость вертикальной составляющей, особенно при формировании нисходящих потоков воздуха (отрицательные значения вертикальной составляющей скорости ветра). Вероятно, в указанных условиях сильнее сказывается разница между результатами усреднения при разных методах измерений.

Для выявления причин несовпадений были также рассмотрены зависимости метеопараметров атмосферы, таких как температура и относительная влажность (рис. 9). Однако эти параметры были получены только из измерений радиозонда, а так как расстояние между лидарной станцией и пунктом запуска радиозондов составляет около 25 км, они могут отличаться в нижних слоях атмосферы в городе и в пригороде.

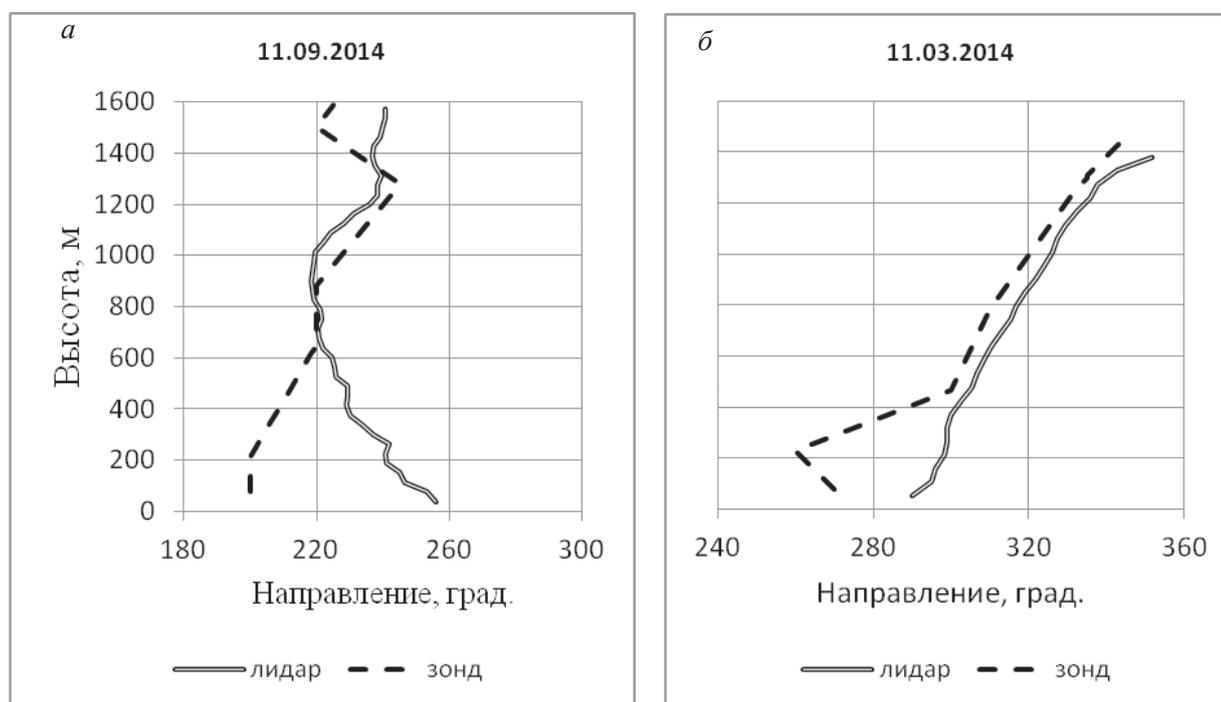


Рис. 9. Измерения направления ветра по лидарным и радиозондовым измерениями: случай совпадения (а) и несовпадения (б)

На рис. 10 показаны профили температуры и влажности для 11.09 и 11.03.2014 г., полученные по данным радиозонда. Как видно из графиков, в основном метеопараметры не влияют на уровень совпадения измерений характеристик ветра доплеровским лидаром и радиозондом, хотя 11.03.2014 в случае несовпадения скорости ветра наблюдается температурная инверсия на высотах до 200 м и выше 1200 м, которая, по-видимому, спровоцировала сильные вариации вертикальной составляющей ветра на тех же высотах.

Причинами несовпадения может быть расстояние между пунктами наблюдения и, соответственно, разные подстилающие поверхности: лесная местность увеличивает шероховатость подстилающей поверхности и тормозит движение воздуха, а нагретый асфальт в городе усиливает восходящие потоки. Кроме того, лидар находится недалеко

от залива, т.е. на стыке различных типов поверхностей, таких как суша и вода, что способствует развитию турбулентности и, в свою очередь, воздействует на характеристики ветра. В приземном слое атмосферы рельеф имеет большое влияние на характеристики ветра, однако чем больше высота, тем меньше горизонтальные градиенты характеристик ветра. Кроме того, влияние рельефа может сказываться по-разному при определенных направлениях ветра, поэтому был выполнен статистический анализ, включающий все измеренные результаты.

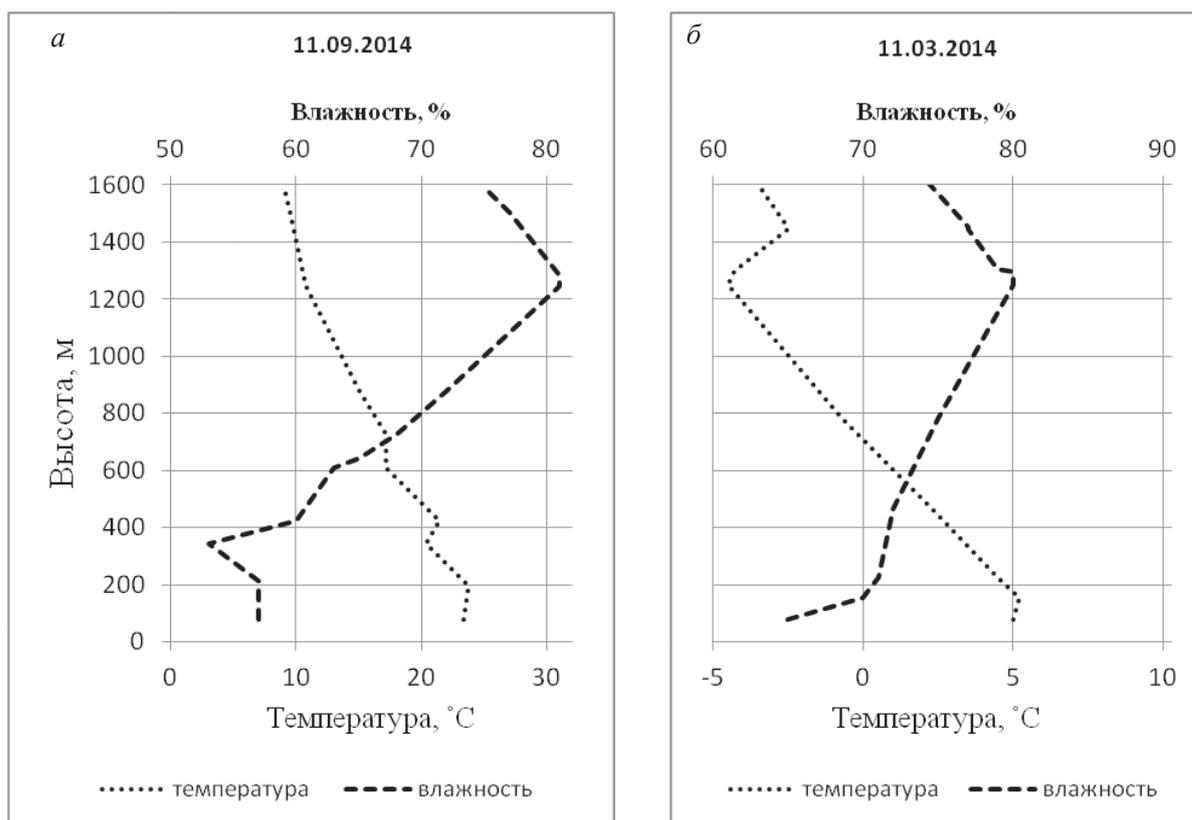


Рис. 10. Метеорологические параметры для случаев совпадения (а) и несовпадения (б)

Для анализа влияния направления ветра, а также высоты точек измерения, на совпадение показаний лидара и радиозонда были рассчитаны средние коэффициенты корреляции результатов измерения лидаром и радиозондом в зависимости от направления ветра и диапазона высот (табл. 2). За направление ветра принято среднее направление, полученное в результате радиозондирования.

Как видно из таблицы, результаты расходятся как по высотам, так и по направлению. При этом направление, при котором наблюдается наилучшее совпадение – это ССЗ (значение коэффициента корреляции 0,69), а наихудшее – СВ (значение коэффициента корреляции -0,27). Наибольший средний коэффициент по всем высотам соответствует низким уровням от 0 до 400 м.

Для визуального отображения совпадения измерений построена диаграмма, на которой изображены значения коэффициента корреляции между двумя типами измерений в зависимости от направления ветра, усредненные по разным диапазонам высот.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции

Направление	Количество измерений лидаром				Значение коэффициента корреляции				
	0–400	400–800	800–1200	>1200	0–400	400–800	800–1200	>1200	среднее
С	3	1	1	0	0,52	0,60	-0,04	–	0,36
ССВ	4	3	3	2	0,10	-0,07	0,37	0,32	0,18
СВ	6	3	3	2	0,19	-0,51	-0,12	-0,65	-0,27
ВСВ	3	5	4	0	0,74	0,03	0,24	–	0,34
В	5	1	2	3	0,20	0,93	0,25	0,32	0,43
ВЮВ	9	6	1	3	0,75	0,45	0,57	0,36	0,53
ЮВ	5	7	1	1	0,17	0,13	-0,07	0,75	0,24
ЮЮВ	13	5	4	2	0,42	0,56	-0,06	-0,39	0,13
Ю	10	3	7	7	0,28	0,91	0,50	0,05	0,43
ЮЮЗ	10	17	7	10	0,58	-0,01	0,73	0,34	0,41
ЮЗ	12	10	11	8	0,51	0,44	-0,22	0,22	0,24
ЗЮЗ	10	11	9	12	0,13	0,25	0,32	0,31	0,25
З	25	17	8	8	0,48	0,27	-0,20	0,02	0,14
ЗСЗ	6	8	0	5	0,30	-0,18	–	0,24	0,12
СЗ	3	4	4	7	0,03	-0,56	-0,15	0,14	-0,13
ССЗ	0	2	1	5	–	0,74	0,83	0,48	0,69
Среднее значение					0,36	0,25	0,19	0,18	

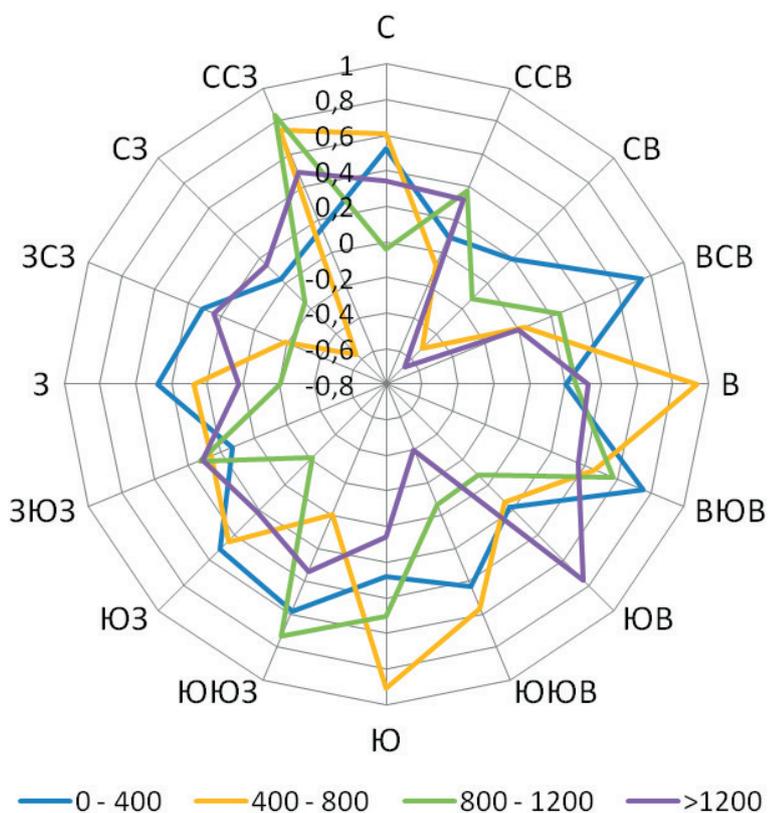


Рис. 11. Диаграмма, демонстрирующая совпадение и несовпадение скорости ветра, усредненной по заданным диапазонам высот, в зависимости от направления

Заключение

На данный момент работа по верификации данных лидарного зондирования продолжается: собирается статистика, разрабатываются новые оптимальные методы обработки данных, производится подбор параметров измерений (углов конуса, скорости сканирования) и исследуется их влияние на качество результатов измерений. Производится сравнительный анализ результатов характеристик ветра, измеренных различными методами. В частности, имеется в виду включение в анализ результатов микроволнового зондирования и лидарных измерений в других пунктах.

Рассматриваемые средства измерения обладают схожими методами усреднения, но различными значениями параметров усреднений. В процессе измерения радиозондом рассчитывается суммарный горизонтальный вектор скорости ветра между точками отправки данных, а, значит, скорость ветра усредняется по пространству и по времени. Такие же усреднения выполняются для показаний ветрового лидара. Так как для определения ветра производится конусное сканирование, происходит горизонтальное усреднение по очередному по высоте горизонтальному сечению конуса (через каждые 75 м), однако по вертикали, в отличие от данных радиозонда, ветер не усредняется. Пространство усреднения по горизонтали при измерении ветровым лидаром можно задавать путем изменения зенитного угла конуса. Усреднение по времени у ветрового лидара зависит от заданной угловой скорости сканирования.

Работа была выполнена с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ.

Литература

1. *Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Коняев М.А., Мишина О.А., Пенкин М.С., Петров Г.А., Тезадов Я.А., Шаталов И.В., Ширяев И.Ф.* Методы и алгоритмы обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием // Журнал радиоэлектроники. № 10. 2013. С. 14.
2. *Банах В.А.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2013. 303 с.
3. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Методы прикладного анализа результатов натурных измерений в окружающей среде. Учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2009. 369 с.
4. *Горелик А.Г., Костарев В.В., Черников А.А.* Новые возможности радиолокационных ветровых измерений // Метеорология и гидрология. 1962. Т. 62. №7. С. 34–40.
5. *Мишина О.А.* Методы и алгоритмы обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров Дисс. ... канд. технических наук: 05.13.01. Санкт-Петербург, 2012. 156 с.
6. *Самуленков Д. А., Мельникова И. Н., Сапунов М. В., Донченко В. К., Кузнецов А. Д.* Различие дневных и ночных профилей шапки загрязнений в центре Санкт-Петербурга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 81–96.
7. *Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М.* Радиозондирование атмосферы // «Мир измерений». 01.07.2009. С. 16–21.

Correlation between lidar and upper-air measurements of vertical profile of wind speed and direction

M.V. Sapunov¹, I.N. Melnikova¹, V.K. Donchenko¹, D.A. Samulenkov¹, A.D. Kuznetsov²

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia
E-mail: mikecf@mail.ru

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg 195196, Russia
E-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Measurements of vertical profile of wind speed and direction at the Resource Center "Observatory of ecological safety" of Research Park of St. Petersburg State University in the city center for several months of 2014-2015 are presented. The observations were accomplished using the Doppler lidar. The height of laser wind sounding was limited by lidar characteristics and atmospheric conditions to an average of 1.5-2 km, with the maximum of 6 km. The results were compared with the data of aerial radio sounding performed at Voikovo aerological station. The distance between the observational points was 25 km. The comparison was made with the assumption of wind field homogeneity on such a scale. In most cases, there is a good agreement between the observed vertical profiles of wind obtained by both methods. The cases where the results differ sharply either at high altitudes or, on the contrary, at the surface layer were, however, identified and explained.

Keywords: Doppler lidar, wind velocity, wind direction, radiosonde, vertical profile, meteorological parameters

Accepted: 23.11.2015

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-149-160

References

1. Akhmet'yanov V.R., Vasil'ev D.N., Konyaev M.A., Mishina O.A., Penkin M. S., Petrov G.A., Tezadov Ya.A., Shatalov I.V., Shiryayev I.F., *Metody i algoritmy obrabotki dannykh vetrovogo kogerentnogo doplerovskogo lidarnogo profilometra s konicheskim skaniraniem* (Methods and data processing algorithms of wind coherent Doppler lidar profilometer with conical scanning), *Zhurnal radioelektroniki*, No. 10, 2013, p. 14.
2. Banakh V.A., *Kogerentnye doplerovskie vetrovye lidary v turbulentnoi atmosfere* (Coherent Doppler wind lidar in turbulent atmosphere), Tomsk: Izdatelstvo Instituta optiki atmosfery SO RAN, 2013, 303 p.
3. Vasil'ev A.V., Mel'nikova I.N., *Metody prikladnogo analiza rezul'tatov naturnykh izmerenii v okruzhayushchei srede* (Methods of applied analysis of the results of field measurements in the environment), St. Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, 369 p.
4. Gorelik A.G., Kostarev V.V., Chernikov A.A., *Novye vozmozhnosti radiolokatsionnykh vetrovykh izmerenii* (New opportunities of wind radar measurements), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1962, Vol. 62, No. 7, pp. 34-40.
5. Mishina O.A., *Metody i algoritmy obrabotki signalov vetrovykh kogerentnykh doplerovskikh lidarov: Diss. kand. tekhnicheskikh nauk* (The methods and algorithms for signal processing coherent Doppler wind lidar. Candidate's technical sci. thesis), Saint-Petersburg, 2012, 156 p.
6. Samulenkov D.A., Mel'nikova I.N., Sapunov M.V., Donchenko V.K., Kuznetsov A.D., *Razlichie dnevnykh i nochnykh profilei shapki zagryaznenii v tsentre Sankt-Peterburga* (Difference of day and night profiles of the pollution cap in the center of St. Petersburg city) *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 81-96.
7. Fridzon M.B., Ermoshenko Yu.M., *Radiozondirovanie atmosfery* (Atmospheric radio sounding), "Mir izmerenii", 01.07.2009, pp. 16-21.