



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Использование технологии Lidar в метеорологии»

Исполнитель **Борохова Елена Сергеевна**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«27» мая 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение.....	3
1. Технология и её использование в различных сферах.....	5
1.1 Технология лидар.....	5
1.2 Применение технологии в различных сферах	15
2. Лидары в метеорологии.....	21
2.1 Виды метеорологических лидаров.....	21
2.2 Зондирование атмосферы.....	24
2.3 Подробнее о эффекте Доплера	28
3. Верификация лидарных и аэрологических измерений вертикальных профилей параметров ветра	31
3.1 Источник информации	31
3.2 Сравнение данных.....	40
4. Анализ данных аэрозольного лидара	44
Заключение	48
Список использованных источников	49

Введение

Современная наука не стоит на месте, исследователи с каждым днём всё больше нуждаются в новых, перспективных и более точных методах получения информации. Это касается практически всего, что нас окружает, хотя зачастую мы не обращаем внимания на многие вещи, считая их незначительными. Такие сферы деятельности как строительство, машиностроение, картографирование, космические исследования, охрана окружающей среды, сельское хозяйство, археология, модернизация автомобилей, метеорология и даже развлечения – уже активно применяют такое средство измерений как LiDAR. Эта технология определения расстояния до объекта позволяет, создавать карты, 3D-модели, профили метеорологических величин, обнаруживать объекты и многое другое.

Этот тип приборов расширяет наши возможности, давая нам еще больше способов для наблюдения за атмосферой на большой территории с Земли и из космоса, имея широкий угол обзора [1].

Целью этой работы является рассмотрение возможности использования технологии LiDAR в метеорологии, после чего выяснить, сможет ли она в скором времени получить широкое применение в мониторинге атмосферных процессов.

Выполнение работы требует решения следующих задач:

- изучить технологию LiDAR;
- рассмотреть различные виды лидаров, применяемых в метеорологическом мониторинге;
- на основе сравнительного анализа данных лидарного и аэрологического зондирования рассмотреть возможность использования лидаров для зондирования атмосферы;

- проанализировать данные аэрозольного лидара с мобильного лидарного комплекса.

1. Технология и её использование в различных сферах

1.1 Технология лидар

Лидар (LiDAR – Light Detection and Ranging «световая система обнаружения и измерения дальности») – это технология дистанционного зондирования, использующая явления отражения и рассеяния света в прозрачных и полупрозрачных средах для сбора информации, которую затем можно использовать для создания 3D-моделей, карт, вертикальных профилей атмосферы и так далее [1,2].

Лидар как прибор подобен радару, поэтому его применение — это наблюдение и обнаружение, но вместо радиоволн, как в радаре, в нем используется свет, генерируемый в подавляющем большинстве случаев лазером (рис. 1.1).

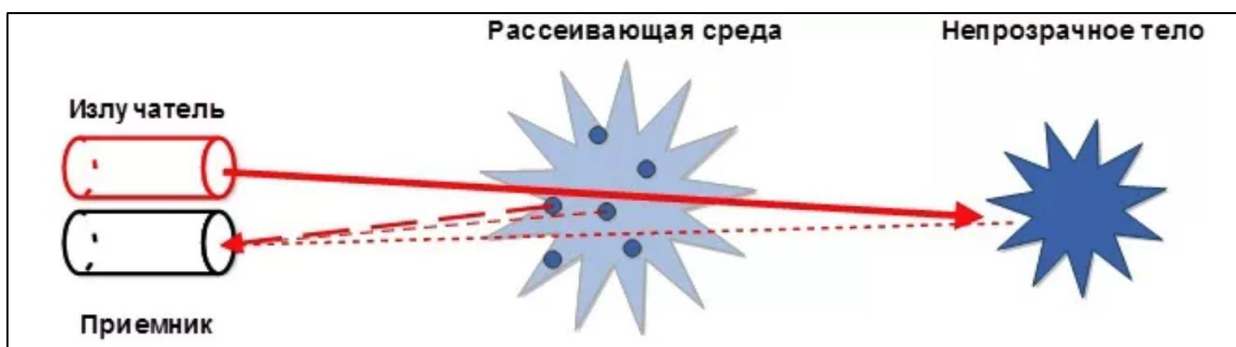


Рисунок 1.1 – Схема процесса измерения лидаром

Система лидар состоит из лазера, оптических элементов для направления излучения, вогнутого зеркала, осуществляющего приём отраженного сигнала, фотоприёмника (он располагается в фокусе вогнутого зеркала) и аппаратуры для анализа получаемого сигнала. [1,2,7,8] Прибор фиксирует время, за которое излучаемый свет (проходя через рассеивающую среду) попадает на объект (непрозрачное тело) и отражается от него обратно

в сканер. Далее рассчитывается расстояние с использованием скорости света по формуле:

$$S = \frac{ct}{2} \quad (1.1)$$

где c – скорость света 299 792 458 метров в секунду,

t – время [1,2].

Рассмотрим работу лазера. Процесс образования светового потока начинается с лампы накачки (чаще всего это мощная импульсная лампа). Она устанавливается так, чтобы как можно эффективнее излучать свет в активную среду (рис. 1.2). В данном случае лампа расположена в виде спирали.

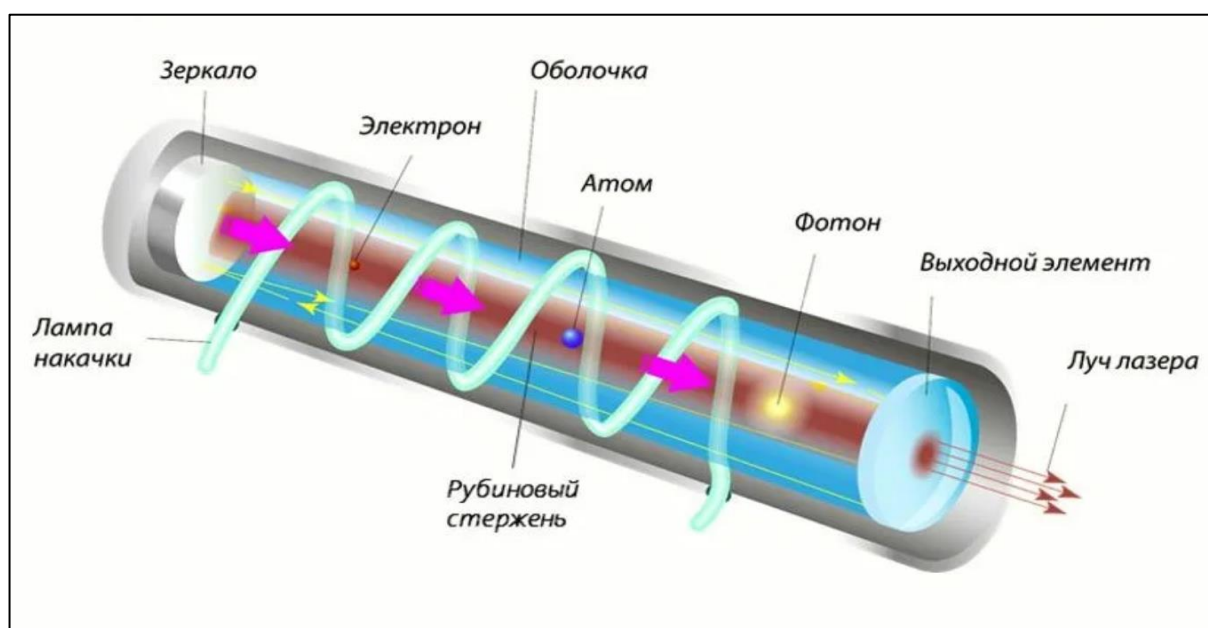


Рисунок 1.2 – Схема работы рубинового лазера

В качестве активной среды выступает рубиновый стержень, но также могут быть использованы газы, красители, полупроводники и так далее.

Лампа накачки излучает первичные фотоны и нарушает термодинамическое равновесие среды, принося дополнительную энергию. И тем самым заставляет атомы активной среды перейти в возбуждённое состояние. В это же время бомбардирование фотонами продолжается, и на атом попадает еще один, который вызовет излучение второго точно такого же фотона. Дело в том, что атом находится в возбуждённом состоянии и больше не поглощает энергию, но, так как это состояние неустойчиво, частица произвольно переходит в обычное состояние, при этом испуская фотон. Такое излучение называется вынужденным.

При помощи двух зеркал, одно из которых полупрозрачно, в рубиновом стержне будет происходить лавинообразное нарастание вынужденно испущенных атомами фотонов (излучение усилится благодаря многократному отражению от зеркал). Когда активная среда будет ими перенасыщена, излучение пройдет через выходной элемент (полупрозрачное зеркало) в виде узконаправленного импульса света. Но для человеческого глаза такие импульсы не заметны, они сливаются в единый поток за счёт высокой частоты.

Технология чаще всего применяется для геодезических задач. Благодаря своей способности собирать трехмерные измерения, системы лазерного сканирования стали активно использоваться для съемки искусственной среды (зданий, дорожных сетей), а также для создания цифровых моделей рельефа и рельефа конкретных ландшафтов. Метод популярен в обнаружении риска наводнений, накопления углерода в лесном хозяйстве и мониторинга береговой линии.

Лидар значительно упрощает работу дизайнерам. Легкость создания 3D-моделей объектов из реального пространства в цифровое балует архитекторов и дизайнеров созданием более детальных визуализаций, облегчающих общение с клиентами и способствующих созданию новых свежих идей. Подробные 3D-измеренные модели в масштабе района

значительно помогают городским дизайнерам в проектировании города, чтобы он был лучше и устойчивее.

Лидарные технологии не стоят на месте, постоянно раскрываются новые возможности их применения. Перечень того, что могут лидары разного типа весьма обширный и не перестаёт увеличиваться. В зависимости от того, какими свойствами обладает сенсор, они позволяют получить информацию о:

1. дальности и высоте;
2. температуре воздуха;
3. плотности газа;
4. степени и характеристиках облачности;
5. скорости и направлении ветра, ветровом сдвиге;
6. виде и размерных характеристиках ландшафта;
7. высоте и плотности лесных массивов;
8. шероховатости морской поверхности.

Оборудование, необходимое для измерения этого малого промежутка времени, должно работать чрезвычайно быстро. Это стало возможным только с достижениями в современной электронике и вычислительной технике.

Лидар запускает быстрые короткие импульсы лазерного излучения на объект (поверхность) с частотой до 150000 импульсов в секунду. Приёмник в приборе регистрирует и измеряет промежуток времени, необходимый для возврата импульса. Свет движется с постоянной и известной скоростью, поэтому система легко вычисляет расстояние между ним и целью с высокой точностью [1].

Существует два типа лидарных методов измерения: прямой метод измерения (также известный как некогерентный, который в основном измеряет изменения амплитуды отраженного света), и когерентное детектирование. Когерентные системы обычно используют оптическое гетеродинное обнаружение. Оно более чувствительно, чем прямое

обнаружение, и позволяет им работать с гораздо меньшей мощностью, но требует более сложных приемопередатчиков.

Оба типа используют импульсные модели: либо микроимпульсные, либо высокоэнергетические. Микроимпульсные системы используют прерывистые всплески энергии. Они возникли в результате постоянно растущей мощности компьютеров в сочетании с достижениями в области лазерных технологий. Они потребляют в лазере значительно меньше энергии, обычно порядка 1 мкДж, и часто безопасны для глаз, то есть их можно использовать без мер предосторожности. Высокоэнергетические системы широко используются в исследованиях атмосферы, где они широко используются для измерения параметров атмосферы: высоты, слоистости и плотности облаков, свойств частиц облаков, температуры, давления, скорости и направления ветра, влажности и концентрации газовых примесей (озон, метан, закись азота и др.) [4].

С использованием данной технологии также наблюдается повышенный уровень внедрения приложений автоматизации. Многие производители автомобилей используют сканеры меньшего диапазона и с более низкой дальностью, чтобы помочь в навигации автономных транспортных средств. Именно с использованием этой технологии работают системы автоматического управления в автомобилях Tesla и им подобных.

Три крупных фактора, отличающих лидары друг от друга: технология управления лучом, измерение расстояния, длина волны лазера.

1.1.1 Технология управления лучом

По технологии управления лучом лидары можно поделить на четыре группы, в зависимости от метода направления лазерного излучения [3].

Первая группа – вращающийся лидар (рис. 1.3). Идея состоит в том, что сканирующие лазеры, установленные в приборе вертикально, вращаются со скоростью в несколько оборотов в секунду и производят сканирование окружающей среды. Преимуществом такого подхода является покрытие на

360 градусов. Недостатком – достаточно большая стоимость прибора. Высокая стоимость достигается за счет использования большого количества сканирующих лазеров и такого же количества приемников отраженного сигнала. Однако в последнее время появилась возможность снизить стоимость прибора за счет компактной упаковки источников и приемников излучения на два чипа [3].

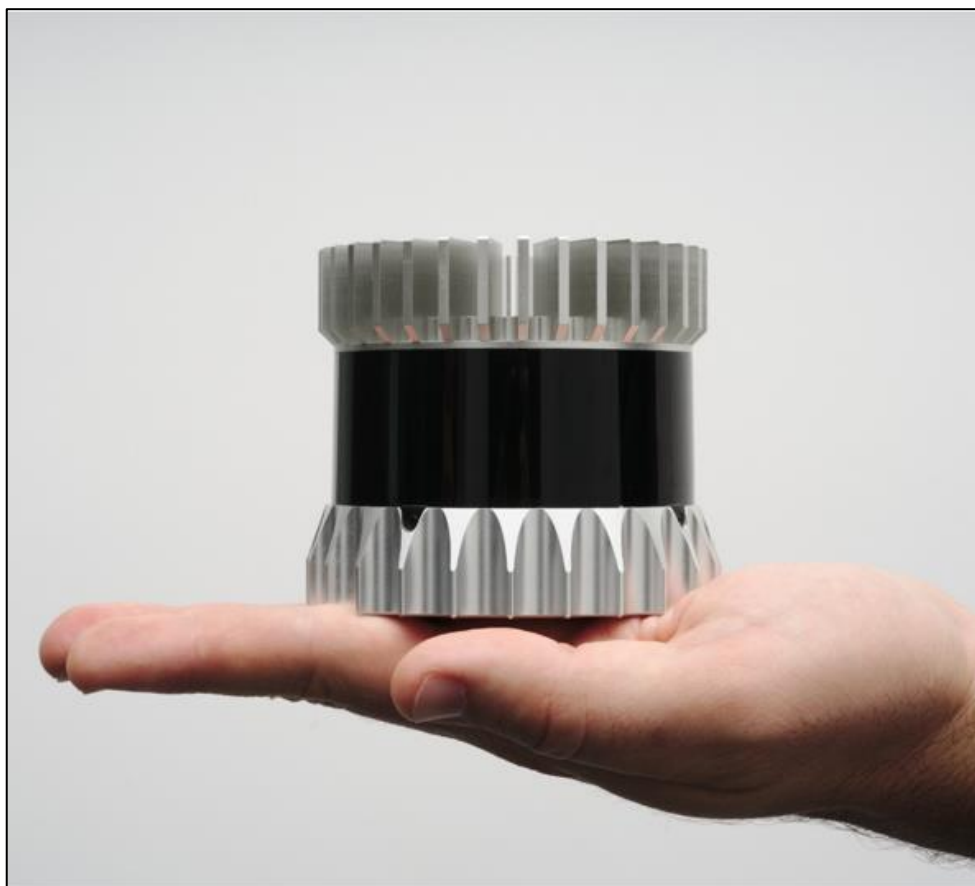


Рисунок 1.3 – Лидар фирмы Ouster с системой вращающихся лазеров

Вторая группа – механический сканирующий лидар (рис. 1.4). В таком лидаре используется один лазерный луч, который перенаправляется зеркалом в разных направлениях [2, 3]. Некоторые из компаний используют подход под названием «микроэлектромеханическая система» (МЭМС) для управления зеркалом. Такой лидар несколько дешевле лидара с системой вращающихся лазеров, но угол его зрения составляет около 120 градусов.

Если задачи мониторинга требуют более широкого угла зрения, то придется использовать несколько лидаров такого типа, что приведет к повышению стоимости и энергозатратности.



Рисунок 1.4 – Лидар фирмы Ouster с механическим сканированием

К третьей группе относятся лидары с активной фазированной антенной решеткой, один из них представлен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Лидар фирмы Quanergy с активной фазированной решеткой [3]

Этот метод использует ряд излучателей (активную фазированную антенную решетку), способных изменять направление лазерного луча, подстраивая относительную фазу сигнала между соседними передатчиками (рис. 1.6). Такая технология могла бы иметь ряд преимуществ, если бы не проблемы с зондированием на определенных расстояниях [3].

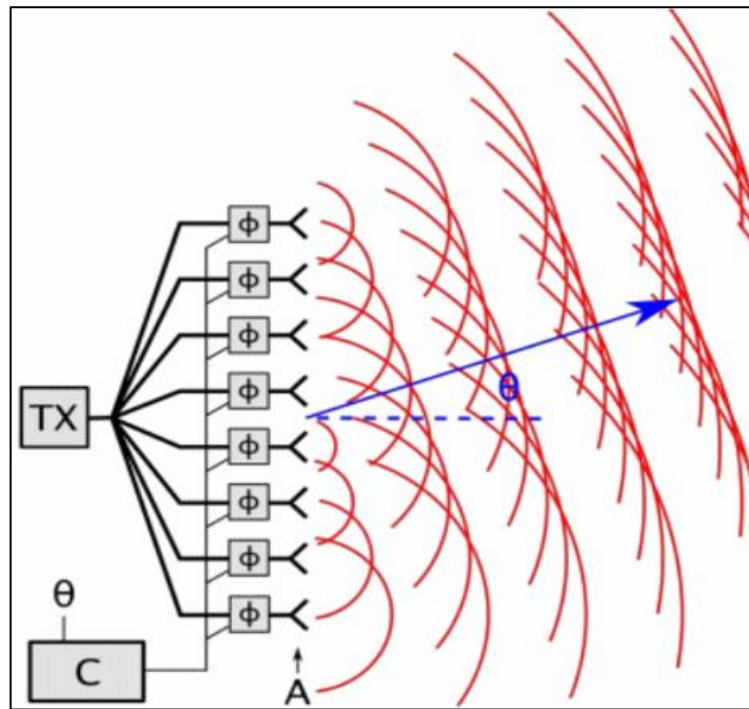


Рисунок 1.6 – Активная фазированная антенная решетка

К четвертой группе относят лидары на основе вспышек. В данном варианте используется один широкоугольный лазер, который подсвечивает всю зондируемую область сразу. На данный момент метод на основе вспышек плохо зарекомендовал себя при зондировании больших расстояний, так как у излучаемой системы имеются ограничения по мощности. Поэтому до удаленной на большое расстояние точки исследования доходит совсем небольшая часть лазерного излучения. Но рассматриваются перспективы создания многолазерной вспышки, в которой предполагается использовать массив из тысяч или миллионов лазеров, направленных в разные стороны [3].

1.1.2 Технология измерения расстояния

Лидар измеряет время, которое требуется свету для того, чтобы дойти до объекта, и отразиться от него. Есть три простых способа сделать это:

- *Время в пути.* Лидар отправляет короткий импульс и измеряет, сколько времени пройдет до фиксации возвращающегося импульса.

- *Лидар непрерывного излучения с частотной модуляцией.*

Отправляет непрерывный луч света, частота которого постоянно меняется во времени. Луч разбивается на два, и один из них отправляется во внешний мир, а потом по возвращению объединяется с другим. Поскольку частота у источника луча меняется непрерывно, разница в пути двух лучей выражается через разность их частот. В результате получается картина интерференции, частота биений которой является функцией от времени в пути (и, следовательно, от расстояния). Этот путь может показаться беспричинно усложнённым, но у него есть несколько преимуществ. Такой лидар устойчив к интерференции от других лидаров или от Солнца и может использовать доплеровское смещение для измерения скорости объектов, а не только расстояния до них.

- *Лидар непрерывного излучения с амплитудной модуляцией.* Этот способ можно рассматривать, как компромисс между двумя предыдущими. Такой лидар, как и простой датчик, измеряющий время в пути, отправляет сигнал, а потом измеряет время, которое у него ушло на то, чтобы отразиться и вернуться. Но если простые системы отправляют один импульс, то данный лидар отправляет сложную схему (псевдослучайный поток цифровых нулей и единиц). Сторонники подхода говорят, что благодаря этому данный способ более устойчив к интерференции [4].

1.1.3 Разделение по длине волны

Лидары могут работать на разных длинах волн (например, 850, 905 и 1550 нанометров). Выбор длины волны лазерного излучения зависит от нескольких факторов: целей мониторинга и безопасности для человеческого глаза.

Лидары с длиной волны 850 и 905 нанометров более экономичные, поскольку могут работать с использованием кремниевых детекторов, но

вместе с тем более опасные для человека. Работая на большой мощности, лазерный свет с длиной волны 850 и 905 нанометров от лидара может дойти до сетчатки глаза.

Лазерный импульс с длиной волны 1550 нанометров, испускаемый лидаром, безопасен для глаз, что позволяет проводить зондирование на большей мощности, и тем самым увеличивать дальность действия. Однако, детекторы таких лидаров выполняются из более дорогих и редких материалов.

1.2 Применение технологии в различных сферах

В настоящее время спектр полезности лазеров огромен и универсален: начиная от смартфонов и планшетов (рис. 1.7), заканчивая космосом. Несомненно, это только начало. Существует огромное количество способов использования лазеров для эффективного и профессионального производства, создания, сбора, поиска информации во многих сферах человеческой деятельности: в технологической сфере, в медицине, в науках о Земле и других и так далее.

На сегодняшний день наиболее распространенными сферами использования системы лидар являются приложения для географического и атмосферного картографирования. Такие организации, как USGS (Геологическая служба США), NOAA (Национальное управление океанографии и атмосферы) и NASA, десятилетиями использовали лидар для создания карт земли и космоса [5].



Рисунок 1.7 – Лидар в Apple iPad pro

Климатологи используют его, чтобы исследовать состав атмосферы и изучать облака, испарение и глобальное потепление. Океанографы для отслеживания береговой эрозии. Ботаники используют лидары, чтобы измерить постоянно меняющиеся структуры лесов Земли [5].

Мы также можем использовать лидар для изучения газового состава атмосферы. Разные газы поглощают световые волны различной длины в необходимом количестве, поэтому мы можем дистанционно изучать газы в определенном месте запустив него два лазерных луча с различной длиной волны из самолета или вертолета, сравнив потом, сколько из каждой длины волны поглощено или отражено. Данная система называется лидар с дифференциальным поглощением (DIAL), она может использоваться для всего: от обнаружения утечек газопроводов, до измерения загрязнения воздуха [5]. Разработкам систем лазерного дистанционного зондирования загрязняющих газов, таких как NO_2 , SO_2 и других, длительное время уделяется большое внимание, поскольку на предприятиях и в промышленных

центрах их концентрация может достигать высоких значений, близких к ПДК (предел допустимой концентрации).

Портативные приборы обычно используют лазеры, излучающие с длиной волны 905 нанометров, являющиеся более дешевыми, безопасными и очень эффективными [5].

В настоящее время лидар широко используется в дополненной реальности (рис. 1.8). LiDAR Augmented Reality (AR) – это технология, которая позволяет пользователю просматривать виртуальный контент так же, как он существовал бы в реальном мире. Лидар распознаёт объекты в трёх измерениях, тем самым повышает четкость и конечный результат AR-систем. Сканер лидара предлагает высококачественное «3D-картирование», которое позволяет другим AR-системам размещать данные поверх карты с высоким разрешением, используя облако точек [3,9].



Рисунок 1.8 – Дополненная реальность, полученная при помощи лидара

Одним из наиболее распространенных применений является полицейское оборудование для измерения скорости автомобилей, хотя мы обычно думаем, что это радар.

Использование технологии распространяется и в автомобильном секторе. Лидар можно назвать «глазами» транспортного средства, так как он смотрит, сканирует окружающую местность, освещая ее лазером, вычисляет расстояние, находит препятствия и предотвращает столкновения с ними (рис. 1.9). Он является самым главным сенсором в беспилотной технологии. Модуль устанавливается на крыше или бампере автомобиля. Система, контролирующая управление, получает информацию от датчиков и решает, когда нужно снизить или повысить скорость или полностью прекратить движение [5,9].

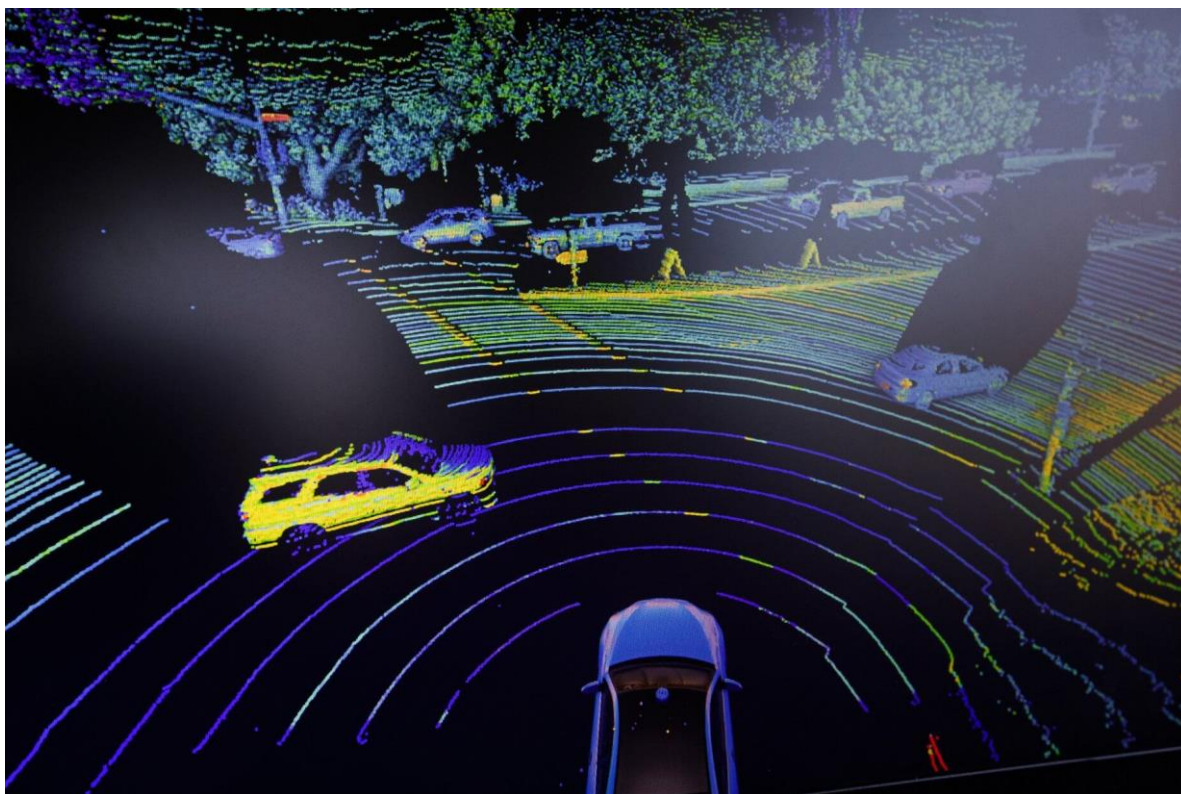


Рисунок 1.9 – Система лидар на автомобиле

Лидар в космосе. NASA для международной космической станции разработало инструмент под названием GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation – исследование динамики глобальной экосистемы), который позволяет получать трехмерное изображение лесных массивов и помогает предоставить информацию об углеродном цикле, что ранее было недоступно. GEDI дает жизненно важную информацию о влиянии деревьев на количество углерода в атмосфере [6]. Прибор производит первые лазерные дальномерные наблюдения 3D-структуры Земли с высоким разрешением, которые дадут ответы на вопросы о том, как обезлесение способствовало концентрации углекислого газа в атмосфере, сколько углерода леса будут поглощать в будущем и как деградация среды обитания повлияет на глобальное биоразнообразие и круговорот воды. Полученные трёхмерные изображения лесных массивов (рис. 1.10) дают информацию об углеродном цикле, что ранее было недоступно.

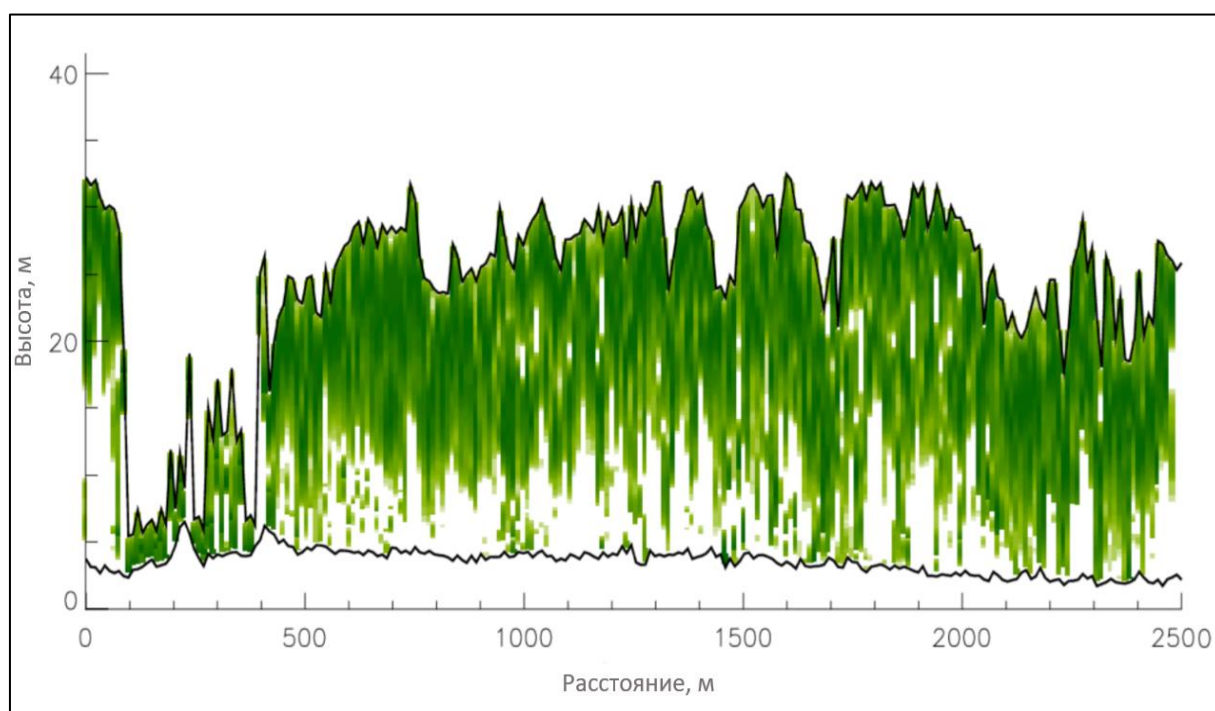


Рисунок 1.10 – График распределения высоты лесных массивов

Имея эту информацию, появляется возможность определить точный уровень углерода, хранящийся в лесах, и количество деревьев, которые необходимо высадить, чтобы скомпенсировать влияние выбросов в атмосферу парниковых газов [6].

Это, в свою очередь, также имеет значение для прогнозирования погоды, управления лесами, мониторинга ледников и снежного покрова. В целом, GEDI поможет лучше понять, как Земля ведет себя как живая система.

Съемка с использованием лидаров также применяется и в строительстве. Материалы собираются достаточно быстро, что является преимуществом перед другими методами. Пространственные модели топографии района имеют незначительную погрешность, экономят средства и позволяют быстрее принимать решения [6].

Используются системы лидарного зондирования и в метеорологии.

2. Лидары в метеорологии

Значительное развитие лазерной техники в последнее десятилетие послужило основой для разработки и внедрения коммерческих систем дистанционного измерения параметров атмосферы, моря и земной поверхности. В зависимости от взаимодействующего излучения с видом вещества можно извлекать широкий спектр комплексной информации о состоянии и составе изучаемого объекта, в зависимости от среды, в которой он находится. Как было сказано ранее, в настоящее время лидары заняли определенную нишу в сфере 3D-сканирования, сенсорике беспилотного транспорта [3,5].

Лидар берет свое начало в 1953 году [5]. Гигантский скачок в своем развитии эта технология получила во время холодной войны (в рамках космических программ СССР и США). Собственно говоря, большинство дистанционных методов зондирования атмосферы с помощью лазерного излучения разрабатывались в последней трети прошлого века. В этот период лазерные лидары (взаимодействие с атмосферными частицами, такими как атомы, молекулы, аэрозоли) использовались как инструменты для реализации различных методов исследования. Пройден долгий путь от лабораторных установок до мобильных наземных и воздушных прототипов различного назначения.

2.1 Виды метеорологических лидаров

Дистанционное зондирование атмосферы в оптическом диапазоне в настоящее время является одним из наиболее эффективных способов получения информации о ее физико-химических и динамических характеристиках. Сегодня лидарные системы атмосферного мониторинга

широко применяются в метеорологии, экологии, климатологии, в сфере обеспечения безопасности полетов, ветроэнергетике.

Наибольшее распространение получили лидарные системы анализа атмосферы на предмет распределения аэрозольного и химического состава воздуха, а также скорости и направления ветра. Исследование аэрозольно-газового состава воздуха особенно важно в задачах экологического мониторинга зон [6], связанных с опасными производствами и глобальным переносом загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов. Подобные задачи решаются с привлечением многоволновых аэрозольных лидаров для исследования структуры аэрозоля и дифференциальных поглощающих лидаров коротковолнового (КВ) или длинноволнового (ДВ) диапазона для определения концентрации газообразных химических соединений.

В метеорологии задействовано немалое количество различных лидаров, которые способны детектировать и идентифицировать физические характеристики, процессы и газовый состав атмосферы. На рисунке 2.1 выделены основные типы лидаров с их результатами измерений.

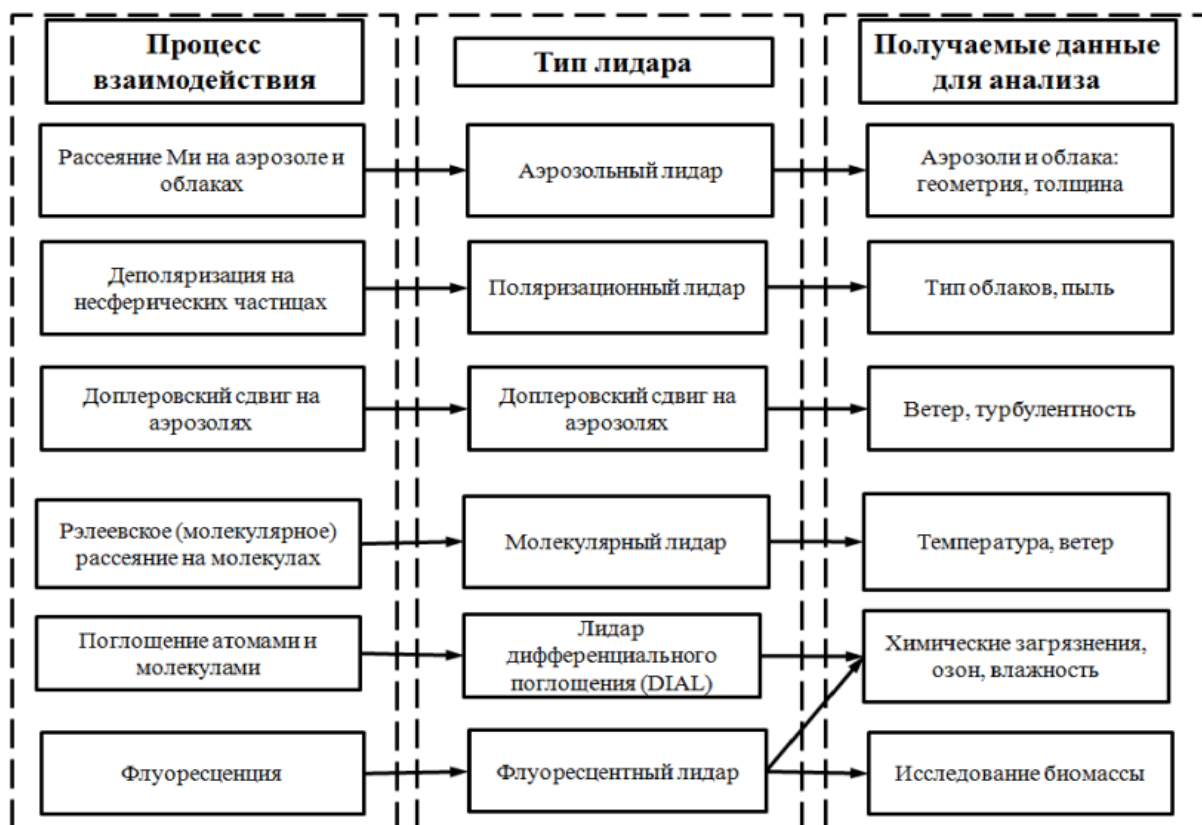


Рисунок 2.1 – Основные типы лидарных систем

Каждый из представленных типов лидаров базируется на своём методе измерений и особенностях измерений, снабжая исследователя теми или иными интересующими его данными. При создании лидарных систем особенно важно учитывать эти критерии для удобной и слаженной работы нескольких приборов в комплексе [3].

Параметры атмосферы, такие как скорость и направление ветра, видимость, плотность и высотность облачных слоев, изменяются как во временном, так и в пространственном масштабе. Это может приводить к формированию опасных метеорологических явлений. В задачах управления воздушным движением и обеспечения безопасности авиаперевозок, особенно в районах аэропортов, необходимо измерять параметры атмосферы с высоким временным и пространственным разрешением. Распределение ветрового поля на различных высотах, а также данные о видимости и

параметрах облачности могут быть получены с помощью когерентных доплеровских лидаров.

Существует несколько типов лидаров, которые способны детектировать и идентифицировать химический состав, а также определять физические параметры атмосферы, которые используются для решения различных задач дистанционного мониторинга.

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в изменении климата, поэтому мониторинг его состава, концентрации и динамики необходим для оценки климатических изменений в глобальном масштабе.

2.2 Зондирование атмосферы

В лидарных методах зондирования, основанных на аэрозольном рассеянии, используется зависимость лидарных сигналов от формы и размера атмосферных частиц. Метод одночастотного лазерного зондирования аэрозоля эффективен для оценки профиля обратного рассеяния или коэффициента ослабления без определения закона размера частиц. Молекулярная (газовая) атмосфера при лазерном зондировании проявляется в поглощении, в явлениях молекулярного, комбинационного, резонансного рассеяния и флуоресценции. Эти явления отличаются интенсивностью или участками взаимодействия и, следовательно, возможностями надежной регистрации сигналов.

Использование лазерного зондирования атмосферы позволяет получить профили или поля различных параметров атмосферы с исключительно высоким временным и пространственным разрешениями, благодаря сверхвысокой чувствительности аппаратуры. Это даёт возможность проводить более точный анализ содержания аэрозоля или иных частиц в атмосфере, температуры и влажности отдельных её участков, а также скорости и направления движения воздушных масс [1].

Но данный метод зондирования сопряжен с рядом трудностей:

- сигнал, отражаемый атмосферой очень слабый. Для его регистрации требуются высокочувствительные приёмники;
- то излучение, которое отражается от наблюдаемой области атмосферы, изменяется нижележащими слоями по пути следования к приёмнику;
- приёмная аппаратура даёт искажение сигнала;
- обработка большого объёма данных многоволнового лидарного зондирования в реальном времени при глобальном мониторинге параметров аэрозолей предъявляет повышенные требования к скорости расчетов, выполняемых используемыми алгоритмами.

Учитывая эти аспекты необходимо использовать очень сложную и сильную вычислительную технику, которая имеет высокую стоимость. Несмотря на это, у лидарного зондирования безусловно есть и достоинства [1]:

1. Дистанционность измерения. Возможность получения данных об атмосфере на расстоянии от нескольких десятков до сотен километров.
2. Высокая разрешающая способность. Зондируемый участок может достигать размера менее 1 метра.
3. Безинерционность метода. С момента излучения до получения отраженного сигнала проходит очень мало времени, миллисекунды и даже меньше, что даёт информацию об атмосфере почти в реальном времени.
4. Возможен глобальный мониторинг атмосферы при помощи лазерного зондирования с искусственных спутников Земли.

Лазерная установка (лидар) включает в себя лазер, оптические элементы для регулирования направления луча, вогнутое зеркало для осуществления приёма отражённого сигнала, фотоприёмник (размещён в фокусе вогнутого зеркала) и аппаратуру, анализирующую полученных сигнал, например, спектрометр. Также, лидар имеет электронные блоки для

подсчета времени и формирования выходного сигнала, который может быть преобразован из аналоговой формы в цифровую.

Далее рассмотрим основные физические принципы зондирования параметров атмосферы лидарами.

1. *Лазерное зондирование аэрозолей.* Технически эта цель вполне простая, потому что отражённый от аэрозолей сигнал довольно мощный. Тем мощнее будет полученный сигнал, чем крупнее частица аэрозоля и больше его концентрация в зондируемом объёме воздуха. Также влияние оказывают и химические свойства частиц. Но сложность состоит в том, чтобы выбрать подходящую длину волны лазера. Излучение должно хорошо отражаться аэрозолями и слабо поглощаться атмосферными газами, для получения корректной информации о загрязнённости воздуха [1].

2. *Зондирование атмосферных газов.* Этот процесс намного сложнее, потому что сигнал, отражаемый молекулами газов, может быть в тысячу раз слабее сигнала, отражаемого аэрозолями. Трудность состоит в том, чтобы выделить полезный сигнал на фоне помех. Добиться этого позволяет высокая энергия лазерного излучения, которая вполне хорошо регистрируется чувствительными светоприёмниками. В данном случае используется метод комбинационного рассеяния света (КРС). Его суть заключается в следующем: световое излучение, рассеянное молекулами газов, не монохромное. Кроме основной частоты приходящее рассеянное излучение имеет ещё две дополнительные частоты – спутниковые частоты: n_1 и n_2 . В результате, получается спектр рассеянного излучения, состоящий из трёх линий. Наглядный вид спектра изображён на рисунке 2.1 [1].

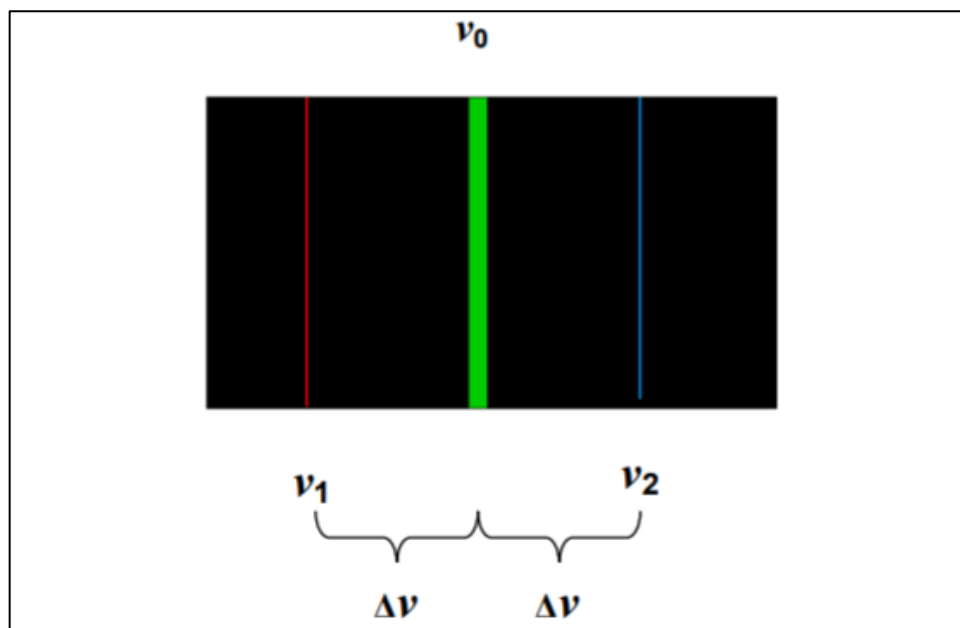


Рисунок 2.1 – Спектр рассеянного излучения

Для того, чтобы определить какой газ находится в зондируемом объёме воздуха, нужно знать разность частот $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_0$, так как она зависит от природы молекул газа. Чем ярче спутниковые линии, тем выше концентрация того или иного газа.

Но, как и говорилось ранее, реализовать данный метод достаточно трудно. В первую очередь из-за того, что в атмосфере одновременно содержится смесь из различных газов, и их спектры накладываются один на другой. Также большие помехи создают нижележащие слои атмосферы, которые должны быть прозрачными для основной и спутниковых линий. Условие прозрачности нижележащих слоёв затрудняет выбор длины волны зондирующего сигнала. Но современные решения в мире техники предоставляют лазеры, в которых длина волны может перестраиваться, что позволяет использовать разные частоты при зондировании различных атмосферных газов.

3. *Лазерное зондирование скорости ветра и турбулентности.* Для решения этой задачи используются методики, основанные на эффекте Доплера при отражении луча лазера аэрозолями. Дело в том, что, при

отражении от движущего аэрозоля, излучение меняет частоту. И чем больше изменилась частота принятого сигнала относительно первоначального, тем выше скорость ветра [1].

4. *Лазерное зондирование влажности.* В этом случае применяется ранее рассмотренный метод комбинационного рассеяния света (КРС). При этом определяется количество содержащего в объёме воздуха водяного пара.

5. *Лазерное зондирование атмосферного давления.* Определение давления проводится путём измерения содержания какого-либо широко распространённого газа, к примеру, азота или кислорода. Здесь также применим метод комбинационного рассеяния света при зондировании одного из этих газов.

6. *Лазерное зондирование температуры.* Измерение температуры воздуха представляется одной из наиболее сложных задач, при которой необходимо использовать самую чувствительную аппаратуру. Тут снова применяется метод КРС, и, как и при определении давления, зондируется азот или кислород. Молекулы газа, при повышении температуры, двигаются с большей скоростью. Отсюда следует, что получаемая спектральная линия расширяется за счёт эффекта Доплера. Именно её ширина и служит мерой температуры газа [1].

Кроме того, температура зависит от отношения яркостей спутниковых линий. Но эта зависимость очень невелика, поэтому измерение яркостей должно производиться очень чувствительной аппаратурой, что позволит получить достоверные результаты [1].

2.3 Подробнее о эффекте Доплера

Как и говорилось ранее, скорость и направление ветра, видимость, плотность и высота облачных слоёв очень изменчивы как во времени, так и в пространстве, что может привести к образованию опасных явлений погоды. Целью организации воздушного движения и обеспечения безопасности

авиаперевозок в аэропортах предельно важно проводить измерения параметров состояния атмосферы с высоким временным и пространственным разрешением. Направление движения потоков воздушных масс на разных высотах, а также информацию о дальности видимости и облачности можно получить при помощи когерентного доплеровского ветрового лидара.

Доплеровский ветровой лидар, как становится ясно из названия, в своей работе основан на эффекте Доплера. Рассмотрим же его подробнее для понимания данного подхода.

Эффект Доплера или доплеровский сдвиг – одна из тех вещей, которые довольно легко заметить, но сложнее понять и объяснить. Этот физический эффект заметил и объяснил австрийский математик Кристиан Доплер. Ученый наблюдал за волнами на поверхности озера и позже заметил, что по мере приближения источника волн к наблюдателю длина волны уменьшается (следовательно, частота волн увеличивается, поэтому гребней волн немного больше перед источником, чем за его спиной). Однако, по мере удаления источника волн от наблюдателя, сами волны растягиваются, их длина увеличивается, а частота уменьшается.

На рисунке 2.2 схематически представлен эффект Доплера. Мы видим, что впереди, в направлении движения объекта, являющегося источником волн, частота волн выше, чем позади. Такое изменение длины волны (частоты) вызвано движением объекта. Если разместить приёмник позади движущего источника волн, то он будет воспринимать волны более длинными, а если впереди – более короткими.

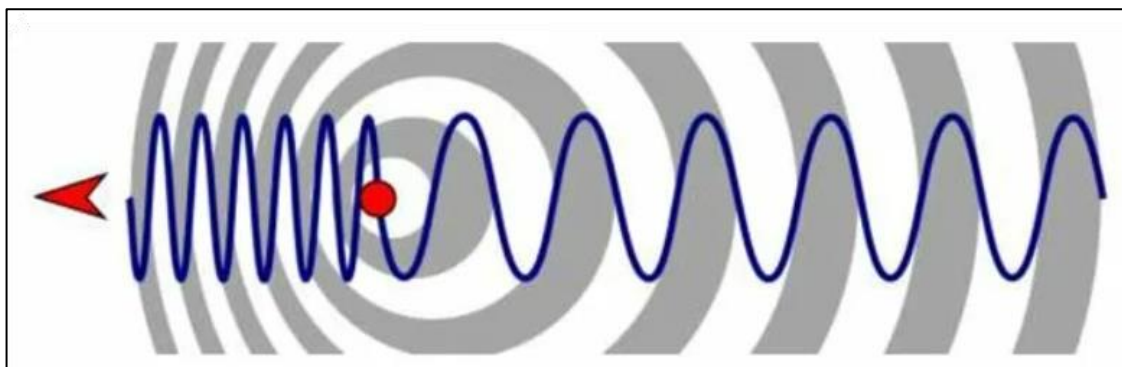


Рисунок 2.2 – Схема эффекта Доплера

На этом и построен метод измерения скорости и направления ветра доплеровским лидаром. Посылаемый излучателем лазера импульс света после отражения от частиц аэрозоля, движущихся с определённой скоростью и в определённом направлении относительно приёмника, будет иметь частоту, отличную от начальной. И по разности частот между посылаемым и получаемым сигналом прибор определяет необходимые нам параметры ветра [10].

3. Верификация лидарных и аэрологических измерений вертикальных профилей параметров ветра

3.1 Источник информации

В настоящее время мы испытываем нехватку средств измерений для получения таких важных данных, как вертикальные профили параметров ветра. Сейчас наиболее распространённым средством является аэрологическое зондирование атмосферы, которое проводится на аэрологических станциях. Но при этом большинство расположено за чертой города, что не позволяет получить данные везде, где это необходимо. Вместе с тем, запуск радиозондов обычно производится 1 – 2 раза в сутки, чего недостаточно для прослеживания динамики атмосферных процессов. Ведь такой параметр атмосферы, как ветер, очень изменчив (он может поменять своё направление или скорость в считанные минуты). Современное решение в виде доплеровского лидара может помочь исследователю в необходимости иметь данные с меньшей дискретностью. Но для того, чтобы рекомендовать этот метод для оперативного использования на практике, нужно провести верификацию с данными сертифицированного средства измерения вертикальных профилей ветра, которым является аэрологический зонд.

В работе использованы данные с импульсного доплеровского лидара, находящегося в обсерватории Санкт-Петербургского государственного университета. Он находится в центре города, что позволяет полностью охватить территорию Санкт-Петербурга и Ленинградской области. На рисунке 3.1 представлена карта города с точным местоположением университета.

В «Обсерватории экологической безопасности» СПбГУ расположено научное оборудование для измерения скорости и направления ветра (импульсный доплеровский лидар) и аэрозольный лидар для измерения параметров атмосферных аэрозолей.

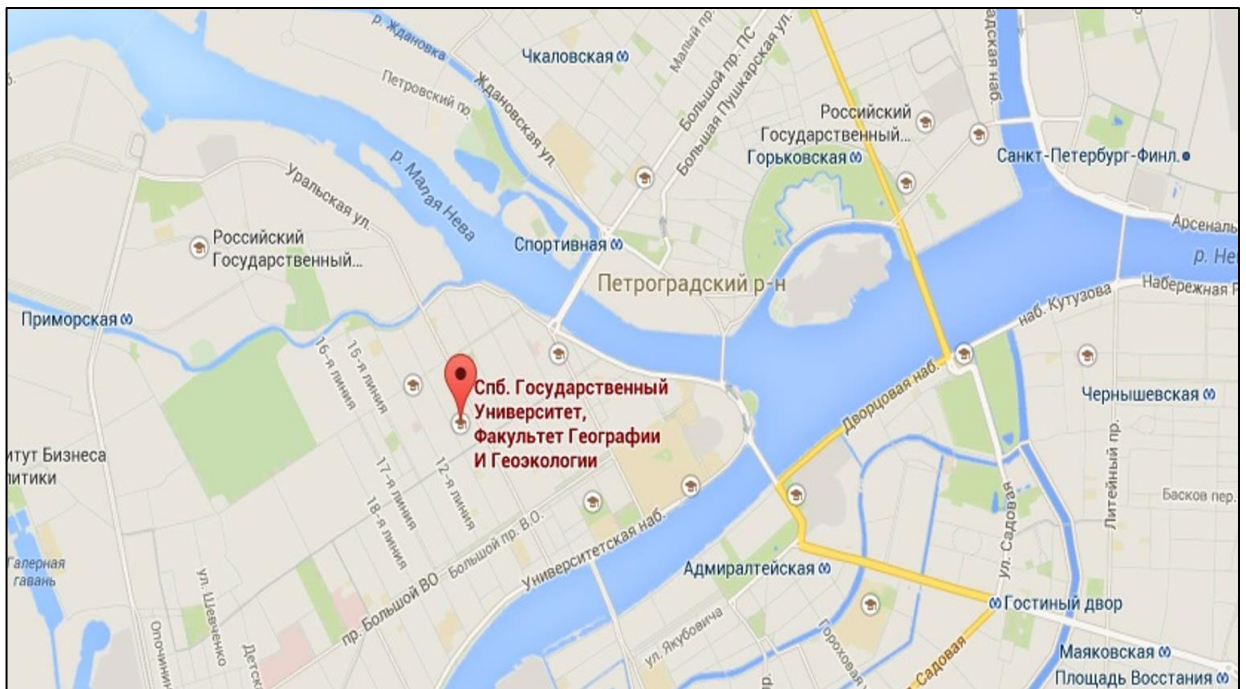


Рисунок 3.1 – Местоположение университета

Состав лидарного комплекса и башня, в которой он располагается изображены на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно.

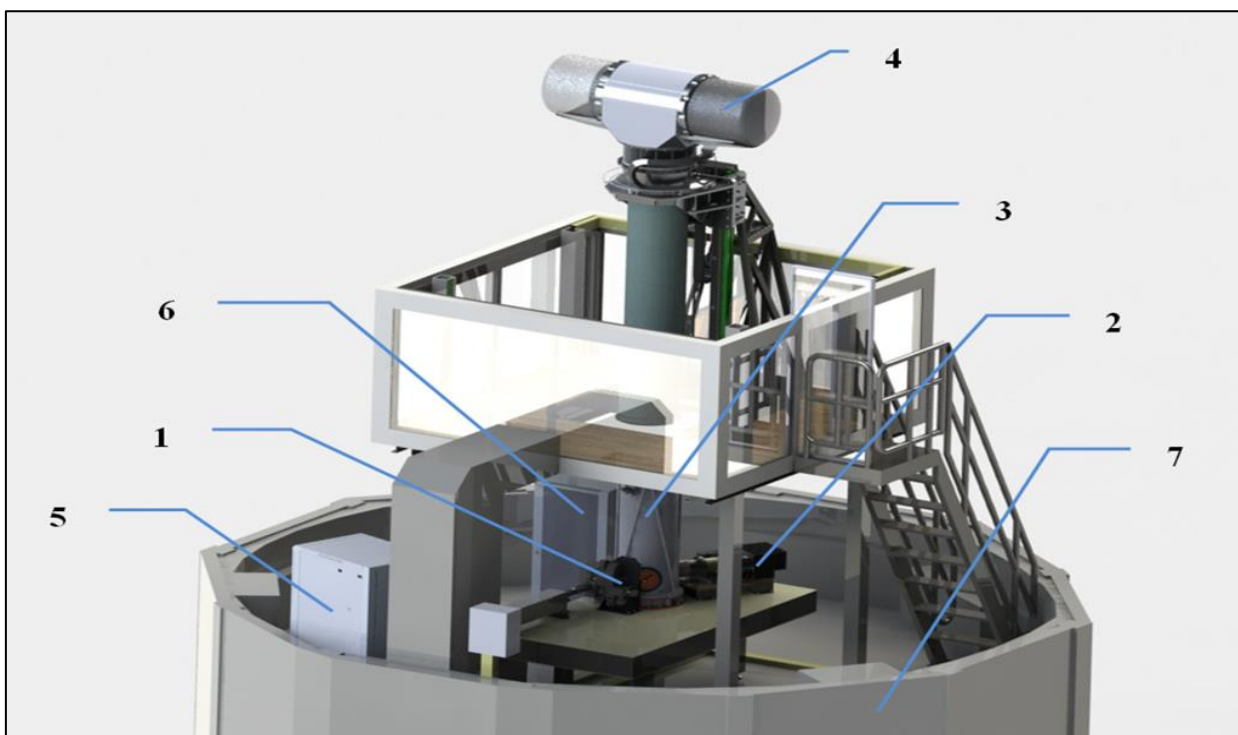


Рисунок 3.2 – Состав лидарного комплекса

- 1 – аэрозольный лидар;
- 2 – доплеровский лидар;
- 3 – телескоп приёмно-передающий;
- 4 – сканер двухосевой;
- 5 – шкаф серверный;
- 6 – шкаф с оборудованием;
- 7 – башня СПБГУ.



Рисунок 3.3 – Башня Санкт-Петербургского государственного университета

Рассмотрим доплеровский лидар более детально. Этот тип лидаров предназначен для исследования параметров ветра. С его помощью мы получаем информацию о скорости, направлении и сдвиге ветра. Данные о перемещении воздушных масс прибор получает, регистрируя разность частот между излучаемыми и принимаемыми импульсами (доплеровский сдвиг). Разность частот возникает при отражении посылаемого лазером импульса от движущихся аэрозольных частиц в атмосфере, и она пропорциональна их скорости. Характеристики ветрового лидара (табл. 3.1).

Характеристики ветрового лидара

Параметр	Значение
Длины волн	1557,2 - 1557,5 нм
Продолжительность импульса	400 нс
Энергия импульса	11 мкДж
Частота повторения импульса	10 КГц
Мин. скорость детектирования	0,2 м/с
Макс. скорость детектирования	40 м/с
Дальность	~ 6 км

Дальность зондирования прибора 6 километров, но она может быть меньше, это зависит от состояния атмосферы [11]. Так как работа лидара тесно связана с концентрацией аэрозольных частиц в атмосфере. Если их будет недостаточно, получаемые данные могут быть некорректными, ведь принимаемый сигнал будет слишком слабым, чего не хватит для информативного анализа.

Данный лидар излучает на длине волны инфракрасного спектра, это позволяет использовать его, не нанося при этом вред глазам человека. Это очень важный критерий, потому что установка находится в центре города.

Далее, на рисунке 3.4, представлена схема прибора.

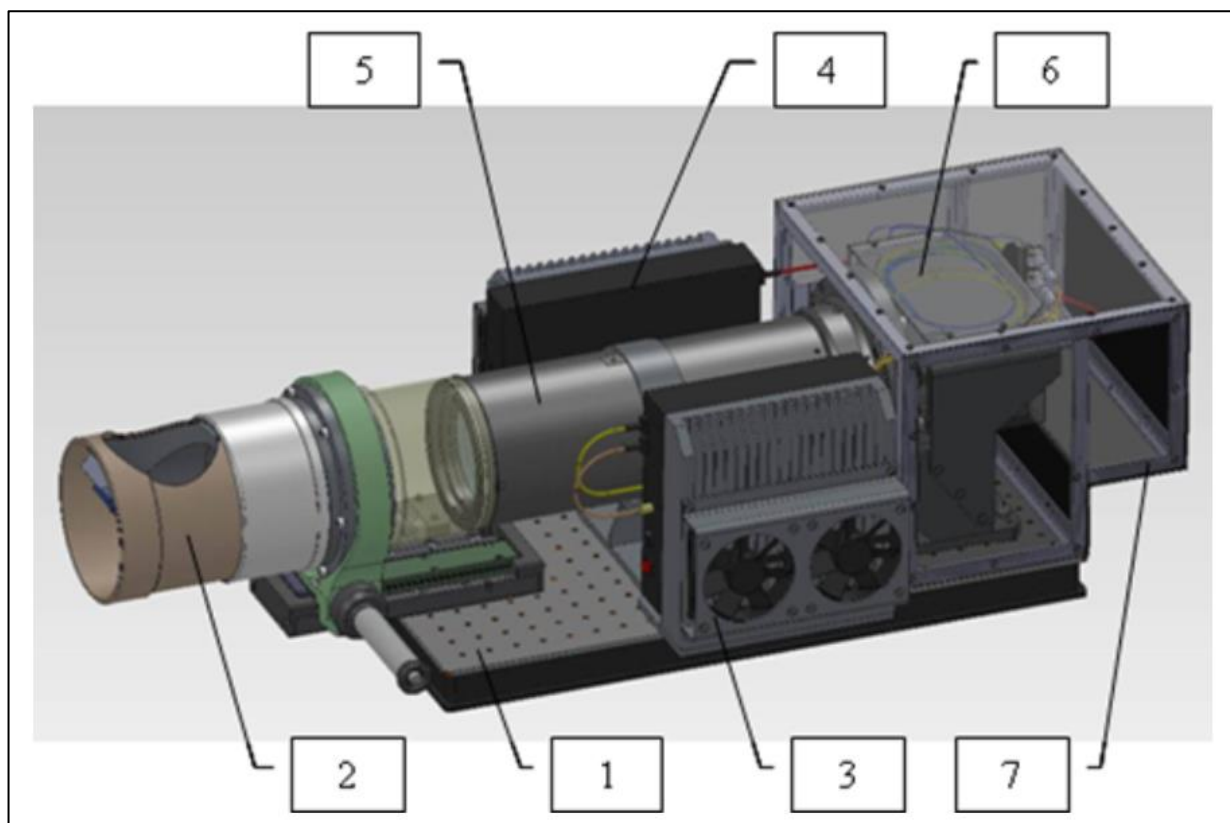


Рисунок 3.4 – Схема ветрового лидара

1. Оптическая плита.
2. Выдвигаемое зеркало.
3. Лазерный излучатель с вентиляторами охлаждения.
4. Оптический волоконный усилитель.
5. Линзовый телескоп.
6. Фотоприёмный модуль.
7. Каркас.

Лидар может проводить сканирование как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, в зависимости от того какие данные необходимы для мониторинга. Два режима сканирования представлены на рисунке 3.5.

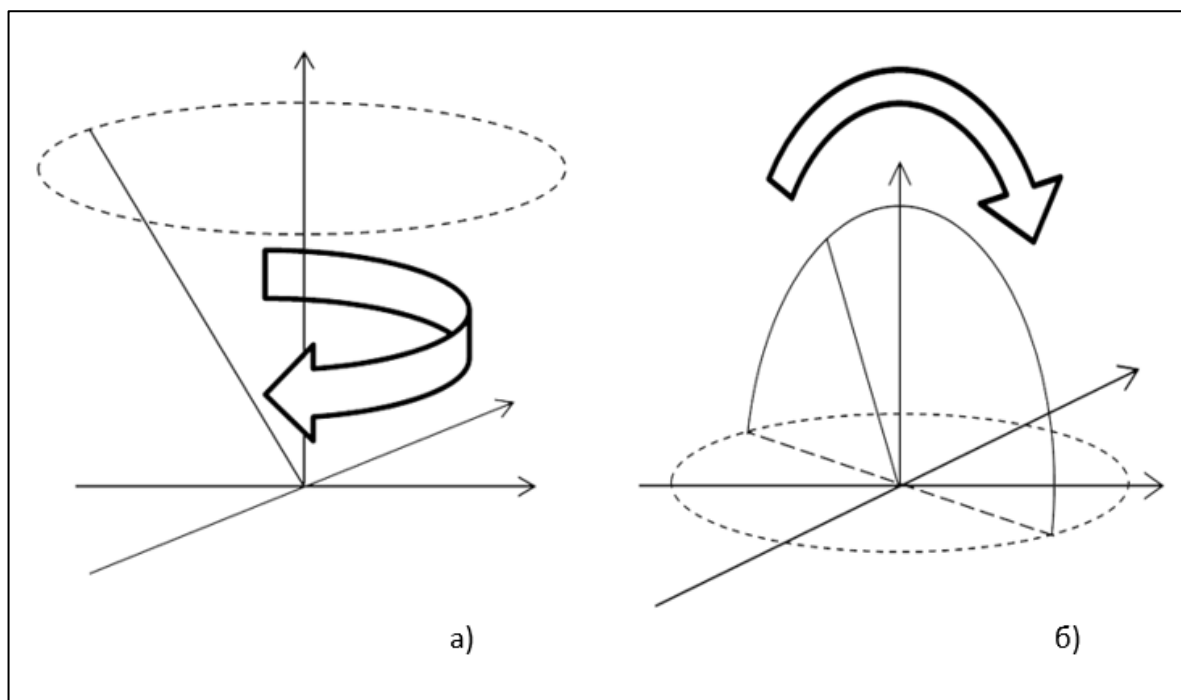


Рисунок 3.5 – Режимы сканирования лидара. а) конусное сканирование, б) секторное сканирование.

Ветровой лидар имеет сканирующую систему, позволяющую менять направление лазера по азимуту – конусное сканирование (рис. 3.5 а), вырисовывая под заданным углом конус, и по зенитному углу – секторное сканирование (рис. 3.5 б), покрывая, в этом случае, область атмосферы в форме полукруга, где наблюдается максимальная скорость ветра.

Когда идёт подготовка к проведению сканирования, оператор подбирает оптимальный угол, так как чем он меньше, тем больше будет слой, в котором данные осреднятся. Также подбирается и время. Зависит оно от постоянства или изменчивости характеристик ветра, по причине того, что в процессе измерения идёт их осреднение внутри конуса или полукруга сканирования. Чем более нестабилен ветер, тем меньшее время сканирования стоит выбрать. Поскольку резкие изменения в скорости (порывы) или направлении (сдвиги) окажутся потерянными в результате осреднения за большой промежуток времени.

После проведения сканирования прибор выдаёт информацию, которую можно представить в виде цветной карты с градациями цвета, которую можно наложить на карту просканированного района для наглядности (рис. 3.6).

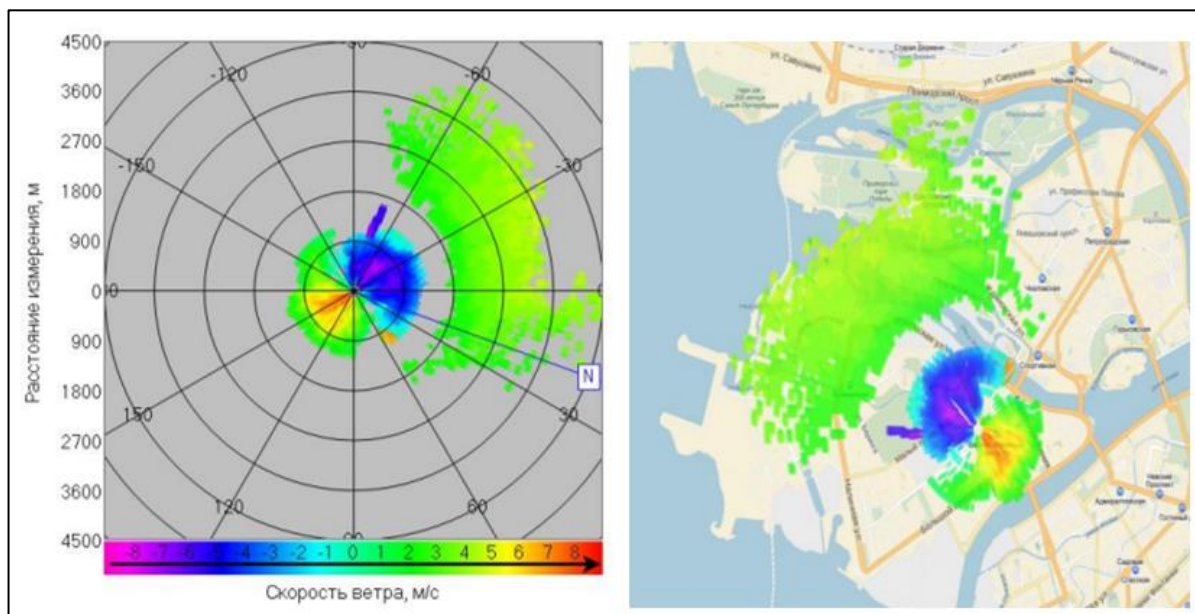


Рисунок 3.6 – Цветная карта с градациями цвета конусного режима сканирования (22 июня 2015 15:07)

На рисунке 3.6 приведен пример результата работы лидара в конусном режиме сканирования от 22 июня 2015 года. По цветной карте видно, что вблизи университета в северо-западной стороне наблюдается скорость ветра 2 – 7 м/с в слое атмосферы высотой до 1000 метров, а в слое от 1800 до 3600 метров около 2–4 м/с. На цветной карте имеются области с отрицательными значениями скорости, конечно, такого быть не может. Стоит учесть помеху в виде крыш зданий, которая и вызывает такой результат на малой высоте. Выбирая данный способ представления информации легко оценить как распределена скорость ветра на отсканированной территории, зоны турбулентности, нижняя граница облаков.

Также, полученные данные можно изобразить на графиках вертикальных профилей параметров ветра (рис. 3.7).

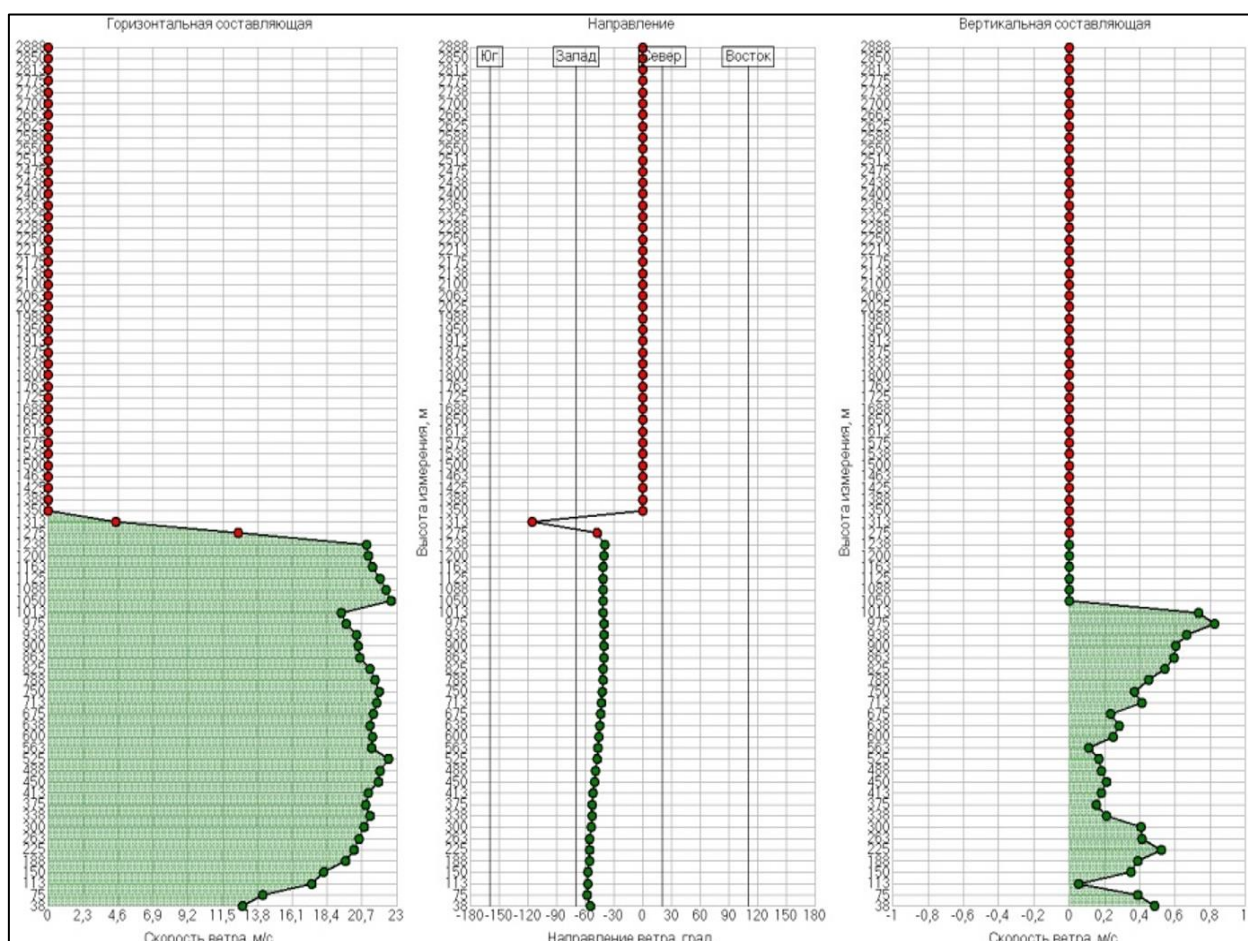


Рисунок 3.7 – Графики вертикальных профилей параметров ветра

Графики позволяют провести оценку скорости и направления ветра на разных высотах наиболее точно, что, несомненно, улучшает анализ не только поведения воздушных масс в конкретном районе, но и явлений погоды в целом.

По графикам видно, что сканирование атмосферы проводилось до высоты 1300 метров. Вначале, на высоте 38 метров скорость ветра составляла около 12,5 м/с, далее она возросла до 21 м/с на высоте 340 метров и не подвергалась сильным изменениям до граничной высоты сканирования. Северо-западное направление ветра во всем слое оставалось практически

неизменным. А вертикальная составляющая скорости была подвержена изменениям, так на высоте 38 метров она была 0,5 м/с, на 113 метрах почти 0 м/с, а на 225 метрах снова возросла до 0,5 м/с. Далее понизилась и достигла своего пика в 0,8 м/с на высоте 975 метров.

3.2 Сравнение данных

Для того, чтобы провести сравнительный анализ использовались данные аэрологического зондирования со станции в поселке Воейково, часть которых приведена на рисунке 3.8.

26063 ULLI St.Petersburg(Voejkovo)							
Observations at 00Z 26 Sep 2014							
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot
1003.0	78	7.2	3.5	77	4.93	180	6
1000.0	104	7.2	3.9	80	5.09	180	8
986.0	220	7.2	3.7	79	5.08	190	19
940.0	612	7.0	2.9	75	5.04	227	13
930.0	700	6.1	1.6	73	4.65	235	12
925.0	744	5.6	1.0	72	4.47	230	14
902.0	950	4.8	0.6	74	4.45	195	16
881.0	1143	6.8	0.8	66	4.62	245	17
876.0	1190	5.8	-0.2	65	4.32	238	17
860.0	1340	5.1	0.2	71	4.54	215	17
850.0	1436	4.6	0.5	75	4.69	215	17
793.0	1997	-0.3	-2.2	87	4.12	217	18
758.0	2356	-3.3	-5.2	87	3.44	218	19
744.0	2504	-3.1	-4.8	88	3.61	219	19
717.0	2795	-5.0	-6.7	88	3.25	220	19
700.0	2984	-6.3	-7.9	88	3.03	215	17
627.0	3817	-12.2	-13.8	88	2.12	200	14
557.0	4712	-18.6	-20.0	88	1.41	215	14
516.0	5290	-22.7	-24.1	88	1.06	208	20
500.0	5520	-24.1	-25.2	91	0.99	205	23
494.0	5608	-24.5	-25.6	90	0.97	200	25

Рисунок 3.8 – Данные аэрологического зондирования со станции в Воейково

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.

Расстояние между пунктами – 25 км. На фрагменте карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области (рис. 3.9) указаны их местоположения: 1 – лидарный комплекс, 2 – аэрологическая станция. Данные аэрологического и лидарного зондирования были синхронизированы по времени, а также проверены на выбросы и разрывы, что чрезвычайно важно при обработке и дальнейшем анализе.

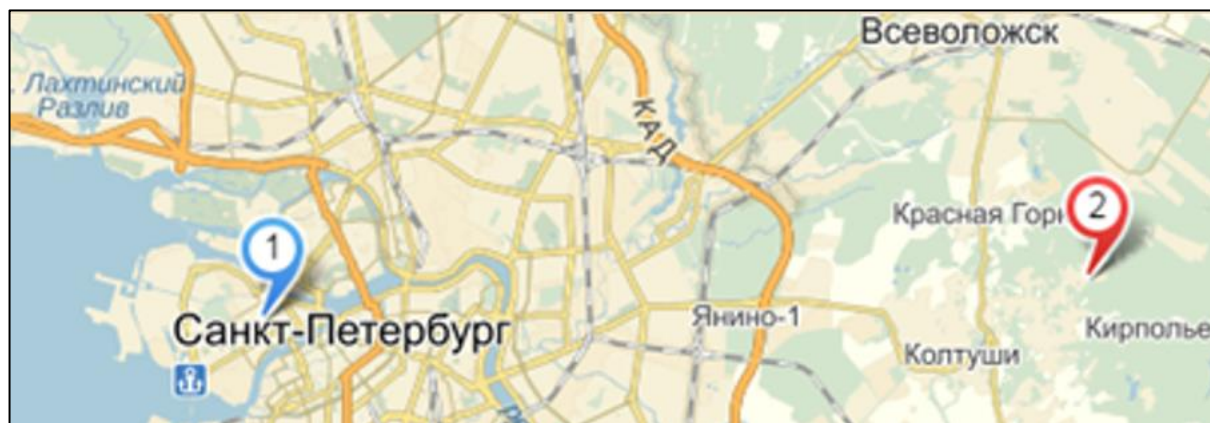


Рисунок 3.9 – Фрагмент карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области

На рисунке 3.10 представлены графики совпадения данных изменения скорости ветра с высотой с двух этих пунктов за 2014 год.

По графикам видно, что кривая лидарного зондирования весьма точно повторяет кривую аэрологического.

Расчитанный по полученным данным коэффициент корреляции оказался больше 0,6, что говорит высокой степени связи между данными лидарного и аэрологического зондирования. В 52 случаях из 96 измерений кривые почти полностью совпадают.

Но, в оставшихся 44 случаях кривые не совпали (рис. 3.11). В данном случае коэффициент корреляции меньше 0,6.

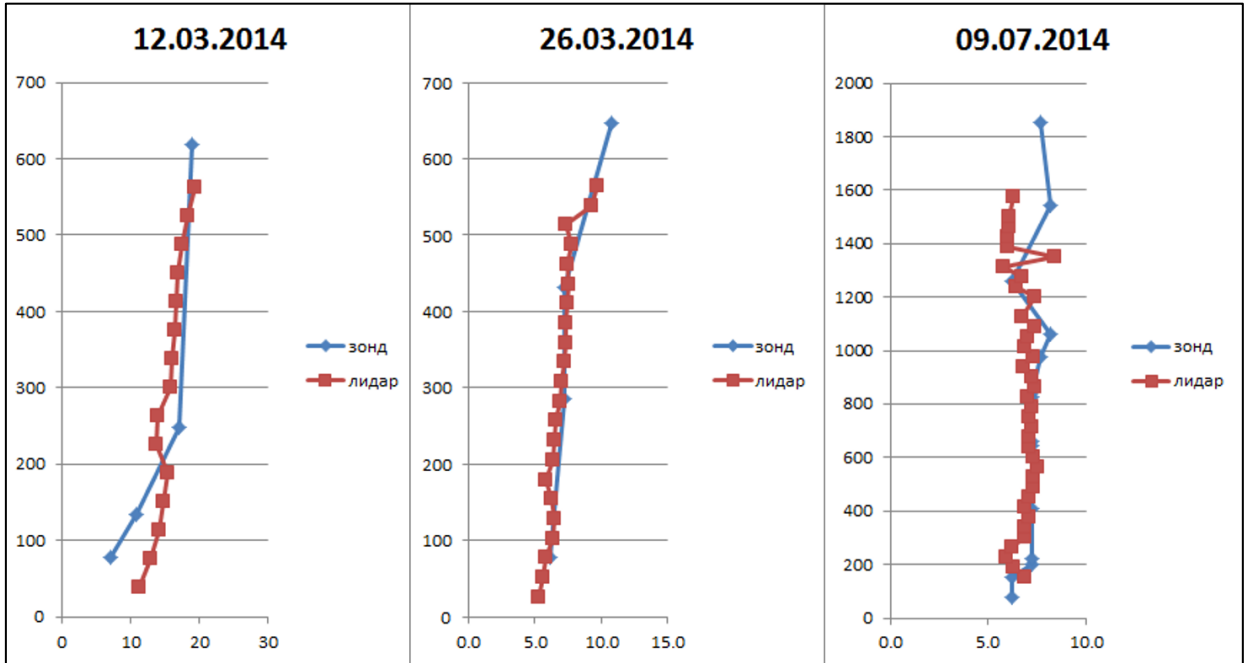


Рисунок 3.10 – Изменение скорости ветра по данным лидара и зонда за 2014 год

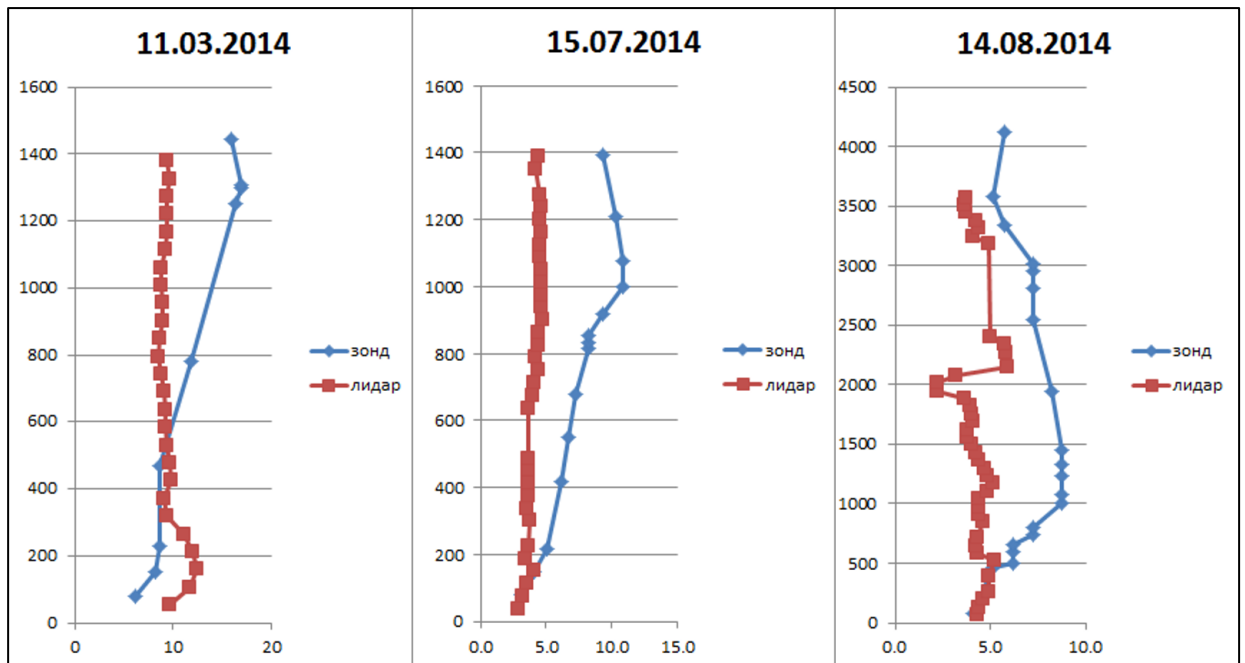


Рисунок 3.11 – Изменение скорости ветра по данным лидара и зонда за 2014 год

Дело в том, что пункты находятся на большом расстоянии друг от друга, и погодные условия могут немного различаться. Также, стоит учесть характеристики подстилающих поверхностей. Это лесная местность в поселке Воейково, которая увеличивает шероховатость подстилающей поверхности (тормозит движения), и город, где нагретый асфальт усиливает восходящие потоки воздуха. Кроме того, лидар находится недалеко от залива, т.е. на стыке различных типов поверхностей, таких как суша и залив, что способствует развитию турбулентности и, в свою очередь, воздействует на характеристики ветра. Так в Санкт-Петербурге:

- 11.03 был северо-западный ветер скоростью 5 м/с, а в Воейково западный ветер 3 м/с.
- 15.07 в Санкт-Петербурге был западный ветер 2 м/с, а в Воейково южный 2м/с.
- 14.08 в Санкт-Петербурге был южный ветер 2 м/с, а в Воейково юго-восточный 1м/с.

Проведя анализ данных двух методов мониторинга параметров ветра, можно сделать вывод, что лидарное зондирование не уступает сертифицированной методике – аэрологическому зондированию.

Ветровой лидар предоставляет более точную информацию о характеристиках ветра. Он значительно упрощает сбор данных и позволяет проводить мониторинг чаще и в тех местах, где запустить зонд является затруднительной или невозможной для выполнения задачей. Но есть и недостаток, заключающийся в состоянии атмосферы. Если в ней недостаточная концентрация необходимого для лидара аэрозоля, то сканирование не даст ожидаемого результата.

4. Анализ данных аэрозольного лидара

Также были рассмотрены данные, полученные аэрозольным лидаром, по трём посёлкам в пределах Ленинградской области: Кондратьево, Гаврилово и Победа. Данные находятся в свободном доступе [18]. Мобильный лидарный комплекс производил сбор данных 23 апреля и 15 октября 2019 года по трассе E18, проезжая указанные ранее пункты. Путь следования мобильного комплекса представлен на фрагменте карты Ленинградской области на рисунке 3.12.

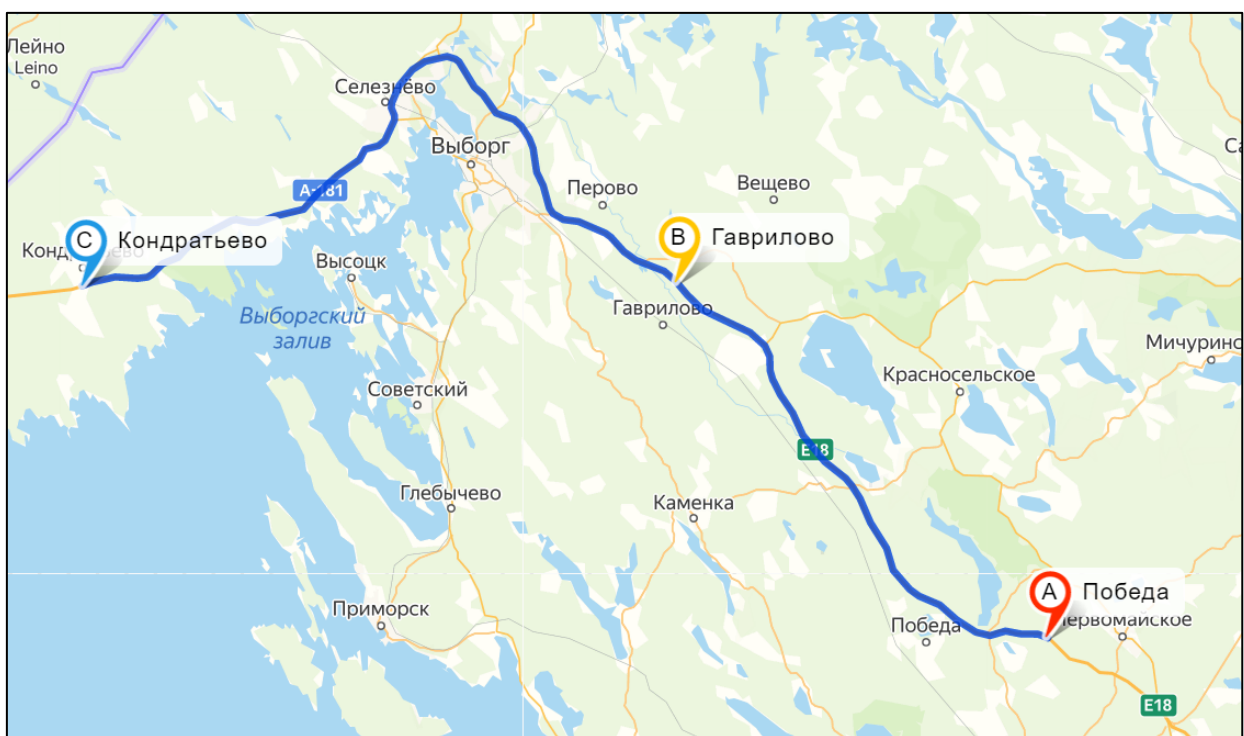
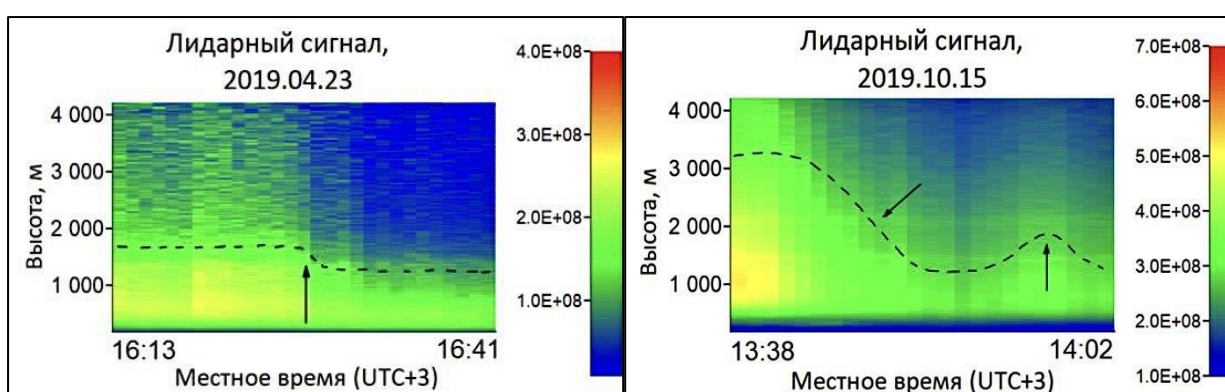


Рисунок 3.12 – Фрагмент карты Ленинградской области

Измерения проводились в приземном слое атмосферы высотой до 4 км. Вертикальная цветная шкала характеризует относительную величину рассеянного сигнала лазера. Чем больше значение, тем больше рассеяние, а

значит больше концентрация аэрозоля. Результаты лидарного зондирования показаны на рисунках 3.13 – 3.18.

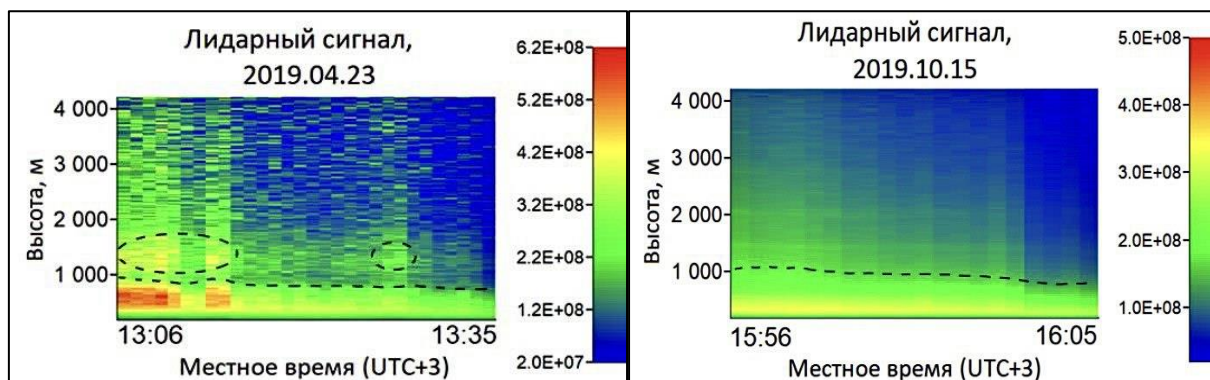
На графиках распределения атмосферного аэрозоля (рис. 3.13, 3.14) показаны данные, полученные в посёлке Кондратьево 23 апреля и 15 октября 2019 года. 23 апреля сначала верхняя граница слоя аэрозоля достигала 2000 метров, затем немного снизилась. А 15 октября наблюдалась неустойчивость, в виде заметного уменьшения высоты слоя аэрозоля и кратковременного увеличения.



Рисунки 3.13, 3.14 – Лидарный сигнал, посёлок Кондратьево

Такие различия в данных за разные дни могли возникнуть из-за скорости ветра. 23 апреля скорость составляла около 5 м/с, а 15 октября – 1,5 м/с. Более высокая скорость ветра не позволяла слою аэрозоля подняться.

Графики по данным с посёлка Гаврилово (рис. 3.15, 3.16) имеют более значительные различия.



Рисунки 3.15, 3.16 – Лидарный сигнал, посёлок Гаврилово

Так 23 апреля лидарный сигнал показал два участка с резко повышенной концентрацией аэрозоля и аэрозольные облака. Их образованию поспособствовала антициклоническая погода и долгое отсутствие осадков на момент измерений. А 15 октября слой аэрозоля был сравнительно небольшим и меньшим по концентрации, так как погода была преимущественно циклонической и с осадками.

В посёлке Победа (рис. 3.17, 3.18) в апреле 2019 была антициклоническая солнечная погода без осадков, что поспособствовало кратковременным увеличениям аэрозольного слоя, вероятно, из-за порывов ветра скоростью около 7-8 м/с. 15 октября был слабый ветер до 2 м/с, что могло привести к образованию такого высокого и более стабильного слоя аэрозоля.

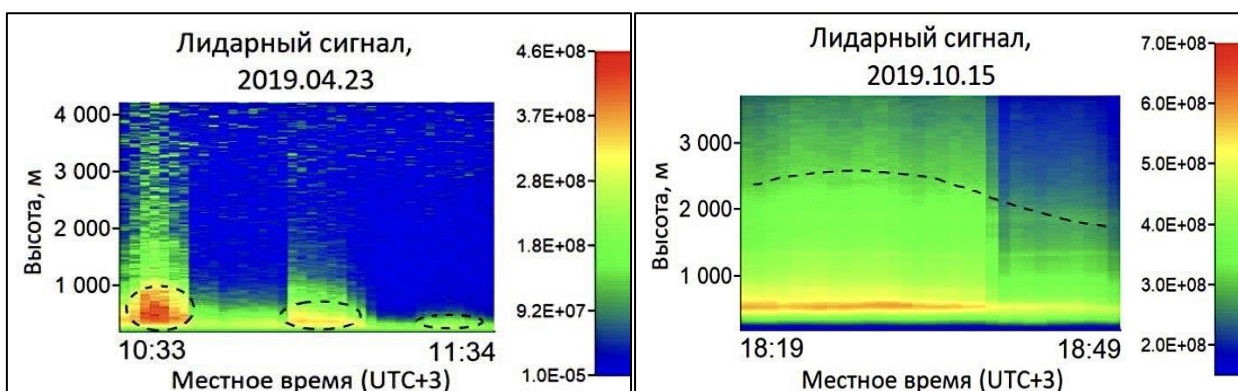


Рисунок 3.17, 3.18 – Лидарный сигнал, посёлок Победа

Конечно, помимо вышеуказанных причин, на образование и концентрацию аэрозоля влияют достаточно много факторов, один из которых – автомобильное движение. Трасса, по которой снимались измерения, достаточно загружена и в течение дня по ней может проходить довольно большой поток транспорта. Нельзя исключать и сезонную составляющую.

Но для проведения такого анализа пока слишком мало данных.

Заключение

Рассмотрев возможности использования технологии LiDAR в метеорологии, а именно:

- разобрав принцип действия прибора,
- разновидности лидаров в метеорологии,
- проведя сравнительный анализ с сертифицированным методом зондирования,
- проанализировав данные аэрозольного лидара

я могу сделать вывод, что лидарный метод мониторинга атмосферных процессов имеет большие перспективы его дальнейшего применения. Лазерная технология даёт возможность значительно упростить сбор данных и позволяет проводить мониторинг более часто, притом в тех местах, где запустить зонд не является возможным или вызывает множество трудностей.

Узнав больше информации о технологии LiDAR и ее влиянии на метеорологию и науку в целом, я могу сказать, что LiDAR – это не просто обычная технология, а сочетание фундаментальных качеств действительно эффективного метода поиска, зондирования, сбора информации; он полезный, в основном универсальный, удобный, точный.

Однако, имеются и несколько важных недостатков – это высокая цена и плохая работа в условиях нехватки атмосферного аэрозоля, дождя, тумана или снега. В любом случае, чтобы дополнить возможности системы, конструкторы и ученые проделали невероятно тяжелую работу. К настоящему моменту мы получили действительно замечательные приборы для совершения новых революционных скачков в научной деятельности, в частности в метеорологии.

Современный LiDAR – это уникальная система, определяемая полезностью и гибкостью в атмосферном поиске, и эта система представляет собой очень мощный, высокотехнологичный профессиональный инструмент для исследований.

Список использованных источников

1. Н.О. Григоров, А.Г. Саенко, К.Л. Восканян. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012 – 306 с. (Электронный ресурс). Режим доступа:
http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_f316451e6f934330ba4e95541bc9ce15.pdf
2. Википедия: Лидар. (Электронный ресурс). Режим доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Лидар>
3. Публикация: как десяток ведущих компаний пытаются создать мощный и недорогой лидар. (Электронный ресурс). Режим доступа:
<https://habr.com/ru/post/441706/>
4. Бесплатная энциклопедия: Лидар. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://www.hmong.press/wiki/Lidar>
5. Лидар. Применение технологии LiDAR. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://gistroy.ru/article/lidar/>
6. Обзор миссии – GEDI. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview/>
7. Лидары: принцип действия. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://learnc.info/blog/lidars.html>
8. Лидар в iPhone 12 Pro. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://root-nation.com/ru/posts/tech/ru-lidar-iphone-12-pro-what-is-it/>
9. Межотраслевой журнал навигационных технологий. (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/news/avtonet/что-такое-лидар-и-как-он-используется-в-автомобильях/>
10. Суть эффекта Доплера. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://nauka.club/fizika/effekt-doplera.html>

- 11.РЦ «Обсерватория экологической безопасности». Оборудование лидарного комплекса. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://emc.spbu.ru/ru/nauchnoe-oborudovanie/lidars/51-wind-lidar.html>
- 12.Проект GreenInterTraffic. (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://greenintertraffic.ru/meteo/lidar-measurements/spring>