

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук»



На правах рукописи

ЗАВОЗИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МИКРОДЖОУЛЬНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ  
ЗОНДИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД**

Специальность 1.3.19.

Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2024



Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

**Научный руководитель:**

Першин Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Научный центр волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (филиал)

**Официальные оппоненты:**

Александр Вячеславович Родин, доктор физико-математических наук, исполнительный директор научно-технического центра мониторинга окружающей среды и экологии, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Вячеслав Усеинович Хаттатов, кандидат физико-математических наук, заведующий отделом исследования состава атмосферы, Федеральное государственное бюджетное учреждение Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится 9 декабря 2024 г. в 16:00 по московскому времени на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук и на сайте <https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Учёный секретарь  
Диссертационного совета  
24.1.223.03  
канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7(499)503-87-80

Осадчий Александр Валентинович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Лазерное дистанционное зондирование широко применяется для исследования атмосферы и гидросферы с помощью лидаров (транслитерация от англ. LiDAR, Light Detection And Ranging — обнаружение и определение дальности с помощью света)[1]. Лидары регистрируют упруго и не упруго рассеянные фотоны, по которым определяют физико-химические свойства удаленного объекта. Несмотря на интенсивное развитие лидарных технологий после изобретения лазера, все лидары с первого зондирования облаков джоульными импульсами рубинового лазера в 1963 г.[2] превышали на несколько порядков безопасный для глаз уровень плотности энергии ( $\sim 1$  мкДж/см<sup>2</sup>). Именно поэтому фактору широкое применение лидаров было ограничено, а в случае зондирования среды обитания вводился строгий запрет. Большая энергия импульсов требовала, также, защиты приёмника от рассеянного излучения и введения паузы включения приёмника («мёртвой зоны»). Кроме того, лидары измеряли расстояние до первого рассеивающего объекта, что исключало обнаружение препятствий за многослойными рассеивающими средами (многоярусными облаками, дымовыми завесами и туманами, или под водой за рассеивающими сетками).

Следовательно, становится актуальной задача разработки безопасных для глаз принципиально новых методов лазерного дистанционного зондирования окружающей среды с плотностью энергии на объекте облучения не больше микроджоулей, что сравнимо или меньше солнечной. В 1991 году учеными РАН был предложен новый статистический принцип зондирования, когда вероятность регистрации сигнала рассеяния от лазерного импульса много меньше единицы [3]. Был экспериментально обоснован способ зондирования с использованием безопасных для глаз микроджоульных импульсов диодных лазеров и стробируемых квантовых счётчиков на основе однофотонных лавинных фотодиодов с усилением сигнала до  $10^6$ . Именно эти преимущества микроджоульного лидара, разработанного учеными РАН обеспечили его включение в состав международной миссии “Mars Polar Lander” НАСА (США) [4] в ходе конкурсного отбора.

Предложенный подход в современном мире используется для коммерческих систем навигации беспилотных автомобилей, других подвижных платформ и роботов. Другим недостатком коммерческих приборов является наличие «мертвой зоны», то есть невозможность проводить дальнометрию на малых расстояниях от лидара (единицы и десятки метров). Поэтому актуальной задачей является разработка статистических лидаров для навигации в

сложных погодных условиях и стыковки вплоть до касания (без мертвой зоны измерения) с повышением точности определения расстояния до сантиметров.

Другой сферой использования лидаров является исследование климата, атмосферы и океана [5, 6, 7, 8]. Здесь актуальной задачей является создание прибора с безопасным для глаз уровнем излучения. Такой лидар обеспечивает построение трехмерной карты распределения многослойных сред таких как облака, туманы, шлейфы, информация о которых необходима для моделирования процессов изменения глобального климата, измерения массы загрязняющих веществ и экологических рисков от пожаров лесов, извержения вулканов и др.

### **Цель и задачи работы**

Разработка новых подходов лазерного дистанционного зондирования микроджоульными импульсами со стробируемыми детекторами в режиме счета фотонов с целью повышения разрешающей способности дальнометрии и повышения чувствительности измерения вариации концентрации аэрозолей при прогнозировании тектонических событий.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать способ генерации лазерного наносекундного импульса с пикосекундной длительностью фронта на диодном лазере для повышения разрешающей способности безопасной для глаз лазерной дальнометрии;
2. Исследовать влияние параметров многослойных оптически плотных сред на формирование эхо-сигнала лидара в режиме счета фотонов;
3. Исследовать лидаром динамику аэрозолей в районах с высокой тектонической активностью.

### **Научная новизна**

1. Предложена и реализована генерация пикосекундной ступеньки на переднем фронте наносекундного импульса инжекционного диодного лазера при накачке током разряда ёмкости, коммутируемого биполярным транзистором в лавинном режиме.

2. Предложен и экспериментально обоснован новый подход лазерной дальнометрии, кратно, до сантиметров, повышающий точность измерений расстояний при использовании наносекундного диодного лазера с пикосекундной ступенькой на переднем фронте оптического импульса и лавинного фотодиода.

3. Впервые была исследована многослойная структура тумана прямой регистрацией баллистических фотонов микроджоульным лидаром. Это преимущество позволяет обнаруживать объекты сквозь оптические плотные среды



(рассеивающие и неоднородные среды, зеркальные поверхности и шлейфы дымовой завесы, и др.).

4. Впервые в ходе лазерного мониторинга динамики аэрозолей в закрытом тоннеле Баксанской Нейтринной Обсерватории (БНО) обнаружена модуляция лидарного эхо-сигнала тектоническими газами, эмиссия которых вызвана деформацией коры Земли приливными волнами.

5. Впервые обнаружена генерация аэрозолей, индуцированная ионами при измерении оптической прозрачности атмосферы в закрытом объёме подземной лаборатории.

### **Практическая значимость**

Генерация пикосекундной ступеньки на фронте наносекундного оптического импульса на диодном лазере открывает перспективы разработки новых цифровых лидаров с повышенной точностью дальнометрии и возможностью измерения скорости в том числе и на коротких расстояниях. Этот факт имеет ключевое значение при автономном маневрировании и стыковке беспилотных платформ. Отметим, что точность дальнометрии в лидаре в статистическом режиме работы определяется длительностью ступеньки на фронте лазерного импульса, временем развития лавины в приёмном фотодиоде и разрешающей способностью временно-цифрового преобразователя (англ. Time to Digital Converter, TDC). Предложенный подход, учитывающий особенность генерации пикосекундной ступеньки в диодном лазере, позволяет управлять точностью измерения расстояния и минимальным периодом зондирования в зависимости от количества срабатываний стробируемого лавинного фотодиода. Адаптационное управление работой лидара являются критическими важным при стыковке платформ в космическом пространстве. Здесь поиск причала на большом удалении проводят в режиме «слабого сигнала» с длинным (100-500 м) стробом и, напротив, сближение и стыковку проводят в режиме «сильного сигнала» с сантиметровым разрешением расстояния и скорости сближения около 1 см/с. Особым преимуществом здесь является цифровой способ обработки сигнала рассеянных фотонов, который позволяет вести зондирование без «мёртвой зоны» вплоть до касания. Отметим, что однофотонный лавинный фотодиод в стробируемом режиме устойчив к повреждению приёмной аппаратуры мощным обратным сигналом или бликом от поверхности объекта зондирования. Последний фактор допускает использование светоотражающих покрытий поверхности причала, которые кратно повышают значение отношения сигнал/шум и, соответственно, дальность обнаружения и зондирования. Несомненно, что предложенный адаптационный подход работы лидара является важной альтернативой использования дорогостоящих пикосекундных лазеров в лидарах, а, значит, делает диодные лидары более доступными для

различных научных и технических приложений.

Продемонстрированный подход лазерного зондирования многослойных рассеивающих сред (туманы, дымовые завесы, кроны деревьев, маскирующие сетки, зеркальные поверхности) позволяет беспилотникам маневрировать в сложных погодных условиях. Использование лидара не ограничивается атмосферными измерениями, но также позволяет определять слои-преграды и препятствия под водой. Статистический режим работы лидара позволяет получать трёхмерные карты распределения физических параметров многослойных сред таких как облака или плотные туманы и шлейфы дыма, что имеет большое значение для построения надёжных климатических моделей и оценки степени загрязнения атмосферы продуктами горения.

В работе проведён длительный эксперимент по мониторингу динамики вариации аэрозолей в закрытых объёмах в сейсмически активных регионах с целью поисков новых индикаторов тектонической активности. Обнаруженная модуляция лидарного эхо-сигнала тектоническими газами, эмиссия которых вызвана приливными волнами, открывает новый канал мониторинга деформации коры Земли. В частности, тектонические события сопровождаются повышенной эманацией радиоактивного газа радона [9]. Поэтому дополнительным индикатором при мониторинге служит факт генерации аэрозолей отрицательными ионами, индуцируемых альфа-частицами радона.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Пикосекундная ступенька на фронте оптического импульса в инжекционном диодном лазере повторяет лавину тока, которую обеспечивает биполярный транзистор в цепи разряда емкости.
2. Диодный лазер с пикосекундной ступенькой на фронте наносекундного оптического импульса в лидаре на стробируемом лавинном фотодиоде в режиме счета фотонов обеспечивает сантиметровую точность дальнометрии.
3. Лидар на однофотонном приёмнике обеспечивает зондирование многослойных рассеивающих сред, несмотря на потери в каждом слое-преграде с высокой оптической плотностью, с вероятностью обратного рассеяния близкой к единице.
4. Тектонические процессы, во время которых повышается концентрация аэроионов, индуцируемых альфа-частицами радона, приводит к образованию аэрозолей и понижению коэффициента оптического пропускания трассы с коэффициентом корреляции  $\rho=0.89$ .

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием для исследований современного высокоточного

оборудования, их воспроизводимостью, а также докладами на международных и национальных конференциях и публикациями в ведущих отечественных и мировых научных журналах.

### **Личный вклад диссертанта**

Планирование и проведение измерений, обработка экспериментальных данных и интерпретация полученных результатов выполнены автором лично либо при его непосредственном участии. Написание и обсуждение текстов статей и тезисов конференций выполнено в соавторстве при непосредственном участии автора.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на семинарах Научного центра волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (Москва, 19 февраля 2020 г., 20 октября 2021 г., 14 сентября 2022 г., 2 марта 2023 г.), а также на национальных и международных конференциях:

- The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019;
- The International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020;
- Школа-конференция молодых учёных «ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ», ИОФ РАН 2021;
- V International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2021»;
- International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT) 2022;
- The International Conference Laser Optics 2022 (ICLO 2022).

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и в 11 тезисах конференций, список которых приведён в конце.

### **Благодарности**

Автор диссертации благодарен за активное участие в выполнении работы, консультации и обсуждения д.ф.-м.н. С.М. Першину, д.ф.-м.н. Л.Б. Безрукову, к.ф.-м.н. В.Н. Ледневу, к.ф.-м.н. М.Я. Гришину, к.ф.-м.н. А. В. Мясникову, к.ф.-м.н. Р.Р. Акбашеву, сотрудникам Баксанской Нейтринной Обсерватории ИЯИ РАН д.ф.-м.н. В.Б. Петкову, к.ф.-м.н. А.М. Гангапшеву, к.ф.-м.н. В.В. Казалову и С.П. Якименко, сотрудникам ИКИ РАН В.С. Макарову и А.В. Тюрину, сотрудникам центра биофотоники ИОФ РАН. Автор выражает

благодарность гранту на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям Научно-технологического развития: "Экология промышленных городов: создание единого комплекса нестандартных научно-технологических решений для мониторинга окружающей среды, нейтрализации и последующей глубокой переработки промышленных и бытовых отходов" (Соглашение от 12 июля 2024 г. № 075-15-2024-646).

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 122 страницы, включая 27 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 100 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, обозначены основные задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, указана апробация работы.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

В **параграфе 1.1** описаны принципы безопасного для глаз лазерного дистанционного зондирования. Приведены максимально допустимые значения плотности мощности лазерного излучения для разных типов лазеров. Описан принцип работы цифрового лидара (Рис. 1), рассмотрены преимущества и недостатки статистического режима работы. Стартовый импульс подаётся на лазер для запуска генерации излучения одновременно с устройством для счета времени. В современных лидарах используется временно-цифровой преобразователь (TDC). Далее лазерный импульс направляется на объект исследования. Для регистрации рассеянного излучения на лавинный однофотонный фотодиод подаётся пороговое напряжение. Когда на приёмник попадает излучение достаточной энергии для развития лавины, то фронт этого импульса является сигналом для остановки измерения времени (Рис. 1а). Многократное повторение этого процесса позволяет собрать статистику распределения времени срабатывания фотодиода по интервалам (Рис. 1б).



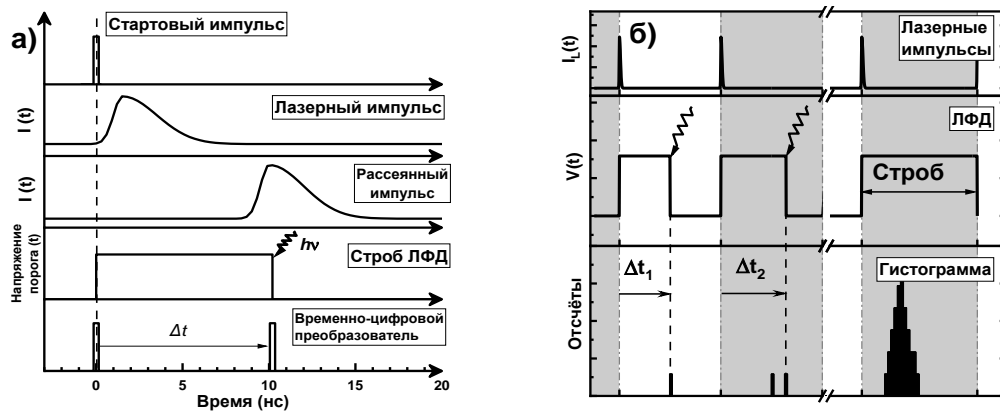


Рис. 1 Принцип работы лидара в статистическом режиме. (а) - единичный акт измерения времени пролёта фотона до препятствия и обратно. (б) – формирование гистограммы фотоотсчётов при многократном измерении времени пролёта.

Для определения энергии на приёмной площадке лавинного фотодиода воспользуемся основным лидарным уравнением [10] для рассеиваемой энергии лазера, регистрируемой за время отклика детектора  $\tau_d$ .

$$E(\lambda, R) = E_L \xi(\lambda) T(R) \xi(R) \frac{A_0}{R^2} \beta(\lambda_L, \lambda, R) \frac{c\tau_d}{2}$$

где  $E_L$  – выходная энергия лазерного импульса,  $\xi(\lambda)$  – коэффициент спектрального пропускания приемной оптической системы,  $T(R)$  – коэффициент пропускания,  $\xi(R)$  – геометрический фактор,  $\beta(\lambda_L, \lambda, R)$  – объёмный коэффициент обратного рассеяния,  $\frac{A_0}{R^2}$  – телесный угол, в котором осуществляется прием сигналов оптической системой ( $A_0$  – площадь линзы или зеркала объектива),  $\lambda_L$  – длина волны лазера,  $\lambda$  – длина волны регистрируемого излучения,  $R$  – расстояние от лидара. В случае регистрации упругого обратного рассеяния длина волны регистрируемого излучения будет совпадать с лазерным. В статистическом лидаре для регистрации обратно рассеянного излучения используется однофотонный лавинный фотодиод, для возбуждения которого достаточно энергии сопоставимой с единичным фотоном.

В параграфе 1.2 представлен обзор современного состояния импульсных полупроводниковых лазеров наносекундной и пикосекундной длительности. Отметим, что малая энергия, низкая воспроизводимость и высокая стоимость оборудования не позволяет применять пикосекундные лазеры для разработки лидаров, что ставит вопрос о разработке более простых и эффективных лазеров с коротким фронтом импульса.

В параграфе 1.3 рассмотрены применяемые в лидарах детекторы. Подробно рассмотрены детекторы, работающие в режиме счета фотонов и определены наиболее перспективные модели для применения в безопасных для

глаз лидерах.

В параграфе 1.4 приведён обзор современного состояния мониторинга газов и аэрозолей до и во время тектонических событий в сейсмически активных областях. Представлены перспективы лазерного дистанционного зондирования для мониторинга вариации газов и аэрозолей, как нового канала информации о сейсмических процессах.

Во второй главе представлено описание адаптационного принципа зондирования диодным лазером с пикосекундной ступенькой на фронте импульса в статистическом режиме с повышением точности дальнометрии до сантиметровых значений. Отметим, что кратное повышение точности достигается при пространственных размерах импульса метр и более.

В параграфе 2.1 приведено описание работы инжекционного диодного лазера с пикосекундной ступенькой на фронте. Для управления формой питания лазерного диода был разработан генератор на базе биполярного транзистора FMMT417 с рабочим напряжением до 300 В. Для сокращения длительности импульса тока, коммутирующий транзистор работает в лавинном режиме. На базу транзистора подаются стартовые импульсы от генератора тока с заданной частотой повторения. Высоковольтное напряжение и величину ёмкости конденсатора выбирают в процессе настройки генератора тока таким образом, чтобы уменьшить длительность оптического импульса [11]. Проведены измерения параметров лазерного импульса на цифровом осциллографе (7704B, Sony Tektronix, США) с полосой пропускания 7 ГГц. При этом фотодиод для измерения формы лазерного импульса имел ширину полосы 5 ГГц (Thorlabs DET08C(/M)). На Рис. 2 показана зависимость сокращения длительности наносекундного лазерного импульса при уменьшении ёмкости. При этом для ёмкости 82 пФ удалось добиться устойчивой генерации импульсов длительностью 2.7 нс.

Отметим, что в начале фронта лазерного импульса можно наблюдать пикосекундную ступеньку со временем нарастания амплитуды  $\sim 200$  пс. При этом длительность фронта ступеньки (Рис. 2б, вставка) и не зависела от запасённой энергии в конденсаторе и, возможно, была ограничена быстродействием приёмника Thorlabs DET08C(/M). Отметим, что для инжекционного лазера оптический импульс отражает форму тока разряда с быстрыми ключами на биполярных лавинных транзисторах [12]. Генерация пикосекундной ступеньки на фронте лазерного импульса отражает лавину тока в биполярном транзисторе на начальном участке импульса разряда ёмкости.

В параграфе 2.2 представлен адаптационный режим лазерного зондирования, кратно повышающий точность лазерной дальнометрии при использовании диодного лазера с пикосекундной ступенькой на фронте наносекундного

импульса и лавинного фотодиода в приближении «слабого» и «сильного» сигнала. Если количество зарегистрированных фотонов будет приближаться к количеству лазерных импульсов (вероятность регистрации импульса близка к единице – приближение «сильного» сигнала), то их распределение на гистограмме перестанет отражать форму зондирующего импульса [13]. Вероятность регистрации фотонов от фронта лазерного импульса будет выше, чем от спада. Если для однофотонного лавинного фотодиода время развития лавины составляет сотни пикосекунд, то при увеличении вероятности регистрации обратно рассеянных фотонов (увеличение площади приемной антенны, увеличение альбедо удаленного объекта и т.д.) точность работы лидара в режиме «сильного» сигнала будет возрастать вплоть до разрешающей способности временно-цифрового преобразователя, что пропорционально размеру ячейки на гистограмме. На Рис. 3 представлены результаты эксперимента по зондированию плоской мишени на расстоянии 35 метров от лидара с регулировкой вероятности регистрации обратно рассеянных фотонов с помощью диафрагмы на приёмной апертуре [11]. Из рисунка видно, что увеличение количества зарегистрированных обратно рассеянных фотонов сопровождается изменением их распределения по интервалам времени (расстояния). Количество зарегистрированных фотонов от передней границы лазерного импульса возрастает вплоть до 20-кратного увеличения, лидар переходит в режим работы «сильного» сигнала. В тоже время распределение зарегистрированных фотонов сужается до нескольких ячеек на гистограмме, а также смещается более чем на 1 м к фронту ступеньки вначале импульса (см. Рис. 3б). Размер (120 см) между двумя вертикальными пунктирными линиями показывает расстояние между максимумом 4 нс импульса (осциллограммы) и началом 200 пс фронта импульса лазера.

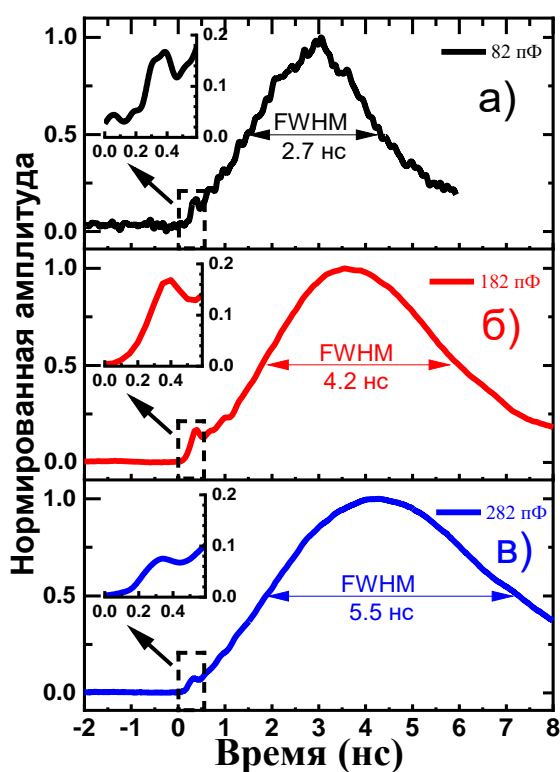


Рис. 2 Осциллограммы оптических импульсов диодного лазера при увеличении значения разрядной ёмкости: (а)- 82, (б) - 182 и (в) - 282 пФ при напряжении заряда 275 В. FWHM (англ. full width at half maximum) - полная ширина на уровне половины высоты

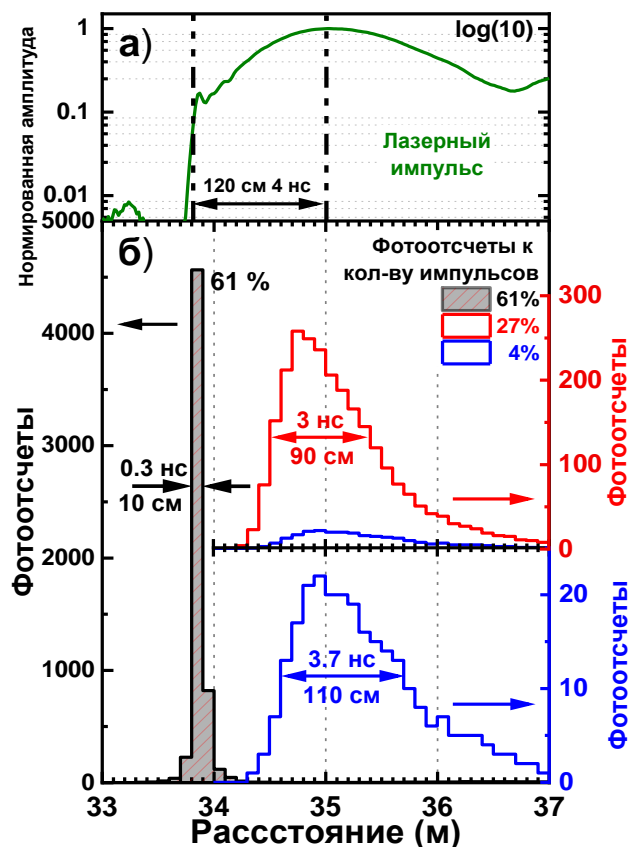


Рис. 3 Принцип адапционного режима работы лидара в приближении «слабого» и «сильного» сигналов. (а) - осциллограмма импульса лазера в логарифмическом масштабе с пунктирными линиями на расстоянии от фронта-ступеньки до максимума импульса. (б) – изменение гистограммы распределения фотоотсчётов по интервалам времени (расстояния) в зависимости от вероятности регистрации фотонов

Отсюда следует, что на коротких расстояниях (метры), когда вероятность регистрации обратных рассеянных фотонов значительно возрастёт, лидар переходит в режим работы «сильного» сигнала, что приведёт к уменьшению распределения интервалов времени задержки между стартом генерации лазерного импульса и моментом срабатыванием фотодиода, вплоть до одной ячейки на гистограмме. Фактически, в таком режиме работы лидар переходит в режим работы дальномера с повышением точности определения расстояния равной разрешению временно-цифрового преобразователя. В этом случае наличие ступеньки на фронте лазерного импульса позволяет повысить разрешающую способность по дальности измерения, поскольку более резкая граница



увеличивает вероятность регистрации обратно рассеянных фотонов именно от неё. Например, в текущей работе показано, что для 3 нс лазерного импульса, наличие ступеньки в 200 пс позволяет в 10 раз увеличить точность определения расстояния лидаром.

Во **третьей главе** представлены схемы и описания экспериментальных установок для проведения зондирования в многослойных рассеивающих средах.

В параграфе 3.1 представлено подробное описание работы созданного в ИОФ РАН лидара для подводного зондирования. В качестве передатчика выбрали Nd:АИГ лазер со второй гармоникой лазера и с пассивной модуляцией добротности (532 нм, импульс 1 нс с частотой повторения 4 кГц, энергией в импульсе 1.75 мкДж). Приёмником сигнала в этом лидаре выступает стробируемый лавинный однофотонный фотодиод (англ. single photon avalanche photodiode, SPAD). На примере разработанного лидара продемонстрированы преимущества и недостатки применения лазера с большим джиттером генерации импульса для задач лазерной дальнометрии.

В параграфе 3.2 описывается разработанный автором аэрозольный лидар и суммированы технические возможности созданного прибора (Рис. 4). В лидаре использовали лазерный диод SPL PL90\_3 (OSRAM), который генерировал оптические импульсы длительностью 2.7 нс с пикосекундной ступенькой на фронте согласно предложенному выше подходу (см. параграф 2.1). Накачка лазерного диода позволяет генерировать импульсы с частотой повторения около 4 кГц. В качестве приёмника был выбран лавинный однофотонный фотодиод SAP-500-T6 (Laser Components), с пикосекундным временем развития лавины и высокой квантовой эффективностью.



Рис. 4 Разработанный в ИОФ РАН аэрозольный лидар в статистическом режиме работы. (а) трёхмерная модель оптического блока лидара; (б) фотография лидара в сборе без корпуса

В **главе 4** представлены результаты зондирования многослойных сред лидаром в статистическом режиме работы.

В параграфе 4.1 приводится описание и результаты лазерного

зондирования через водную среду. Представлена схема эксперимента по моделированию условий подводной навигации. Лидар в статистическом режиме работы надёжно регистрировал эхо-сигнал от непрозрачной мишени через несколько рассеивающих препятствий (через несколько 1/2/3-слойных пластиковых сеток) на расстоянии до 9 м. Обсуждаются перспективы навигации и стыковки подводных аппаратов с использованием лидаров, которые обеспечивают более высокую точность дальнометрии в том числе и в сложных условиях (высокая мутность воды, пузырьковые следы и т.д.).

В параграфе 4.2 представлены результаты зондирования плотных многослойных туманов (Рис. 5). На примере измерений в наклонном тоннеле сцинтилляционного телескопа Баксанской Нейтринной Обсерватории (пос. Нейтрино вблизи вулкана Эльбрус) формируются многослойные туманы вследствие взаимодействия воздушных масс различной влажности и температуры.

Впервые прямым измерением микрожюльным лидаром получены эхо-сигналы от различных слоев плотного тумана (Рис. 5б), для которых вероятность зарегистрировать обратно рассеянный фотон составляет более 20 %. Длительные лидарные измерения на протяжении трех дней позволили провести оценку динамики формирования и рассеяния плотных туманов в тоннеле (Рис. 5в). Показано, что при контакте с внешней атмосферой в течение двух часов сформировался плотный туман, для которого вероятность зарегистрировать фотон, прошедший через него до мишени и обратно, составляет менее 20 %. Плавное заполнение объёма тоннеля туманом наблюдалось в течение следующих двух дней.

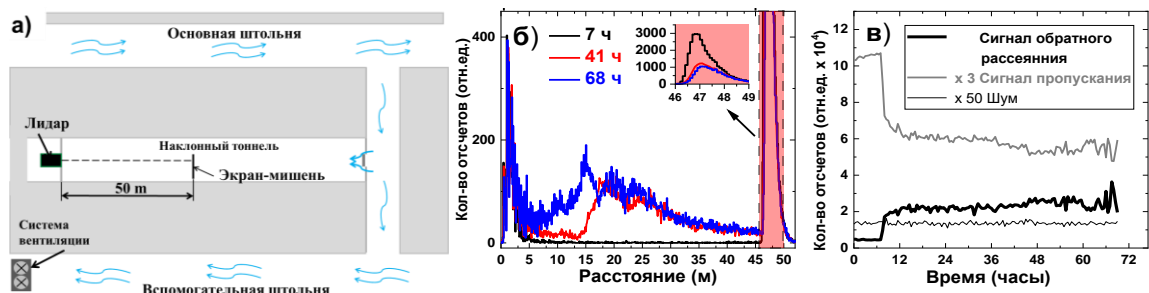


Рис. 5 Лазерное зондирование многослойных туманов. (а)- схема эксперимента с расположением тоннелей и лидара; (б) – три гистограммы обратно рассеянных фотонов для различных профилей плотности многослойных туманов; (в) – вариации сигнала обратного рассеяния (толстая линия); сигнал пропускания трассы на круговом обходе (серая линия,  $\times 3$  для визуализации) и шумовые отсчёты (тонкая линия,  $\times 50$  для визуализации) при формировании многослойного тумана.

В главе 5 описываются результаты длительного мониторинга аэрозоля в закрытых тоннелях в областях с высокой сейсмической активностью, при

которой происходит эманация трудноуловимых тектонических газов.

В разделе 5.1 приводится описание и результаты эксперимента по мониторингу аэрозолей, генерируемых эманацией тектонических газов вблизи вулкана Эльбрус (Низкофононая лаборатория Баксанской Нейтринной Обсерватории). Впервые мы обнаружили деформацию земной коры по выбросам аэрозоля, выпускаемым трещинами, которые были количественно оценены с помощью аэрозольного лидара, описанного выше (см. параграф 3.2). Для измерения вариации аэрозолей лидар за один сеанс измерения регистрировал статистику распределения фотонов по времени по  $10^5$  лазерным импульсам. Лидар проводил измерения каждые 10 минут, чтобы можно было сопоставить получаемые данные с сигналом лазерного деформографа. Для определения сигналов обратного рассеяния и пропускания на гистограмме были определены зоны интегрирования фотонов, рассеянных на аэрозолях и прошедших трассу зондирования до мишени и обратно. Результаты измерений представлены на Рис. 6.

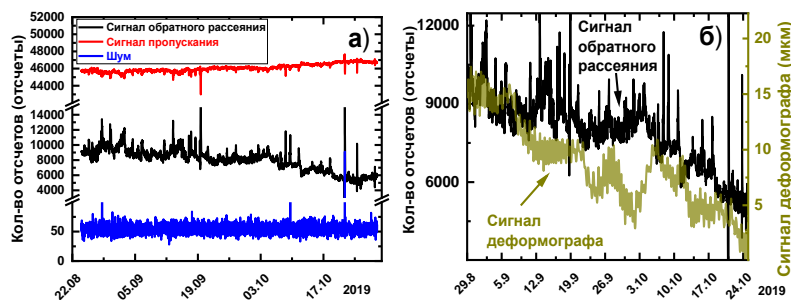


Рис. 6 Результаты лидарного мониторинга вариации концентрации аэрозолей в тоннеле БНО над очагом вулкана Эльбрус. (а) - сезонное снижение коэффициента обратного рассеяния на аэрозолях (чёрная линия) с одновременным увеличением пропускания трассы лидарного зондирования (красная линия) и шумовой сигнал (нижняя синяя линия) с выбросами аэрозолей в объём тоннеля из трещин и пор; (б) – вариация сигнала обратного рассеяния (черная линия) и сигнала лазерного деформографа, установленного в БНО для непрерывного мониторинга деформации коры Земли.

По графикам видно устойчивое и заметное (двукратное) снижение концентрации рассеивающих центров (сигнал обратного рассеяния) (чёрная линия вверху), которое сопровождается повышением сигнала пропускания (красная линия) [14].

Результаты аэрозольного мониторинга были сопоставлены с данными лазерного деформографа, который установлен в БНО для непрерывного мониторинга деформации коры Земли. Фурье-анализ данных лазерного деформографа и аэрозольного лидара (см. Рис. 7) показал хорошее совпадение частоты суточных и полусуточных модуляций деформации коры Земли и вариаций выхода тектонических аэрозолей приливными волнами  $P_1K_1$  и  $S_1$ . Приливные волны указаны согласно П. Мельхиору [15].

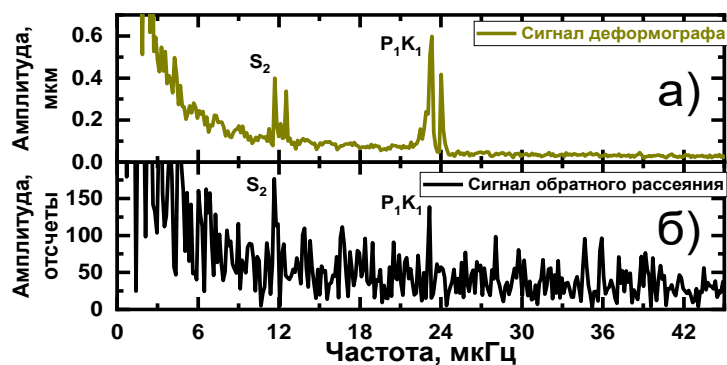


Рис. 7 Фурье-спектр данных лазерного деформографа (а) и пропускания трассы лидарного зондирования (б),  $S_2$ , – полусуточные приливные волны связанные с Солнцем,  $P_1$ ,  $K_1$  – суммарный вклад двух компонент суточных колебаний связанных с Солнцем согласно П. Мельхиору [15]

Совокупность результатов подтверждает, что аэрозольный лидар является новым индикатором деформации коры Земли при зондировании тектонических аэрозолей в закрытом тоннеле.

В параграфе 5.2 представлено описание и результаты лидарного эксперимента по исследованию влияния аэроионов на оптическую прозрачность трассы в закрытом объёме. Обнаружена высокая степень корреляции (до  $\rho=0.89$ ) лидарного сигнала пропускания трассы и концентрации аэроионов (Рис. 8). Обсуждаются перспективы применения аэрозольного лидара для непрерывного мониторинга концентрации аэрозолей с высоким пространственным и временным разрешением на длинных трассах с целью обнаружения индикаторов сейсмической активности. Одним из них является повышение эманыции радиоактивного радона, который ионизирует воздух. В свою очередь отрицательные аэроионы генерируют центры рассеяния лазерного излучения в виде аэрозолей.

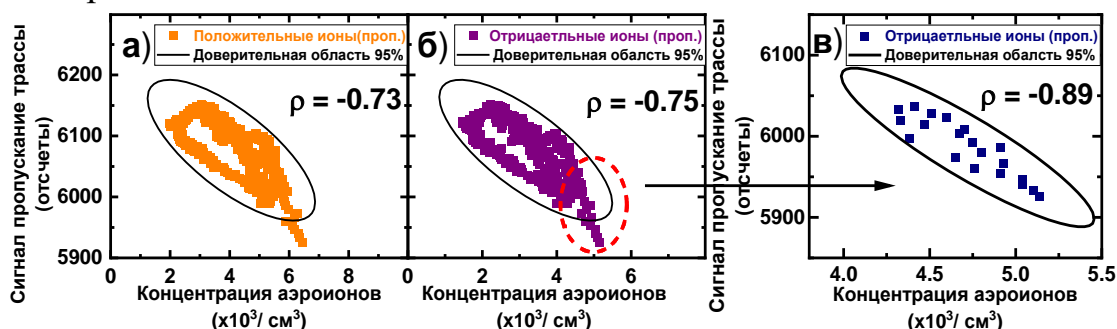


Рис. 8. Графики корреляции лидарного сигнала и концентраций аэроионов: (а) – сигнал пропускания трассы от концентрации положительных ионов (оранжевый цвет); (б) – сигнал пропускания трассы от концентрация отрицательных ионов (фиолетовый цвет); (в) – увеличенная область на графике сигнала пропускания трассы от концентрации отрицательных аэроионов. Значения коэффициента корреляции Спирмана ( $\rho$ ) представлены на рисунке.



## Заключение и основные выводы

1. Показано и экспериментально обосновано, что при накачке инжекционного диодного лазера током разряда ёмкости, который коммутируется биполярным транзистором в лавинном режиме работы, генерируется лазерный импульс с пикосекундной ступенькой на фронте.

2. Предложен адаптационный режим работы лидара и достигнута сантиметровая точность дальнометрии в лидаре с наносекундным лазерным импульсом. Улучшение достигнуто за счёт использования диодного лазера с наносекундным импульсом с ступенькой на фронте в цифровом лидаре с лавинным фотодиодом и разрешением по времени равным 250 пс.

3. Продемонстрировано, что основанный на регистрации баллистических фотонов цифровой принцип работы микроджоульного лидара позволяет обнаруживать объекты сквозь оптические плотные среды (плотные туманы и шлейфы дымов, зеркальные поверхности, и др.). Впервые прямым измерением микроджоульным лидаром была исследована многослойная структура тумана.

4. Впервые обнаружена модуляция лидарного аэрозольного эхо-сигнала тектоническими газами, эмиссия которых вызвана деформацией коры Земли приливными волнами.

5. Впервые прямым измерением оптической прозрачности атмосферы в закрытом объёме подземной лаборатории обнаружена динамика индуцированной ионами генерации аэрозолей.

### Библиографический список использованной литературы

1. Першин, С. М. Лидар / С. М. Першин // Большая российская энциклопедия. – Москва, 2010. – Т. 17. – С. 451-452.
2. Fiocco, G. Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60–140 km) by Optical Radar / G. Fiocco, L. D. Smullin // Nature. – 1963. – Vol. 199. – № 4900. – P. 1275-1276.
3. Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter / S. Pershin, V. Linkin, V. Makarov [et al.] // Conference on Lasers and Electro-Optics / Citation Key: Pershin:91. – Optica Publishing Group, 1991. – P. CF11.
4. Mars Polar Lander. – URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1999-001A> (date accessed: 01.01.2024). – Text : electronic.
5. Концепция инфракрасного дистанционного газоанализатора лидарного типа для мониторинга антропогенных загрязнений / В. В. Мещеринов, М. В. Спиридонов, В. А. Казаков, А. В. Родин // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 11. – С. 1055-1062.

6. Измерения содержания аэрозолей в тропосфере Арктического региона дистанционными и контактными методами с борта самолета лаборатории Як-42Д " Росгидромет" / А. Кузьмичев, Т. Бабухина, А. Ганьшин [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 5. – С. 88-97.
7. Привалов, В. Измерение концентрации молекул углеводородов лидаром комбинационного рассеяния света / В. Привалов, В. Шеманин // Измерительная техника. – 2016. – № 9. – С. 22-25.
8. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы / В. Дьяченко, П. Чартий, Р. Чартий, В. Шеманин // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 3. – С. 36-43.
9. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification / S. A. Pulinets, V. A. Alekseev, A. D. Legen'ka, V. V. Khagai // Middle Atmosphere: Changes and Electrodynamics. – 1997. – Vol. 20. – № 11. – P. 2173-2176.
10. Межерис, Р. М. Лазерное дистанционное зондирование / Р. М. Межерис; ред. А. Б. Карасева; пер. В. И. Городецкий, В. В. Филюшкина. – Москва : Мир, 1987. – 550 с.
11. Диодный лазер, генерирующий импульсы 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением / С. М. Першин, М. Я. Гришин, В. А. Завозин [и др.] // Квант. электроника. – 2021. – Т. 51. – № 5.
12. Дьяконов, В. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение / В. Дьяконов. – Солон-Пресс, 2008. – 382 с.
13. Tontini, A. Numerical Model of SPAD-Based Direct Time-of-Flight Flash LIDAR CMOS Image Sensors / A. Tontini, L. Gasparini, M. Perenzoni // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 18.
14. Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser / S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Y. Grishin [et al.] // Laser Physics Letters. – 2020. – Vol. 17. – № 11. – P. 115607.
15. Мельхиор, П. Земные приливы / П. Мельхиор; ред. Н. Н. Парийский; пер. С. Н. Барсенкова, Ю. С. Доброхотова, Б. П. Перцова. – Москва : Издательство «Мир», 1968.

## Список работ

### Конференции

1. S. M. Pershin, G. I. Dolgikh, V. S. Makarov, A. V. Turin, M. Y. Grishin, **V. A. Zavoziin**, V. N. Lednev, A. A. Plotnikov. A pulsed diode laser for tectonic aerosol lidar sensing // Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL. – 2019. – Vols. 2019-Septe.

2. М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**. Лидарное зондирование тектонического аэрозоля как новый метод мониторинга деформаций коры Земли / М. Я. Гришин, В. А. Завозин // Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный ..., 2020. – С. 6-8.

3. S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavoziin**, V. N. Lednev, V. S. Makarov, P. A. Sdvizhenskii, A. V. Turin. Eye-safe LIDAR sensing through dense fog // Proceedings - International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020. – 2020.

4. S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Y. Grishin, **V. A. Zavoziin**, V. V. Kuzminov, V. N. Lednev, D. V. Likhodeev. Tectonic aerosol sensing by lidar as a new technique for Earth's crust deformation monitoring // Proceedings - International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020 / Citation Key: Pershin2020. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

5. **В. А. Завозин**, М. Я. Гришин. Лазерное зондирование многослойных туманов лидаром с безопасным для глаз уровнем излучения / В. А. Завозин, М. Я. Гришин // Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный ..., 2021. – С. 10-12.

6. S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavoziin**, V. S. Makarov, V. N. Lednev, A. V. Myasnikov, A. V. Turin. A 3-ns pulsed diode laser for a high spatial resolution lidar // Abstracts of the 28th International Conference on Advanced Laser Technologies. – 2021. – P. 171.

7. S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavoziin**, V. S. Makarov, V. N. Lednev, A. V. Myasnikov. Omnidirectional dynamics of the Earth's crust seasonal deformation and the aerosol output decrease in the adit over the Elbrus volcano magmatic chamber // Abstracts of the 28th International Conference on Advanced Laser Technologies. – 2021. – P. 172.

8. S. M. Pershin, V. S. Makarov, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavoziin**, I. M. Tupitsyn, E. A. Cheshev, D. G. Artemova. Unique dual-pulse diode laser with controllable (3-20 ns) interval & duration for the eye-safe lidar // V International Conference on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight-2021". – Moscow, 2021. – P. 179.

9. V. Lednev, M. Y. Grishin, P. Sdvizhenskii, **V. Zavozin**, S. Pershin, A. Bunkin. Developing Compact LIDAR Systems: Size and Eye-Safety Matters // Сборник трудов конференции “International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)”. – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный ..., 2022. – P. 194-194.

10. S. M. Pershin, **V. A. Zavozin**, D. G. Artemova, M. Ya. Grishin, K. Kh. Kanonidi, V. N. Lednev, V. S. Makarov, Ya. Ya. Ponurovskii. Improving magmatic aerosol detection by LIDAR above the Elbrus magma chamber // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO) / Citation Key: 9839805. – 2022. – P. 1.

11. S. M. Pershin, **V. A. Zavozin**, M. Y. Grishin, V. N. Lednev, G. A. Boldin, L. B. Bezrukov, A. K. Mezhokh, V. V. Sinev. Air ions induced aerosol sensing by eye-safe LIDAR. – 2023.

### Научные публикации

1. С. М. Першин, Г. И. Долгих, А. Ф. Бункин, М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**, В. К. Клинков, В. Н. Леднёв, В. С. Макаров, А. А. Плотников, А. В. Тюрин. Корреляции сигналов лидарного аэрозольного рассеяния и лазерного деформографа при сжатии/растяжении коры Земли // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2018. – Т. 45. – № 7. – С. 32-38. – DOI: 10.3103/S1068335618070059.

2. С. М. Першин, А. Н. Федоров, А. В. Тюрин, А. В. Мясников, В. С. Макаров, В. Н. Леднёв, В. В. Кузьминов, **В. А. Завозин**, М. Я. Гришин, В. Б. Петков. Лидарное зондирование эволюции многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – Т. 10. – С. 46-54.

3. S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Y. Grishin, V. V. Gravirov, **V. A. Zavozin**, V. V. Kuzminov, V. N. Lednev, D. V. Likhodeev, V. S. Makarov, A. V. Myasnikov, A. N. Fedorov. Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // Laser Physics Letters. – 2020. – Vol. 17. – № 11. – P. 115607. – DOI: 10.1088/1612-202X/abbedc.

4. S. M. Pershin, M. Y. Grishin, **V. A. Zavozin**, V. N. Lednev, V. A. Lukyanchenko, V. S. Makarov. Aerosol layers sensing by an eye-safe lidar near the Elbrus summit // Laser Physics Letters. – 2020. – Vol. 17. – № 2. – P. 026003. – DOI: 10.1088/1612-202X/ab66c4.

5. С. М. Першин, М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**, В. Н. Леднев, А. Н. Федоров, А. В. Мясников, А. В. Тюрин. Диодный лазер, генерирующий импульсы 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением // Квант. электроника. – 2021. – Т. 51. – № 5



6. С. М. Першин, А. Л. Собисевич, М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**, В. С. Макаров, В. Н. Леднёв, А. Н. Фёдоров, А. В. Мясников, Д. Г. Артёмова. Разнонаправленная модуляция сезонного сжатия коры Земли и сигнала аэрозольного лидара в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 501. – № 1. – С. 14-18. – DOI: 10.31857/S2686740021060134.

7. **V. A. Zavozin**, M. Y. Grishin, V. N. Lednev, V. S. Makarov, S. M. Pershin. Eye-safe photon counting LIDAR for magmatic aerosol detection // Laser Physics. – 2022. – Vol. 32. – № 12. – P. 125601. – DOI: 10.1088/1555-6611/aca15d.

8. V. Myasnikov, S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavozin**, V. S. Makarov, A. A. Ushakov. Estimation of the Influence of Meteorological Factors on the Aerosol Lidar Signal in Tunnels above the Elbrus Volcano Chamber // Physics of Wave Phenomena. – 2022. – Vol. 30. – № 2. – P. 119-127. – DOI: 10.3103/S1541308X22020054.

9. С. М. Першин, В. С. Макаров, М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**, А. Л. Коромыслов, В. Н. Леднев, П. А. Сдвиженский, И. Прохазка, И. М. Тупицын, Е. А. Чешев. Новый режим генерации диодного лазера: 200-пикосекундный фронт наносекундного импульса // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – № 11. – С. 1050-1053.

10. С. М. Першин, А. Л. Собисевич, **В. А. Завозин**, М. Я. Гришин, В. Н. Леднев, В. Б. Петков, Я. Я. Понуровский, А. Н. Фёдоров, Д. Г. Артёмова. Лидарное детектирование аэрозолей в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2022. – Т. 49. – № 2. – С. 10-19.

11. С. Першин, Е. Гордеев, М. Гришин, **В. Завозин**, В. Макаров, В. Леднёв, Я. Понуровский, А. Фёдоров, А. Ушаков, В. Казалов. Реверсия конвекции воздуха в горячем тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2023. – Т. 50. – № 3. – С. 3-13.

12. С. М. Першин, **В. А. Завозин**, В. Н. Леднев, Г. А. Болдин, М. Я. Гришин, В. С. Макаров, Л. Б. Безруков, А. К. Межох, В. В. Синев. Лидарный мониторинг динамики аэрозолей, индуцированных аэроионами // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – № 12. – С. 69.

13. С. М. Першин, А. Л. Собисевич, В. С. Макаров, А. В. Мясников, М. Я. Гришин, **В. А. Завозин**, В. Н. Леднев, Д. В. Лиходеев, В. В. Казалов. Лидарный мониторинг магматической активности малой камеры эльбрусского вулканического центра // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2023. – Т. 509. – № 1. – С. 15-20. – DOI: 10.31857/S2686740023020086.

14. S. M. Pershin, E. I. Gordeev, M. Ya. Grishin, **V. A. Zavozin**, V. S. Makarov, V. N. Lednev, Ya. Ya. Ponurovskii, D. B. Stavrovskii, A. A. Ushakov, V. V. Kazalov. Monitoring the Baric Modulation of Gas Concentration in the Baksan Neutrino Observatory Tunnel in the Elbrus Region Using Differential Absorption Lidar // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 515. – № 1. – P. 535-540. – DOI: 10.1134/S1028334X23603164.