

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 621.317.361

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-99-114

Свойства атмосферных оптических линий для систем акустооптического мониторинга опасных природных и антропогенных процессов*

А.В. БРИТВИН^{1,3,a}, О.А. КОПЫЛОВА^{2,b}, Н.С. НИКИТЕНКО^{1,c},
Б.В. ПОЛЛЕР^{1,2,d}, А.Б. ПОЛЛЕР^{1,e}, М.С. ХАЙРЕТДИНОВ^{2,3,f},
Л.В. ШАСТИН^{1,4,g}

¹ РФ, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, Институт лазерной физики СО РАН

² РФ, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

³ РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

⁴ РФ, 630004, г. Новосибирск, Красный пр., 18, Министерство науки и инновационной политики Новосибирской области

^a a.v.britvin@yandex.ru

^b oksana@opg.sgcc.ru

^c nikitenkons@mail.ru

^d lablis@mail.ru

^e poller85@mail.ru

^f marat@opg.sgcc.ru

^g leonid_shastin@mail.ru

Для прогнозирования опасных природных и антропогенных процессов – оползней, камнепадов, лавин, ураганов, паводков и деформаций сооружений – необходимы беспроводные линии для связи и дистанционных измерений в условиях сложного рельефа местности. В этом контексте перспективным направлением является применение атмосферных оптических измерительных систем в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

Статья посвящена развитию и экспериментальному обоснованию перспективных дистанционных методов оптического и акустооптического мониторинга для прогнозирования и контроля опасных природных и техногенных процессов. Рассматриваются два ключевых направления. Первое направление связано с лазерным контролем опасных деформаций и перемещений объектов, таких как горные склоны, мосты и плотины. Для этого предлагается метод использования системы взаимосвязанных ретрорефлекторов, при котором опорный отражатель устанавливается в зоне с малой вероятностью деформации, а контрольный – в потенциально опасной зоне.

Второе направление связано с разработкой лазерного метода детектирования акустических предвестников опасных событий, таких как ураганы и штормы, путем регистрации инфразвуковых колебаний. Метод основан на прецизионном измерении флуктуаций времени

* Статья получена 14 октября 2025 г.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и образования РФ (НИОКТР Рег. № 121033100068-7).

распространения лазерных импульсов, стабилизированных высокоточным стандартом частоты, в атмосферной линии с ретрорефлектором.

Исследованы параметры флуктуации и ослабления оптических импульсов в диапазонах от 0,28 до 1,55 мкм на горных трассах с ретрорефлекторами протяженностью от 0,05 до 8 км на высотах от 1,1 до 2,1 км. Получены характеристики оптической линии связи с БПЛА для видеомониторинга объектов в загоризонтных зонах. Для обнаружения предвестников ураганов и штормов в инфразвуковом диапазоне представляет интерес исследование атмосферных лазерных синхронных линий со стандартом частоты. Измерения оптических измерительных систем проводились на территории научно-исследовательского полигона Института лазерной физики СО РАН в Горном Алтае и на лазерном стенде на здании Института лазерной физики СО РАН в Академгородке г. Новосибирска.

Ключевые слова: оптический мониторинг, лазерный контроль, оптическая атмосферная линия, ретрорефлектор, стандарт частоты, инфразвук, деформация объектов, чрезвычайная ситуация, устойчивость к электромагнитным помехам, искро- и взрывобезопасная аппаратура, дистанционный контроль

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение вероятности опасных проявлений природных и промышленных процессов требует развития новых методов мониторинга объектов в сложной электромагнитной и опасной обстановке. В [1] отмечается всевозрастающий рост техногенной нагрузки на биосферу, отмечается актуальность разработки методов мониторинга геодинамических процессов (сейсмичность, оползни, обвалы и т. п.) и методов мониторинга антропогенно-техногенных проявлений (опасных аварий, взрывов, акустических и электромагнитных излучений).

В [2] указывается на необходимость постоянного контроля параметров экологической обстановки и важность оптических дистанционных методов для такого контроля, которые открывают возможность увеличения объемов и оперативности информации о пространственных характеристиках окружающей среды: об опасных деформациях сооружений, оползнях, накоплении снега, о паводках, об авариях на нефте- и газопроводах, о появлении опасных газов и излучений, о возникновении пожаров, камнепадов, ураганов и т. п. Значительные возможности предоставляют информационно-измерительные методы на основе использования атмосферных оптических линий адаптивных линий для построения систем сбора и передачи данных [3–6]. Такие линии должны обеспечивать большую пропускную способность, иметь электромагнитную помехозащищенность и устойчивость к погодным условиям. Исследования характеристик одновременного распространения ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) излучения в приземной атмосфере на трассах протяженностью от 0,1 до 6 км при снегопаде, выполненные в 1989–1994 гг. [4], показали отсутствие селективного ослабления УФ-излучения вопреки известным расчетным соотношениям. Анализ флуктуации УФ-излучения на трассе протяженностью 6 км при дожде показал, что его спектр не превышает 10 Гц. Отсутствие заметного ослабления УФ-излучения при малой метеорологической дальности видимости ($MДВ < 50$ м) при снегопадах отмечено также в работе [7]. Отсутствие фоновых помех менее 0,3 мкм и появление малогабаритных полупроводниковых излучателей стимулирует в последние годы развитие атмосферных УФ-линий связи. В последнее время активно изучается

возможность контроля с помощью лидаров потенциально опасных природных процессов, таких как наводнение [8], оползни [9], ледостав [10]. В статье [11] представлен всесторонний обзор технологий дистанционного зондирования для повышения эффективности борьбы с геологическими катастрофами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для мониторинга опасных природных и антропогенных процессов зачастую целесообразно использовать дистанционные методы контроля. В настоящей статье рассмотрена система удаленного наблюдения за опасными объектами в оптическом диапазоне и акустооптические системы контроля обстановки в инфранизком диапазоне акустических частот.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ

Системный подход к проблеме построения систем акустооптического мониторинга опасных природных и антропогенных процессов включает в себя совокупность методов измерений и передачи информации с учетом условий функционирования технических средств на объектах. Так, исследования и развитие оптических атмосферных линий на сложных трассах с установленными в контрольных точках ретрорефлекторами дают возможность обоснованно определить параметры окружающих объектов и создавать системы для акустооптического мониторинга.

Исследование процессов преобразования УФ-фотонов в пленочных структурах с фотоустойчивыми люминофорами позволило создать для УФ-линий малогабаритные люминесцентные планарно-волоконные антенны с большими углами поля зрения [12]. Аналогичные исследования люминесцентных преобразователей для информационных систем проводятся и за рубежом [13, 14]. Такие антенны устойчивы к электромагнитным воздействиям и могут функционировать в искро- и пожароопасной обстановке, так как выполняются полностью из диэлектрических материалов с использованием для подключения к удаленным оптоэлектронным блокам полимерных волоконных кабелей [12]. Следует отметить, что атмосферные УФ-линии обеспечивают обмен информацией также и при отсутствии прямой видимости между объектами за счет молекулярного рассеяния УФ-импульсов в атмосфере.

Развитие метода анализа флуктуаций частоты лазерных импульсов в атмосфере от высокостабильного по частоте генератора (стандарта частоты) открывает новые возможности построения систем мониторинга акустических предвестников опасных процессов [15–17].

Так, исследования для систем мониторинга в Горном Алтае характеристик атмосферных оптических линий показали, что при увеличении длины наклонной горной трассы от 1,6 до 7,5 км при высоте над уровнем моря от 1,1 до 2,1 км значительно увеличиваются (в 1,5 раза) текущие значения средних амплитуд принятых лазерных импульсов на длине волны 0,53 мкм и в 1,8 раза увеличиваются текущие дисперсии амплитуд импульсов.

При уменьшении длины трассы от 7,5 км до 1,6 км значительно увеличиваются (в 2 раза) интервалы времени с незначительно отличающейся амплитудой

принятых импульсов, что свидетельствует о более низкочастотном спектре флуктуации параметров атмосферы на трассе 1,6 км. При использовании ретрорефлекторов в виде пластин с катафотными либо ленточными полимерными отражателями, установленных на контрольных объектах на горных склонах, при распространении лазерных импульсов на длине волны 808 нм на трассах протяженностью 800 и 1600 м наблюдалось высокое отношение сигнал/помеха на выходе лазерных приемников. При длительном пребывании ретрорефлектора на светоотражающих лентах на постаменте отражательная способность на длине волны 808 нм уменьшилась не более чем на 15 %. Можно считать такие рефлекторы пригодными для длительного использования в системах лазерного мониторинга в горных условиях.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ РЕТРОРЕФЛЕКТОРОВ

В настоящей статье предложен метод измерения относительного пространственного смещения двух объектов и параметров деформации объекта. Суть метода лазерного контроля опасных перемещений и деформаций с помощью взаимосвязанных ретрорефлекторов заключается в установке на объекте на определенном расстоянии $L_{\text{трасс}}$ двух или более ретрорефлекторов, один из которых (ретрорефлектор 1) размещается в месте с малой вероятностью деформации объекта, второй (ретрорефлектор 2) размещается на расстоянии длины контрольного ключа $L_{\text{кон}}$ от ретрорефлектора 1 в месте, где вероятны перемещения и деформация объекта. С помощью излучателя и многоэлементного фотоприемника осуществляется определение изменения расстояния $L_{\text{кон}}$. Это позволяет оценить вероятность возникновения опасных перемещений и деформаций $P_{\text{оп}}(t)$ с учетом динамики изменения $L_{\text{кон}}$ во времени.

Для оценки параметров метода были выполнены экспериментальные измерения на горной трассе с помощью фотолинейки Hamamatsu S11638 с 2048 фотоячейками, размер одной ячейки 14×42 мкм (блок БФ), с использованием малогабаритного лазера на 800 нм (блок БИ).

Схема структуры стенда для измерений с двумя рефлекторами представлена на рис. 1.

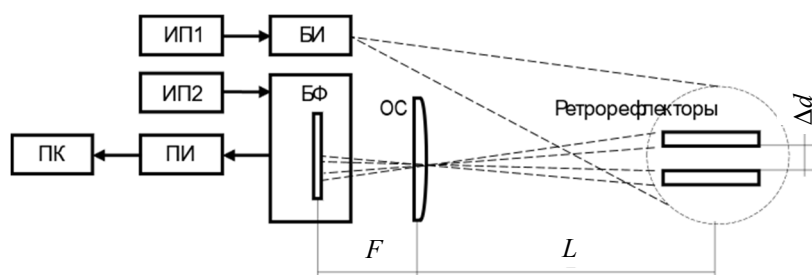


Рис. 1. Структура стенда для измерений с фотолинейкой

Fig. 1. Structure of a measuring bench with a linear image sensor

В качестве блока фотоприемника (БФ) был использован многоэлементный оптический приемник, построенный на базе фотолинейки S11638. Для снятия данных с приемника 4800 раз в секунду и передачи их в персональный компьютер (ПК) использовался модуль преобразователя интерфейса (ПИ) и источники питания ИП1 и ИП2.

Теневые диаграммы для расстояний 100, 200 и 400 м приведены на рис. 2. По горизонтали отложены номера фоточувствительных элементов фотолинейки.

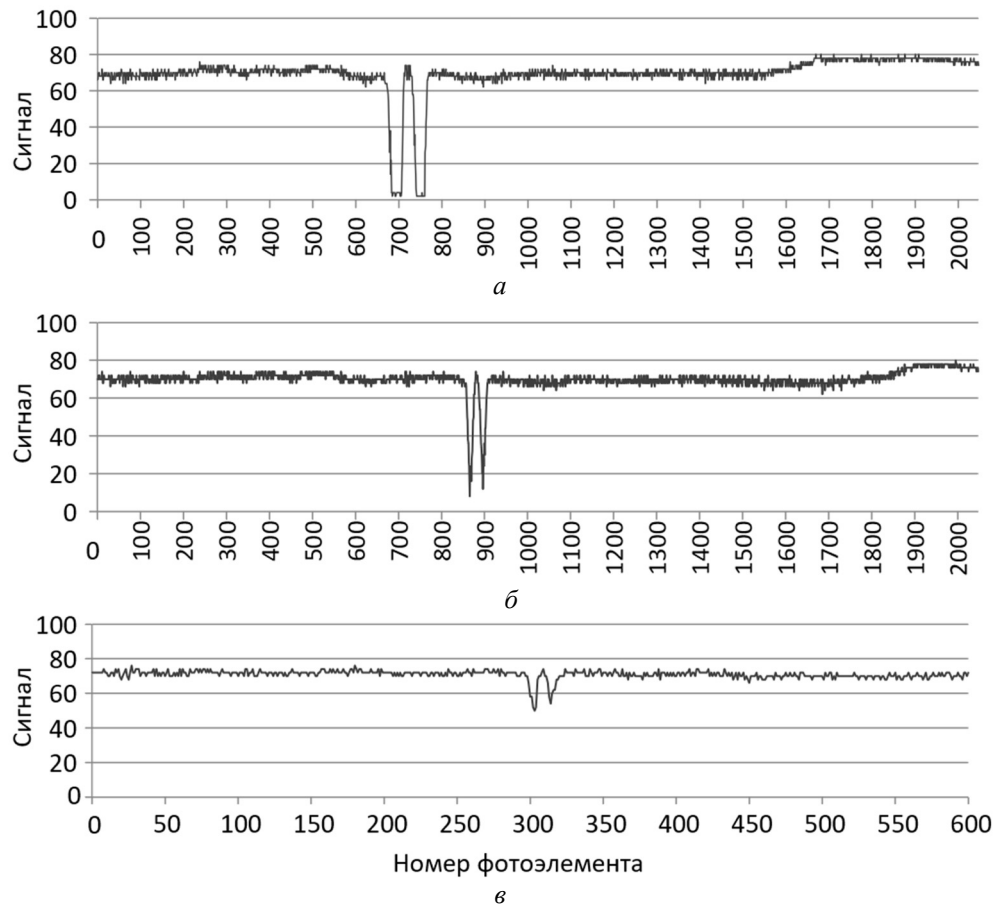


Рис. 2. Сигналы с фотолинейки на расстоянии:
а – 100 м; б – 200 м; в – 400 м (увеличенный масштаб)

Fig. 2. Signals from a linear image sensor at a distance of:
а – 100 m; б – 200 m; в – 400 m (zoomed in)

Сигналы с фотолинейки приведены на рис. 2 для расстояний 100, 200 и 400 м. По горизонтали отложены номера фоточувствительных элементов фотолинейки. Уровень сигнала выдается в инверсном виде, где сильный оптический сигнал приближается к нулю, а слабый – к ста.

Как видно из рис. 2, БФ в совокупности с оптической системой ОС способен разрешать два рефлектора с зазором между ними 150 мм, расположенных на расстоянии 400 м от ОС.

Оценки разрешающей способности, а также расстояние между пиками теневых диаграмм отражены в таблице.

Результаты измерений

Measurement results

Расстояние до отражателя	Расчетное разрешение БФ, мм	Количество элементов между пиками теневой диаграммы, шт.	Расстояние между засвеченными элементами, мкм
100	7	51	714
200	14	32	448
400	28	12	168

Из полученных данных следует, что при соответствующем выборе оптических параметров фотоприемника, излучателя и ретрорефлекторов открывается возможность оперативного лазерного контроля смещения ретрорефлектора 2 относительно ретрорефлектора 1, например, при контроле опасных деформаций удаленных объектов (горных склонов, камнепадов, мостов, плотин и др.), в том числе с использованием беспилотных летательных систем.

Преимущество этого метода заключается в возможности замены фотолинейки на обычные видеокамеры для контроля удаленных объектов. Это позволяет снизить массу и габариты дополнительного оборудования при мониторинге удаленных объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Предложенный метод позволяет дистанционно контролировать потенциально опасные объекты без использования дорогостоящих прецизионных лидарных систем.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Для прогнозирования штормов и ураганов представляют интерес методы прецизионного измерения акустических волн с помощью лазерных атмосферных и волоконных линий, которые рассмотрены в наших публикациях [16, 17]. Использование ретрорефлекторов на атмосферной трассе с импульсным лазером, стабилизированным по времени, позволяет ускорить и упростить оценку характеристик акустических волн. Ретрорефлекторы, в отличие от зеркал, не требуют юстировки, что особенно важно на трассах большой протяженности в естественных условиях. Это актуально, так как опоры могут смещаться из-за температурного влияния на опоры и грунт.

Статистические характеристики выборок из принятых групп лазерных импульсов длительностью $T_{\text{выб}}$, прошедших туда и обратно трассу длиной $L_{\text{тр}}$ с ретрорефлектором, сравниваются с параметрами одновременно зафиксированных выборок из групп лазерных импульсов с частотой импульсов $F_{\text{сч}}$. Частота импульсов должна быть стабильной на период измерений $T_{\text{выб}}$.

Основным параметром, влияющим на время распространения излучения по трассе, будет коэффициент преломления атмосферы.

Коэффициент преломления является функцией температуры, давления, влажности воздуха и длины волны излучения. Индекс преломления можно выразить через метеорологические параметры [14]:

$$N = (n - 1)10^6 = 83,11 \frac{P}{T} - 12,92 \frac{e}{T} + 37\,1914 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

где P – атмосферное давление, гПа; T – температура воздуха, К; e – влажность воздуха (парциальное давление), гПа.

Так, например для трассы в 1000 м для прозрачной атмосферы со стабильными характеристиками время распространения импульсов составит 6,66 мкс. Поскольку коэффициент преломления на участке трассы не меняется мгновенно, существует интервал замороженности атмосферы [15, 16], и плавные изменения коэффициента преломления оказывают влияние на временные интервалы между импульсами. При росте показателя преломления время распространения импульсов будет увеличиваться и соответственно увеличиваться разница во времени прихода импульсов. Таким образом, при сравнении методом фазового детектирования на интервалах, не превышающих время заморозки атмосферы, частоты принятых отраженных лазерных импульсов с неизменной частотой стандарта частоты появляется возможность оценивать текущие изменения коэффициента преломления на трассе, связанные в том числе с влиянием мощных акустических инфразвуковых колебаний.

Недостатком одиночной лазерной линии является локальная чувствительность к направлению акустической волны. Так как первоначально неизвестно местонахождение возможного источника инфразвука, то необходимо использовать несколько лазерных линий. Лазерные сигналы направляются на несколько атмосферных трасс одинаковой длины с применением идентичных ретрорефлекторов. Отраженные лазерные сигналы фиксируются соответствующими фотоусилителями и фазовыми детекторами. Для каждой трассы задается угол направления α_i .

На рис. 3 представлена лазерная измерительная установка инфразвуковых волн с ортогональным размещением измерительных линий (ИО – измерительное оборудование).

Статистический анализ выборок (пакетов) экспериментальных отраженных импульсных сигналов от лазера, стабилизированного по времени по сравнению с синхронными пакетами импульсов от того же стандарта частоты, позволит определить параметры изменения текущего коэффициента преломления на атмосферной трассе на интервалах стационарности атмосферы. На их основе возможны оценки вида и параметров акустического инфразвукового процесса (случайный, детерминированный, однократный, периодический и др.). Для этого случая универсальным методом анализа процесса является спектрально-временной анализ, позволяющий отслеживать динамику спектральных уровней инфразвукового процесса в координатах «частота – время» [21]. В этом случае исходный процесс «разрезается» на временные окна равной длительности, каждое окно анализируется отдельно, что позволяет получить

эволюцию спектра во времени. Такой анализ называется спектрально-временным (СВА). Он применяется к классу моделей сигналов вида

$$S(t) = A(t)\xi(t),$$

где $\xi(t)$ – непрерывный случайный сигнал, $A(t)$ – импульсная функция.

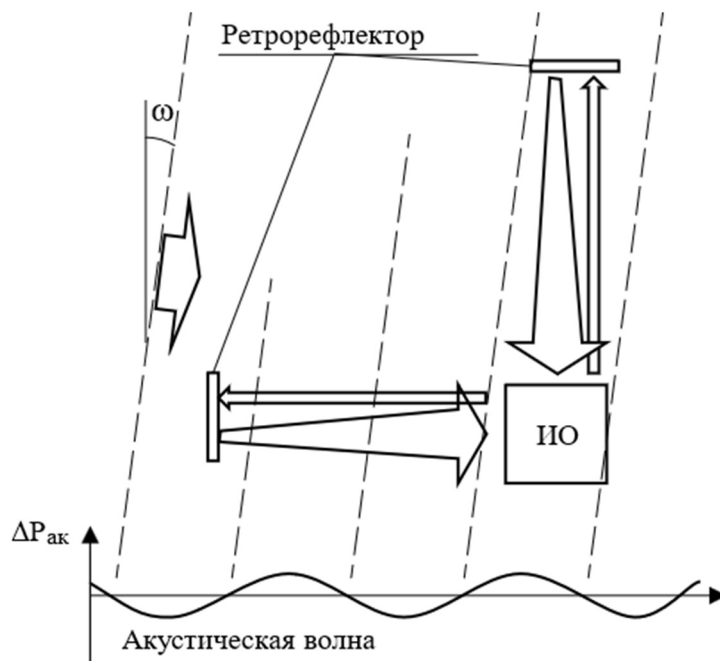


Рис. 3. Схема лазерной установки измерения акустических волн

Fig. 3. Diagram of a laser device for measuring acoustic waves

Преобразование СВА описывается в виде

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} S_l(t_n) \exp\left(-i \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad l = 1, \dots, L. \quad (2)$$

Здесь $T = N\Delta t$ – длительность секции, Δt – интервал дискретизации непрерывных сигналов, L – число секций длительностью T каждая. Выбор времени T определяется интервалами стационарности атмосферы.

В результате вычисления в соответствии с (2) получаем спектрально-временную функцию (СВФ) искомого процесса, характеризующую его параметры.

В качестве примера на рис. 4 приведена спектрально-временная функция низкочастотного акустического шума проходящего в 20 метрах электропоезда: на рис. 4, а – исходная СВФ, на рис. 4, б – проекция СВФ на плоскость «частота – время». Приведенная СВФ показывает основные параметры низкочастотного случайного акустического процесса: средоточие его основной мощности в диапазоне от 5 до 10 Гц и во временном окне от 5360 до 5380 с. Таким образом, определяем тип функции (случайная) и ее основные параметры.

Другими дополнительными количественными статистическими параметрами являются среднее значение, дисперсия.

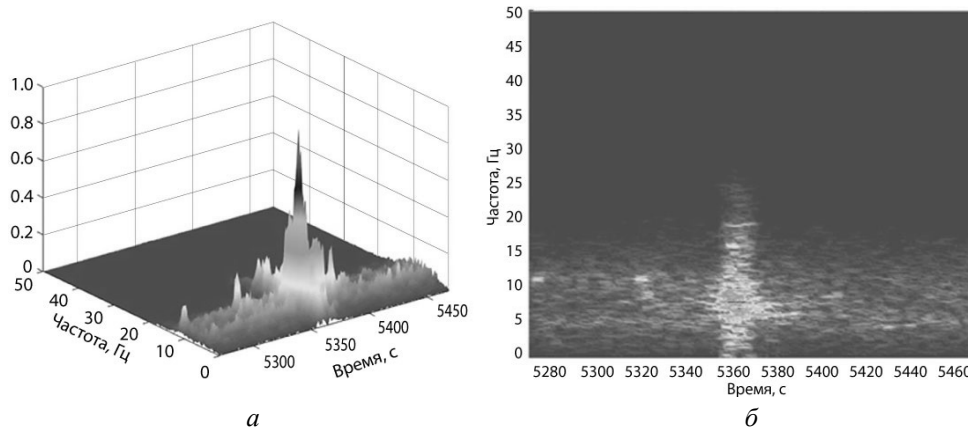


Рис. 4. Спектрально-временная функция и ее проекция: исходная (а); проекция СВФ на плоскость «частота – время» для внешнего акустического шума, создаваемого при прохождении электропоезда (б)

Fig. 4. The spectral-time function is its projection (a); the spectral-time function on the frequency-time plane for external acoustic noise generated during the passage of an electric train (b)

При экспериментальной оценке параметров лазерной системы со стандартной частоты $F_{СТ}$, стабильностью 10^{-12} , с атмосферной линией протяженностью 87 м 67 см и волоконной линией длиной 126 м оценивались изменения времени задержки между соседними импульсами двух потоков импульсов. Первый поток проходил по атмосферной трассе, второй – по оптическому кабелю [17, 18]. При последовательном считывании времени задержки на интервале времени около 200 с образовывался массив данных, который обрабатывался для получения экспериментального распределения плотности вероятности – гистограммы.

На рис. 5 приведена гистограмма задержек времени для полученного массива данных. Данные сгруппированы по семи интервалам от 70 до 74 нс.

Статистический анализ выборок (пакетов) экспериментальных отраженных импульсных сигналов от лазера, стабилизированного по времени, по сравнению с синхронными пакетами импульсов от того же стандарта частоты, позволит определить параметры изменения текущего коэффициента преломления на атмосферной трассе на интервалах стационарности атмосферы. На их основе возможны оценки вида и параметров акустического инфразвукового процесса (случайный, детерминированный, однократный, периодический и др.).

Статистическая проверка по критерию χ^2 показала, что гистограмма близка к гауссовому (нормальному) распределению с уровнем значимости 5 %.

При измерениях стабильности частоты импульсов на выходе лазерного драйвера флуктуаций частоты не отмечалось. На выходе фотоусилителя импульсов с оптического кабеля отмечались редкие флуктуации в интервалах до минут. На выходе атмосферной трассы отмечалась более интенсивная флуктуация частоты со средней частотой флуктуаций около $0,066 \text{ с}^{-1}$.

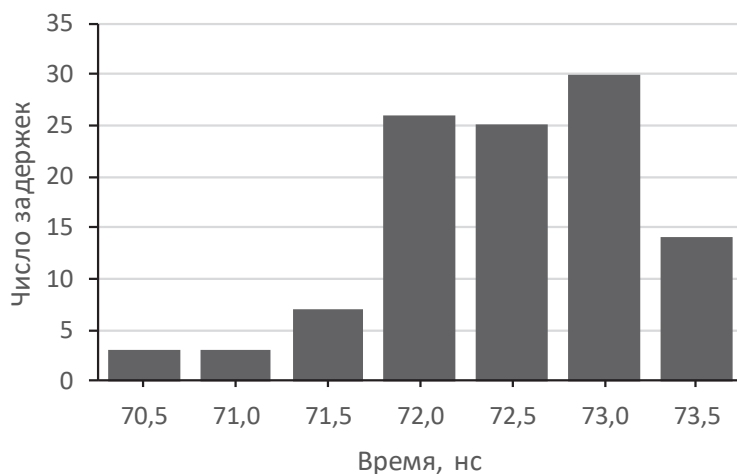


Рис. 5. Гистограмма задержек времени

Fig. 5. Histogram of time delays

Выполненные эксперименты по оценке статистики флуктуаций фазы (задержек) атмосферных импульсов показали, что они близки к нормальному закону, характерному для фоновых инфразвуковых шумов.

Следует иметь в виду, что акустооптическое взаимодействие относится к числу слабых взаимодействий, что обуславливает необходимость учета влияния фактора внешних шумов на точность оценивания временного положения атмосферных импульсов. Это обуславливает использование статистических методов повышения точности измерений времени, чему, в частности, соответствует метод поисковой оптимизации времени прихода импульсов для модели квазипериодической последовательности импульсов [21].

Так, эксперименты по оценке времени распространения лазерных импульсов, частота которых стабилизирована со стабильностью 10^{-12} , выполнялись на различных трассах с ретрорефлектором размером 46×47 см, собранным из 28 полимерных прямоугольных катафотов размером около $6,0 \times 11,5$ см каждый. Ретрорефлектор облучался лазерным пучком на длине волны 0,8 мкм, диаметр пучка на расстоянии около 100 м соответствовал размеру отражателя. При облучении лазерным пучком на длине волны 532 и 450 нм угол расходимости отраженного от одного катафота лазерного пучка был в пределах $2,5 \dots 3,0^\circ$. При повороте или наклоне катафота на угол Q происходит поворот направления отраженного пучка в соответствии с углом Q , что открывает возможность поворачивать лазерный луч в необходимом направлении.

Оценка времени распространения на атмосферных трассах протяженностью 49,28 и 87,60 м при одинаковой метеорологической дальности видимости около 10 км показала, что время распространения близко к расчетной величине и при увеличении длины трассы от 48,6 до 87,6 м время распространения отраженного лазерного сигнала увеличилось в 1,8 раза. Отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника соответственно уменьшилось в 5 раз, от 50 до 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований можно сделать вывод, что рассматриваемый метод с синхронными лазерными линиями со стандартом частоты на атмосферных трассах с ретрорефлекторами может позволить одновременно производить оценку параметров аномальных инфразвуковых полей и измерять перемещения и деформацию объектов.

Также открывается возможность значительного увеличения вероятности обнаружения аномальных инфразвуковых сигналов за счет большой базы измерений на трассах до нескольких сотен метров с ретрорефлекторами и при увеличении быстродействия передающих, приемных и фазовых устройств до долей наносекунд.

Следует отметить, что использование атмосферных синхронных УФ-линий с люминесцентными антеннами увеличивает помехоустойчивость к воздействию электромагнитных естественных и промышленных помех.

В целом совокупность полученных характеристик открывает новые возможности построения систем акустооптического мониторинга для контроля опасных деформаций горных склонов, лавин, паводков и инфразвуковых предвестников опасных природных и техногенных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевский В.К. Экологическая геофизика: учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 256 с. – ISBN 5-211-04282-4.
2. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с. – ISBN 5-7038-1497-9.
3. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу / Р.А. Казарян, А.В. Оганесян, К.П. Погосян, Е.Р. Милютин. – М.: Радио и связь, 1985. – 208 с.
4. Поллер Б.В. Характеристики распространения ультрафиолетового излучения в приземной атмосфере: // Направления развития лазерных и миллиметровых систем и средств в технике передачи информации и медицине: материалы конференции, 3–5 октября 1995 г. – Воронеж, 1996. – С. 48.
5. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи / А.В. Бритвин, С.И. Коняев, Н.С. Никитенко, А.В. Поважаев, Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. – № 1. – С. 21–25. – DOI: 10.18127/j20700784-201901-03. – EDN: YUHNWH.
6. Куприянова О.В., Левенец А.В., Чье Е.У. Моделирование систем передачи данных с адаптацией к состоянию канала // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (62). – С. 120–132. – DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-120-132. – EDN: VYXPQR.
7. Прохождение УФ-С, видимого и ближнего инфракрасного излучений через атмосферу / И.Д. Родионов, А.И. Родионов, И.П. Родионова, Д.В. Шестаков, В.Д. Песков, В.В. Егоров, А.П. Калинин, Н.А. Матвеева // Химическая физика. – 2019. – Т. 38, № 7. – С. 30–36. – DOI: 10.1134/S0207401X19070136. – EDN: VZNVRG.
8. High-resolution flood risk assessment in small streams using DSM–DEM integration and airborne LiDAR data / S.-J. Lee, Y.-S. Han, J.-S. Kim, H.-S. Yun // Sustainability. – 2025. – Vol. 17 (21). – DOI: 10.3390/su17219616.
9. Monitoring and characterization of surface movements in rock slopes / T. Carlà, T. Beni, L. Lombardi, M. Nocentini, G. Gigli // Progress in landslide research and technology. Vol. 4, Iss. 1. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. – P. 145–164. – DOI: 10.1007/978-3-031-89836-5_9.
10. Вытовтов А.В., Куприяненко П.С., Королев Д.С. Перспективы использования искусственного интеллекта в лазерных локаторах для мониторинга ледостава // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 24 мая 2024 г. – Железногорск, 2024. – С. 364–366. – EDN: TAQKHT.

11. A comprehensive review of remote sensing technologies for improved geological disaster management / S. Kumari, S. Agarwal, N.K. Agrawal, A. Agarwal, M.C. Garg // *Geological Journal*. – 2025. – Vol. 60 (1). – P. 223–235. – DOI: 10.1002/gj.5072.
12. Характеристики трендов в динамике излучения полимерных планарно-волноводных структур с люминофорами для ультрафиолетовых информационных систем при длительных натуральных испытаниях / А.В. Бритвин, Н.С. Никитенко, А.Б. Поллер, Б.В. Поллер, Н.В. Шахов // *Проблемы информатики*. – 2022. – № 3 (56). – С. 5–13. – DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-5-13. – EDN: IZOMFV.
13. Bandwidth limits of luminescent solar concentrators as detectors in free-space optical communication systems / M. Portnoi, P.A. Haigh, T.J. Macdonald, F. Ambroz, I.P. Parkin, I. Darwazeh, I. Papakonstantinou // *Light: Science and Applications*. – 2021. – Vol. 10. – P. 3. – DOI: 10.1038/s41377-020-00444-y.
14. He C., Collins S., Murata H. Fluorescent antenna based on Förster resonance energy transfer (FRET) for optical wireless communications // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32. – P. 17152–17164. – DOI: 10.1364/OE.523128.
15. Акустооптическое взаимодействие на инфразвуке в задачах лазерного экологического мониторинга / М.С. Хайретдинов, Б.В. Поллер, Б.Д. Борисов, А.В. Бритвин // *Автометрия*. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 91–99. – DOI: 10.15372/AUT20200610. – EDN: VHPXTC.
16. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard / A.V. Britvin, B.D. Borisov, B.V. Poller, A.B. Poller, M.S. Khairretdinov, A.S. Khokhryakov // *Modern problems of laser physics – MPLP-2021: The IX International Symposium technical digest, Novosibirsk, 22–28 August, 2021*. – Novosibirsk, 2021. – P. 130–131. – EDN: TVRFNG.
17. Экспериментальные характеристики лазерной атмосферно-волоконной системы обнаружения акустических инфразвуковых колебаний в задачах геоэкологического мониторинга / А.В. Бритвин, С.И. Коняев, Б.В. Поллер, А.Б. Поллер, М.С. Хайретдинов // *Автометрия*. – 2023. – Т. 59, № 6. – С. 74–79. – DOI: 10.15372/AUT20230608. – EDN: NRCTZP.
18. Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах / под общ. ред. А.А. Землянова. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2012. – 401 с. – ISBN 978-5-94458-114-3. – EDN: QKLBLF.
19. Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности / А.Г. Борзилов, П.А. Коняев, В.П. Лукин, Е.Л. Соин // *Оптика атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 36, № 7. – С. 557–562. – DOI: 10.15372/AOO20230704. – EDN: KKKFMJ.
20. Хайретдинов М.С., Копылова О.А. Статистический анализ сигналов в геомониторинговых системах: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025. – 127 с. – ISBN 978-5-7782-5406-0.
21. Воскобойникова Г.М., Хайретдинов М.С. Апостериорные алгоритмы для решения задач совместного обнаружения и оценивания сейсмических волн // *Сибирский журнал промышленной математики*. – 2015. – Т. 18, № 4 (64). – С. 9–17.

Бритвин Александр Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН, доцент кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, оптическая связь, оптические датчики, оптические измерения акустических, сейсмических полей. Имеет более 60 печатных работ и патентов. E-mail: a.v.britvin@yandex.ru

Копылова Оксана Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории геофизической информатики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – геоинформатика, геоэкология, статистический анализ данных, распознавание образов. Имеет около 80 публикаций. E-mail: oksana@org.sgcc.ru

Никитенко Никита Сергеевич, ведущий инженер Института лазерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – оптоэлектроника, лазерная физика, фотолуминофоры. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: nikitenskons@mail.ru

Поллер Борис Викторович, доктор технических наук, заведующий лабораторией лазерных информационных систем Института лазерной физики СО РАН, профессор

кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, оптическая связь, оптические измерения акустических, сейсмических полей. Имеет более 200 печатных работ и патентов, ряд внедренных радио и оптоэлектронных систем. E-mail: lablis@mail.ru

Поллер Андрей Борисович, младший научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – лазерная физика, оптическая связь, оптические измерения акустических, сейсмических полей. Имеет 15 печатных работ. E-mail: poller85@mail.ru

Хайретдинов Марат Саматович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – волновые геофизические процессы, геоинформатика, геоэкология, статистический анализ данных, распознавание образов. Имеет около 400 научных работ. E-mail: marat@opg.sgcc.ru

Шастин Леонид Васильевич, ведущий инженер Института лазерной физики СО РАН, специалист Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области. Основное направление научных исследований – оптоэлектроника, лазерная физика, УФ-излучатели для атмосферных информационных линий. Имеет 5 печатных работ. E-mail: leonid_shastin@mail.ru

Britvin Aleksandr V., PhD (Eng.), senior researcher at the Institute of Laser Physics SB RAS, associate professor at the Department of Laser Systems, Novosibirsk State Technical University. The main area of his scientific research is laser physics, optical communications, optical sensors, and optical measurements of acoustic and seismic fields. He has more than 60 publications and patents. E-mail: a.v.britvin@yandex.ru

Kopylova Oksana A., a junior researcher at the Laboratory of Geophysical Informatics in the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, She is a senior lecturer at the Department of Computer Engineering in the Novosibirsk State Technical University. Her main research areas are geoinformatics, geocology, statistical data analysis, and pattern recognition. She has about 80 publications. E-mail: oksana@opg.sgcc.ru

Nikitenko Nikita S., senior engineer at the Institute of Laser Physics SB RAS. The main research areas are optoelectronics, laser physics, and photoluminophores. He has more than 10 publications. E-mail: nikitenkons@mail.ru

Poller Boris V., D. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory of Laser Information Systems at the Institute of Laser Physics SB RAS, Professor. the Department of Laser Systems, Novosibirsk State Technical University. The main area of his scientific research is laser physics, optical communication, optical measurements of acoustic and seismic fields. He has more than 200 publications and patents, and a number of implemented radio and optoelectronic systems. E-mail: lablis@mail.ru

Poller Andrey B., a junior researcher at the Institute of Laser Physics SB RAS, his main research area is laser physics, optical communication, optical measurements of acoustic and seismic fields. He has 15 printed works. E-mail: poller85@mail.ru

Khayretdinov Marat S., D. Sc. (Eng.), chief researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Professor at the Department of Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His main research areas are wave geophysical processes, geoinformatics, geocology, statistical data analysis, and pattern recognition. He has published about 400 scientific papers. E-mail: marat@opg.sgcc.ru

Shastin Leonid V., a leading engineer at the Institute of Laser Physics SB RAS, a specialist at the Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region. His main research areas are optoelectronics, laser physics, and UV emitters for atmospheric information lines. He has 5 printed works. E-mail: leonid_shastin@mail.ru

Properties of atmospheric optical lines for acousto-optical monitoring systems of hazardous natural and anthropogenic processes*

A.V. BRITVIN^{1,3,a}, O.A. KOPYLOVA^{2,3,b}, N.S. NIKITENKO^{1,c}, B.V. POLLER^{1,3,d},
A.B. POLLER^{1,e}, M.S. KHAYRETDINOV^{2,3,f}, L.V. SHASTIN^{1,4,g}

¹ Institute of Laser Physics SB RAS, 15b Academician Lavrentiev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Academician Lavrentiev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

⁴ Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region, 18 Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630004, Russian Federation

^a a.v.britvin@yandex.ru

^b oksana@opg.sbcc.ru

^c nikitensk@mail.ru

^d lablis@mail.ru

^e poller85@mail.ru

^f marat@opg.sbcc.ru ^g leo-

nid_shastin@mail.ru

Abstract

For predicting hazardous natural and anthropogenic processes—such as landslides, rock-falls, avalanches, hurricanes, floods, and structural deformations—wireless communication lines for remote measurements in difficult terrain conditions are essential. In this context, the application of atmospheric optical measurement systems in the ultraviolet (UV) and infrared (IR) ranges is a promising approach.

This article is devoted to the development and experimental validation of advanced remote optical and acousto-optical monitoring methods for predicting and controlling hazardous natural and technogenic processes. Two key areas are considered. The first area is associated with the laser-based monitoring of hazardous deformations and displacements of objects, such as mountain slopes, bridges, and dams. For this purpose, a method using a system of interconnected retroreflectors is proposed, where a reference reflector is installed in an area with a low probability of deformation, and a control reflector is placed in a potentially hazardous zone.

The second area is aimed at developing a laser-based method for detecting acoustic precursors of dangerous events, such as hurricanes and storms, by registering infrasonic oscillations. The method is based on the precision measurement of fluctuations in the propagation time of laser pulses, which are stabilized by a high-precision frequency standard, in an atmospheric line with a retroreflector.

The parameters of fluctuations and attenuation of optical pulses in the range from 0.28 to 1.55 μm were investigated on mountain paths with retroreflectors, ranging in length from 0.05 km to 8 km and at altitudes from 1.1 km to 2.1 km. The characteristics of an optical communication line with a UAV for video monitoring of objects in over-the-horizon zones were obtained. For detecting precursors of hurricanes and storms in the infrasonic range, the study of atmospheric synchronous laser lines with a frequency standard is of significant interest. Measurements of the optical measurement systems were carried out on the territory of the research test site of the Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ILP SB RAS) in the Altai Mountains and on the laser test bench at the ILP SB RAS building in Novosibirsk.

Keywords: optical monitoring, laser control, optical atmospheric line, retroreflector, frequency standard, infrasound, object deformation, emergency situation, electromagnetic interference resistance, spark-proof and explosion-proof equipment, remote monitoring

* Received 14 October 2025.

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation. (HIOKTP Reg. № 121033100068-7).

REFERENCES

1. Bogoslovskii V.A., Zhigalin A.D., Khmelevskii V.K. *Ekologicheskaya geofizika* [Environmental geophysics]. Moscow, Moscow State University Publ., 2000. 256 p. ISBN 5-211-04282-4.
2. Rozhdestvin V.N., ed. *Optiko-elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical and electronic systems for environmental monitoring]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. ISBN 5-7038-1497-9.
3. Kazaryan R.A., Oganeyan A.V., Pogosyan K.P., Milyutin E.R. *Opticheskie sistemy peredachi informatsii po atmosfernomu kanalu* [Optical systems for transmitting information through the atmospheric channel]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 208 p.
4. Poller B.V. [Characteristics of the propagation of ultraviolet radiation in the near-surface atmosphere]. *Napravleniya razvitiya lazernykh i millimetrovykh sistem i sredstv v tekhnike peredachi informatsii i meditsine* [Directions for the development of laser and millimeter-wave systems and tools in information transmission technology and medicine]. Proceedings of the conference, October 3–5, 1995. Voronezh, 1996, p. 48. (In Russian).
5. Britvin A.V., Konyaev S.I., Nikitenko N.S., Povazhaev A.V., Poller B.V., Shchetinin Yu.I. Metody postroyeniya i eksperimental'nye kharakteristiki ul'trafiioletovykh atmosfernykh linii svyazi [Methods of construction and experimental characteristics of ultraviolet atmospheric communication]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2019, no. 1, pp. 21–25. DOI: 10.18127/j20700784-201901-03.
6. Kupriyanova O.V., Levenets A.V., Chye E.U. Modelirovanie sistem peredachi dannykh s adaptatsiei k sostoyaniyu kanala [Simulation of data transmission systems with the adaption to the communication channel state]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (62), pp. 120–132. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-120-132.
7. Rodionov I.D., Rodionov A.I., Rodionova I.P., Shestakov D.V., Peskov V.D., Egorov V.V., Kalinin A.P., Matveeva N.A. Prokhozhdenie UF-S, vidimogo i blizhnego infrakrasnogo izlucheniya cherez atmosferu [Passage of UV-C, visible, and near-infrared radiation through the atmosphere]. *Khimicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2019, vol. 38, no. 7, pp. 30–36. DOI: 10.1134/S0207401X19070136. (In Russian).
8. Lee S.-J., Han Y.-S., Kim J.-S., Yun H.-S. High-resolution flood risk assessment in small streams using DSM–DEM integration and airborne LiDAR data. *Sustainability*, 2025, vol. 17 (21). DOI: 10.3390/su17219616.
9. Carlà T., Beni T., Lombardi L., Nocentini M., Gigli G. Monitoring and characterization of surface movements in rock slopes. *Progress in landslide research and technology*. Vol. 4, Iss. 1. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 145–164. DOI: 10.1007/978-3-031-89836-5_9.
10. Vytovtov A.V., Kuprienko P.S., Korolev D.S. [Prospects of using artificial intelligence in laser locators for monitoring ice formation]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem bezopasnosti* [Young scientists in solving urgent security problems]. Proceedings of the VI All-Russian scientific and practical conference, Zheleznogorsk, May 24, 2024. Zheleznogorsk, 2024, pp. 364–366. (In Russian).
11. Kumari S., Agarwal S., Agrawal N.K., Agarwal A., Garg M.C. A comprehensive review of remote sensing technologies for improved geological disaster management. *Geological Journal*, 2025, vol. 60 (1), pp. 223–235. DOI: 10.1002/gj.5072.
12. Britvin A.V., Nikitenko N.S., Poller A.B., Poller B.V., Shakhov N.V. Kharakteristiki trendov v dinamike izlucheniya polimernykh planarno-volnovodnykh struktur s lyuminoforami dlya ul'trafiioletovykh informatsionnykh sistem pri dlitel'nykh naturnykh ispytaniyakh [Characteristics of trends in the radiation dynamics of polymer planar waveguide structures with phosphors for ultraviolet information systems during long-term field tests]. *Problemy informatiki = Problems of Informatics*, 2022, no. 3 (56), pp. 5–13. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-5-13.
13. Portnoi M., Haigh P.A., Macdonald T.J., Ambroz F., Parkin I.P., Darwazeh I., Papakonstantinou I. Bandwidth limits of luminescent solar concentrators as detectors in free-space optical communication systems. *Light: Science and Applications*, 2021, vol. 10, p. 3. DOI: 10.1038/s41377-020-00444-y.
14. He C., Collins S., Murata H. Fluorescent antenna based on Förster resonance energy transfer (FRET) for optical wireless communications. *Optics Express*, 2024, vol. 32, pp. 17152–17164. DOI: 10.1364/OE.523128.
15. Khairtdinov M.S., Poller B.V., Borisov B.D., Britvin A.V. Akustoopticheskoe vzaimodeistvie na infrazvuke v zadachakh lazernogo ekologicheskogo monitoringa [Acousto-optic interaction

in infrasound for laser environmental monitoring]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 91–99. DOI: 10.15372/AUT20200610. (In Russian).

16. Britvin A.V., Borisov B.D., Poller B.V., Poller A.B., Khairtdinov M.S., Khokhryakov A.S. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard. *Modern Problems of Laser Physics – MPLP-2021: IX International symposium technical digest*, Novosibirsk, 22–28 August, 2021, pp. 130–131.

17. Britvin A.V., Konyaev S.I., Poller B.V., Poller A.B., Khairtdinov M.S. Eksperimental'nye kharakteristiki lazernoi atmosferno-volokonnoi sistemy obnaruzheniya akusticheskikh infrazvukovykh kolebaniy v zadachakh geoeologicheskogo monitoringa [Experimental characteristics of an atmospheric fiber laser system for detecting acoustic infrasonic oscillations for geoecological monitoring]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2023, vol. 59, no. 6, pp. 74–79. DOI: 10.15372/AUT20230608. (In Russian).

18. Zemlyanov A.A., ed. *Rasprostranenie opticheskikh voln v neodnorodnykh, sluchainykh, nelineinykh sredakh* [Propagation of optical waves in inhomogeneous, random, and nonlinear media]. Tomsk, Institute of atmospheric optics SB RAS Publ., 2012. 401 p. ISBN 978-5-94458-114-3.

19. Borzilov A.G., Konyaev P.A., Lukin V.P., Soin E.L. Izmereniya parametrov atmosfery na protyazhennoi trasse. II. Opticheskie izmereniya urovnya turbulentsi [Measurements of atmospheric parameters along an extended path. II. Optical measurements of turbulence]. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, vol. 36, no. 7, pp. 557–562. DOI: 10.15372/AOO20230704.

20. Khairtdinov M.S., Kopylova O.A. *Statisticheskii analiz signalov v geomonitoringovykh sistemakh* [Statistical analysis of signals in geomonitoring systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2025. 127 p. ISBN 978-5-7782-5406-0.

21. Voskoboynikova G.M., Khayrettdinov M.S. Aposteriornye algoritmy dlya resheniya zadach sovmenstnogo obnaruzheniya i otsenivaniya seismicheskikh voln [A posteriori algorithms for solving problems of joint detection and estimation of seismic waves]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2015, vol. 18, no. 4 (64), pp. 9–17.

Для цитирования:

Свойства атмосферных оптических линий для систем акустооптического мониторинга опасных природных и антропогенных процессов / А.В. Бритвин, О.А. Копылова, Н.С. Никитенко, Б.В. Поллер, А.Б. Поллер, М.С. Хайретдинов, Л.В. Шастин // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 2 (102). – С. 99–114. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-99-114.

For citation:

Britvin A.V., Kopylova O.A., Nikitenko N.S., Poller B.V., Poller A.B., Khayrettdinov M.S., Shastin L.V. Svoistva atmosferynykh opticheskikh linii dlya sistem akustoopticheskogo monitoringa opasnykh prirodnykh i antropogennykh protsessov [Properties of atmospheric optical lines for acousto-optical monitoring systems of hazardous natural and anthropogenic processes]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 2 (102), pp. 99–114. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-99-114.