

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.3

Экспериментальные характеристики атмосферных лазерных линий на трассах научно-исследовательского полигона ИЛФ СО РАН в Горном Алтае для систем экологического мониторинга

А.В. Бритвин¹, Б.В. Поллер^{✉ 1, 2}, А.Б. Поллер¹, Н.В. Шахов^{1, 2*}

¹Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б

²Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

Поступила в редакцию 31.07.2024;

после доработки 23.09.2024;

принята к печати 30.09.2024

В статье приводятся основные результаты исследований энергетических и временных характеристик передачи лазерных импульсов в диапазоне от 0,36 до 1,55 мкм на горизонтальных и наклонных горных трассах длиной от 0,05 до 8,5 км на высотах от 1100 до 2100 м на научно-исследовательском полигоне Института лазерной физики СО РАН «Кайтанак» в Горном Алтае. Измерены характеристики оптических помех в УФ–А-диапазоне на разных высотах. Получены экспериментальные оценки приема оптических сигналов в диапазоне 0,36–0,45 мкм на беспилотном летательном аппарате при удалении до 1,5 км от наземных лазерных излучателей. Приведены параметры ретрорефлекторов после длительной эксплуатации в течение нескольких лет на удаленных горных постах. Полученные данные открывают новые возможности построения систем лазерного экологического мониторинга для дистанционного контроля опасных деформаций горных склонов и камнепадов, накопления снега, возникновения пожаров, ураганов и т.п.

Ключевые слова: лазерная атмосферная линия, оптические помехи, оптические ретрорефлекторы, оптическая связь с БПЛА, лазерный экологический мониторинг; laser atmospheric line, optical interference, optical retroreflector, optical communication with UAV, laser environmental monitoring.

Введение

Развитие методов прогнозирования опасных природных и антропогенных процессов в горной местности требует больших объемов и оперативности информации о пространственных характеристиках окружающей среды: опасных деформациях горных склонов, накоплении снега, паводков, возникновении пожаров, камнепадов, ураганов и т.п. Значительные возможности здесь открывают лазерные информационно-измерительные методы на основе атмосферных лазерных линий [1–6]. Экспериментальные характеристики таких линий на горных трассах, с установленными в контрольных

точках ретрорефлекторами, дают возможность обоснованно определить параметры лазерных систем для экологического мониторинга.

В работах [2–4, 6, 7] по распространению лазерного излучения в атмосфере получены оценки влияния турбулентности, осадков, туманов, облачности на ослабление и флуктуации интенсивности лазерного излучения. Публикаций по результатам экспериментальных исследований распространения лазерного излучения на горных трассах немного. Так, для горной трассы протяженностью ~3 км (высота горы 0,68 км) в районе Байкала определены [7] характеристики атмосферной турбулентности, существенно отличающиеся от значений для приземных трасс. Установлено, что структурная характеристика коэффициента преломления может изменяться более чем на два порядка. Крупные неоднородности рельефа создают роторные возмущения воздушных течений на трассах.

* Александр Викторович Бритвин (a.v.britvin@yandex.ru); Борис Викторович Поллер (lablis@mail.ru); Андрей Борисович Поллер (poller85@mail.ru); Николай Владимирович Шахов (nikolay.shakhov@gmail.com).

Для горных трасс на Северном Кавказе протяженностью до 4,2 км и высотой до 1,98 км получены характеристики ослабления сигналов в УФ–С, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [8]. Для горной трассы протяженностью 1,5 км отмечается значительное уменьшение затухания УФ–С-сигнала при увеличении высоты трассы до 0,74 км по сравнению с наземной трассой такой же протяженностью. Установлено, что на трассах с дождем и снегом ослабление УФ–С-сигналов незначительно по сравнению с большим затуханием видимых и инфракрасных сигналов. В работе [9] также отмечается, что на трассе с дождем и снегом при метеорологической дальности видимости (МДВ) менее 80 м наблюдалось прохождение УФ–С-излучения на расстоянии 1 км. Это позволяет использовать УФ-излучение для диагностики в условиях тумана и облачности на дальности до нескольких километров.

В [10] описаны телекоммуникационные лазерные атмосферные линии со скоростями до 10 Гбит/с в диапазоне 0,8–1,55 мкм, а также наземно-космические лазерные линии. Для увеличения их устойчивости и пропускной способности активно развиваются методы формирования атмосферных вихревых лазерных пучков [11].

На научно-исследовательском полигоне (НИП) Института лазерной физики (ИЛФ) СО РАН «Кайтанак» (Горный Алтай) в начале 1990-х гг. были сооружены постаменты с оптическими платформами. Они позволяли организовать трассы длиной от 0,05 до 8,5 км на высотах от 1100 до 2100 м. В 2000–2010 гг. на НИП под научным руководством академика С.Н. Багаева исследовалось влияние гравитации (перепада высот в 1000 м на НИП)

на параметры оптического стандарта частоты. В 2005–2010 гг. изучались лазерные интерферометрические методы дистанционной оценки микроперемещений постаментов с зеркальными отражателями для анализа деформаций горных склонов. На НИП также изучалась лазерная наземно-космическая телекоммуникационная и квантово-криптографическая связь со спутниками [10]. Развитию метода лазерного обнаружения в атмосфере акустических колебаний с помощью лазерных линий, синхронизированных стандартом частоты, посвящены работы [12, 13].

В последние годы на НИП осуществляются экспериментальные измерения характеристик лазерных линий, оптических фоновых помех и характеристик ретрорефлекторов разных типов. При выборе аппаратуры и методов измерений учитываются специфика измерений в горной местности и удаленность НИП «Кайтанак» от ИЛФ СО РАН почти на 1000 км. Схемы горных трасс представлены на рис. 1. Из-за отсутствия дорог до постаментов используются малогабаритные приборы с автономным питанием.

Цели работы – получение оценок временных и энергетических параметров лазерных атмосферных импульсных линий в диапазоне длин волн 0,36–1,5 мкм на наклонных трассах длиной 1,6 и 8,5 км от полигона на высоте 1,1 км н.у.м. до гор высотой 1,3 и 2,1 км н.у.м. соответственно для определения параметров излучающих и приемных систем лазерной диагностики объектов, а также экспериментальные оценки оптических ультрафиолетовых (УФ) помех и оптических спектральных характеристик ретрорефлекторов на горных трассах.

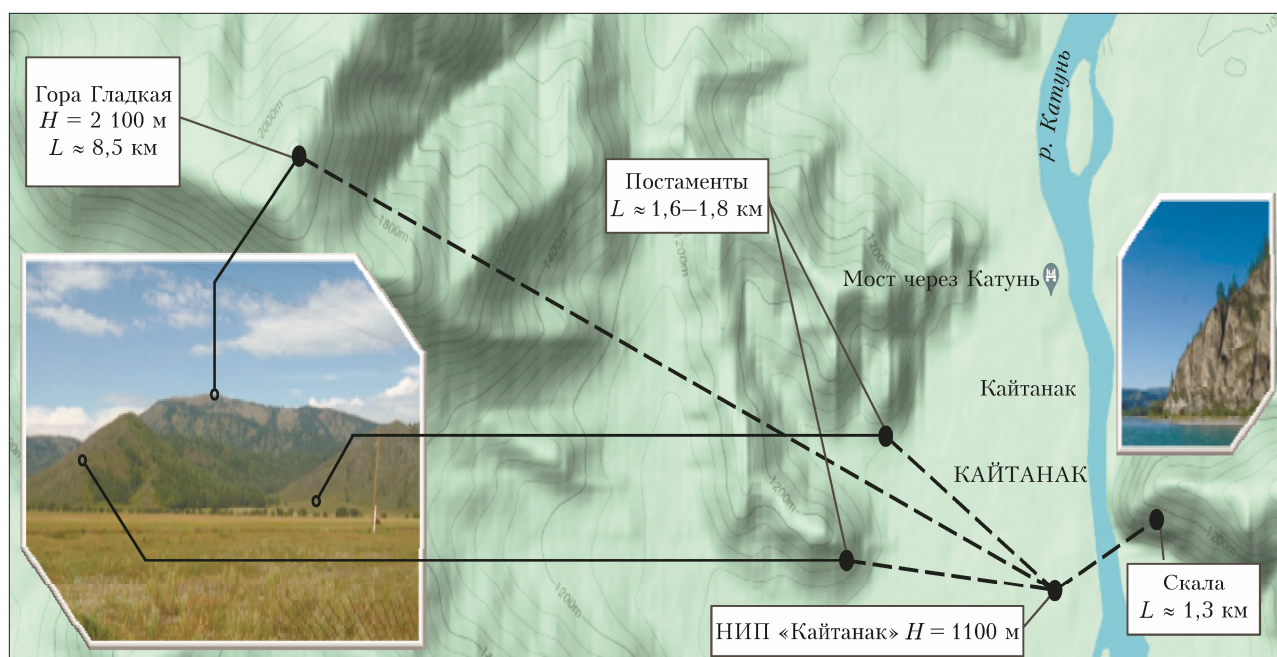


Рис. 1. Схема горных трасс на полигоне ИЛФ СО РАН «Кайтанак» в Горном Алтае. H – высота; L – длина трассы (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.12>)

Материалы и методы

Аппаратура и методы оценки оптических помех

Для оценки оптических помех в УФ-диапазоне использовался УФ-радиометр «ТКА-ПКМ», предназначенный для измерения энергетической освещенности в диапазоне от 10 до 40000 мВт/м² в спектральных диапазонах УФ–А, УФ–В, УФ–С. В видимом диапазоне применялся люксметр «ТКА-Люкс». Масса каждого из приборов составляет не более 0,4 кг, рабочий диапазон температур — от 0 до 40 °С. Для оценки метеоусловий при проведении измерений использовались данные метеостанции на полигоне. Метеорологическая дальность видимости во время измерений определялась визуально с учетом известных расстояний до местных ориентиров (до горы высотой 2,1 км на расстоянии около 8,5 км и др.).

Аппаратура и методы оценки параметров оптических атмосферных линий

Длины волн излучателей выбирались с учетом окон прозрачности атмосферы и возможности использования излучателей на горных вершинах и в дальнейшем в системах дистанционного лазерного контроля объектов экологии. В УФ-диапазоне использовались одиночные излучатели и матрица из девяти УФ-диодов на длине волны $\lambda = 360$ нм общей мощностью до 1,5 Вт. Матрица размещалась в оптических системах для формирования оптических пучков с разными углами расходимости. Также применялись малогабаритные лазеры Class 111 с автономным питанием с углами расходимости от 3 до 20 мин и $P_0 \geq 100$ мВт ($\lambda = 405 \pm 10$ и 532 ± 10 нм) и ≥ 1 Вт ($\lambda = 450$ нм). На $\lambda = 808$ нм с разными оптическими системами использовался лазер АТС–С8000-200-ТОО-808 с максимальной мощностью до 8 Вт и шириной спектра 2,1 нм. На $\lambda = 1,55$ мкм использовался оптический модуль с углом расходимости 30 мин с полупроводниковым лазером на $\lambda = 1,55$ мкм мощностью 100 мВт. Импульсная модуляция оптического излучения производилась для оценки параметров флуктуации амплитуд импульсов на временных интервалах и с учетом ограничений по емкости источников питания, которые надо было поднимать по крутым склонам. На $\lambda = 4,5$ мкм использовались приемопередающие модули телекоммуникационной аппаратуры «ТИРС» DTS-100 FD (г. Томск), частота 74–75,5 ГГц.

Лазерные импульсы принимала оптическая система телескопа ТАЛ 1М с главным зеркалом диаметром 110 мм, которая позволяла наводиться на удаленный источник излучения, а также принимать сигналы на различные фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или фотодиоды с усилителями. В каче-

стве оптической системы приемника на расстояниях менее 2 км использовалась также оптика от оптической атмосферной линии связи OCC2 (диаметр линзы 80 мм; фокусное расстояние 200 мм). Для оценки параметров принятых сигналов на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) вертолетного типа применялась видеокамера SJCAM SJ4000, HD1080p с чувствительностью около 10^{-2} лк, а на БПЛА самолетного типа — Soni 1/3 CMOS Sensor с чувствительностью 10^{-4} лк в видимом диапазоне. В УФ-диапазоне использовались также пленочные люминесцентные преобразователи лазерных импульсов, разработанные в ИЛФ СО РАН [14].

Методы измерений энергетических и временных параметров принятых оптических импульсов в УФ-, видимом и ИК-диапазонах на трассах от 8,5 до 0,05 км на высотах от 2100 до 1100 м базировались на оценке МДВ и метеоусловий, а также на контроле юстировки лазерной линии для достижения максимального и стабильного принятого сигнала. Для регистрации параметров сигналов применялись принципы репрезентативных выборок с целью исключения влияния случайных факторов. Сигналы (осциллограммы) записывались на портативных осциллографах (Hantek DSO1202B, АКИП-4119/4, HDS2062M). При обработке осциллограмм оценивались текущие средние $U_{cp, i}$ и дисперсии D_i амплитуд принятых лазерных импульсов U_i на последовательных интервалах времени, где проявляется заметное колебание амплитуд импульсов из-за влияния атмосферы на наклонной горной трассе без осадков и туманов, и определялся интервал времени $T_{ст. max}$, где сохраняется почти одинаковая U_i . С помощью видеокамер на БПЛА определялись параметры мощности принятых сигналов от наземных излучателей на разных расстояниях и высотах.

Результаты и обсуждение

Оценки уровня оптических помех от Солнца

Оптические помехи в УФ–А-диапазоне измерялись на центральном постаменте полигона (1100 м н.у.м.) в августе 2016–2021 гг. на вершине горы высотой 2,1 км, а также в Академгородке г. Новосибирска (150 м н.у.м.) на крыше лабораторного корпуса ИЛФ СО РАН. Из результатов измерений следует, что увеличение высоты местности до 1100 м (НИП «Кайтанак») приводит к значительному росту оптических помех до 4–4,5 Вт/м² (на 20–30%) по сравнению с Академгородком (3–3,5 Вт/м²). Уровень солнечных помех в УФ–А-диапазоне на вершине горы высотой 2,1 км при ясном небе в полдень составлял ~5–6 Вт/м², что на 20–30% больше, чем в аналогичных условиях на центральном постаменте НИП «Кайтанак».

Оценки характеристик принятых сигналов на длинах волн 360 и 532 нм

Для передачи оптического сигнала использовался однолучевой передатчик с импульсной модуляцией на $\lambda = 365$ нм с углом расходимости $\sim 0,4^\circ$ и средней излучаемой мощностью ~ 120 мВт. Оптический сигнал принимался переносным приемником с апертурой 150 см^2 и чувствительностью ~ 60 нВт (на импульс). Измерения проводились в августе 2018 г. при МДВ > 10 км на приземной горизонтальной трассе длиной 400 м. Результаты показали, что затухание сигнала обратно пропорционально квадрату расстояния между излучателем и приемником. Следует отметить, что на флуктуации амплитуды принятых импульсов влияло перемещение летающих насекомых в выходном пучке УФ-излучателя.

Импульсный лазер на $\lambda = 532$ нм, мощностью ~ 100 мВт и углом расходимости ~ 3 мин устанавливался на вершине горы высотой 2100 м (см. рис. 1). Лазерный луч наводился на приемник на базе телескопа ТАЛ-1, располагавшийся на центральном постаменте полигона. Принятый сигнал записывался на осциллограф Hantec DSO 1202B. На вершине горы температура была значительно ниже (на $8\text{--}12^\circ\text{C}$), чем на полигоне. Визуальная оценка МДВ на трассе длиной $\sim 8,5$ км составляла более 15 км. Угол наклона лазерного луча относительно вертикали $\sim 80^\circ$, высота луча над подстилающей поверхностью изменялась в соответствии с рельефом местности и уменьшалась до 100 м, не доходя до приемника около 1 км.

Аналогичные измерения при сходных метеоусловиях проводились на трассе длиной 1,6 км. Трасса проходила от центрального постамент до постамент на склоне небольшой горы высотой ~ 150 м относительно высоты местности 1100 м с сохранением ориентации трассы в направлении на гору высотой 2100 м. Угол наклона этой трассы составил $\sim 85^\circ$.

Оценка временных и энергетических характеристик принятых импульсов осуществлялась посредством статистической обработки записей осциллограмм. В результате были получены характеристики изменения текущих средних амплитуд импульсов $U_{\text{ср.}}$ и дисперсий амплитуд импульсов D_i в зависимости от длины трассы L при сходных метеоусловиях. Эти параметры необходимы для выбора характеристик зондирующих лазерных сигналов при экологическом мониторинге.

Обработка записей для трассы длиной $\approx 8,5$ км показала, что на смежных интервалах времени по 30 мс отношение максимальной к минимальной текущих средних амплитуд $U_{\text{ср. } i}$ ($U_{\text{ср. max}}/U_{\text{ср. min}}$) изменяются в 2,1 раза, а отношение текущих дисперсий амплитуд D_i ($D_{\text{max}}/D_{\text{min}}$) — в 5,75 раза. Анализ результатов аналогичных измерений на горной трассе длиной 1,6 км показал, что $U_{\text{ср. } i}$ изменяются только в 1,35 раза, а D_i — в 3,26 раза. Отношение сигнал/шум ($U_{\text{ср.}}/U_{\text{ср. шум}}$) для принятых сигналов, как правило, было более 10.

Анализ длительности интервалов времени $T_{\text{ст. max}}$, на которых амплитуда принятых импульсов изменялась незначительно, показал что на трассе длиной 1,6 км эти интервалы были в два раза длиннее, чем на трассе 8,5 км, что свидетельствует о более низкочастотном спектре флуктуации параметров атмосферы на трассе длиной 1,6 км.

Оценки характеристик принятых сигналов на длине волны 808 нм на трассе с ретрорефлектором

Для контроля перемещения различных объектов и сред в сложных условиях перспективно использование удаленных оптических отражателей — ретрорефлекторов, устанавливаемых в контрольных точках на склонах гор, берегах рек, в пожароопасных зонах. В качестве элементов таких ретрорефлекторов испытывались полимерные катафоты из РММА и светоотражающих лент типа V-6701B. Испытания заключались в оценке изменения отражательных свойств таких ретрорефлекторов после длительного нахождения в реальных условиях эксплуатации.

Оптической системой приемника служила линза диаметром 80 мм с фокусным расстоянием 200 мм. Собранные линзой излучение фокусировалось на оптическое волокно FT600UMT (диаметр сердцевины 600 мкм) длиной 0,5 м. Поле зрения приемника $0,085^\circ$. Угол расходимости излучения лазера на $\lambda = 808$ нм составлял 1° . Ретрорефлектор из лент на пластине ставился на постамент, расположенный на склоне горы и удаленный на 1,6 км от источника.

Результаты измерений уровня отраженного сигнала от передатчика на $\lambda = 808$ нм показали высокое отношение сигнал/шум. Через 10 мин после начала мелкого дождя сигнал на трассе уменьшился более чем на 30% в основном из-за намокания отражателя.

Чтобы уточнить требования к лазерным устройствам для мониторинга уровня снега и интенсивности его таяния на территории НИП «Кайта-нак» в августе 2017 г. с помощью лазерной аппаратуры STABILA была выставлена с точностью до 1 см лазерная плоскость параллельно земле с неровным рельефом. Относительно плоскости были размещены девять вешек высотой $\sim 1,5$ м, каждая с восемью ленточными отражателями площадью ~ 8 см, что позволяет оценивать уровень снега на неровном рельефе. Аналогичные три вешки были размещены на площадке в лесной зоне рядом со зданием ИЛФ СО РАН. Контроль уровня снега по вешкам зимой 2017 г. и весной 2018 г. показал, что высота снежного покрова около ИЛФ СО РАН значительно больше, чем на полигоне. Однако динамика снижения уровня снега оказалась значительно больше на полигоне. Вешки с отражателями функционировали на площадках еще два года. При этом значительного ослабления отражения лазерных сигналов на $\lambda = 0,53$ мкм не отмечено.

Была выполнена оценка изменения отражательных свойств таких ретрорефлекторов после

длительного нахождения в реальных условиях эксплуатации. На рис. 2 представлены спектральные характеристики отражения нового ленточного ретрорефлектора 1 и рефлектора 2, находившегося под действием естественных атмосферных условий в течение двух лет (НИП «Кайтанак»).

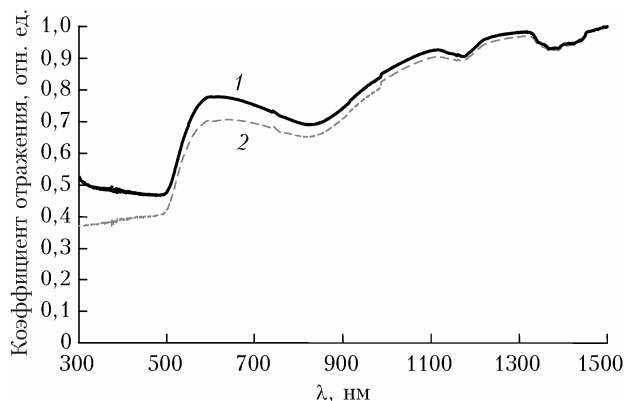


Рис. 2. Коэффициент отражения элементов ретрорефлектора: 1 – нового; 2 – после двух лет эксплуатации

Из рис. 2 видно, что происходит незначительное снижение (на 14%) отражательной способности ретрорефлектора 2 в области 500 нм.

Оценки затухания сигналов на длинах волн 1,55 мкм и 4 мм в условиях тумана (облачности)

Эксперименты по исследованию распространения ИК- (1,55 мкм) и миллиметрового (~ 4 мм) излучения в условиях тумана проводились у постаментов, находящегося у подножия горы (см. рис. 1). Расстояние между приемником и излучателем 100 м. На рис. 3 показано затухание ИК- и миллиметрового сигналов при одновременном распространении в тумане.

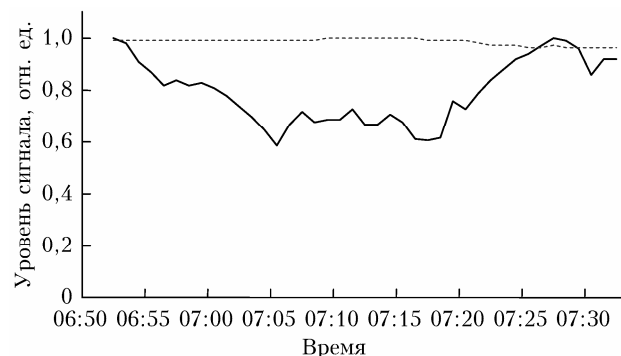


Рис. 3. Изменение уровня сигнала в атмосферном канале при проходе слоя тумана (с МДВ от 0,9 км) на высокогорной трассе 100 м для лазерного излучения на $\lambda = 1,55$ мкм (сплошная кривая) и миллиметрового излучения на $\lambda = 4$ мм (штриховая кривая)

Результаты измерений показали ослабление лазерного сигнала в тумане на 40% от первоначального значения и миллиметрового сигнала на 4%.

Расчетная оценка МДВ для такого ослабления ~ 0,9 км. Следует отметить, что слой тумана двигался вверх по горе и затем превратился в облачность над горой.

Экспериментальные характеристики принятых сигналов для построения УФ-линий связи с БПЛА

В работах [15–20] выполнены исследования оптической связи с БПЛА как в условиях прямой видимости, так и при ее отсутствии между абонентами.

Для оценки характеристик принятых сигналов на БПЛА при облучении удаленным УФ-излучателем на $\lambda = 0,36$ мкм был подготовлен и выполнен эксперимент с девятилучевым излучателем с углом расходимости 3° и импульсной мощностью ~ 1,5 Вт, направленным вертикально вверх. Сигналы от излучателя регистрировались на разных высотах УФ-видеокамерой на БПЛА. Видеокамеры были подобраны по показателю чувствительности к УФ-излучению на $\lambda = 360$ нм. Проведена оценка чувствительности восьми разных видеокамер. По максимальной чувствительности выбрана видеокамера SJCAM SJ4000 с HD1080p, произведена ее монтаж и балансировка на БПЛА DJI Phantom 2. Из-за большого угла поля зрения УФ-видеокамеры многолучевой пучок интегрировался в единое изображение УФ-излучателя, что регистрировалось на видеокамере при горизонтальном проходе БПЛА над излучателем на высотах до 100 м.

Для оценки возможности применения информационно-телекоммуникационных УФ-средств для мониторинга и создания систем лазерной ориентации и связи в условиях отсутствия прямой видимости были использованы многолучевой УФ-излучатель (360 нм) и два лазера (450 нм). Получены характеристики мощности рассеяния лазерных сигналов, принятых на БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 2 и БПЛА самолетного типа. Регистрацию сигналов проводили с помощью видеокамер, установленных на БПЛА, с чувствительностью в видимом диапазоне ~ 0,0001 лк, что приблизительно эквивалентно чувствительности в $(10^{-10} - 10^{-8})$ Вт для нашего диапазона длин волн.

Для экспериментов с БПЛА была подготовлена трасса длиной 500 м, где через каждые 100 м устанавливались стойки с солнечными фонарями, которые автоматически включались в темное время суток, освещая стойку, по которой оператор БПЛА определял расстояние до лазерных и УФ-излучателей, установленных в лабораторном корпусе под углом 30° к горизонтالي.

На постаменте размещался многолучевой УФ-излучатель ($\lambda = 360$ нм, общая мощность ~ 1,5 Вт) и соосно расположенные с ним два лазера ($\lambda = 450$ нм, мощность по 1 Вт, углы расходимости ~ $16'$ и ~ $8'$ соответственно). Лазерные пучки были соориентированы в горизонтальной плоскости с углом расходимости между ними ~ 5° . Видеокамеры на БПЛА ориентировались на прием рассеянного

сигнала от лазерных и УФ-пучков при движении снизу вверх (БПЛА вертолетного типа) через каждые 100 м и от лазерных пучков вдоль трассы (БПЛА самолетного типа).

Эксперименты с БПЛА вертолетного типа проводились при ориентации видеокамеры вертикально вверх на трассе 500 м с коррекцией по радиосвязи прохода БПЛА на лазерные пучки. Видеокамерой БПЛА уверенно фиксировалось рассеянное в атмосфере оптическое излучение от излучателя с $\lambda = 360$ нм на дистанции до 0,5 км. Эксперименты по оценке характеристик принятых сигналов на БПЛА самолетного типа от наземных лазеров с $\lambda = 450$ нм с двумя наклонными лазерными пучками показали, что пучки проходят над горой на высоте около 900 м и рассеянное излучение в диапазоне мощностей $10^{-10} - 10^{-8}$ Вт фиксируется видеокамерой БПЛА за горой (в зоне радиотени) на расстоянии около 1,5 км.

Заключение

По результатам исследований были сделаны следующие выводы.

1. При увеличении длины наклонной горной трассы от 1,6 до 8,5 км значительно увеличиваются флуктуации амплитуд принятых лазерных импульсов на $\lambda = 0,53$ мкм (в 1,5 раза) и дисперсии амплитуд импульсов (в 1,8 раза). При уменьшении длины трассы от 8,5 до 1,6 км в 2 раза увеличиваются интервалы времени с незначительно отличающейся амплитудой принятых импульсов, что свидетельствует о более низкочастотном спектре флуктуации параметров атмосферы на трассе длиной 1,6 км. Эти зависимости необходимо учитывать при выборе параметров пакетов зондирующих лазерных импульсов на контрольных наклонных трассах.

2. При распространении лазерных импульсов на $\lambda = 808$ нм на трассах длиной 800 и 1600 м с ретрорефлекторами наблюдалось высокое отношение сигнал/помеха на выходе лазерных приемников. За два года пребывания ретрорефлектора на светоотражающих лентах на постаменте на трассе 1600 м отражательная способность на $\lambda = 808$ нм уменьшилась не более чем на 15%, а в области 500 нм — 14%. Можно считать данные рефлекторы пригодными для длительного использования в системах лазерного мониторинга в горных условиях.

3. Получены экспериментальные оценки затухания на 40% лазерного излучения на $\lambda = 1,5$ мкм и миллиметрового излучения на $\lambda = 4$ мм на 4% при одновременном распространении в тумане/облачности на высоте 1200 м.

4. При наблюдениях в сходных условиях в течение нескольких лет установлено, что оптические помехи в УФ–А-диапазоне значительно возрастают (от 3–3,5 до 4–4,5 Вт/м²) с увеличением высоты местности от 150 м (г. Новосибирск, Академгородок) до 1100 м (НИП «Кайтанак») и на вершине горы 2100 м достигают 5–6 Вт/м². Для сохранения помехоустойчивости УФ лазерных линий на высо-

тах ~ 2 км необходимо компенсировать значительный рост уровня солнечной радиации путем изменения параметров оптических систем мониторинга.

5. Эксперименты по оценке характеристик принятых сигналов на БПЛА самолетного типа от наземных лазеров на $\lambda = 450$ нм с двумя наклонными лазерными пучками показали, что пучки проходят над горой на высоте ~ 900 м. Рассеянное излучение от этих двух лазерных пучков в диапазоне мощностей $(10^{-10} - 10^{-8})$ Вт фиксируется видеокамерой на БПЛА за горой (в зоне радиотени) на расстоянии ~ 1,5 км от излучателей. На матрице видеокамеры формируется изображение следа излучения, рассеянного в атмосфере, что позволяет определять положение БПЛА относительно этого луча. Это создает основу для разработки систем ориентации БПЛА с использованием нескольких оптических маяков, находящихся вне прямой видимости, при мониторинге в труднодоступных местностях.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. О.Н. Прудникову за участие в экспериментах на горных трассах на полигоне ИЛФ СО РАН «Кайтанак» в Горном Алтае по приему рассеянного лазерного излучения на собранном им БПЛА самолетного типа.

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

Список литературы

1. Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.П., Лукьянов Д.П., Корниенко А.А. Лазерные измерительные системы. М.: Радио и связь, 1981. 456 с.
2. Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
3. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М., Мионов В.Л., Балин Ю.С., Банах В.А., Белов М.Л., Копытин Ю.Д., Лукин В.П. Сигналы и помехи в лазерной локации / под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
4. Кабанов М.В. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 1. Научно-методические основы / под общ. ред. В.Е. Зуева. Томск: изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 1997. 211 с.
5. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
6. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации: учебное пособие / под ред. В.Н. Рождествина. 2-е изд., перераб. и доп.: М.: МГТУ им. Баумана, 2010. 574 с.
7. Банах В.А., Белов В.В., Землянов А.А., Креков Г.М., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Носов В.В., Суханов А.А., Фалиц А.В. Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах / под общ. ред. д.ф.-м.н., проф. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 401 с.
8. Родионов И.Д., Родионов А.И., Родионова И.П., Шестаков Д.В., Песков В.Д., Егоров В.В., Калинин А.П., Матвеева Н.А. Прохождение УФ-С, видимого и ближнего инфракрасного излучений через атмосферу //

- Химическая физика. 2019. Т. 38, № 7. С. 30–36. DOI: 10.1134/S0207401X19070136.
9. Медведев А.В., Гринкевич С.Н., Князева А.В. Особенности приборов солнечно-слепого УФ-диапазона спектра // Фотоника. 2021. Т. 15, № 6. С. 502–525. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.6.502.524.
 10. Поллер Б.В., Бритвин А.В., Борисов Б.Д., Коломников Ю.Д., Коняев С.И., Кусакина А.Е., Шергунова Н.А., Курочкин В.Л., Зверев А.В., Курочкин Ю.В., Плюсин В.Ф. Характеристики энергоинформационной модели и методов построения телекоммуникационной и квантово-криптографической лазерной системы спутниковой связи // Проблемы информатики. 2013. Т. 18, № 1. С. 69–75.
 11. Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Макенова Н.А., Веретехин И.Д. Оценка возможности передачи информации с использованием оптических вихрей при наличии фона, сформированного массивом случайно расположенных дислокаций // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 9. С. 716–725. DOI: 10.15372/AOO20210908; Kanev F.Yu., Aksenov V.P., Makenova N.A., Veretekhin I.D. Estimation of the possibility of information transfer using optical vortices in the presence of a background formed by an array of randomly located dislocations // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 3. P. 202–211.
 12. Хайретдинов М.С., Поллер Б.В., Бритвин А.В. Акустооптическая двухлучевая лазерная измерительная линия // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4, № 1. С. 235–239.
 13. Britvin A.V., Borisov B.D., Poller B.V., Poller A.B., Khairetdinov 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: The IX International Symposium Technical Digest. Novosibirsk: OOO Ofset-TM, 2021. P. 120–130.
 14. Белов В.В., Тарасенков М.В., Познахареv Е.С., Федосов А.В., Абрамочкин В.Н. Оптическая загоризонтная связь. Полевые, лабораторные и численные эксперименты в России в 2012–2022 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 10. С. 787–798. DOI: 10.15372/AOO20231001; Belov V.V., Tarasenkoy M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V., Abramochkin V.N. Non-line-of-sight optical communication: Field, laboratory, and numerical experiments in Russia in 2012–2022 // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N S1. P. S1–S12.
 15. Raj A.A.B., Krishnan P., Darusalam U., Kaddoum G., Ghassemlooy Z., Abadi M.M., Majumdar A.K., Ijaz M.A. Review – unguided optical communications: Developments, technology evolution, and challenges // Electronics. 2023. V. 12. P. 1922. DOI: 10.3390/electronics12081922.
 16. Khawaja W., Guven I., Matolak D.W., Fiebig U.-C., Schneckenburger N. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. V. 21, N 3. P. 2361–2391. DOI: 10.1109/COMST.2019.2915069.
 17. Тарасенков М.В., Познахареv Е.С., Белов В.В. Оценка качества канала атмосферной оптической связи на рассеянном излучении между земной поверхностью и беспилотным летательным аппаратом // XXVIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. 203–207. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.71.50.001.
 18. Abdelfatah R., Alshaer N., Ismail T. A review on pointing, acquisition, and tracking approaches in UAV-based FSO communication systems // Opt. Quant. Electron. 2022. V. 54. P. 571. DOI: 10.1007/s11082-022-03968-2.
 19. Britvin A.V., Nikitenko N.S., Shahov N.V., Poller B.V., Poller A.B. Characteristics of optical planar fiber luminescent antennas for laser telecommunications // Proc. of 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2023. P. 1380–1383. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347581.
 20. Tarasenkoy M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V. Non-line-of-sight atmospheric optical communication in the visible wavelength range between UAV and the ground surface // Atmosphere. 2024. V. 15, N 1. P. 21. DOI: 10.3390/atmos15010021.

A.V. Britvin, B.V. Poller, A.B. Poller, N.V. Shakhov. Experimental characteristics of atmospheric laser lines on paths of the research polygon of ILP SB RAS in Gorny Altai for environmental monitoring systems.

The main results of investigations of energy and time characteristics of laser pulse transmission in the range from 0.36 to 1.55 μm along horizontal and inclined mountain paths with lengths from 0.05 to 8.5 km at altitudes from 1100 to 2100 m at ILP SB RAS research site “Kaitanak” in the Altai Mountains are presented. The characteristics of optical interference in the UV–A range at different altitudes were measured. Experimental estimates of optical signals reception in the range of 0.36 μm and 0.45 μm by UAVs at a distance of up to 1.5 km from ground-based laser emitters are obtained. The parameters of retroreflectors for laser signals after operation for several years at remote mountain posts are given. The totality of the obtained characteristics opens new possibilities of building laser environmental monitoring systems for remote control of dangerous deformations of mountain slopes and rockfalls, snow accumulation, and occurrence of fires, storms, etc.