

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ И КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Б. Д. Борисов, Ю. Д. Коломников,
С. И. Коняев, А. Е. Кусакина, Н. А. Шергунова, В. Л. Курочкин*,
А. В. Зверев*, Ю. В. Курочкин*, В. Ф. Плюснин**

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

* Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

** Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

УДК 621.391

Рассмотрена задача обеспечения лазерной связи космических аппаратов с наземными пунктами с использованием опторadiоволновых ретрансляторов в атмосфере при наличии облачности на трассе. Исследовались методы построения лазерной линии с учетом изменения окон прозрачности атмосферы в зависимости от высоты подъема ретрансляторов. Охарактеризованы процессы преобразования энергетических, спектральных и временных характеристик принятого лазерного излучения с помощью планарно-волоконной антенны.

Ключевые слова: космические аппараты, наземно-космическая линия связи, опторadiоволновые ретрансляторы, окна прозрачности, пленочно-волоконная антенна, квантовый ключ, плавающий базис.

The problem of ensuring laser communications spacecraft with ground-based items at the clouds on the road with the use of optoradiowave repeaters in the atmosphere, as were investigated by methods of laser line, given the changes in the Windows of transparency of the atmosphere depending on the lifting height of the ORR. Describes the process of transformation of the energy, spectral and temporal characteristics adopted by laser radiation with the help of planar-fiber antenna.

Key words: spacecraft, earth-space communication line, optoradiowave repeaters, window transparency, film-fiber antenna, quantum key, floating basis.

Введение. Использование широкополосной лазерной связи космических аппаратов (КА) с наземными пунктами (НП) ограничено изменением состояния атмосферы, в частности появлением облачности, влияющей не только на скорость передачи данных в спектральных окнах прозрачности, но и на возможность самого сеанса связи. Для обеспечения лазерной связи на трассах КА — НП разрабатываются разнообразные схемы организации линии связи, в том числе с использованием промежуточных опторadiоволновых ретрансляторов (ОРР) в атмосфере (рис. 1). В такой схеме канал связи на участке КА — ОРР функционирует на оптических несущих, а на участке ОРР — НП — в СВЧ-диапазоне, обеспечивающем надежную передачу информации. В данной схеме предполагается использовать планарно-волоконные антенны (ПВА), размещенные по периметру рефлекторов спутниковых СВЧ-антенн, что позволит одновременно передавать и принимать сигналы СВЧ и оптических частот на наземный пункт и другие космические аппараты. С помощью шаров с гелием оптоволоконные ретрансляторы поднимаются выше верхней кромки облачности, где могут

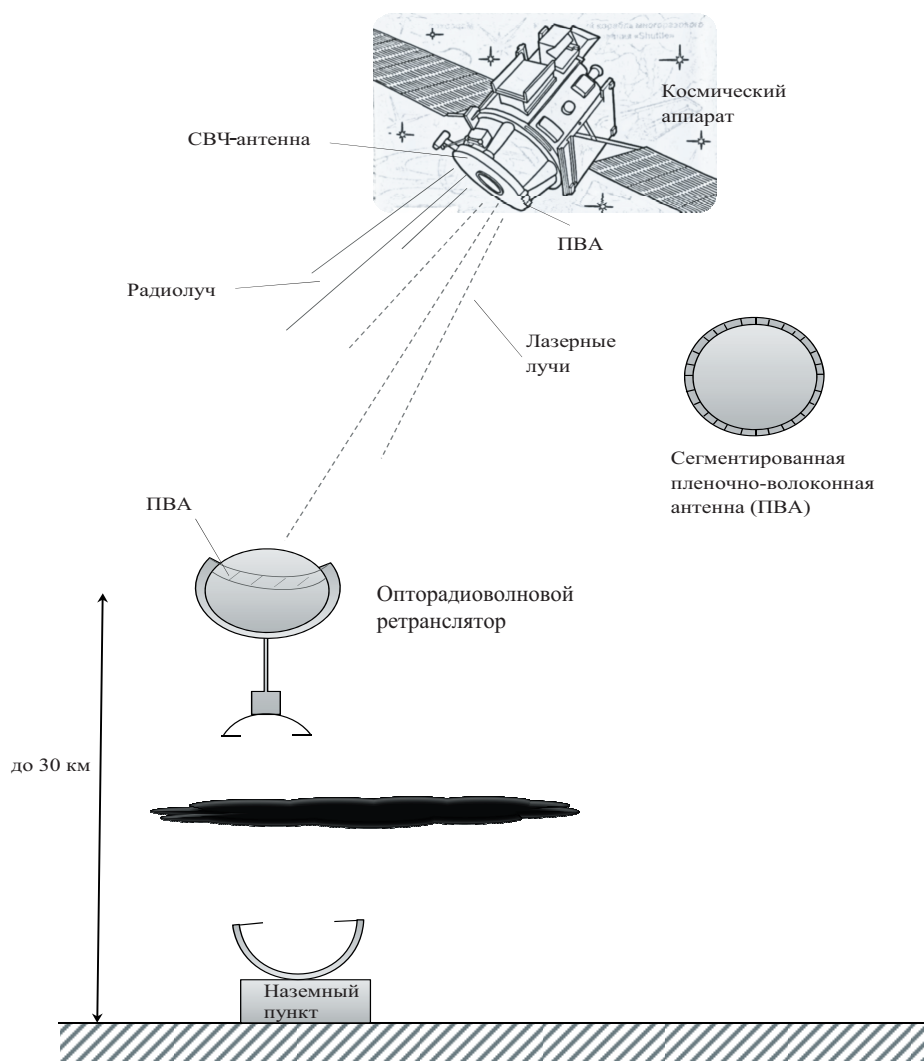


Рис. 1. Схема построения лазерной линии связи космический аппарат — наземный пункт с использованием опторadiоволновых ретрансляторов над облачностью

находиться в течение заданного времени. В верхней части шара-зонда размещается планарно-волоконная антенна, соединенная с оптоэлектронным узлом и СВЧ-приемопередатчиком для связи с НП. Наземный пункт с оптико-электронными устройствами приемопередающего тракта и квантово-криптографического лазерного канала целесообразно размещать на возвышениях местности.

На основе ранее полученных результатов был разработан эскиз планарно-волоконной антенны (ПВА), совмещенной с СВЧ-антенной (рис. 2).

Энергоинформационная модель. Энергоинформационная модель лазерной системы, предназначенной для связи наземных пунктов с космическими аппаратами, описывает закономерности преобразования энергии и информации при использовании различных лазерных диапазонов и различных высоте подъема ($3 \div 30$ км) опторadiоволновых ретрансляторов $H_{ОРР}$ и длинах трасс связи L в атмосфере и космическом пространстве ($300 \div 40\,000$ км). Кроме того, на энергоинформационную модель значительное влияние оказывают параметры естественных и искусственных электромагнитных помех в зонах размещения наземных, атмосферных и космических объектов.

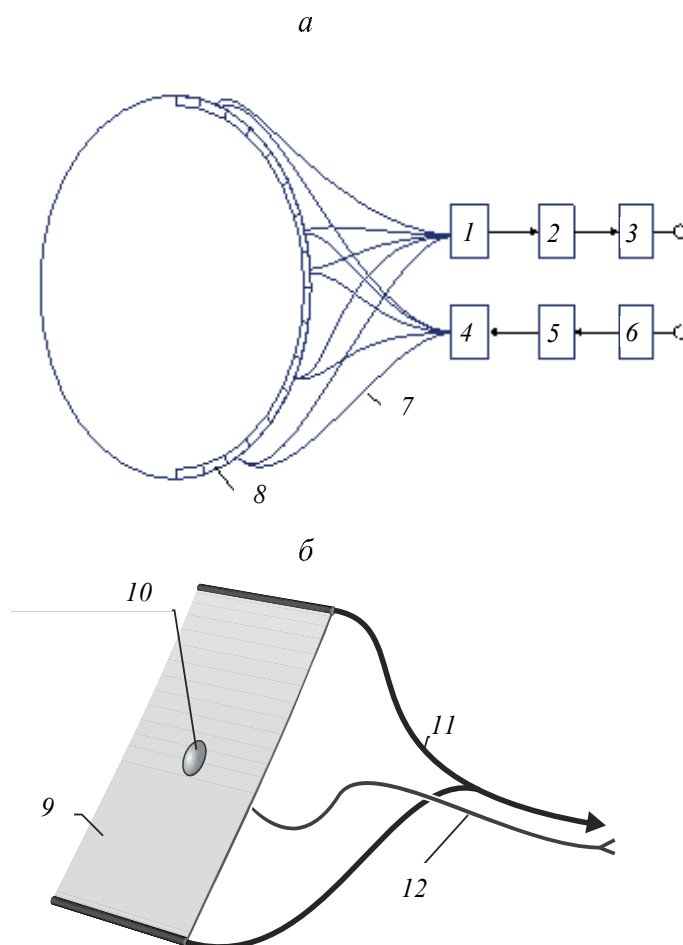


Рис. 2. Эскиз пленочно-волоконной антенны:

a — схема пленочно-волоконной антенны и приемопередающих модулей ТК- и КК-связи, *б* — эскиз пленочно-волоконной антенны; 1 — оптический анализатор, 2 — оптический усилитель, 3 — оптоэлектронный блок, 4 — оптический коммуникатор, 5 — матрица лазеров, 6 — модулятор, 7 — волоконные световоды, 8 — пленочная антенна, 9 — пленка, 10 — линзовый элемент, 11 — приемный волоконный световод, 12 — передающий волоконный световод

Данная модель может задаваться функционалом $\Psi\{(f_1, f_2, f_i, \dots, f_n); (f_{1н}, \dots, f_{п.н})\}$, имеющим определенные (известные) f_i и неопределенные (неизвестные на данном этапе) компоненты $f_{1н}$. При известных характеристиках ослабления лазерных и радиоволновых излучений на трассе с опторadiоволновым ретранслятором качественная оценка высоты $H_{ОРР}$, при которой энергия, затрачиваемая на передачу информации, будет минимальной (энергетический оптимум), может определяться по графикам, представленным на рис. 3.

Для получения оценки информационного оптимума (максимальной пропускной способности) необходимо знать зависимость оптических и радиоволновых помех $f_{i пом}(H_{ОРР})$ от высоты $H_{ОРР}$ и зависимость ослабления лазерного излучения на разных длинах волн $f(\alpha(\lambda)H_{ОРР})$ от высоты $H_{ОРР}$. На данном этапе исследований эти компоненты известны лишь частично.

Передача информации по лазерной линии связи с КА зависит и от вероятности оптического контакта. Когда эта вероятность близка к нулю, передача невозможна.

В работах [1–3] оценивалась вероятность оптического контакта $P_{ОК}$ между наземным пунктом и космическим аппаратом в условиях облачности при различных высотах подъема

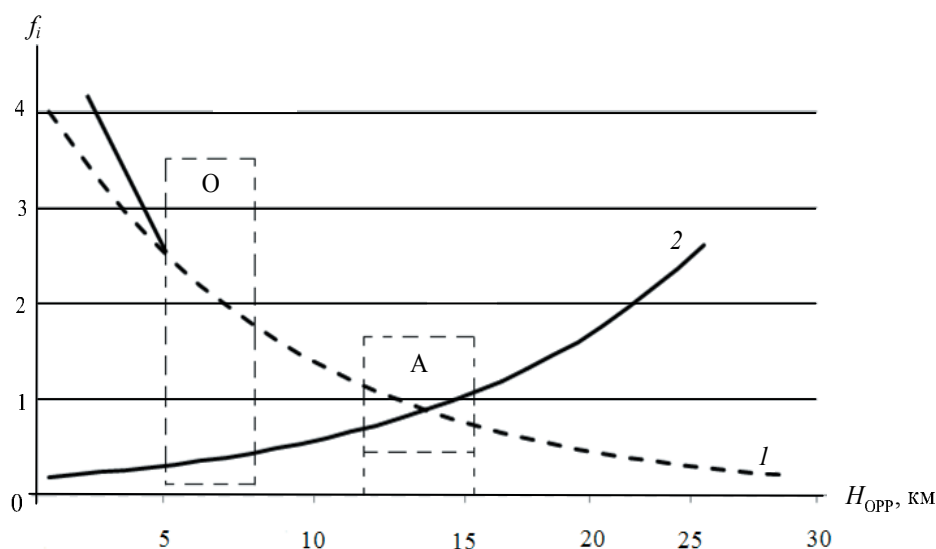


Рис. 3. Качественная оценка зон энергетического оптимума:
 1 — ослабление лазерного излучения на трассе КА — ОРР (без облачности),
 2 — ослабление РВ на трассе НП — ОРР, А — зона оптимума при чистой атмосфере,
 О — зона оптимума при появлении облачности

ретранслятора. Под оптическим контактом понимается отсутствие облачности на трассе связи, а также большая метеорологическая дальность видимости (МДВ) (более 20 км) на атмосферной части трассы связи. Установлено, что вероятность $P_{ОК}$ зависит от статистических характеристик распределения облачности по небосводу и от высоты подъема ОРР $H_{ОРР}$. Очевидно, если значение $H_{ОРР}$ больше высоты верхней кромки облачности, то $P_{ОК} \approx 1$.

В данной работе при исследовании методов построения лазерной линии впервые учитывались изменения окон прозрачности атмосферы в зависимости от высоты подъема ОРР, возможность использования на трассе нескольких ОРР, динамика движения автономных ОРР в атмосфере и параметры электромагнитных помех. Установлено, что информационные характеристики наземно-космических линий связи существенно зависят от высоты размещения ОРР, так как окна прозрачности атмосферы значительно увеличивались с увеличением высоты подъема ОРР.

В случае если высота, на которой расположены ОРР, больше высоты, на которой заканчивается озоновый слой ($H_{ОРР} > 20$ км), становится доступным диапазон длин волн менее 0,3 мкм, в котором можно получить рекордные значения скорости передачи информации как за счет большей энергооблученности апертуры приемника ОРР, так и за счет меньшего уровня фоновых помех. Расчетные оценки пропускной способности радиоволновых линий связи (в диапазоне единиц и десятков гигагерц на трассах ОРР — НП от 3 до 30 км при мощности СВЧ-передатчиков ОРР, составляющей десятки милливатт) изменяются в диапазоне от сотен мегабит в секунду до единиц гигабит в секунду в зависимости от количества ОРР и высоты их подъема.

При определении энергоинформационных характеристик лазерной линии связи, использующей квантовое кодирование (КК) данных, существенны два обстоятельства: большая длина свободного пробега фотонов по трассе связи и сохранение параметров поляризации фотонов. Для учета этих обстоятельств необходимы высокая прозрачность атмосферы на трассе и минимальные оптические помехи в рабочем диапазоне. При несоблюдении данных условий будут необходимы ретрансляторы квантового ключа по трассе связи. Соотношение

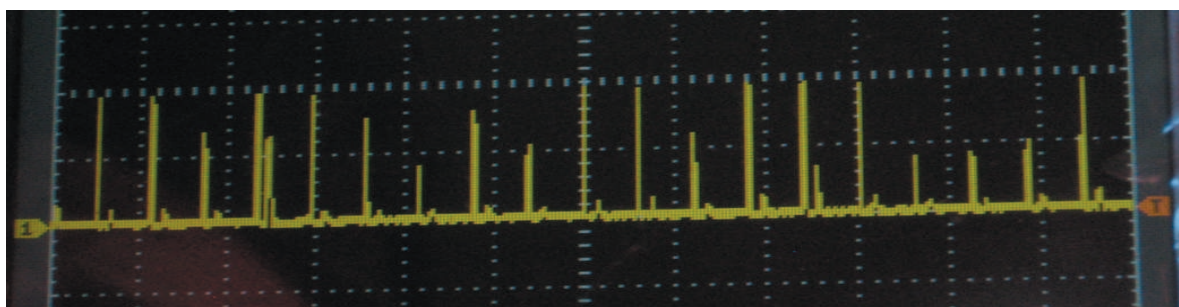


Рис. 4. Лазерные импульсы, принятые от передатчика на трассе длиной 8,5 км на вершине горы высотой 2100 м

сигнал-шум особенно важно в КК при доказательстве абсолютной секретности передачи данных. Проведен анализ секретности протоколов BB84 с ложными импульсами (decoy state) и авторского протокола с плавающими базисами. По скорости передачи более предпочтительными являются именно эти протоколы. Следует учитывать, что протокол Decoy state восприимчив к флуктуациям поглощения в атмосфере. Вследствие удобства реализации протокола с плавающим базисом для поляризационного кодирования и меньшей чувствительности к соотношению сигнал-шум использование данного протокола является перспективным решением для спутниковой связи.

Натурный эксперимент. Для определения условий функционирования лазерных систем на НП на вершине горы высотой 2100 м проведены эксперименты по распространению лазерных сигналов на длинах волн 405, 450, 530, 910 нм на горизонтальной трассе длиной 1100 м и на наклонной трассе длиной 8500 м с перепадом высоты 1100 м на полигоне “Кайтанак” в Горном Алтае. Получены характеристики оптических фонов в УФ-, видимом ближнем ИК-диапазонах на высотах 1000 и 2100 м над уровнем моря. Кроме того, дополнительно исследовались характеристики фонов в спектральном диапазоне для квантовой криптографии. Также проведены предварительные эксперименты по запуску оболочек с гелием объемом до 0,553 м³ на высоту до 60 м для оценки требований, предъявляемых к макетам привязных аэростатов на вершине горы.

Типичная осциллограмма принятого сигнала на наклонной трассе от передатчика на 450 нм, размещенного на вершине горы, показана на рис. 4. Результаты статистической обработки принятых амплитуд импульсов на 405 нм на наклонной трассе показаны на рис. 5. Видно, что распределение амплитуд импульсов одномодальное и среднеквадратичное отклонение не превышает 12,5% среднего значения амплитуд лазерных импульсов.

Для линии с квантовым криптографированием возможны различные варианты расположения приемника и передатчика. Передатчик на КА осуществляет поочередный обмен ключами с двумя приемниками на земле. Два передатчика на земле поочередно осуществляют обмен ключом с приемником на КА. Приемник и передатчик находятся на земле, в то время как на КА находится только зеркало, отражающее сигнал от передатчика к приемнику. Важными факторами для такой линии являются возмущения светового пучка в атмосфере и фоновая засветка. Наиболее значительные атмосферные возмущения, приводящие как к расширению самого пучка, так и к изменению его направления, происходят в нижних слоях атмосферы. Изменение направления пучка, наиболее критичное в начале пути, приводит к разбросу пучка (иногда на десятки метров) при передаче с НП на КА. Фоновое рассеянное излучение Луны приблизительно на пять-шесть порядков слабее солнечного фонового излучения, что делает предпочтительным передачу квантового ключа в ночное время. Тем

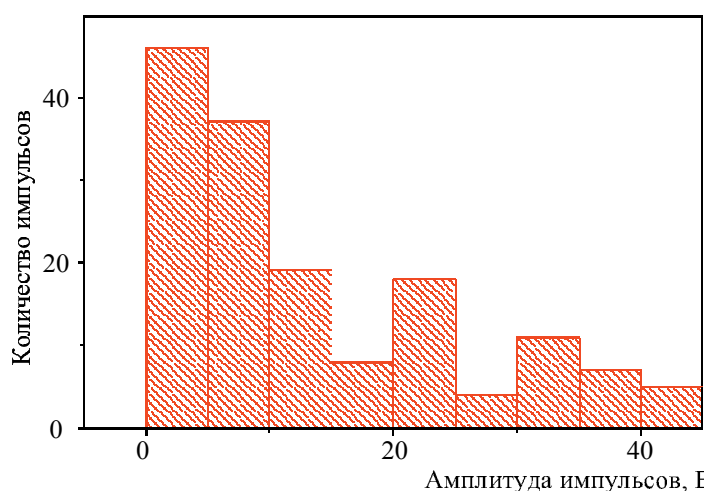


Рис. 5. Распределение амплитуд принятых лазерных импульсов на 405 нм

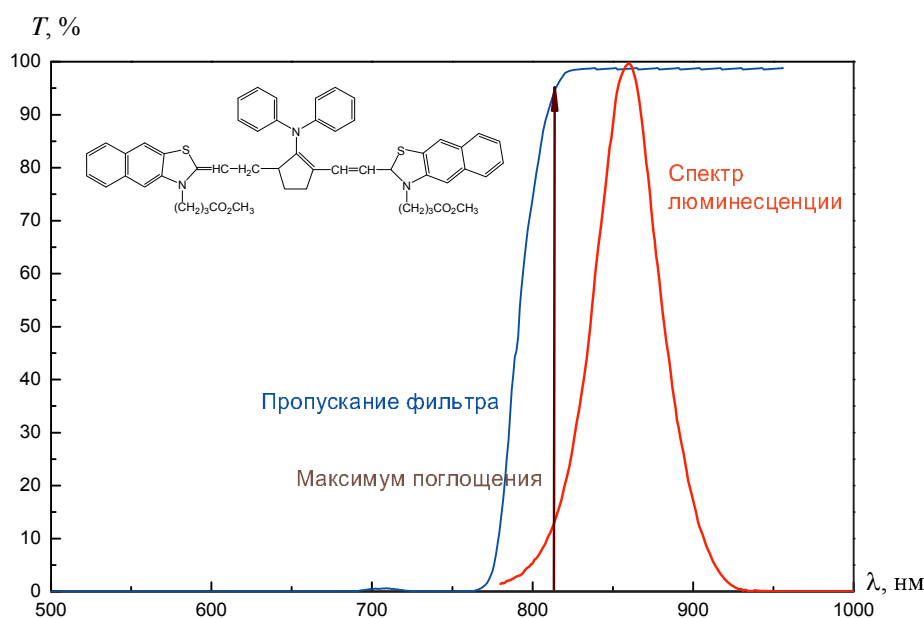


Рис. 6. Спектральные характеристики ПВА на основе красителя IR-132 на фоне пропускания оптического фильтра (*вверху* — молекулярная структура IR-132)

не менее современные технологии позволяют в дневное время подавить посторонние факторы за счет фильтрации по длине волны, уменьшения времени прихода сигнала и коллимации, но это должно быть подтверждено экспериментально. Еще одним условием возможности реализации является использование качественной системы наведения, обеспечивающей высокую степень коллимации.

Планарно-волоконная антенна. В энергоинформационной модели лазерной системы важной составляющей является физико-химическая модель ПВА. Данная модель ПВА характеризует процессы преобразования энергетических, спектральных и временных характеристик принятого лазерного излучения $P\{N(x, y, z, t), (f)\}$ в структурах синтезируемой ПВА. Для синтеза ПВА выбраны молекулы, поглощающие фотоны в ИК-области спектра, для создания фильтра в виде полимерной пленки толщиной $10 \div 100$ мкм, пропускающего излучение полупроводниковых лазеров. Преобразующие спектральные характеристики лазерного сигнала и физико-химическая структура в составе ПВА показаны на рис. 6.

Кинетика данного красителя позволяет получать высокие скорости передачи информации. В целом применение данных структур приводит к существенному улучшению энергетических и информационных параметров лазерной линии, особенно в условиях облачности.

Заключение. Таким образом, установлено, что организация канала лазерной связи космических аппаратов с наземными пунктами с использованием опторadiоволновых ретрансляторов в атмосфере позволяет обеспечить передачу информации при наличии облачности на трассе. Исследованы методы построения лазерной линии, в том числе с квантово-криптографическим кодированием данных, с учетом изменения окон прозрачности атмосферы в зависимости от высоты подъема ретрансляторов и характеристик принятого с помощью специальной планарно-волоконной антенны лазерного излучения.

Список литературы

1. Поллер Б. В., Федоров Б. В., Щетинин Ю. И. К оценке характеристик систем лазерной связи “спутник — наземный пункт” // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 25–27 апреля 2000 г. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. Т. 1. С. 718–727.

2. Багаев С. Н., Поллер Б. В., Бритвин А. В. и др. Развитие лазерных информационно-сенсорных систем с планарными волноводами и элементами микрооптики для наземно-космических телекоммуникаций и локальных сетей связи и контроля // Материалы 11-й Междунар. конф. “Проблемы функционирования информационных сетей”, Новосибирск, 30 июля – 4 августа 2006 г. Новосибирск: Прайс Курьер, 2006. С. 22–26.

3. Поллер Б. В., Бритвин А. В., Коняев С. И., Щетинин Ю. И. О характеристиках опторadiоволновых ретрансляторов для лазерных наземно-космических сетей и линий связи в условиях облачности // Материалы 7-го Мужденар. науч. конгр. “ГЕО-Сибирь”, Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г. Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. С. 64–68.

Поллер Борис Викторович — д-р техн. наук, зав. лабораторией

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Бритвин Александр Викторович — канд. техн. наук, мл. науч. сотр.

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Борисов Борис Дмитриевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: borisov@laser.nsc.ru;

Коломников Юрий Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук,

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Коняев Сергей Иванович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Кусакина Анна Евгеньевна — ведущий инженер

Института лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Шергунова Наталья Александровна — асп. Института

лазерной физики СО РАН; e-mail: lablis@mail.ru;

Курочкин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

Института физики полупроводников СО РАН; e-mail: kurochkin@isp.nsc.ru;

Зверев Алексей Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Института

физики полупроводников СО РАН; e-mail: zverev@isp.nsc.ru;

Курочкин Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, инженер Института

физики полупроводников СО РАН; e-mail: y.kurochkin@gmail.com;

Плюснин Виктор Федорович — д-р хим. наук, зав. лабораторией Института

химической кинетики и горения СО РАН; e-mail: plusnin@kinetics.nsc.ru

Дата поступления — 27.12.12