

# Бистатическая подводная оптико-электронная связь. Полевые эксперименты 2017–2018 гг.

В.В. БЕЛОВ, В.Н. АБРАМОЧКИН, Ю.В. ГРИДНЕВ, А.Н. КУДРЯВЦЕВ,  
М.В. ТАРАСЕНКОВ, А.В. ФЕДОСОВ

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН), Томск  
E-mail: belov@iao.ru

## Аннотация

Рассмотрены результаты экспериментов с подводными бистатическими оптико-электронными системами связи, в которых источником информации и полезным сигналом является рассеянное лазерное излучение. В полевых условиях получены дальности передачи информации до 40 м в озёрной воде.

**Ключевые слова:** естественная водная среда, оптическая бистатическая связь, рассеяние, вероятности и СКО ошибок связи, фотоэлектронные умножители.

## Введение

В работах [1–3] рассмотрены возможности и варианты создания подводных бистатических оптико-электронных систем связи (ОЭСС), в которых источником информации и полезным сигналом является рассеянное или отражённое оптическое излучение (в частности, лазерное)<sup>1</sup>.

Теоретические исследования передаточных свойств бистатических каналов ОЭСС ведутся в рамках теории переноса коротковолнового излучения в рассеивающих и поглощающих средах (каковыми являются атмосфера и водные среды) и теории анализа линейных систем. При этом связь между яркостью излучения в заданной точке и в заданном направлении в среде с её оптическими характеристиками определяет уравнение переноса излучения, которое в интегро-дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + (\boldsymbol{\omega}, \text{grad } I) = -\beta_{\text{ext}} I + \beta_{\text{sc}} \int_{\Omega} I(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}') g(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' + \Phi_0(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}),$$

где  $I = I(\lambda, \mathbf{r}, \boldsymbol{\omega})$  – яркость излучения на длине волны  $\lambda$  в точке  $\mathbf{r}$  в направлении  $\boldsymbol{\omega}$ ;  $c$  – скорость света;  $\beta_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{r})$  – коэффициент ослабления на длине волны  $\lambda$  в точке  $\mathbf{r}$ ;  $\beta_{\text{sc}}(\lambda, \mathbf{r})$  – коэффициент рассеяния на длине волны  $\lambda$  в точке  $\mathbf{r}$ ;  $g(\lambda, \mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}')$  – индикатриса рассеяния на длине волны  $\lambda$  в точке  $\mathbf{r}$  в направлении  $\boldsymbol{\omega}$ ;  $\boldsymbol{\omega}'$  – направление распространения излучения до рассеяния;  $\Phi_0$  – функция источника в точке  $\mathbf{r}$  в направлении  $\boldsymbol{\omega}$ .

Это уравнение: а) линейно относительно  $I$  и потому анализ передаточных свойств бистатических каналов связи целесообразно проводить в рамках теории линейных систем, т.е. исследовать реакцию канала  $h(t)$  на входной  $\delta(t)$ -импульс в зависимости от входных параметров ОЭСС; б) не имеет общего аналитического решения и потому для его решения в приложениях, связанных с коммуникационными подводными бистатическими ОЭСС, используют разные алгоритмы метода Монте-Карло (от алгоритмов прямого моделирования [4] до модификаций двойных локальных оценок [5]).

В публикациях [6–10] рассмотрены результаты моделирования методом Монте-Карло импульсных реакций подводных каналов связи, с помощью которых оценены предельные дальности действия конкретных вариантов подводных *Direct NLOS* ОЭСС. Они составили от 5 до 100 м в зависимости от варьируемых параметров ОЭСС и оптического состояния водной среды. В [10] учтено влияние случайных наклонов волны на поверхности раздела атмосфера-вода на дальности действия ОЭСС, а в [9] оценено влияние оптико-геометрических условий формирования бистатических каналов на вероятность ошибок связи.

В работе [11] предложена аналитическая модель принимаемого бистатического сигнала и приведены результаты экспериментов в бассейне при расстояниях источник-приёмник (их называют базовыми)  $L$  до 50 м. Сравнение теоретических оценок ослабления сигналов показало, что предложенная модель неплохо согласуется с измерениями в экспериментах при  $L$  от 10 до 50 м. На этих трассах сигнал ослабевает на 6–10 дБ в зависимости от оптического состояния воды и направленной ориентации оптических осей источника и приёмника. В этой же работе приводятся результаты экспериментов в Вудсхоуловском океанографическом институте (*Woods Hole Oceanographic Institution*, США), где в разных водоёмах (от бассейнов до доков) подводная оптическая связь осуществлена в замутнённой воде на расстояниях до 40 м. В статье [12] обсуждаются результаты наших первых экспериментов в *естественной водной среде* с бистатическими ОЭСС<sup>2</sup>.

## Аппаратура, геометрические схемы и результаты экспериментов

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы на основе полевых экспериментов 2017–2018 гг., выполненных при испытаниях в *естественном* водоёме подводных бистатических ОЭСС (с разномощными источниками излучения и разной средней мощностью), сравнить их по дальности действия и качеству подводной связи (по уровням ошибок связи и их среднеквадратического отклонения (СКО)). Поскольку эти характеристики зависят от оптического состояния водной среды, то представляло интерес сравнить их при проведении экспериментов в разное время года (зимой, когда вода менее замутнена, и весной, когда в водоём поступают аэрозоль из атмосферы и стоки с окружающей озеро территории).

Подробное описание методики экспериментов 2017–2018 гг. и использованной в них аппаратуры приведено в [14]. Вкратце повторим его. В качестве импульсных источников излучения использовались «зелёный» лазер на парах бромида меди (пико-

<sup>1</sup> В зарубежной литературе бистатические ОЭСС чаще называют *Non Line of Sight (NLOS)* ОЭСС, и иногда те из них, в которых полезным сигналом служит отражённое излучение, называют *Direct NLOS* ОЭСС, а в которых – рассеянное излучение, – *Non Direct NLOS* ОЭСС.

<sup>2</sup> Полевым испытаниям бистатических ОЭСС в атмосфере посвящены, например, работы [13–15].

Рис. 1. Геометрические схемы экспериментов:  
 а – вид сбоку: «зелёный» лазер на берегу озера и «синий» лазер в воде; б – вид сверху: направление оптических осей излучателя и приёмной системы

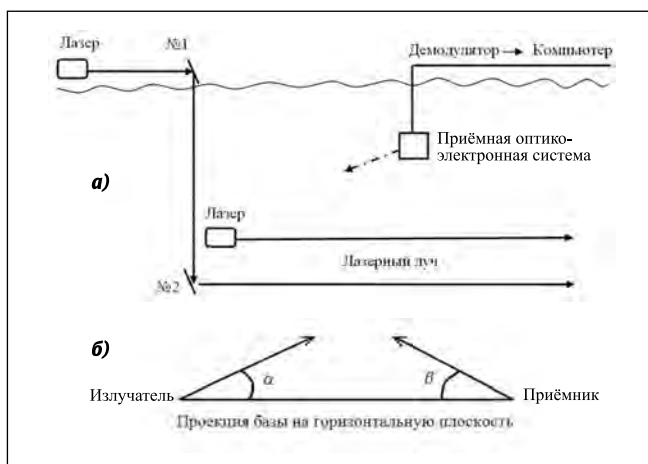
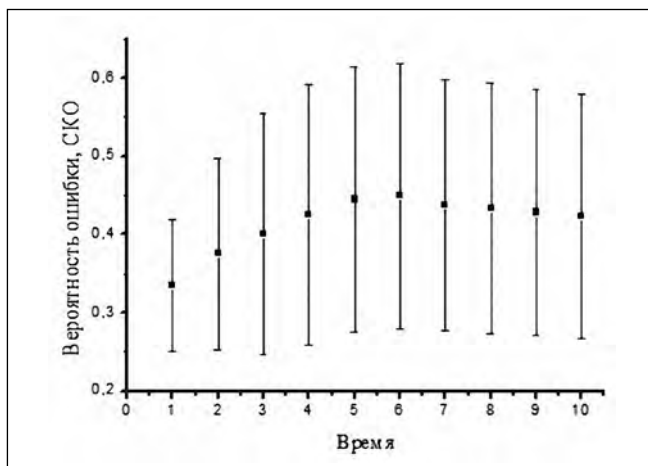


Рис. 2. Фотография участников экспериментов, перемещающих приёмный блок по озеру, и основных блоков лабораторного макета ОЭСС



Рис. 3. Зависимости оценочных значений вероятности ошибок и интервалов СКО (вертикальные линии) от времени «зондирования» качества подводного канала (условия связи – по тексту)



вая  $\lambda = 510,6$  нм), созданный в ИОА СО РАН, и «синий» лазерный модуль B2000 (пиковая  $\lambda = 445,0$  нм), переведённый в импульсный режим. Зондирование качества каналов связи в реальном масштабе времени осуществлялось на основе оценок выборок средних значений и СКО ошибок связи. С этой целью по каналам связи передавался тестовый графический периодический сигнал. Эксперименты 2015–2016 гг. производились как в водной среде, так и через лёд в воду и из воды [12].

Средняя мощность импульсного «зелёного» лазера в экспериментах 2017–2018 гг. составляла 4–6 Вт,

а «синего» – 13–20 мВт, расходимость лазерных пучков не превышала  $1^\circ$ , а поле зрения приёмной системы –  $2^\circ$ .

Геометрические схемы ориентации приёмников и источников излучения, реализованные в экспериментах, приведены на рис. 1.

Место проведения экспериментов – озеро Боярское в окрестности Томска. Согласно [16, 17], можно предполагать, что о. Боярское относится к эвтрофному трофическому типу с оптическими характеристиками, близкими к воде о. Лапа Алтайского края. Оно, как и о. Боярское, – непроточное озеро-старица, расположенное в окрестности города. Эксперимен-

ты с «зелёным» лазером проводились в феврале и мае 2017 г. Ввод «зелёного» лазерного излучения зимой осуществлялся с помощью двух зеркал, № 1 и № 2 (рис. 1, а), через лунку во льду (толщина ледяного покрова достигала 50 см, а глубина озера в местах проведения экспериментов – 6 м). Частота следования импульсов излучения лазера составляла 11 кГц, а их длительность – (20–40) нс. В состав приёмного блока в 2017 г. был включён фотоумножитель ФЭУ-84. Приёмный блок опускался в воду также через лунку во льду на расстоянии до 70 см от нижней границы льда. Результаты получены для  $L$  от 5 до 25 м и обсуждены в работе [13]. Особенность геометрической схемы экспериментов под водой (т.е. не через ледяной слой) состояла в том, что глубины погружения приёмного блока и лазерного луча были разными. Такие схемы организации связи называют некомпланарными. Оптические оси излучателя и приёмной системы были параллельны нижней границе льда, не пересекались и отстояли друг от друга на 20 см. Средняя мощность излучения лазера, падающего на первое зеркало, не превышала 4 Вт.

Обратимся к результатам испытаний в летнее время (в мае) того же года, на том же озере, с теми же лабораторным макетом и геометрической схемой организации коммуникационного канала, что и в феврале (рис. 1), но при мощности лазерного излучения 6 Вт. При этом приёмный блок и лазерный источник погружались на глубину 1 м от водной поверхности. На фотографии (рис. 2) показаны основные блоки лабораторного макета ОЭСС и участники экспериментов. Одна из основных задач этих экспериментов состояла в определении предельного  $L$  при фиксированных характеристиках и параметрах излучателя и приёмного блока. В экспериментах при каждом значении  $L$  фиксировался угол  $\alpha$  и изменялся угол  $\theta$  (рис. 1, б). В реальном масштабе времени оценивались вероятности ошибок связи и их СКО. В каждом сеансе связи, длившемся от 7 до 30 мин, передавалось от 7000 до 90000 символов. Каждый эксперимент длился от 1 до 3 ч.  $L$  последовательно увеличивалось с шагом 5 м, начиная с 5 м. Предельная  $L$  составила 40 м. Этот результат близок к ранее полученному в искусственных и естественных водоёмах [11].

На рис. 3 приведён один из результатов «зондирования» качества подводного канала при  $L = 40$  м. Критерии качества: выборочное среднее и СКО ошибок связи (ось ординат на рис. 3) и условное время (ось абсцисс). Значения углов  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1, б). –  $8,5$  и  $75,0^\circ$  соответственно.

В отличие от результатов, полученных в зимнее время (февраль) при  $L = 25$  м [12] и близких к указанным значениям  $\alpha$  и  $\beta$ , качество летнего (май) канала связи оказалось существенно хуже зимнего. Это можно объяснить тем, что увеличение  $L$  приводит к снижению плотности энергии на входном зрачке приёмной системы, которое в данных экспериментах не компенсируется увеличением мощности лазерного излучения с 4 до 6 Вт. Другая причина ухудшения качества подводного коммуникационного канала состоит в том, что в открытом водоёме мутность воды в летнее время выше, чем в зимнее, когда водоём покрыт льдом и в него не поступают повышающие его мутность вещества (см., напр., [16, 17]).

В 2018 г. в лабораторный макет бистатической ОЭСС были внесены изменения: ФЭУ-84 был заменён на фотоумножитель УФК-4Г-2 (производитель ООО «Катод», Новосибирск), в состав оптического блока приёмной системы введён фильтр *Semrock FF01-442/42-25* и в качестве излучателя использован полупроводниковый лазер на основе модуля *B2000* при средней мощности в импульсном режиме 20 мВт (пиковая  $\lambda = 445,0$  нм). В феврале 2018 г. с этим (модифицированным) макетом ОЭСС были проведены эксперименты, аналогичные осуществлённым в 2015 г. с «синим» лазером со средней мощностью 13 мВт при том же значении  $L$  (рис. 1). Сравним качество подводных бистатических каналов связи для двух вариантов приёмных систем. Пример результатов оценок вероятностей и СКО ошибок связи в «синем» подводном зимнем канале, заимствованный из [12], приведён на рис. 4.

На рис. 5 показан один из результатов оценки качества «синего» подводного бистатического канала ОЭСС во время экспериментов в феврале 2018 г. Как видим, качество «синего» канала в 2018 г. на порядок выше, чем в 2015 г. Если обратиться к геометрическим характеристикам схем формирования каналов связи, то в 2018 г.

Рис. 4. Аналогично рис. 3. «Синий» лазер и приёмник в воде, на уровне 10 см от нижней кромки льда.  $L = 10$  м,  $\alpha = 3^\circ$  и  $\beta = 2^\circ$

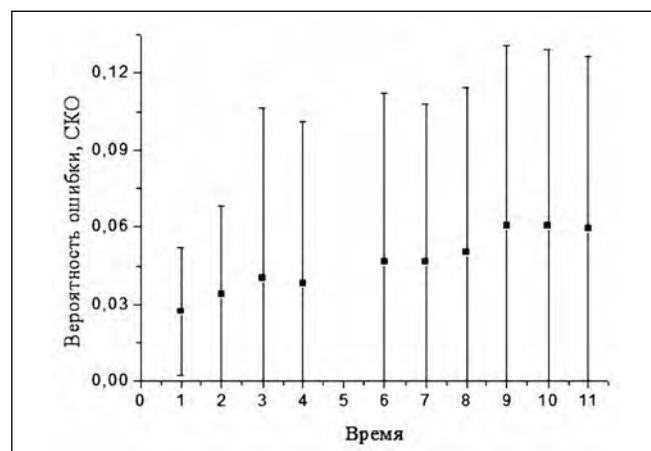


Рис. 5. Аналогично рис. 3 и 4. «Синий» лазер и приёмник в воде, на уровне 43 см от нижней кромки льда.  $L = 10$  м,  $\alpha = 31^\circ$  и  $\beta = 25^\circ$

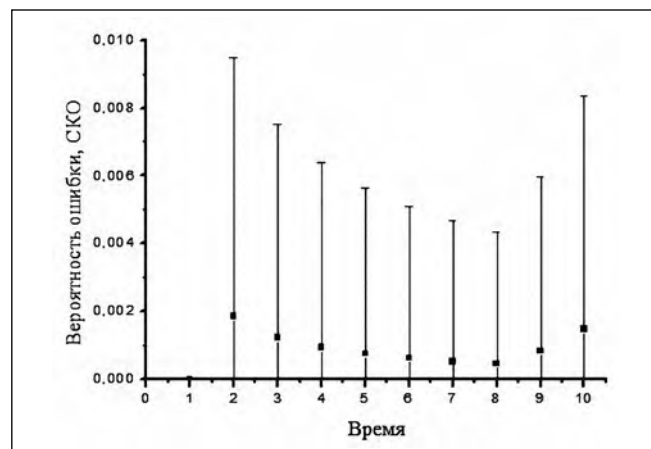
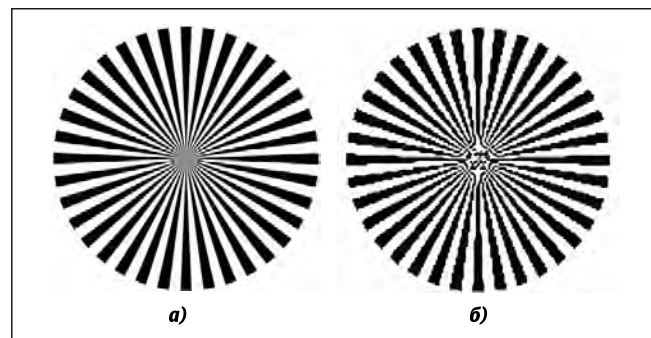


Рис. 6. Исходная секторная мира (а) и принятое её изображение (б)



они были менее оптимальны, чем в 2015 г. Углы  $\alpha$  и  $\beta$  в первом случае соответствовали ситуации, когда приёмник ориентировался на источник, а во втором – на участок лазерного луча, удалённый от источника. Средняя мощность лазерного излучения во втором случае выше, чем в первом в 1,5 раза, но не даёт повышения качества канала связи на порядок. Следовательно, причина существенного повышения качества связи в 2018 г. состоит в использовании фотоумножителя УФК-4Г-2.

В 2018 г. проведены эксперименты по передаче по подводной бистатической ОЭСС информации в виде изображений плоского тестового объек-

та (секторная мира). На рис. 6 приведены изображения этого объекта для условий связи по рис. 5.

## Заключение

Экспериментально подтверждена возможность создания функционирующих оптико-электронных систем бистатической подводной связи на рассеянном лазерном излучении в видимом диапазоне длин волн в озёрной воде при базовых расстояниях между источником и приёмником  $L$  до 40 м, что согласуется с результатами работы [11].

Есть основания полагать, что дальность действия таких ОЭСС может

доходить до сотен метров за счёт применения существенно более мощных лазерных источников и более чувствительных фотоприёмников. При этом нами показано, что использование современных фотоумножителей типа УФК-4Г-2 вместо ФЭУ-84 повышает качество связи на порядок.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Приоритетного направления П.10, проект П.10.3.3 «Прямые и обратные задачи зондирования атмосферы и земной поверхности, атмосферная коррекция и коммуникационные оптико-электронные системы на рассеянном лазерном излучении».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. Система оптической связи в водной среде // Первая миля.– 2014.– № 2. – С. 46–51
2. Arnon S., and Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless Communication network // J. Opt. Soc. Am. A. – 2009. Vol. – 26, No. 3. pp. 530–539.
3. Hanson F., Radic S. High bandwidth underwater optical communication // Appl. Opt. 2008. – Vol. 47, No. 2. – P. 277–283.
4. Ding H., Chen G., Majumdar A.K., Sadler B.M., Xu Z. Modeling of Non-Line-of-Sight Ultraviolet Scattering Channels for Communication // IEEE Journal on selected areas in communications.– 2009. – Vol. 27, No. 9. – P. 1535–1541.
5. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // Оптика атмосферы и океана.– 2016. – Т. 29, № 05. – С. 397–403.
6. Jagadeesh V.K., Choudhary A., Bui F.M., Muthuchidambaranathan P. Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications / 2014 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Advances in Computing and Communications (ICACC), Cochin, India, 27–29 Aug. 2014: IEEE, 2014. – P. 77–79.
7. Jasman F., Green R.J. Monte Carlo Simulation for Underwater Optical Wireless Communications / 2013 2<sup>nd</sup> Int. Workshop on Optical Wireless Communications, Newcastle upon Tyne, UK, 21–21 Oct. 2013. DOI: 10.1109/IWOW.2013.6777789.
8. Choudhary A., Jagadeesh V.K., Muthuchidambaranathan P. Pathloss analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication channel // 2014 Int. Conf. on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, India, 13–14 Feb. 2014: IEEE, 2014. – P. 1–4.
9. Tang S, Dong Y, Zhang X. On Path Loss of NLOS Underwater Wireless Optical Communication Links / 2013 MTS/IEEE OCEANS –

Bergen, Norway, 10–14 June 2013: IEEE. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608002.

10. Gabriel C., Khalighi M., Bourennane S., Léon P., Rigaud V. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems // Journal of Optical Communications and Networking.– 2013. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–12.

11. Doniec M., Angermann M., Rus D. An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications // IEEE Journal of Oceanic Engineering.– 2013. – Vol. 38, Iss. 4. – P. 743–757. DOI: 10.1109/JOE.2013.2278932.

12. Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Tarasenkov M.V., Fedosov A.V. Bistatic Optoelectronic Communication Systems: Field Experiments in Artificial and Natural Water Reservoirs // Atmospheric and Oceanic Optics.– 2017. – Vol. 30, No. 4. – P. 366–371. DOI: 10.1134/S1024856017040042.

13. Belov V.V. Optical communication on scattered laser radiation // Proc. SPIE.– 2017. – Vol.. 10466. CID:10466 0H. [10466–24].

14. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Гриднев Ю.В., Троицкий В.О., Димаки В.А. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // Оптика атмосферы и океана.– 2014. – Т. 27, № 8. – С. 659–664.

15. Абрамочкин В.Н., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты // Светотехника.– 2017.– № 4. – С. 24–30.

16. Суторихин И.А., Букастый В.И., Акулова О.Б. Спектральная прозрачность воды в разнотипных озёрах Алтайского края. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015.– 145 с.

17. Суторихин И.А., Букастый В.И., Литвиных М.Е., Эккердт К.Ю. Влияние взвешенного вещества на спектральную прозрачность озёр Алтайского края / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXII Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. – С. 93.



**Белов Владимир Васильевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1971 г. ТГУ. Зав. лабораторией РОС ИОА СО РАН. Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов:

теория переноса оптического излучения в рассеивающих и поглощающих средах, теория лазерного зондирования, теория видения, атмосферная коррекция аэрокосмических изображений земной поверхности, метод Монте-Карло, многократное рассеяние



**Абрамочкин Владимир Николаевич**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1992 г. Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. Старший научный сотрудник ИОА СО РАН. Область

научных интересов: оптико-электронная связь



**Гриднев Юрий Владимирович**, инженер. Окончил в 1981 г. ТПИ. Научный сотрудник ИОА СО РАН. Область научных интересов: системное программирование



**Кудрявцев Андрей Николаевич**, инженер. Окончил в 2003 г. ТУСУР. Ведущий электроник ИОА СО РАН. Область научных интересов: измерители мощности лазеров, устройства стробирования лазера, электронные схемы, ПЛИСы, микроконтроллеры, содары

изображений через атмосферу, атмосферная коррекция изображений в видимом и УФ диапазонах излучения, теоретические исследования по каналам связи вне прямой видимости



**Тарасенков Михаил Викторович**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 2007 г. ТГУ. Старший научный сотрудник ИОА СО РАН. Область научных интересов: анализ закономерностей формирования

изображений через атмосферу, атмосферная коррекция изображений в видимом и УФ диапазонах излучения, теоретические исследования по каналам связи вне прямой видимости



**Федосов Андрей Васильевич**, техник. Окончил Радиомонтажное училище. Техник ИОА СО РАН. Область научных интересов: электроника