Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона

В.Н. Леднёв¹, М.Я. Гришин^{1,2}, С.М. Першин¹, А.Ф. Бункин¹, И.А. Капустин³, А.А. Мольков³, С.А. Ермаков³

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия E-mails: lednev@kapella.gpi.ru, pershin@kapella.gpi.ru ² Московский физико-технический институт (государственный университет) Долгопрудный, 141700, Россия E-mail: mikhail.grishin@phystech.edu ³ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru, wave3d@mail.ru

Экспресс-диагностика экологического состояния крупных пресных водоемов особенно актуальна в летний период бурного роста фитопланктона («цветение воды»), что связано как с мониторингом степени влияния данного явления на нарушение природных экосистем, так и контролем качества воды. Наряду с контактными методами исследований в последние годы все более востребованными становятся методы дистанционного зондирования с различных носителей (авиа, спутники и т.д.). В частности, привлекают все большее внимание методы лазерного дистанционного зондирования, что связано как с совершенствованием лазерного оборудования, так и с бурным развитием технологий беспилотных авианосителей. В работе представлены результаты лазерного дистанционного зондирования южной части Горьковского водохранилища с высокой концентрацией водорослей. С помощью компактного лидара комбинационного рассеяния зарегистрированы спектры обратного рассеяния в приповерхностном слое воды с борта судна вдоль траектории зондирования акватории. Продемонстрированы возможности лазерного зондирования для экспресс-диагностики изменения видового состава водорослей. Проведено картирование акватории по распределению лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния одновременно с флуоресценцией водорослей, а также данных калиброванного STD-зонда, погруженного на глубину 0,3 м. Проведено сравнение и выявлена хорошая корреляция данных лазерного зондирования и контактных измерений концентрации водорослей. Результаты работы открывают перспективы для создания лидарных систем, устанавливаемых на беспилотные авианосители, для мониторинга акваторий в автоматическом режиме.

Ключевые слова: лидар, лазерное дистанционное зондирование, экологический мониторинг пресноводных акваторий, эвтрофирование водоемов, мультисенсорные измерения

Одобрена к печати: 12.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-119-134

Введение

Диагностика экологического состояния акваторий является одной из наиболее актуальных гидрологических задач. Значительная антропогенная нагрузка на прибрежные зоны океана, создание больших искусственных водоемов (водохранилищ) нарушает экологическое равновесие речных бассейнов. Совокупность действия различных факторов сопровождается значительными изменениями флоры и фауны (Hallegraeff, 1993; Richardson, 1996; Anderson et al., 2012). Одной из важнейших проблем крупных пресных водоемов является значительное (в 5–100 раз) повышение концентрации фитопланктона в летний период («цветение воды»), что приводит не только к разрушению природных экосистем, но и к ухудшению качества воды. Особенно напряженная ситуация складывается вблизи крупных городов и около промышленных центров. Для измерения характеристик зон цветения воды и мониторинга экологического состояния акваторий используют различные методы и подходы. Наряду с контактным профилированием широкое развитие получили дистанционные методы с использованием спутниковых сканеров цвета (Лаврова и др., 2011; Richardson, 1996) и различного рода оптических систем авиационного и судового базирования (Measures, 1992; Brown, Fingas, 2003; Bunkin, Voliak, 2001; Bunkin et al., 2012), а также активно изучаются возможности использования радиолокаторов СВЧ-диапазона (Ермаков и др., 2013).

В числе оптических методов диагностики важное место принадлежит лазерному (лидарному) зондированию (Measures, 1992; Bunkin, Voliak, 2001). Лидар (от англ. LiDAR – Light Detecting And Ranging) – прибор, действующий по принципу радара, с тем отличием, что вместо радиоволны используется излучение лазеров оптического диапазона. Общая схема лидарного зондирования водоемов состоит в следующем: импульсное (длительностью несколько наносекунд) лазерное излучение направляют через поверхность в глубину зондируемой акватории и принимают излучение, рассеянное назад при взаимодействии с молекулами примесей (например, хлорофилла) или частицами суспензии. Как правило, выбирают длину волны лазерного излучения, расположенную в области прозрачности атмосферы и воды. Лазерное излучение взаимодействует с атомами и молекулами зондируемой среды, что приводит к появлению эхо-сигналов, которые распространяются, в том числе, и в сторону излучателя. По задержке обратного сигнала судят о расстоянии до исследуемого объекта, а по спектру – о его строении и свойствах.

В литературе представлено большое количество теоретических (Measures, 1992; Dolin et al., 2008; Luchinin, 2010) и экспериментальных (Leonard et al., 1979; Becucci et al., 1999) работ, описывающих лазерное дистанционное зондирование океанских и морских акваторий. В цикле работ группы В.В. Фадеева продемонстрирована принципиальная возможность количественного измерения концентрации водорослей и органических примесей в воде по спектрам лазерного зондирования (Dolenko et al., 2002; Fadeev et al., 2000), а также проведены исследования влияния различных параметров на сигнал флуоресценции хлорофилла (Fadeev et al., 2012). Однако систематические исследования сигнала флуоресценции хлорофилла были проведены только для морских акваторий (Chekalyuk et al., 1993; Fadeev et al., 2012) без одновременных лидарных и контактных измерений концентрации водорослей для проверки корреляции получаемых сигналов. Отметим, что лазерное дистанционное зондирование успешно применяли для оценки видового состава и концентрации водорослей в период бурного «цветения» воды, что связано с изучением антропогенного воздействия и эвтрофикации прибрежных вод (Babichenko et al., 1999; Barbini et al., 2001; Seppälä et al., 2007). Обнаруженное и описанное в работах (Barbini et.al., 2001; Barbini et al., 2003) существенное расхождение значений концентрации хлорофилла (фитопланктона) по данным спутниковых и лидарных измерений (последние калибруются по данным пробоотбора в реальном времени) указывает на необходимость обязательного подспутникового мониторинга для корректировки результатов орбитального картирования. В то же время, в литературе отсутствуют данные по дистанционному лазерному зондированию пресных водоемов с высокой концентрацией водорослей («цветение воды»). Заметим, что экспрессдиагностика во время «цветения» представляет большой интерес для оценки качества пресной воды и для оценки влияния этого явления на экологическое равновесие акватории.

Целью данной работы было проведение лидарного зондирования пресноводной акватории с высокой концентрацией водорослей и сравнение полученных результатов с данными калиброванного коммерческого измерителя концентрации сине-зеленых водорослей и мутности, входящего в состав STD-зонда (YSI Inc., 6600 v2). Данное исследование позволит оценить перспективность

применения лидарного зондирования для определения различных параметров пресной воды: температуры, мутности, концентрации водорослей с борта летательных аппаратов.

Проведенные измерения представляют особый интерес для подспутниковых исследований методами лазерного дистанционного зондирования с использованием техники пробоотбора в опорных точках для сравнения данных. Несомненно, что откорректированные по этим точкам профили распределения концентрации водорослей вдоль трассы лидарного зондирования чрезвычайно важны для калибровки изображений спектральных анализаторов орбитального базирования при зондировании Земли из космоса.

Эксперимент

Район проведения наблюдений

Натурный эксперимент был проведен 15 июля 2015 г. на Горьковском водохранилище (Нижегородская область, Россия). Данный водоем был выбран в связи с тем, что в июле – августе в его акватории интенсивно развиваются большие скопления водорослей, при этом концентрация водорослей увеличивается в десятки – сотни раз (до 50–100 тыс. клеток/мл и более) по сравнению с весенним периодом, что представляет особый интерес для подспутниковых исследований методами лазерного дистанционного зондирования. Оборудование было установлено на судне – плавучей лаборатории «Геофизик», разработанном и изготовленном в отделе радиофизических методов в гидрофизике Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН). Во время эксперимента при передвижении судна по южной части водохранилища исследование поверхностного слоя воды проводили с помощью компактного лидара комбинационного рассеяния (см. описание далее) и STD-зонда (YSI Inc., 6600 v2). Маршрут судна, наложенный на карту местности, приведен на *рис. 1*.



Рис. 1. Маршрут следования судна. На вставке слева вверху представлена карта водохранилища. 1 – сканирование приповерхностного слоя с низкой концентрацией водорослей, 2– начало сканирования поверхностного слоя воды вдоль трассы судна, 3 – окончание сканирования

Схема и техника экспериментов

Компактный лидар комбинационного рассеяния был разработан в Центре волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (Pershin et al., 2012). Основу данного комплекса составляет импульсный твердотельный лазер Nd:YLiF₄ с диодной накачкой (Laser Compact, DTL-319QT: 527 нм, 5 нс, 1 кГц, 200 мкДж/имп). Лазерный пучок с помощью двух поворотных призм направляется на исследуемый объект. Рассеянное от объекта излучение собирают с помощью кварцевой линзы и фокусируют на входную щель спектрографа. Система регистрации сигналов состоит из компактного спектрографа (Spectra Physics, MS127i), оборудованного ПЗС-камерой со стробируемым усилителем яркости (Andor iStar). Для увеличения соотношения сигнал – шум была использована дифракционная решетка с малой дисперсией (150 штрихов/мм) и входная щель шириной 250 мкм. Во избежание повреждения ПЗС-матрицы рассеянным лазерным излучением при регистрации сигналов был использован полосовой светофильтр OC-13. Спектральное окно регистрации составляет 500–750 нм, что позволяет регистрировать одновременно несколько сигналов.

Зондирование поверхностного слоя воды проводили по схеме, изображенной на *рис. 2а.* Лидар был установлен в ходовой рубке судна, направление лазерного луча на исследуемую область и сбор рассеянного назад сигнала осуществляли поворотным алюминиевым зеркалом, закрепленным на борту судна (*рис. 2б, в*). Длина оптического пути от лидара до поверхности воды составила 2,4 м.



Рис. 2. Схема эксперимента, общий вид судна, лидар в рубке. (а) – схема лидарного зондирования; (б) – фотография плавучей лаборатории «Геофизик»; (в) – фотография лидара, установленного в рубке судна

Результаты

Примеры характерных спектров для верхнего слоя воды Горьковского водохранилища с различными концентрациями водорослей приведены на *рис. 3*.



Рис. 3. Характерные спектры обратного рассеяния приповерхностного слоя воды Горьковского водохранилища: (а) – высокая концентрация водорослей (220 тыс. клеток/мл); (б) – концентрации 200, 43, 20 и 4,3 тыс. клеток/мл

Спектр состоит из нескольких компонент (*puc. 3a*): линия упругого рассеяния (0 см⁻¹), полосы, соответствующие флуоресценции растворенного органического вещества (POB, 1500–2000 см⁻¹), комбинационному рассеянию света на валентных колебаниях ОН-групп молекул воды (3000–4000 см⁻¹) и флуоресценции хлорофилла фитопланктона и водорослей (4000–4500 см⁻¹).

В ходе эксперимента было проведено картирование сигналов вдоль трассы следования судна и сравнение результатов с данными STD-зонда. Для этого в автоматическом режиме регистрировали спектры обратного рассеяния из столба воды глубиной 0,8 м; частота работы лазера составила 12 Гц, спектр суммировали по 100 импульсам, т.е. одно измерение занимало около 8 секунд. STD-зонд (YSI Inc., 6600 v2) был расположен на глубине 30 см под поверхностью воды и позволял измерять в автоматическом режиме температуру, соленость и мутность воды, а также концентрацию водорослей.

На *рис.* 4 представлены наиболее характерные спектры вдоль движения судна: водная поверхность в центральной части водохранилища (черная линия, номер 4 на *рис.* 4), поверхность воды с пленкой природного происхождения (т.н. биогенные пленки, красная линия, номер 3 на *рис.* 4), кильватерный след прошедшей мимо баржи (синяя линия, номер 2 на *рис.* 4), массивное скопление водорослей на поверхности воды вблизи порта (зеленая линия, номер 1 на *рис.* 4).



Рис. 4. Характерные спектры приповерхностного слоя воды вдоль трассы судна

В спектрах поверхности с биогенной пленкой полоса флуоресценции РОВ имеет меньшую интенсивность по сравнению со спектрами свободной поверхности воды, что обусловлено ухудшением проникновения лазерного излучения в глубокие слои воды из-за повышения отражения при наличии пленки на поверхности: одновременно с падением интенсивности полосы РОВ в биогенной пленке пропорционально возрастает интенсивность линии упругого рассеяния.

Следует отметить, что спектры кильватерного следа баржи сильно отличаются от спектров невозмущенной поверхности воды. Уменьшение концентрации водорослей и, соответственно, снижение интенсивности полос флуоресценции в области кильватерного следа связано с интенсивным турбулентным перемешиванием и выносом менее прогретой жидкости в следе средними циркуляционными течениями (Ermakov et al., 2014; Митягина, Лаврова, 2014).

При движении судна в закрытом заливе шлюза в условиях очень слабого поверхностного волнения была обнаружена высокая концентрация водорослей (100–150 тыс. клеток/мл), водоросли в значительной степени концентрировались в тонком слое (1–5 мм толщиной) вблизи поверхности воды. На *рис.* 5 представлено фото границы раздела областей с плотной пленкой водорослей и без нее в заливе шлюза.



Рис. 5. Фотография границы раздела областей без и с плотной пленкой водорослей в заливе шлюза (в центре рисунка отмечена область лазерного зондирования)

Спектры массивного скопления водорослей существенно отличаются от спектров свободной поверхности воды: из-за невозможности проникновения лазерного излучения в толщу воды в связи с рассеянием на взвешенных частицах водорослей возрастает интенсивность линии упругого рассеяния; при этом в спектре появляется очень интенсивная компонента в области 4500–5500 см⁻¹, соответствующая флуоресценции хлорофилла «а» водорослей (Pershin et al., 2012). Различия формы спектральной линии для свободной водной поверхности и массивного скопления водорослей могут быть объяснены тем, что в застойной области воды меняется видовой состав водорослей и помимо флуоресцирующего пигмента хлорофилла «а» проявляется вклад флуоресценции хлорофиллов «b» и «с» (в более длинноволновой области), а также т.н. фикоэритринов (Bunkin, Voliak, 2001).

Поскольку толстый слой водорослей в заливе шлюза водохранилища не позволял лазерному излучению проникать вглубь, сравнение данных лазерного зондирования с данными STD-зонда было проведено только до входа в область с толстым слоем водорослей.

В спектре лидарного зондирования наблюдали сильное наложение сигналов флуоресценции, поэтому полученные экспериментальные данные с лидара обрабатывали следующим образом: спектральную кривую аппроксимировали суммой трех гауссовых контуров (*puc. 6*), затем строили зависимость сигнала флуоресценции хлорофилла (площадь соответствующей компоненты, см. *puc. 6*) от расстояния, а также зависимость сигнала упругого рассеяния, который определяли как интеграл линии с вычетом фона.



Рис. 6. Спектральная кривая (черная линия) и аппроксимирующие гауссовы компоненты. Розовая линия соответствует флуоресценции РОВ, синяя – комбинационному рассеянию на валентных колебаниях ОН-групп молекул воды, зеленая – флуоресценции хлорофилла

Итоги сравнения результатов по данным лидарного зондирования и STD-зонда представлены на *рис.* 7, 9 для мутности воды и концентрации водорослей соответственно. Как видно из *рис.* 7, наблюдается корреляция между сигналом упругого рассеяния (лидар) и мутностью воды (STD-зонд) вдоль трассы движения судна (*рис.* 7 *a*, *б*), а также при пересечении следа баржи (*рис.* 7 *в*, *г*). Видны области с высокой вариацией мутности воды в центральной части водохранилища, что может быть связано с повышением концентрации водорослей.



Рис. 7. Сравнение сигнала упругого рассеяния и мутности воды по данным STD-зонда вдоль трассы движения судна (голубым цветом фона отмечена область вне залива шлюза – см. рис. 1, салатовым – внутри залива шлюза, красным прямоугольником выделена область пересечения кильватерного следа баржи): а) – профиль мутности поверхностного слоя воды по данным STD-зонда; б) – зависимость сигнала упругого рассеяния вдоль трассы движения судна; в) – профиль мутности верхнего слоя воды при пересечении кильватерного следа баржи (стрелкой отмечен момент входа в след баржи); г) – профиль сигнала упругого рассеяния при пересечении кильватерного следа баржи

В случае лазерного зондирования (сигнал упругого рассеяния) вариация изменений мутности значительно снижена, что может быть связано с уменьшением эффективности упругого рассеяния на клетках водорослей вследствие поглощения лазерного излучения. Также следует отметить, что поверхностное волнение приводит к повышению флуктуации сигнала упругого рассеяния и становится сложнее определить изменение мутности воды по данным лидарного зондирования. На *рис.* 8 представлена корреляция сигнала упругого рассеяния (лидар) и мутности воды (STD-зонд) по всем точкам вдоль трассы движения судна.



Рис. 8. Корреляция сигнала упругого рассеяния (лидар) и данных STD-зонда

В процессе движения судно пересекло кильватерный след баржи под прямым углом через ~1 минуту после прохождения баржи. Это позволило оценить влияние перемешивания воды в верхнем слое и сравнить данные лидарного зондирования и STD-зонда. Результаты определения мутности воды при пересечении кильватерного следа баржи представлены на *рис.* 7 *в*, *г* (начало отмечено красной стрелкой).

Одной из наиболее важных задач для лазерного дистанционного зондирования поверхности пресного водоема в летний период является картирование концентрации фитопланктона. Для оценки возможностей лидара и его калибровки при измерении концентрации водорослей были получены профили сигнала флуоресценции (лидар) и данных STD-зонда с калиброванным флуоресцентным датчиком. Прямое сравнение сигналов на *рис.* 9 свидетельствует о хорошей корреляции двух сигналов, однако в случае STD-зонда происходит «сглаживание» вариации сигналов. Это может быть вызвано большим периодом (1 раз в 60 с) автоматической очистки выходного окошка флуориметра. Корреляция данных лидарного зондирования концентрации фитопланктона и концентрации водорослей представлена на *рис.* 10, следует отметить высокое значение коэффициента корреляции (0,765).



Рис. 9. Сравнение концентрации водорослей по данным STD-зонда (а) и сигнала флуоресценции хлорофилла, измеренного лидаром (б). Подробный масштаб зависимости сигналов при пересечении кильватерного следа баржи представлен на в) и г)



Рис. 10. Корреляция сигнала флуоресценции (лидар) и концентрации водорослей по данным STD-зонда

Отметим различия лидарного зондирования и контактных измерений при пересечении кильватерного следа баржи (*puc. 9 в, г*). О начале пересечения кильватерного следа судили визуально по бурунам, оставленным прошедшей баржей. STD-зонд не фиксировал повышения концентрации водорослей при входе в кильватерный след, он отслеживал изменение концентрации фитопланктона только при прохождении половины ширины кильватерного следа. Это связано с тем, что измерительный модуль флуориметра в STD-зонде располагался на глубине 30 см под поверхностью воды, в то время как лидар регистрировал изменение концентрации фитопланктона в столбе воды глубиной 80 см. Отличие в изменении концентрации фитопланктона в кильватерном следе судна обусловлено разницей в процессе смешения слоев воды вблизи поверхности. Это может являться преимуществом применения лазерного дистанционного зондирования в местах с сильной неоднородностью концентрации фитопланктона, например, при слиянии рек.

В процессе работы в акватории Горьковского водохранилища было обнаружено, что высокая концентрация фитопланктона в пресных водоемах влияет на точность определения температуры по спектру комбинационного рассеяния света. Стандартные методы спутникового измерения температуры поверхности воды (применение спутниковых радаров, микроволновых и лазерных скаттерометров) основаны на регистрации спектра теплового излучения тонкого (10–30 мкм) поверхностного слоя воды. Недостаток данных методов в том, что даже при слабом ветре над морской поверхностью температура верхних слоев толщиной до 100 мкм снижается на 0,5–1 °C (Soloviev, 1997). Этим обусловлена необходимость калибровки спутниковых данных. Спектроскопия комбинационного рассеяния света является одним из альтернативных способов дистанционного измерения температуры, так как в этой методике регистрируют спектр, по которому можно определить термодинамическую температуру из столба воды высотой 0,5–5 м. Этот метод успешно зарекомендовал себя при измерении температуры воды как в условиях лаборатории, так и в экспедициях (Весиссі, 1997; Першин, Бункин, 1998).

Измерение температуры по спектру комбинационного рассеяния (КР) производят по форме полосы валентного колебания ОН. Было предложено два подхода для подобных измерений. Первый основан на аппроксимации экспериментального спектра суммой двух или более составляющих контуров с последующим построением зависимости отношения площадей составляющих пиков от температуры (Becucci, 1999), что обеспечивает точность определения температуры 1 °C. Второй подход впервые был предложен в работе (Pershin, 2010) и основан на корреляции положения центра полосы ОН и температуры. Точность определения температуры с использованием данного подхода составляет 0,5 °C.

На *рис.* 11 представлена калибровка лидара для измерения температуры по форме ОН-полосы в спектре комбинационного рассеяния молекулы воды. Калибровку лидара проводили непосредственно на борту судна, для этого отбирали образцы забортной воды с известной концентрацией фитопланктона (STD-зонд) и наполняли кювету, расположенную возле выходной апертуры лидара.

На *рис. 11 а, б* представлены профили ОН-полосы в спектре комбинационного рассеяния света для дистиллированной воды и пресной воды с концентрацией водорослей 10 000 клеток/мл. Согласно предложенному методу огибающую спектра аппроксимировали с помощью гауссового профиля для каждого значения температуры, т.е. проводили «взвешивание», и искали центр масс каждого спектра (Pershin, 2010). После этого получали калибровочную зависимость центра OH-полосы от температуры (*puc. 11, в*).



Рис. 11. Профиль ОН-полосы (точки) и результат аппроксимации гауссовой формой кривой (линия, значения центра) для образцов дистиллированной (а) и природной воды с высокой концентрацией фитопланктона (б); (в) – калибровка лидара для измерения температуры по форме ОН-полосы в спектре комбинационного рассеяния света

Точность определения температуры определяли как ширину доверительного интервала по абсциссе при известной ординате. Точность определения температуры для образца дистиллированной воды составляет менее 0,3 °C, в то время как для образца с высокой концентрацией водорослей точность составила 0,9 °C. Снижение точности определения температуры связано со спектральным наложением полосы флуоресценции хлорофилла на профиль ОН-полосы. Отметим, что этот эффект имеет место только для пресной воды при высокой концентрации фитопланктона («цветение воды»).

Выводы

Проведено лазерное дистанционное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией водорослей в летний период. Компактный лидар комбинационного рассея-

ния позволяет регистрировать данные о мутности поверхностного слоя воды и о концентрации водорослей. Показано, что по спектрам лидарного зондирования верхнего слоя воды можно обнаружить места, где изменяется видовой состав водорослей. Оценка мутности воды по данным лидарного зондирования не может быть выполнена с достаточной точностью, что связано с поглощением лазерного излучения хлорофиллом в водорослях в период «цветения воды». В то же время показано достаточно хорошее совпадение результатов лидарного зондирования по концентрации водорослей и данных STD-зонда. Обнаружено влияние высокой концентрации фитопланктона на точность определения температуры воды по форме ОН-полосы в спектре комбинационного рассеяния, что связано со спектральным наложением флуоресценции. Полученное совпадение данных лидарного зондирования и анализа воды в режиме контактных измерений (STD-анализатора) демонстрирует перспективы применения компактных лидарных систем, установленных на беспилотных авианосителях, для калибровки космических снимков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №15-35-50449 мол нр. 15-45-02690, 15-35-20992 мол а вед, 14-05-00876, 15-45-02531) и программы Президента РФ по поддержке ведущих научных школ 4482.2014.2.

Литература

- 1. Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Сергиевская И.А., Андриянова Н.В. О возможностях радио-прямают С.П., Напусная П.П., Сизарска П.П., Серевсеская П.П., Перемеская П.П.: С возможностик радно локационной диагностики зон эвтрофирования водоемов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 336–343.
 Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
- 3. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 73-87.
- 4. Першин С.М., Бункин А.Ф. «Скачок» центра и ширины огибающей спектральной полосы КР валентных колебаний О-Н при фазовых переходах первого и второго рода в воде // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 85. C. 209-212.
- 5. Anderson D.M., Cembella A.D., Hallegraeff G.M. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management // Annual review of marine science. 2012. Vol. 4. P. 143-176.
- 6. Babichenko S., Kaitala S., Leeben A., Poryvkina L., Seppälä J. Phytoplankton pigments and dissolved organic matter distribution in the Gulf of Riga // J. Mar. Syst. 1999. Vol. 23. P. 69–82.
- 7. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Fiorani L., Palucci A. Lidar fluorosensor calibration of the SeaWiFS chlorophyll algorithm in the Ross Sea // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24. No. 16. P. 3205–3218. 8. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Fiorani L., Palucci A., Artamonov E.S., Galli M. Remotely sensed primary
- production in the western Ross Sea: results of in situ tuned models // Antarctic Science. 2003. Vol. 15. No. 01. P. 77–84.
- 9. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Palucci A., Ribezzo S. Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and seawater quality monitoring in Antarctica // Int. J. Remote Sens. 2001. Vol. 22 P. 369–384.
- Becucci M., Cavalieri S., Eramo R., Fini L., Materazzi M. Raman spectroscopy for water temperature sensing // Laser Physics. 1999. Vol. 9. P. 422–425.
 Brown C.E., Fingas M.F. Review of the development of laser fluorosensors for oil spill application // Marine
- pollution bulletin. 2003. Vol. 47. No. 9. P. 477–484.
- 12. Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lednev V.N., Lushnikov D.L., Marchenko A.V., Morozov E.G., Pershin S.M., Yulmetov *R.N.* Remote sensing of seawater and drifting ice in Svalbard fjords by compact Raman lidar // Applied optics. 2012. Vol. 51. No. 22. P. 5477–5485.
- Bunkin A.F., Bunkin A., Voliak K.I. Laser remote sensing of the ocean: methods and applications // Wiley-Interscience. 2001. Vol. 5. P. 150–195.
- 14. Chekalyuk A.M., Demidov A.A., Fadeev V.V., Lapshenkova T.V. Lidar mapping of phytoplankton and organic matter distributions in the Baltic Sea // Laser Spectroscopy of Biomolecules: 4th International Conference on Laser Applications in Life Sciences. 1993. P. 401-405.

- 15. Dolenko T.A., Fadeev V.V., Gerdova I.V., Dolenko S.A., Reuter R. Fluorescence diagnostics of oil pollution in coastal marine waters by use of artificial neural networks // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. No. 24. P. 5155–5166.
- 16. Dolin L.S., Luchinin A.G. Water-scattered signal to compensate for the rough sea surface effect on bottom lidar imaging // Applied Optics. 2008. Vol. 47. No. 36. P. 6871–6878. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N. Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface:
- observations and physical mechanisms // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9240, 92400N.
- 18. Fadeev V.V., Maslov D.V., Matorin D.N., Reuter R., Zavyalova T.I. Some peculiarities of fluorescence diagnostics of phytoplankton in coastal waters of the Black Sea // Available at: http://las.Phys.uni-oldenburg.de/eProceedings/ Vol01. 2000. Vol. 1. No. 01. P. 1.
- 19. Fadeev V.V., Sysoev N.N., Fadeeva I.V., Dolenko S.A., and Dolenko T.A. On the potentiality of using the fluorescence of humic substances for the determination of hydrological structures in coastal sea waters and in inland water basins // Oceanology. 2012. Vol. 52. No. 4. P. 566-575.
- 20 Hallegraeff G.M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase // Phycologia. 1993. Vol. 32. No. 2. P. 79–99
- 21. Hoge F.E., Swift R.N. Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter and fluorescence from chlorophyll a and other naturally occurring pigments // Applied Optics. 1981. Vol. 20. No. 18. P. 3197–3205.
- 22. Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E. Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering // Applied Optics. 1979. Vol. 18. No. 11. P. 1732–1745.
- 23. Luchinin Â.G. Light pulse propagation along the path: atmosphere rough surface sea water // Applied Optics. 2010. Vol. 49. No. 28. P.5059-5066.
- Measures R.M. Laser remote sensing: fundamentals and applications. Krieger, 1992. 524 P.
 Pershin S.M., Lednev V.N., Klinkov V.K., Yulmetov R.N., and Bunkin A.F. Ice thickness measurements by Raman scattering // Optics Letters. 2014. Vol. 39, P. 2573-2575.
- 26. Pershin S.M., Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lednev V.N., Lushnikov D., Morozov E.G., Yul'metov R.N. Remote sensing of Arctic Fjords by Raman lidar: heat transfer screening by layer of glacier's relict water // Physics of Wave Phenomena. 2012. Vol. 20. No. 3. P. 212–222.
- 27. Pershin S.M., Bunkin A.F., Luk'yanchenko V.A. Evolution of the spectral component of ice in the OH band of water at temperatures from 13 to 99 C // Quantum Electronics. 2010. Vol. 40. No.12. P. 1146.
- 28. Raimondi V., Cecchi G. Lidar Field Experiment for Monitoring Sea Water Column Temperature // EARSEL Advances in Remote Sensing. 1995. Vol. 3. P. 84-89. *Richardson L.L.* Remote sensing of algal bloom dynamics // BioScience. 1996. P. 492–501.
- 29
- 30. Rull F., Vegas A., Sansano A., Sobron P. Analysis of arctic ices by remote Raman spectroscopy // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2011. Vol. 80. No. 1. P. 148–155. 31. Seppälä J., Ylöstalo P., Kaitala S., Hällfors S., Raateoja M., Maunula P. Ship-of-opportunity based phycocyanin
- fluorescence monitoring of the filamentous cyanobacteria bloom dynamics in the Baltic Sea // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2007. Vol. 73. P. 489–500.
- 32. Soloviev A.V., Lukas R. Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool // Deep-Sea Research. 1997. Vol. 44. P. 1055–1076.

Laser remote probing of freshwater reservoir with high phytoplankton concentration

V.N. Lednev¹, M.Ya. Grishin^{1,2}, S.M. Pershin¹, A.F. Bunkin¹, I.A. Kapustin³, A.A. Molkov³, S.A. Ermakov³

¹ A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow 119991, Russia *E-mails: lednev@kapella.gpi.ru, pershin@kapella.gpi.ru* ² Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny 141700, Russia E-mail: mikhail.grishin@phystech.edu ³ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia *E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru*, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru, wave3d@mail.ru

Express diagnostics of large freshwater reservoirs is of great interest for both scientists and local authorities especially within a summer period due to rapid growth of phytoplankton (so-called algal bloom). Points of interest include changes of natural ecosystems and fresh water supply quality control during algal bloom. Conventional contact methods are of high man-power consumption and remote probing methods are of high demand. Laser remote probing methods are of great interest in optic remote probing methods due to quality of the information provided. Laser technology progress resulted in a compact LIDAR systems development that could be installed on unmanned aircraft vehicle. Results of laser remote probing of algal bloom in south area of Gorky freshwater reservoir are presented. Compact Raman LIDAR system was installed on ship and a backscattered spectra of upper water layer were digitized along the ship route. The perspectives of laser remote probing for express diagnostics of alga types variations were demonstrated. Elastic and Raman scattering as well as chlorophyll fluorescence were quantified, mapped and compared with data acquired by commercial STD-probe installed at a depth of 0.3 m below water surface. A good correlation between laser remote probing results and STD-probe data for algae concentration was established. Accuracy of water temperature measurements by Raman OH-band profile was shown to be dependent on chlorophyll fluorescence spectra interference due to high phytoplankton concentration. The results of laser remote probing of algal bloom in freshwater reservoir promote development of compact LIDAR systems installed on unmanned aircraft vehicles for fully automatic measurements of water properties at large area.

Keywords: lidar, laser remote probing, ecological monitoring of freshwater areas, water reservoirs eutrophication, multi-sensor measurements

> Accepted: 12.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-119-134

References

- 1. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Sergievskaya I.A., Andriyanova N.V., O vozmozhnostyakh radiolokatsionnoi diagnostiki zon evtrofirovaniya vodoemov (On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs), Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana, 2013, Vol. 49, No. 3, pp. 336-343.
- 2 Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii (Complex satellite monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
- 3. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Osobennosti proyavleniya na sputnikovykh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh korabel'nykh sledov v oblastvakh intensivnogo tsveteniva fitoplanktona (Radar manifestations of ship wakes in areas of intense phytoplankton bloom), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,
- 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 73–87. Pershin S.M., Bunkin A.F., "Skachok" tsentra i shiriny ogibayushchei spektral'noi polosy KR valentnykh kolebanii O-H pri fazovykh perekhodakh pervogo i vtorogo roda v vode ("A jump" in the position and width of 4. the Raman band envelope of O-H valence vibrations upon phase transitions of the first and second kinds in water), *Optika i spektroskopiya*, 1998, Vol. 85, pp. 209–212. Anderson D.M., Cembella A.D., Hallegraeff G.M., Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm
- 5. shifts and new technologies for research, monitoring, and management, Annual review of marine science, 2012, Vol. 4, pp. 143-176.
- Babichenko S., Kaitala S., Leeben A., Poryvkina L., Seppälä J., Phytoplankton pigments and dissolved organic matter distribution in the Gulf of Riga, *J. Mar. Syst.*, 1999, Vol. 23, pp. 69–82. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Fiorani L., Palucci A., Lidar fluorosensor calibration of the SeaWiFS chlorophyll 6.
- 7. algorithm in the Ross Sea, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 16, pp. 3205–3218. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Fiorani L., Palucci A., Artamonov E.S., Galli M. Remotely sensed primary production
- 8 in the western Ross Sea: results of in situ tuned models, Antarctic Science, 2003, Vol. 15, No. 01, pp. 77-84.
- 9. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Palucci A., Ribezzo S., Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and seawater quality monitoring in Antarctica, Int. J. Remote Sens., 2001, Vol. 22, pp. 369-384.

- 10. Becucci M., Cavalieri S., Eramo R., Fini L., Materazzi M., Raman spectroscopy for water temperature sensing, Laser Physics, 1999, Vol. 9, pp. 422-425.
- 11. Brown C.E., Fingas M.F., Review of the development of laser fluorosensors for oil spill application, Marine pollution bulletin, 2003, Vol. 47, No. 9, pp. 477–484. Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lednev V.N., Lushnikov D.L., Marchenko A.V., Morozov E.G., Pershin S.M.,
- 12 Yulmetov R.N., Remote sensing of seawater and drifting ice in Svalbard fjords by compact Raman lidar, Applied
- Optics, 2012, Vol. 51, No. 22, pp. 5477–5485.
 13. Bunkin A.F., Bunkin A., Voliak K.I. Laser remote sensing of the ocean: methods and applications, *Wiley-Interscience*, 2001, Vol. 5, pp. 150–195.
 14. Chelshele A.M. Denide A.M. Erster V.V. Leaster and applications of relations of the test and applications.
- 14. Chekalyuk A.M., Demidov A.A., Fadeev V.V., Lapshenkova T.V., Lidar mapping of phytoplankton and organic matter distributions in the Baltic Sea, Laser Spectroscopy of Biomolecules: 4th International Conference on Laser Applications in Life Sciences, 1993, pp. 401–405.
- 15. Dolenko T.A., Fadeev V.V., Gerdova I.V., Dolenko S.A., Reuter R., Fluorescence diagnostics of oil pollution in coastal marine waters by use of artificial neural networks, *Appl. Opt.*, 2002, Vol. 41, No. 24, pp. 5155–5166. Dolin L.S., Luchinin A.G., Water-scattered signal to compensate for the rough sea surface effect on bottom lidar
- 16.
- Domin D.S., Dalmin T.C., Wale Scale of Senter of Senter of Polymer for the Folger of a barrace effect on obtaining imaging, *Applied Optics*, 2008, Vol. 47, No. 36, pp. 6871–6878.
 Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms, *Proc. of SPIE*, 2014, Vol. 9240, 92400N.
 Fadeev V.V., Maslov D.V., Matorin D.N., Reuter R., Zavyalova T.I., Some peculiarities of fluorescence diagnostics.
- of phytoplankton in coastal waters of the Black Sea, Available at: http://las.Phys.uni-oldenburg.de/eProceedings/ *Vol01*, 2000, Vol. 1, No. 01, p. 1.
- 19. Fadeev V.V., Sysoev N.N., Fadeeva I.V., Dolenko S.A., Dolenko T.A., On the potentiality of using the fluorescence of humic substances for the determination of hydrological structures in coastal sea waters and in inland water basins, *Oceanology*, 2012, Vol. 52, No. 4, pp. 566–575.
- 20. Hallegraeff G.M., A review of harmful algal blooms and their apparent global increase, *Phycologia*, 1993, Vol. 32, No. 2, pp. 79–99.
 21. Hoge F. E., Swift R. N., Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter
- and fluorescence from chlorophyll a and other naturally occurring pigments, Applied Optics, 1981, Vol. 20, No. 18, pp. 3197-3205.
- 22. Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E., Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering, Applied Optics, 1979, Vol. 18, No. 11, pp. 1732-1745.
- Luchinin A.G., Light pulse propagation along the path: atmosphere rough surface sea water, *Applied Optics*, 2010, Vol. 49, No. 28, pp. 5059–5066. 23

- Vol. 49, No. 28, pp. 3039–3000.
 Measures R.M., *Laser remote sensing: fundamentals and applications*, Krieger, 1992, 524 p.
 Pershin S.M., Lednev V.N., Klinkov V.K., Yulmetov R.N., Bunkin A.F., Ice thickness measurements by Raman scattering, *Optics Letters*, 2014, Vol. 39, pp. 2573–2575.
 Pershin S.M., Bunkin A.F., Klinkov V.K., Lednev V.N., Lushnikov D., Morozov E.G., Yul'metov R.N., Remote sensing of Arctic Fjords by Raman lidar: heat transfer screening by layer of glacier's relict water, *Physics of Wave Physics Of Wave Physics*, 2012, Vol. 2012, Vol. 2021. Phenomena, 2012, Vol. 20, No. 3, pp. 212–222.
- 27. Pershin S.M., Bunkin A.F., Luk'yanchenko V.A., Evolution of the spectral component of ice in the OH band of water at temperatures from 13 to 99 C, *Quantum Electronics*, 2010, Vol. 40, No. 12, p. 1146. Raimondi V., Cecchi G., Lidar Field Experiment for Monitoring Sea Water Column Temperature, *EARSEL*
- 28 Advances in Remote Sensing, 1995, Vol. 3, pp. 84–89.
 29. Richardson L.L., Remote sensing of algal bloom dynamics, *BioScience*, 1996, pp. 492–501.
- 30. Rull F., Vegas A., Sansano A., Sobron P., Analysis of arctic ices by remote Raman spectroscopy, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, Vol. 80, No. 1, pp. 148–155. 31. Seppälä J., Ylöstalo P., Kaitala S., Hällfors S., Raateoja M., Maunula P., Ship-of-opportunity based phycocyanin
- fluorescence monitoring of the filamentous cyanobacteria bloom dynamics in the Baltic Sea, Estuar. Coast. Shelf Sci., 2007, Vol. 73, pp. 489-500.
- 32. Soloviev A.V., Lukas R., Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool, Deep-Sea Research, 1997, Vol. 44, pp. 1055–1076.