

УДК 535.361.13

ЛИДАРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИОННЫХ СЛОЕВ В ВОДЕ ПОДО ЛЬДОМ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Гришин М.Я.

*Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник,
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Аннотация

Впервые, насколько нам известно, с помощью лидара обратного рассеяния проведен неинвазивный (без возмущения среды) поиск следов стратификации рассеивающих центров (мутности) в воде в условиях полного штиля подо льдом на юго-западном шельфе озера Байкал. Зондирование проводили импульсным лидаром (3 нс, 532 нм, 2 мкДж) с приёмником на базе однофотонного лавинного фотодиода через просверленную во льду лунку. На расстоянии ~40 м от берега в лидарном сигнале обратного рассеяния на глубинах 5.5 и 6.5 м обнаружены слои с повышенным коэффициентом рассеяния, которые были интерпретированы как придонные слои воды из ручья, впадающего в озеро Байкал неподалёку от места проведения эксперимента. Контактные измерения распределения температуры по глубине, проведенные одновременно контактным датчиком, показали локальные повышения температуры воды на глубинах, близких к глубинам обнаруженных лидаром слоев.

Ключевые слова: лидар, озеро Байкал, стратификация, дистанционное зондирование, обратное рассеяние, температура воды

***LIDAR DETECTION OF STRATIFICATION LAYERS IN WATER
UNDER THE ICE OF LAKE BAIKAL***

Grishin M.Ya.

PhD, Researcher,

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,

Moscow, Russia

Abstract

For the first time to our knowledge, a non-invasive (without disturbing the environment) search for traces of stratification of scattering centers (turbidity) in water under no-wind conditions under the ice on the south-western shelf of Lake Baikal was conducted using a backscatter lidar. Sensing was conducted using a pulsed lidar (3 ns, 532 nm, 2 μ J) with a receiver based on a single-photon avalanche photodiode through a hole drilled in the ice. At a distance of ~ 40 m from the shore, layers with an increased scattering coefficient were detected in the lidar backscattering signal at depths of 5.5 and 6.5 m. These layers were interpreted as near-bottom water layers from a small creek flowing into Lake Baikal near the experiment site. Contact measurements of water temperature depth distribution, carried out simultaneously by a contact sensor, have shown local increases in water temperature at depths close to the depths of the layers detected by the lidar.

Keywords: lidar, Lake Baikal, stratification, remote sensing, backscattering, water temperature

Введение

Обнаружение потоков и слоёв воды подо льдом становится всё более востребованным в научных и технологических приложениях. Интерес к таким исследованиям возрос в последние десятилетия в связи с добычей нефти и газа в Арктике и мониторингом глобальных изменений климата. В лабораторных измерениях могут использоваться различные методы в зависимости от целей исследования, в то время как мониторинг обширных природных территорий может осуществляться только с помощью дистанционного зондирования. Лазерное дистанционное зондирование с помощью лидаров (лазерных радаров) [1] является перспективным способом определения физических свойств как льда, так и открытой воды, однако допускается использование только безопасных для глаз систем. Озеро Байкал в данном контексте является важным объектом исследования, поскольку содержит в себе более 20% мировых запасов чистой пресной воды и в зимний период покрывается льдом уникальной прозрачности.

Также важность и актуальность оперативного зондирования озера Байкал обусловлена опасностью загрязнения токсинами водоросли спирогира, которая уже распространилась на 60% шельфа вдоль береговой линии [2]. Основным загрязняющим фактором, стимулирующим рост спирогиры, является сброс фосфорных соединений ручьями и реками, впадающими в озеро. Лидарное зондирование стратификационных слоев с базированием на подвижных беспилотных платформах или с поверхности льда зимой, когда нет ветрового перемешивания воды, может обеспечить дистанционный мониторинг и оценку объёма вброса по вариациям упругого рассеяния в слоях воды.

Эксперимент

Место проведения эксперимента

Натурные эксперименты были проведены на юго-западном берегу озера Байкал возле деревни Большое Голоустное Иркутской области ($52^{\circ}0'33.9128''$ с.ш., $105^{\circ}22'6.3206''$ в.д., см. рисунок 1).

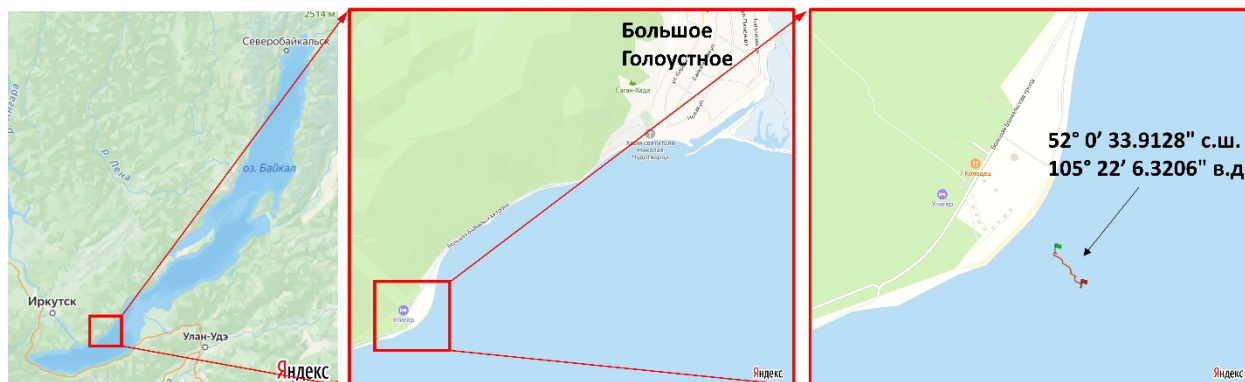


Рис. 1. Место проведения натурных экспериментов по лидарному зондированию на озере Байкал. Источник рисунка: авторская разработка с использованием открытых данных сервиса «Конструктор карт Яндекс»
<https://yandex.ru/map-constructor>

Лидар был размещён на поверхности льда, и зондирование воды проводили по схеме, показанной на рисунке 2, через лунку, просверленную во льду.

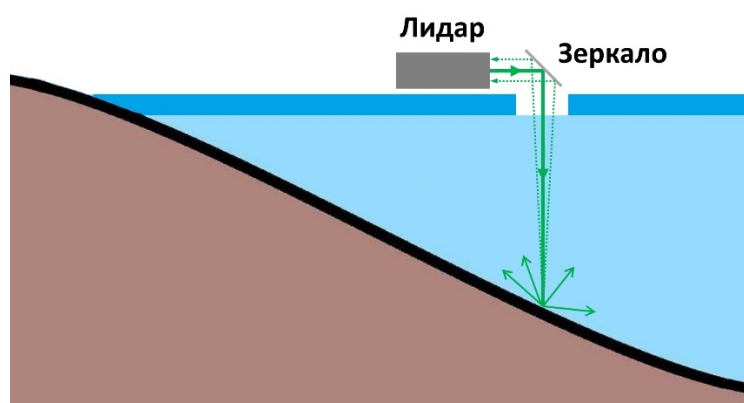


Рис. 2. Схема лидарного зондирования воды подо льдом озера Байкал.
Источник рисунка: авторская разработка.

Лидар

Компактный лидар, разработанный в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, построен на базе импульсного твердотельного лазера с активным элементом Nd^{3+} :АИГ и пассивным модулятором добротности (532 нм, 3 нс, 10 мкДж/импульс, 8 кГц) и однофотонного лавинного фотодиода в качестве детектора. Общий вид лидара приведён на рисунке 3.

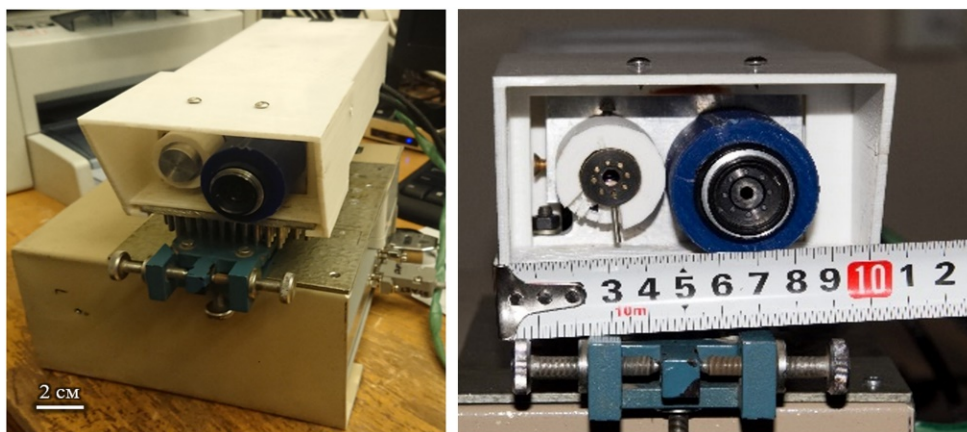


Рис. 3. Общий вид компактного лидара (слева), фотография передней панели оптического блока лидара с линейкой для масштаба (справа). На передней панели видны излучающий канал (синий тубус справа) и приёмный канал (белый тубус слева). Источник рисунка: авторская разработка.

Результаты и обсуждение

Зондирование проводили следующим образом. Лазерное излучение лидара направляли с помощью зеркала вертикально вниз в лунку во льду, лазер излучал 100000 импульсов, и детектор регистрировал рассеянное назад излучение. Для повышения отношения сигнал-шум и подавления солнечной засветки в приёмном канале лидара установлен узкополосный светофильтр с центральной длиной волны пропускания 532 нм. Лидар работает по принципу коррелированного по времени подсчета одиночных фотонов [3]: лазер испускает импульсы с низкой энергией с большой частотой повторения, и приемник лидара

настроен так, что для каждого лазерного импульса вероятность регистрации фотона много меньше единицы. При многократном повторении цикла «испускание лазерного импульса – детектирование одиночного фотона» происходит построение т.н. гистограммы – распределения обратно рассеянных фотонов по расстоянию от лидара. Таким образом, для нашего лидара результатом измерения является гистограмма, которая отражает распределение коэффициента обратного рассеяния в среде вдоль оси лазерного пучка. Одновременно с лидарным зондированием проводили контактные измерения распределения температуры по глубине контактным датчиком (профилометр качества воды AAQ177-CAD, JFE Advantech Co., Ltd., Япония).

На рисунке 4 показаны полученные в результате совместных измерений профили коэффициента обратного рассеяния по глубине после коррекции на квадрат расстояния (синий цвет, нижняя шкала) и температуры воды, измеренной контактным погружным датчиком (красный цвет, верхняя шкала). Для удобства визуального восприятия графики ориентированы так, что по вертикальной шкале сверху вниз отложена глубина от верхней грани льда. Толщина льда в месте проведения экспериментов составляла 76 см, в связи с чем данные по температуре воды на глубинах ~0-1 м отсутствуют.

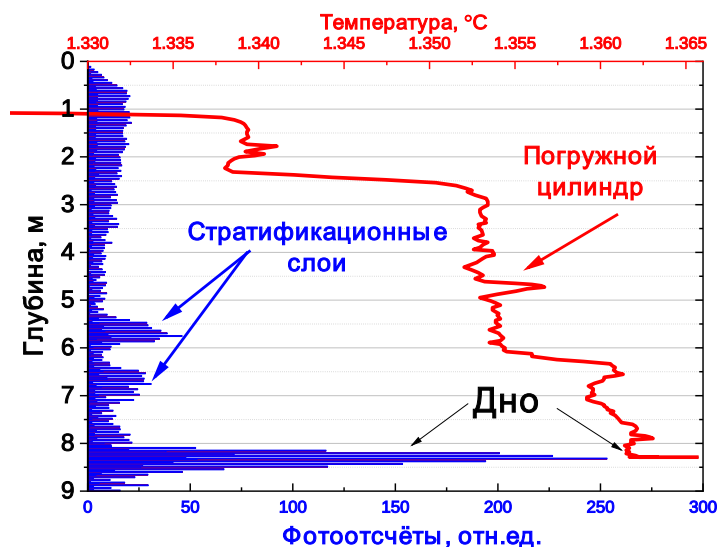


Рис. 4. Данные совместных измерений по глубине: профиль коэффициента обратного рассеяния, измеренный лидаром (синий цвет, нижняя шкала), и профиль температуры воды, измеренный погружным контактным датчиком (красный цвет, верхняя шкала). Источник рисунка: авторская разработка.

Из лидарной гистограммы на рисунке 4 видно, что на глубинах 5.5 и 6.5 м в воде присутствуют менее чистые рассеивающие слои, образованные взвесью микрочастиц разного размера, которые стратифицируются без конвекции в подледном объеме на шельфе. Возникновение слоев стратификации можно объяснить совместным воздействием двух факторов: а) подледным потоком воды из небольшого ручья, впадающего в озеро Байкал поблизости от места проведения измерений (~100 м к северо-западу); б) перемещением слоев воды за счет циклонической циркуляции [4]. На основании экспериментальных измерений и отношения сигнал/шум можно оценить, что лидар позволяет обнаруживать потоки воды на глубинах до 50 м. Благодаря малым габаритам, малой массе и энергоэффективности разработанный лидар может быть установлен на легких катерах или беспилотных квадрокоптерах [5], что позволяет осуществлять автоматический мониторинг пресноводных водоемов непрерывно, например, с помощью подводных беспилотников.

В показаниях погружного датчика было обнаружено два стабильных слоя сверху (толщиной ~ 1.3 м, глубина от 1 до 2.3 м) с большим градиентом температуры ($\sim 0.2^\circ\text{C}/\text{м}$) на тонкой границе (~ 10 см) между ними. Выявлено, что последующее увеличение температуры на глубинах от 3 м до дна сопровождается скачком температуры на глубине ~ 6.5 м, что совпадает с локализацией скачка коэффициента рассеяния, измеренного лидаром. Обнаруженные оптические неоднородности можно рассматривать как индикаторы циклонических циркуляций воды подо льдом озера. Так, обнаруженные придонные стратификационные слои с локальным нагревом отнесены к следу ручья, устье которого находится на ~ 100 м к северо-западу от места зондирования. Выявленный сдвиг потоков воды из ручья на юг совпадает с направлением глобальной циклонической циркуляции по западному шельфу озера Байкал [4]. Совокупность данных даёт основание для проведения систематического лидарного мониторинга циклонической циркуляции на озере Байкал, которая остаётся пока малоизученной, особенно в зимний период. Особый интерес здесь вызывает новый подход к физике трансформации энергии вращения планеты в циклоническую циркуляцию на основе диссипативно-центробежной неустойчивости.

Выводы

В результате экспериментов по лидарному зондированию прибрежной зоны озера Байкал были обнаружены слои стратификации с различными рассеивающими свойствами воды подо льдом. Также, с использованием коммерчески доступного контактного погружного датчика были обнаружены слои воды с различной температурой. Стратификация воды может быть обусловлена взвешенными частицами, приносимыми водой небольшого ручья, протекающего с холма в районе села Большое Голоустное, или сезонными циркуляционными потоками в озере Байкал. Расположение слоёв с повышенным коэффициентом рассеяния совпадает с локальным повышением температуры

воды, зарегистрированным контактным датчиком. Благодаря высокой чувствительности, компактности и энергоэффективности лидары обратного рассеяния могут быть установлены на беспилотных носителях для автономного мониторинга пресноводных водоёмов.

Библиографический список

1. Bunkin A.F., Voliak K.I. Laser remote sensing of the ocean: Methods and applications. New York: Wiley, 2001. 244 p.
2. Volkova E. A., Bondarenko N. A., Timoshkin O. A. Morphotaxonomy, distribution and abundance of *Spirogyra* (Zygnematophyceae, charophyta) in lake baikal, East Siberia // Phycologia. – 2018. – V. 57. – No. 3. – P. 298-308.
3. O'Connor D.V., Phillips D. Time-correlated single photon counting. Academic Press: London, 1984. 298 p.
4. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V. et al. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal // Aquatic Sciences. – 2015. – V. 77. – P. 171-182.
5. Гришин М.Я., Леднёв В.Н., Першин С.М., Капралов П.О. Ультеракомпактный флуоресцентный лидар на базе диодного лазера (405 нм, 150 мВт) для зондирования акваторий и подстилающей с квадрокоптера // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 498. С. 3-6.

Оригинальность 83%