

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов*, Ю. А. Гольдин, 2024

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, Москва, Россия

*vl.glukhov@inbox.ru

МОРСКИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛИДАРЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Статья поступила в редакцию 09.02.2024, после доработки 04.03.2024, принята в печать 21.03.2024

Аннотация

Обзор посвящен океанологическим исследованиям, выполняемым с использованием радиометрических (профилирующих) лидаров. В работе представлено современное состояние технических средств лидарной съемки, методов обработки лидарных данных, описание решаемых с помощью лидарного зондирования задач, представляющих научный и практический интерес в океанологии. Вопросы, связанные с лазерной батиметрией, спектральными лидарами, а также лидарами, устанавливаемыми на борту искусственных спутников Земли, являющиеся самостоятельными специфическими разделами, в обзоре не рассматриваются. Основное внимание уделено работам, выполненным в последние годы. Приведены сводные таблицы технических характеристик ряда наиболее интересных лидаров авиационного и судового базирования. Рассмотрены особенности их конструкций. Представлены результаты использования лидаров для определения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, в том числе с использованием поляризационных лидаров и активно развивающихся в последние годы лидаров высокого спектрального разрешения. Приведены результаты регистрации тонких слоев повышенного светорассеяния, наблюдаемых в разных акваториях. Даны результаты теоретических исследований по лидарным изображениям внутренних волн и экспериментальные результаты наблюдения внутренних волн в водах с различными типами стратификации гидрооптических характеристик. Рассмотрены вопросы применения лидаров для решения задач промысловой океанологии. Намечены тенденции развития и основные направления продолжения исследований.

Ключевые слова: радиометрический лидар, профилирующий лидар, поляризационный лидар, гидрооптические характеристики, тонкие светорассеивающие слои, внутренние волны, промысловая океанология

UDC 551.46.08

© V. A. Glukhov*, Yu. A. Goldin, 2024

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

*vl.glukhov@inbox.ru

MARINE PROFILING LIDARS AND THEIR APPLICATION FOR OCEANOLOGICAL PROBLEMS

Received 09.02.2024, Revised 04.03.2024, Accepted 21.03.2024

Abstract

The review focuses on research conducted using profiling (radiometric) lidars. The paper presents the current state of lidar surveying equipment, methods for processing lidar data, and describes the problems of scientific and practical interest in oceanology that can be solved using lidar sensing. The review does not cover issues related to laser bathymetry, spectral (Raman) and spaceborne lidars, as they are separate specific fields. The main focus is on recent research in profiling lidar field. Summary tables of the technical characteristics of several of the most interesting airborne and shipborne lidars are provided. Their design features are discussed. Results from using lidars to determine near-surface hydrooptical characteristics, including employing polarization lidars and recently developed high-resolution spectral lidars, are presented. Findings from observing thin scattering layers across

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А. Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических задач // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 104–128.

doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-9

For citation: Glukhov V.A., Goldin Yu.A. Marine profiling lidars and their application for oceanological problems. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 104–128. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-9

various aquatic regions are shown. The paper explores theoretical studies on lidar images of internal waves and experimental observations of internal waves in waters with different hydrooptical stratification. Lidars' application in addressing fisheries-related issues is examined. An overview of current development trends and future research directions is provided.

Keywords: radiometric lidar, profiling lidar, polarization lidar, hydrooptical characteristics, thin scattering layers, internal waves, fisheries

1. Введение

Морские радиометрические лидары (используется также термин «профилирующие лидары» — *profiling lidar*) основаны на регистрации временной зависимости мощности сигнала обратного рассеяния на несмещенной длине волны, формируемого в толще морской воды при её зондировании коротким мощным узконаправленным лазерным импульсом. Такие лидары позволяют определять гидрооптические характеристики приповерхностного слоя вод и исследовать их пространственное распределение [1–4], регистрировать и оценивать параметры различного рода неоднородностей и объектов, например, слоев повышенного светорассеяния, часто ассоциированных с повышенной концентрацией зоо- и фитопланктона [5–7], рыбных косяков [8–10]. Лидарная съемка позволяет также регистрировать внутренние волны и оценивать их параметры [11–15]. Важным разделом лидарного зондирования является лазерная батиметрия. Это единственное направление исследований, применяющееся регулярно и имеющее отработанные методики проведения измерений и интерпретации результатов.

Важнейшее преимущество лидарных методов по сравнению с другими дистанционными методами исследования океана (акустическими, радиолокационными) — возможность проведения измерений через границу раздела воздух–вода. Лазерное излучение сине-зеленого диапазона достаточно хорошо распространяется как на воздушном, так и на подводном участке трассы зондирования и пересекает границу раздела с относительно небольшими потерями. Это обеспечивает возможность установки лидара на борту авианосителя или судна. Ограничений на скорость и курс носителя не накладывается. При проведении лидарной съемки морских акваторий с авианосителя высота полета в большинстве случаев лежит в диапазоне 200–400 м. Границы диапазона обусловлены требованиями безопасности полета, чувствительностью аппаратуры, а также снижения влияния на результаты измерения атмосферного участка трассы зондирования, главным образом — низкой облачности. Лидарное зондирование позволяет проводить измерения в толще воды, не оказывая воздействия на происходящие процессы и исследуемые объекты. Лидарную съемку можно проводить как в светлое, так и в темное время суток.

Наиболее эффективно применение морских лидаров при их размещении на авианосителе. Авиационная лидарная съемка обеспечивает быстрый сбор оперативной информации о различных процессах на поверхности и в приповерхностном слое на значительных по площади акваториях. Благодаря высокой скорости сбора данных стоимость авиационной съемки существенно ниже, чем судовой. За один вылет (< 8 часов) самолет способен провести съемку на акватории, которая может быть покрыта судовой съемкой за неделю или больше. Авиационная лидарная съемка обеспечивает возможность получения «квази-синоптической» не искаженной временной изменчивостью картины пространственного распределения измеряемых характеристик. Это важно при съемках акваторий с высокой пространственно-временной изменчивостью. Авиационные лидары позволяют проводить измерения на акваториях, где исследования с судов затруднены или невозможны. Это мелководные акватории, акватории со сложным рельефом дна или со сложной ледовой обстановкой. В силу указанных причин значительное количество работ по лидарному зондированию выполнено с авиационными лидарами.

Для целого ряда задач интерес представляет установка морского лидара на борту судна. Судовая лидарная съемка может проводиться непрерывно по всему маршруту движения судна, обеспечивая возможность получения большого объема данных с высокой пространственной дискретностью. Данные судовых лидарных измерений удобно сопоставлять с данными контактных измерений.

Возможности использования методов лидарного зондирования морских акваторий сопряжены с рядом ограничений. В первую очередь нужно назвать небольшую дальность действия лидара в воде. В водах открытых районов океана глубина зондирования может достигать значений 50–70 м, в то время как для прибрежных морских районов характерны глубины зондирования 20–30 м. Важно отметить, что именно в этом приповерхностном слое наблюдается наиболее сильная изменчивость характеристик морской воды, здесь интенсивно протекают экологические процессы и именно этот слой подвергается наибольшему антропогенному воздействию.

Лидарные методы измерений являются дистанционными и косвенными, что осложняет проведение с их помощью абсолютных измерений. Возможность проведения лидарной съемки существенно зависит

от гидрометеоусловий. Взволнованная поверхность может вызывать значительные флуктуации на начальном участке эхо-сигнала, затрудняя оценку показателя обратного рассеяния по его амплитуде. Во многих случаях при анализе формы спада эхо-сигнала начальный участок из рассмотрения исключается. При волнении более 4–5 баллов при наличии на поверхности пены, а также в случаях приводного тумана или сильного снегопада проведение лидарных измерений оказывается затруднено или вообще невозможно. При проведении лидарной съемки в условиях открытого солнца необходимо контролировать ориентацию приемников, направляя их таким образом, чтобы солнечные блики не попадали в поле зрения приемной оптической системы.

Разработка морских радиометрических лидаров ведется, начиная с 1970-х гг. [16–21]. К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных разработке и использованию таких лидаров. По этой тематике есть несколько обзоров [22–28]. Вышел ряд интересных работ, не отраженных в обзорах. Кроме того, в существующих обзорах недостаточно полно описаны работы российских авторов.

Цель данного обзора — оценка современного состояния технических средств лидарной съемки, методов обработки лидарных данных, описание решаемых с помощью лидарного зондирования задач, представляющих научный и практический интерес в океанологии, определение тенденций развития и основных направлений продолжения исследований. В обзоре не рассматриваются вопросы, связанные с лазерной батиметрией, спектральными лидарами, а также лидарами, устанавливаемыми на борту искусственных спутников Земли, являющиеся самостоятельными специфическими разделами.

2. Конструкция морских лидаров

Большинство радиометрических лидаров построено по типовой схеме, включающей в себя импульсный лазерный излучатель, приемную оптико-электронную систему, блок управления лидаром, устройство оцифровки сигналов и блок визуализации и долговременной регистрации данных измерений. Одни из первых лидарных натурных измерений были проведены в 1977 г. с лидаром NASA [17]. Исследования с поляризационными лидарами начались в середине 1990-х гг. — лидар АПЛ (ИО РАН) [7] и лидар «Макрель 1» (ИОА СО РАН) [29]. В последующие годы различными научными группами был разработан ряд авиационных и судовых лидаров, предназначенных для океанологических исследований и решения задач промысловой океанологии [1, 9, 30–37]. Лидарная техника развивается и совершенствуется с учетом развития элементной базы. В первую очередь за счет развития лазерной техники и аппаратуры для оцифровки сигналов.

Размещение лидара на определенном носителе накладывает дополнительные требования на характеристики лидара. В случае размещения на авианосителе требуется большая энергия зондирующего импульса в связи с протяженностью атмосферного участка трассы зондирования. Судовое размещение лидара над поверхностью воды приводит к сокращению протяженности атмосферного участка трассы зондирования (с 200–500 м до 4–15 м), увеличению угла зондирования (из-за наличия пены у борта судна) и изменению режима съемки (вследствие уменьшения скорости носителя снижаются требования к частоте зондирования, увеличивается продолжительность циклов непрерывных измерений). Кроме того, увеличивается скорость спада лидарного эхо-сигнала. Размещение лидара в шахте научно-исследовательского судна устраняет влияние взволнованной поверхности, приводящей к повышенной изменчивости начального участка эхо-сигнала [11, 36].

Основные технические характеристики ряда современных лидаров авиационного и судового базирования, использовавшихся в исследованиях, опубликованных в последние годы, собраны в табл. 1 (авиационные лидары) и табл. 2 (судовые лидары).

Подавляющее большинство морских лидаров осуществляет зондирование на длине волны 532 нм. Выбор этой длины волны излучения обусловлен спектральной зависимостью показателя ослабления света морской водой и наличием надежного и удобного для использования в натурных условиях источника излучения — твердотельного лазера на АИГ: Nd^{3+} с модуляцией добротности и удвоением частоты излучения. Эта длина волны оптимальна для относительно мутных прибрежных вод, где минимальные значения показателя ослабления находятся в области длин волн 550–580 нм. Для открытых районов океана наименьшее ослабление света в воде достигается в диапазоне длин волн 450–490 нм. Смещение длины волны зондирующего излучения в синюю область позволит увеличить в таких водах глубину лидарного зондирования. При этом в мутных водах максимальная глубина зондирования уменьшится. Оценки, выполненные по результатам лабораторных исследований с макетом лидара и расчетов лидарных эхо-сигналов методом Монте-Карло показали, что при смещении в область 470–490 нм в чистых водах открытых районов океана величина сигнала увеличивается в 1,5–1,75 раз по сравнению с зондированием на длине волны 532 нм [39]. При сдвиге длины волны

Таблица 1

Table 1

Основные технические характеристики ряда современных авиационных лидаров

Technical characteristics of some modern airborne lidars

Название	FLOE [9]	АПЛ-3 [30]	ПАЛ-1 [31]	«Макрель 2» [32]	AOL-SIOM [33]	DWOL [34]
Длина волны зондирующего излучения, нм	532	532	532	532	532	486/532
Длительность зондирующего импульса по уровню 0,5, нс	7,2	7	10	7	1,5	4/8,7
Энергия зондирующего импульса, мДж	26	45	40	50	1,5	5,4/2,7
Частота зондирования, Гц	100	30	2	25	1000	100
Угол поля зрения приемной оптической системы, мрад (град.)	5 (0,29)/15 (0,86)	35 (2)	26 (1,5)	13 (0,74)	6 (0,34)	25 (1,4)
Диаметр входной оптики, мм	60/150	100/100	63/100	150	200	200
Регистрация линейно-поляризованных компонент эхо-сигнала	да	да	да	да	нет	нет
Тип поляризационной селекции	Отдельные каналы с поляроидами	Отдельные каналы с поляроидами	Отдельные каналы с поляроидами	Призма Волластона	—	—
Частота дискретизации приемной системы, ГГц	0,8	2,5	1,0	2,5	1,25	1,0
Разрядность приемной системы, бит	14	14	8	9	10	10

Таблица 2

Table 2

Основные технические характеристики ряда современных судовых лидаров

Technical characteristics of some modern shipborne lidars

Название	Лидар Университета Олд Доминион [1]	ПЛД-1 [35]	«Электрозонд» [36]	СПЛ-1 [38]	Лидар Чжэцзянского университета [37]
Длина волны зондирующего излучения, нм	532	532	532	539	532
Длительность зондирующего импульса по уровню 0,5 энергии, нс	4	7	10	10	10
Энергия зондирующего импульса, мДж	20	20	10–300	40	5
Частота зондирования, Гц	10	1	5	0,5–15	10
Угол поля зрения приемной оптической системы, мрад (град.)	244 (14)	35 (2)	Не указан	17,5 (1)–87,3 (5)	200 (11,5)/200 (11,5)
Диаметр входной оптики, мм	12,5	50/100	200	150	80/80
Регистрация поляризованных компонент эхо-сигнала	да	да	да	да	да
Тип поляризационной селекции	Поляризационный светоделительный куб	Отдельные каналы с поляроидами	Отдельные каналы с поляроидами	Отдельные каналы с поляроидами	Отдельные каналы с поляроидами
Частота дискретизации приемной системы, ГГц	1,0	2,5	0,5	2,5	0,5
Разрядность приемной системы, бит	8	14	8	9	14

в область 560–580 нм величина сигнала в мутных водах увеличивается в 1,5 раза. Отметим, что поскольку в мутных водах глубина лидарного зондирования существенно меньше, чем в прозрачных, то и выигрыш в глубине зондирования по абсолютной величине при переходе к оптимальной длине волны зондирующего излучения в мутных водах оказывается заметно меньшим, чем в прозрачных. Целесообразно использовать двухволновую систему, позволяющую выполнять зондирование одновременно на двух длинах волн или с оперативным переключением длины волны. Использование двухволнового источника зондирующего излучения реализовано в авиационном лидаре [34]. В этом лидаре использован стандартный источник на длине волны 532 нм и параметрический генератор, позволяющий получить зондирующее излучение на длине волны 486 нм. Длина волны 486 нм соответствует линии Фраунгофера, что обеспечивает снижение фонового солнечного излучения в светлое время суток [40]. При регистрации лидарных эхо-сигналов используется режим накопления по 100 зондированиям. Натурные эксперименты, выполненные с борта самолета в водах разного типа, показали, что в открытых океанских водах глубина зондирования на длине волны 486 нм почти на 25 % превосходит глубину зондирования на длине волны 532 нм (100 и 75 м соответственно) [34]. В работе [41] представлен результат разработки трехволновой лазерной системы для зондирования морской воды с авианосителя, работающей на длинах волн 452 нм, 532 нм и безопасной для глаз длины волны 1572 нм, предназначенной для канала измерения высоты авианосителя над поверхностью воды.

Угол поля зрения авиационных лидаров обычно составляет от $0,3^\circ$ [9] до 2° [30], что позволяет регистрировать вертикальный профиль гидрооптических характеристик. В судовых лидарах, предназначенных для измерения гидрооптических характеристик, угол поля зрения может быть увеличен вплоть до значений $12\text{--}14^\circ$ [1, 4], что увеличивает площадку на поверхности воды, с которой приемная система собирает рассеянное назад излучение. Такое увеличение поля зрения приемной системы позволяет регистрировать многократно рассеянное излучение. Влияние величины угла поля зрения на характеристики принимаемых сигналов исследовано в работе [4]. В ней приведены результаты экспериментальных исследований с судовым лидаром с переменным углом поля зрения ($2,3\text{--}11,5^\circ$) и результаты соответствующих расчетов методом Монте-Карло. Более подробно результаты этой работы рассмотрены в разделе 3.1.

Существенный прогресс в совершенствовании метрологических характеристик лидаров связан с развитием широкополосных АЦП, используемых для оцифровки сигналов обратного рассеяния. Современные возможности АЦП позволяют производить оцифровку лидарных эхо-сигналов с частотой дискретизации 2,5 ГГц и выше, что соответствует вертикальному разрешению примерно 4–5 см. При этом итоговая разрешающая способность лидара по глубине ограничивается длительностью импульсной характеристики измерительной системы, включающей в себя длительность зондирующего импульса и длительность отклика фотоприемника.

Важную роль играет величина динамического диапазона приемо-регистрирующей системы. Во многих случаях максимальная глубина лидарного зондирования определяется ограниченностью динамического диапазона. Для его расширения в радиометрических лидарах используют логарифмический усилитель [9, 42], метод ранжирования [38] и разные приемники для ближней и дальней зоны лидарного эхо-сигнала [36]. Применение логарифмического усилителя расширяет динамический диапазон регистрирующей системы до значений $\sim 10^4$, что позволяет одновременно регистрировать большой по амплитуде сигнал от верхних слоев воды и слабые сигналы от светорассеивающих слоев, косяков рыб или дна, находящихся вблизи предельной глубины зондирования лидара. Использование логарифмического усилителя может приводить к некоторому искажению информации о вертикальном распределении гидрооптических характеристик.

Метод ранжирования основан на одновременном использовании двух каналов оцифровки сигнала, включающих предварительный усилитель и АЦП [38]. Принятый сигнал делится на два канала с разными коэффициентами усиления предварительного усилителя. Коэффициенты усиления подобраны так, что во входной диапазон первого канала АЦП попадает участок эхо-сигнала от верхних слоев воды с большими амплитудами, а второго канала — эхо-сигнала от больших глубин с малыми амплитудами, в то время как начальный участок эхо-сигнала отрезан. Максимальный динамический диапазон регистрации при использовании такой комбинации примерно тот же, что и при использовании логарифмического усилителя. Таким образом, динамический диапазон регистрации расширяется для каждого эхо-сигнала. Недостатком такой схемы является необходимость удвоения регистрирующих каналов.

В работах [1, 43] для расширения динамического диапазона используется метод «конструирования» результирующего эхо-сигнала из фрагментов, полученных при разном коэффициенте усиления ФЭУ и соответствующих разным по амплитуде участкам сигнала, поступающим в одноканальное АЦП с фиксированным входным диапазоном. Фрагменты сигнала регистрируются в разные последовательные моменты времени и соответствуют разным точкам пространства. Поэтому такой метод может быть использован только в однородных водах.

Регистрация временной зависимости состояния поляризационных компонент лидарного эхо-сигнала дает важную дополнительную информацию, позволяющую более полно и точно определять распределения гидрооптических характеристик и различного рода неоднородностей в толще морской воды [7, 14, 44, 45]. Для этого в ряде лидаров предусмотрена одновременная регистрация ко- (совпадает с поляризацией зондирующего излучения) и кросс-поляризованных (ортогональна зондирующему излучению) компонент эхо-сигнала. Такая регистрация может быть реализована с помощью двух приемных оптических каналов с соответствующим образом ориентированных поляроидов на входе оптических систем [9, 30, 31, 35, 37, 38]. Другая схема основана на использовании одной общей приемной оптической системы и разделении ортогонально поляризованных компонент эхо-сигнала с помощью призмы Волластона (или поляризационного светоделительного куба), устанавливаемой после приемной оптической системы [1, 32]. Плюсом такого устройства приемной системы является возможность использования только одного приемного телескопа, стабильность и высокая степень поляризационной селекции, а также точное соотношение между амплитудами принимаемых компонент эхо-сигнала.

Перспективным для применения в морских лидарах представляется использование в приемном канале метода коррелированного по времени счета фотонов (time correlated single photon counting — TCSPC) [46]. Метод заключается в регистрации одиночных фотонов и измерении времени их прихода относительно момента испускания зондирующего импульса. Время прихода фотона измеряется с высокой разрешающей способностью. В качестве источника зондирующих импульсов используются лазеры с малой энергией отдельного импульса и высокой частотой повторения. Результирующий сигнал накапливается по большому количеству актов зондирования. К достоинствам метода относятся возможность использования «маломощных» лазеров, отсутствие «звона» в регистрирующей системе, вызванного приходом мощного сигнала от верхних слоев воды, и большой диапазон линейности регистрации амплитуды эхо-сигнала. К недостаткам метода относится большое время накопления, составляющее десятки секунд. Это затрудняет использование таких лидаров на быстро движущихся носителях, а также в акваториях с высокой пространственной изменчивостью гидрооптических характеристик.

О разработке судового лидара, использующего метод коррелированного по времени счета фотонов, и о результатах его натурных испытаний сообщается в [47]. В лидаре используется лазер на длине волны 532 нм, с энергией зондирующего импульса 2,5 мкДж, длительностью импульса 300 пс и частотой повторения 200 кГц. В приемном канале используются ФЭУ Hamamatsu H10721–20. Длительность строка составляет 256 пс, время накопления сигнала — 30 с. Результаты испытаний продемонстрировали эффективность использования указанной техники для регистрации формы эхо-сигнала до глубин 50–80 м.

Лидарная техника непрерывно совершенствуется с учетом развития элементной базы за счет появления новых идеи и методов лидарного зондирования.

3. Применение лидаров для решения океанологических задач

3.1. Определение гидрооптических характеристик

Лидарный эхо-сигнал содержит информацию о гидрооптических характеристиках морской воды. Впервые схема лидарного зондирования была использована для измерения гидрооптических характеристик морской воды во время 5 рейса НИС «Дмитрий Менделеев» в 1970-м г. [18]. Измерения выполнялись на станциях в однородных по глубине прозрачных водах открытых районов океана с использованием устройства, погружаемого под поверхность воды. Начальная расходимость лазерного пучка составляла $0,17^\circ$ (3 мрад), угол поля зрения приемной системы составлял 20° (349 мрад), база (расстояние между оптическими осями источника и приемника) — 1 м. Величина показателя поглощения рассчитывалась по скорости спада эхо-сигнала в диапазоне глубин 7–40 м. Применимость метода была продемонстрирована в достаточно широком диапазоне изменения показателя поглощения.

Форма эхо-сигнала описывается лидарным уравнением [7, 19, 48]. С учетом влияния вклада многократного рассеяния зависимость мощности эхо-сигнала P от времени t имеет вид:

$$P\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = \frac{c_w W_0 A T_O (1-r)^2}{2(nH + Z)^2} \beta'(\pi, Z) \exp\left[-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ'\right], \quad (1)$$

где Z и H — протяженности подводного и надводного участков трассы зондирования, c_w — скорость света в морской воде, n — показатель преломления морской воды, W_0 — энергия зондирующего импульса, A — площадь приемной апертуры, T_O — пропускание приемной системы, $r \approx 0,02$ — коэффициент отражения

Френеля для границы раздела воздух—морская вода, $\alpha(Z)$ — показатель ослабления лидарного эхо-сигнала, $\beta'(\pi, Z)$ — эффективное значение показателя направленного рассеяния $\beta(\theta, Z)$ (volume scattering function — VSF) при значении угла рассеяния $\theta = 180^\circ$. Истинная глубина z может быть пересчитана из Z с учетом угла зондирования φ . Момент времени t отсчитывается от момента пересечения зондирующим импульсом поверхности воды.

Связь $\beta(\theta, Z)$ с показателем рассеяния b (scattering coefficient) и индикатрисой рассеяния $x(\theta)$ (scattering phase function — SPF) определяется соотношениями:

$$\beta(\theta, Z) = \frac{b(Z)}{4\pi} x(\theta), \quad b(Z) = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta, Z) \sin \theta d\theta,$$

если индикатриса рассеяния удовлетворяет условию нормировки

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi x(\theta) \sin \theta d\theta = 1.$$

Значения $\beta'(\pi)$ и α зависят от индикатрисы рассеяния $x(\theta)$, показателей поглощения a и рассеяния b и параметров лидарной системы, таких как высота установки лидара над поверхностью воды H и угол поля зрения приемника 2γ . Величина $\beta'(\pi)$ учитывает вклад в лидарный эхо-сигнал многократно рассеянного излучения [19]. При малых значениях t вклад многократно рассеянных фотонов практически отсутствует, поэтому на начальном участке спада эхо-сигнала $\beta'(\pi) \approx \beta(\pi)$. Значение экспоненты при малых t близко к 1, поэтому вершина эхо-сигнала несет информацию о $\beta(\pi)$ и при соответствующей калибровке позволяет определить значение этой характеристики. Зависимость α от гидрооптических характеристик, параметров лидарной системы и геометрии зондирования в предположении однородного распределения гидрооптических характеристик по глубине исследовано в [19] методом Монте-Карло. Расчеты выполнены для широкого диапазона изменения гидрооптических характеристик и реальной индикатрисы рассеяния, измеренной в Саргассовом море. В расчетах полагается, что источник излучает мононаправленный короткий лазерный импульс, описываемый δ -функцией Дирака, поверхность воды плоская, $H = 150$ м, диаметр приемной оптической системы $D = 300$ мм, $2\gamma = 1,2^\circ$ (20,4 мрад). Расчеты проведены для временного интервала 0–90 нс, что соответствует диапазону глубин 0–10 м.

Для оценки возможного вклада многократного рассеяния в лидарный эхо-сигнал при заданной геометрии вводится безразмерный параметр cR — отношение радиуса пятна на воде $R = H \tan \gamma$, с которого приемная оптическая система собирает рассеянное назад излучение, к длине свободного пробега фотона в воде, равной $1/c$. Результаты расчетов показали, что α в зависимости от cR меняется в диапазоне от показателя диффузного ослабления света K_d до показателя ослабления света морской водой c . В общем случае K_d зависит от условий освещения. В данном случае сравнение идет с K_d , рассчитанным для случая положения солнца в зените и отсутствию вклада атмосферы по формуле [49]:

$$K_d = 1,0395 \cdot D_0 (a + b_b), \quad (2)$$

где a — показатель поглощения света морской водой, b_b — показатель рассеяния назад, $D_0 = \frac{1-g}{\cos \theta_{0w}} + 1,197g$, θ_{0w} — угол преломления прямых солнечных лучей, g — доля диффузного излучения в общем потоке излучения, падающего на поверхность.

На рис. 1 показаны результаты расчетов зависимости отношений α/c (рис. 1, а) и α/K_d (рис. 1, б) от cR для различных значений параметра выживания фотона $\omega_0 = b/c$, где b — показатель рассеяния света морской водой. Из результатов расчета следует, что при малых значениях cR лидарный коэффициент ослабления α близок по своей величине к c . При $cR > 4$ –5 α близок к K_d . Малые значения cR , необходимые для регистрации c , технически реализуемы в судовых лидарах, но практически нереализуемы в авиационных.

Экспериментальные исследования зависимости α от cR выполнены в работе [4] для судового лидара. Для проведения исследования использовался лидар с переменным углом поля зрения приемного канала. Диапазон изменения 2γ составлял 2,3–11,5° (40–200 мрад). Высота установки лидара над поверхностью воды составляла 9 м. Лидарное зондирование сопровождалось сопутствующими измерениями a , c и показателя рассеяния назад b_b . Выполнялись расчеты с использованием лидарного уравнения и метода Монте-Карло. На рис. 2 показаны экспериментальные значения α для слоя 4–10 м в зависимости от угла поля зрения, полученные на станции в Желтом море. Погрешность определения измеряемой величины отмечена на рисунке вертикальными отрезками. Здесь же показаны результаты расчетов α по аналитической мо-

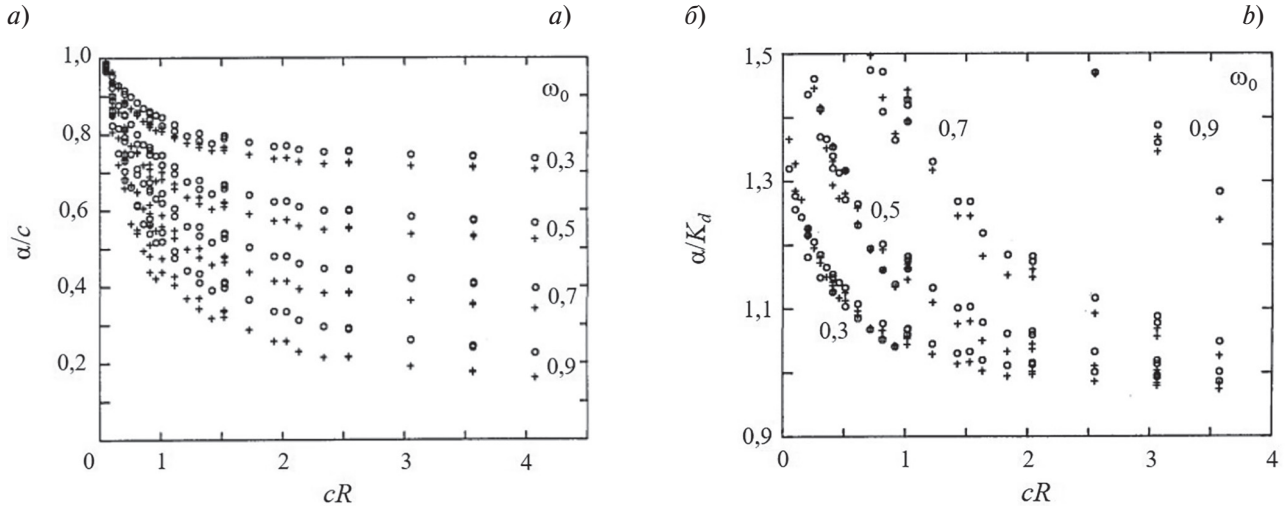


Рис. 1. Зависимость отношений α/c (а) и α/K_d (б) от cR для различных значений параметра выживания фотона ω_0 [19]

Fig. 1. Dependence of the α/c ratio (a) and the α/K_d ratio (b) on cR for various values of the single scattering albedo ω_0 [19]

дели и методом Монте-Карло. Сравнение экспериментальных данных и результатов численных расчетов показало хорошее соответствие (коэффициент детерминации $R^2 > 0,91$). Из приведенных на рисунке результатов следует, что лидарный α близок к K_d при $2\gamma = 11,5^\circ$ (200 мрад). Соответствующее значение cR составляет 0,42.

В работе [1] проведено исследование связи α и K_d с использованием судового лидара, установленного на высоте 4,3 м над поверхностью воды. Угол поля зрения приемной оптической системы лидара составляет 14° (244 мрад), соответствующие значения cR — 0,26–0,63. Сопоставление α , K_d , рассчитанного по формуле (2), и K_d , измеренного на станциях, показано на рис. 3. На рисунке представлены результаты определения указанных характеристик вдоль маршрута судна, проходящего через воды с различными значениями гидрооптических характеристик — области кокколитофоридных цветений, чистых олиготрофных вод и прибрежных замутненных вод. На всем маршруте судна наблюдается хорошее соответствие значений α и K_d .

Приведенные выше результаты исследований показывают, что авиационные и судовые лидары могут быть использованы для дистанционного измерения K_d в однородном по глубине верхнем слое морской воды. Проведение лидарной съемки с движущегося судна или авианосителя позволяет получить пространственные распределения значения K_d вдоль маршрута движения [1, 2, 50], а при соответствующей организации лидарной съемки — двумерное (площадное) распределение [31]. Связь α и K_d зависит от величины угла поля зрения приемной системы

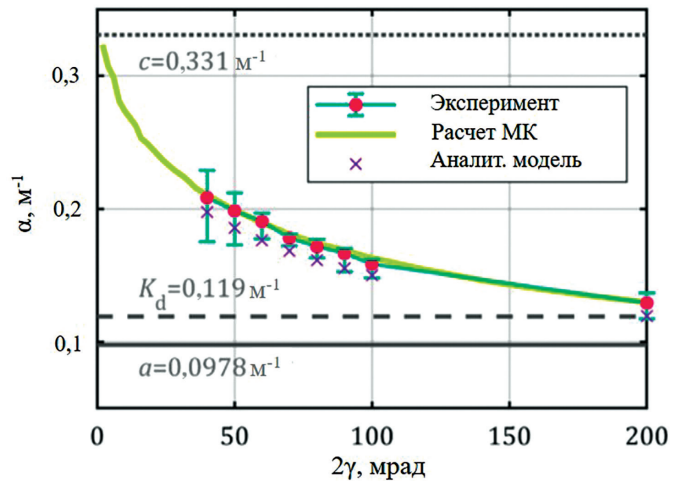


Рис. 2. Экспериментальные значения α для слоя 4–10 м в зависимости от угла поля зрения при $\omega_0 = 0,7$ [4]

Fig. 2. Experimental values of the lidar attenuation coefficient α at different FOVs ($\omega_0 = 0.7$) [4]



Рис. 3. Результат сопоставления пространственных распределений α и K_d вдоль маршрута судна [1]

Fig. 3. The result of comparing the spatial distribution of α and K_d along the vessel route [1]

2γ , высоты размещения лидара над поверхностью воды и значений гидрооптических характеристик. В дальнейшем необходимо исследовать зависимость значения угла поля зрения приемной системы $2\gamma'$, при котором $\alpha \approx K_d$ для широкого диапазона изменения гидрооптических характеристик, от высоты размещения лидара над поверхностью воды.

Дополнительные возможности по измерению гидрооптических характеристик открываются с использованием поляризационных лидаров, в которых производится одновременная регистрация ко- и кросс-поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала. В [51] найдена связь профиля показателя рассеяния света морской водой с временной зависимостью степени поляризации рассеянного назад излучения. Степень поляризации лидарного сигнала $g(t)$ определяется формулой:

$$g(t) = \frac{P_{co}(t) - P_{cross}(t)}{P_{co}(t) + P_{cross}(t)}. \quad (3)$$

Предполагается, что угол поля зрения приемной оптической системы лидара много больше исходной расходимости источника излучения. Предполагается также, что ϕ — фактор деполяризации, зависящий от значений диагональных элементов матрицы Мюллера M_{11} и M_{22} и индикатрисы рассеяния, а также отношение M_{11}/M_{22} меняются с глубиной значительно слабее, чем показатель рассеяния b . Это предположение оправдано, когда изменения значений этих величин с глубиной определяются изменением концентрации рассеивающих частиц, а форма, распределение частиц по размерам и показатель преломления с глубиной не меняются. В указанных предположениях получено следующее выражение:

$$b\left(t = \frac{2Z}{c_w}\right) = -\frac{1}{\phi c} \frac{d}{dt} \ln g(t). \quad (4)$$

Трудность практического использования данного выражения связана с недостатком априорной информации о возможных значениях фактора деполяризации ϕ . В работе [7] путем сравнения данных лидарных и сопутствующих измерений найдено значение $\phi = 0,025$ для океанских вод с показателем ослабления $c = 0,2-0,4 \text{ м}^{-1}$ и $\omega_0 = 0,8$. Для других условий это значение требует уточнения. В указанной работе получено хорошее согласие рассчитанных значений профиля b и измеренных *in situ* профилей c . Прямых сопоставлений рассчитанных значений b с значениями b , измеренными *in situ*, в этой работе не проводилось.

В работе [52] предложен алгоритм получения ряда первичных гидрооптических характеристик из данных двухканального лидара, в котором приемники в каналах имеют разную диаграмму направленности, одна из которых имеет сложную угловую зависимость. Использование алгоритма не предполагает однородность вертикального распределения исследуемого слоя. К настоящему времени этот алгоритм не получил экспериментальной реализации и не сформулированы количественные требования к используемой аппаратуре.

3.2. Определения гидрооптических характеристик с использованием лидаров высокого спектрального разрешения

В соответствии с уравнением (1) одновременно измерить $\alpha(z)$ и $\beta(\pi, z)$ можно только в случае однородного по глубине участка трассы зондирования и наличия радиометрической калибровки лидарной системы [53]. Возможность одновременного измерения этих величин может быть достигнута с использованием морского лидара высокого спектрального разрешения (HSRL — high spectral resolution lidar). Такой лидар позволяет получить $\alpha(z)$ и $\beta(\pi, z)$ из лидарных эхо-сигналов путем спектрального разделения компонент, сформированных упругим рассеянием и рассеянием Мандельштама-Бриллюэна (М-Б), характеризующимся сдвигом длины волны порядка пикометров. Первоначально эта методика была разработана при лидарном зондировании атмосферы [54]. Она сочетает методы регистрации временных и спектральных характеристик эхо-сигналов [55–57].

В лидарах высокого спектрального разрешения зондирование осуществляется импульсным излучением на длине волны вблизи 532 нм с высокой степенью монохроматизации (ширина полосы менее 1 пм). Эхо-сигнал состоит из набора компонент, сформированных рэлеевским рассеянием на молекулах воды (R), рассеянием на взвешенных частицах, содержащихся в морской воде (p), рассеянием М-Б, комбинационным рассеянием на молекулах воды, флуоресценцией хлорофилла «а» и окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ). Сигналы комбинационного рассеяния и флуоресценции имеют значительное смещение по длине волны и могут быть отфильтрованы интерференционными фильтрами. Приемная оптическая система лидара регистрирует компоненты, сформированные рэлеевским рассеянием на молекулах воды и рассеянием на частицах, а также компоненту, сформированную рассеянием М-Б. Спек-

тральные компоненты рассеяния М-Б смещены относительно центральной полосы зондирования примерно на 7–8 ГГц (менее 10 пм) слева и справа от неё и имеют ширину около 1 ГГц (около 1 пм). Принятый эхо-сигнал с помощью светоделительного устройства направляется на два фотоприемных канала. Первый канал (combined channel) регистрирует полный сигнал обратного рассеяния, а второй канал (MB channel) — только сигнал рассеяния М-Б. В качестве спектрального дискриминатора во втором канале, полностью подавляющего излучение на несмещенной длине волны, могут быть использованы, например, интерферометр Майкельсона [58] или ячейка на парах йода, одна из линий поглощения которой при заданной температуре совпадает с линией зондирующего излучения [56].

Эхо-сигнал первого канала можно представить в виде:

$$P_{comb}(z) \sim P_R \beta_R(\pi, z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_R(z') dz'\right) + P_p \beta_p(\pi, z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_p(z') dz'\right) + P_{MB} \beta_{MB}(\pi, z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_{MB}(z') dz'\right), \quad (5)$$

где $\alpha(z)$ и $\beta(\pi, z)$ — соответствующие коэффициенты лидарного эхо-сигнала в зависимости от характера рассеяния, а P_R, P_p, P_{MB} — калибровочные коэффициенты, определяющиеся параметрами используемого лидара.

Сигнал во втором канале можно представить в виде:

$$P_{MB}(z) \sim P_{MB} \beta_{MB}(\pi, z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_{MB}(z') dz'\right). \quad (6)$$

В следствие малого смещения длины волны излучения М-Б $\alpha_R(z) = \alpha_p(z) = \alpha_{MB}(z)$. Соотношение интенсивностей релеевского рассеяния и рассеяния М-Б оценивается отношением Ландау-Плачека. Для указанных длин волн и диапазона возможных температур приповерхностного слоя это отношение составляет 0,02 [59]. В связи с этим, компонентой релеевского рассеяния можно пренебречь. При тех же условиях значение $\beta_{MB}(\pi)$ не зависит от глубины и является практически постоянной величиной [60]. Таким образом, в эхо-сигнале первого канала остается 2 компоненты — эхо-сигнал рассеяния на частицах и эхо-сигнал рассеяния М-Б. Получается система из двух уравнений с двумя неизвестными — $\alpha_{MB}(z)$ и $\beta_p(\pi, z)$. Эхо-сигнал рассеяния М-Б регистрируется во втором канале и позволяет определить $\alpha_{MB}(z)$. В соответствии с результатами работы [61] с учетом известного значения пропускания М-Б канала (T_{MB}) можно записать выражение для расчета значения $\beta_p(\pi, z)$:

$$\beta_p(\pi, z) = \beta_{MB}(\pi, z) \frac{T_{MB} P_{comb}(z)}{P_{MB}(z) - 1}. \quad (7)$$

В случае, если угол поля зрения приемной системы лидара высокого спектрального разрешения достаточно большой, $\alpha \approx K_d$. Значение $\beta_p(\pi, z)$ позволяет оценить значение показателя рассеяния назад частицами b_{bp} [62]:

$$b_{bp}(z) = 2\pi\chi\beta_p(\pi, z), \quad (8)$$

где χ — коэффициент, связывающий b_{bp} и $\beta_p(\pi, z)$ и зависящий от вида индикатриссы рассеяния. В лидарных исследованиях разными коллективами были получены оценки коэффициента χ , значения которого меняются в диапазоне от 0,5 [62] до 1 [53].

Испытание лидаров высокого спектрального разрешения авиационного [55, 57] и судового [56] базирования были выполнены в однородных по глубине водах. Анализ результатов исследований показывает высокую степень соответствия данных о величинах K_d и b_{bp} , полученных лидарным методом и *in situ*, для глубин до 30 м. В рамках авиационно-судового эксперимента, проведенного в северной Атлантике, коэффициенты корреляции для величины K_d составил 0,90, а для величины b_{bp} — 0,94 [57].

В дальнейшем с использованием HSRL интересно исследовать возможность измерения величин K_d и b_{bp} в широком диапазоне их изменчивости.

3.3. Регистрация подповерхностных слоев повышенного светорассеяния

Возможность регистрации вертикального профиля гидрооптических характеристик приповерхностного слоя является важным достоинством метода лидарного зондирования. В частности, радиометрические лидары позволяют регистрировать подповерхностные слои повышенного светорассеяния и оценивать их параметры. Светорассеивающие слои проявляются на спаде эхо-сигнала в виде локальных максимумов, положение которых даёт информацию о глубине залегания слоя. Такие слои могут быть образованы как

фито- и зоопланктоном, так и минеральной взвесью. Важность изучения подповерхностных слоев обусловлена рядом причин. Пассивные спутниковые методы, дающие информацию о горизонтальных распределениях концентрации планктона и взвешенного вещества в относительно тонком поверхностном слое, не учитывают вклад заглубленных слоев, в которых концентрация может существенно возрасти. Использование данных лидарного зондирования позволяет корректировать результаты расчета биомассы планктона, проводимые по спутниковым данным в исследуемом районе [63, 64]. Во многих случаях подповерхностные слои повышенного светорассеяния приурочены к положению пикноклина. Лидарная регистрация пространственно-временной изменчивости положения светорассеивающих слоев позволяет получать информацию о гидрологических процессах в приповерхностном слое [12, 13].

Лидарный метод обладает высокой чувствительностью к изменчивости гидрооптических характеристик, позволяющей регистрировать их относительно небольшие изменения. На рисунке 4 показан пример регистрации слоя, расположенного на глубине 24,5 м, в котором увеличение показателя ослабления составило всего 10% от фонового [38]. Измерения были выполнены с использованием судового поляризационного лидара СПЛ-1 (разработка ИО РАН [38]) на станции в Южной Атлантике. Зондирование сопровождалось синхронными измерениями профиля показателя ослабления и температуры, выполненных погружаемым прозрачномером. Обработка лидарных эхо-сигналов производилась методом базового сигнала [38]. Приведенный профиль b_{eff} является результатом вычитания из лидарного эхо-сигнала функции аппроксимации, построенной по вышележащему квазиоднородному слою. Такой метод позволяет определить глубину залегания, толщину и структуру слоя, но не дает возможности определить значения гидрооптических характеристик в слое.

Регистрации подповерхностных слоев повышенного светорассеяния, формирующихся под воздействием разных факторов (апвеллинги, течения, речной сток, вихри) с помощью авиационного лидара FLOE, посвящен цикл работ [6, 65–67]. Алгоритм обработки кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала включал следующие этапы: усреднение результатов 100 зондирований, корректировка геометрического фактора (ослабления, пропорционального квадрату дистанции), вычитание функции экспоненциального затухания (показатель экспоненты определялся по двум точкам на эхо-сигнале, соответствующим глубинам 2 м и 0,8 от максимальной глубины зондирования), компенсация экспоненциального затухания выявленных неоднородностей на спаде эхо-сигнала. Такая обработка позволяет оценить глубину залегания, структуру и относительную величину слоя, но не дает возможности получать абсолютные значения гидрооптических характеристик. Пример зарегистрированного в заливе Аляска тонкого светорассеивающего слоя, образованного, предположительно, планктоном, показан на рис. 5.

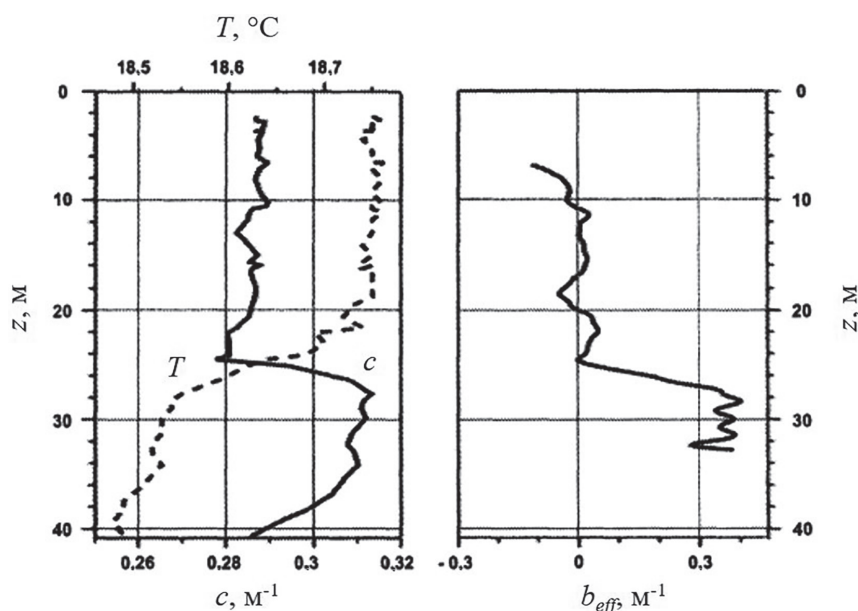


Рис. 4. Пример лидарной регистрации слоя, расположенного на глубине 24,5 м, на станции в Южной Атлантике (33°30' ю. ш., 40°50' з. д.) [38]

Fig. 4. An example of lidar sounding of a scattering layer located at a depth of 24.5 m at a station in the South Atlantic (33°30' S, 40°50' W) [38]

Дополнительные возможности регистрации слоев повышенного светорассеяния дает поляризационная методика зондирования, при которой одновременно регистрируются две ортогонально поляризованные компоненты эхо-сигнала. Деполяризация эхо-сигнала $\delta(z)$, равная:

$$\delta(z) = \frac{P_{cross}(z)}{P_{co}(z)}, \quad (9)$$

чувствительна к изменению концентрации взвеси. Вертикальный профиль деполяризации хорошо отражает наличие слоев повышенного светорассеяния на дистанции зондирования [2, 45]. Рост значений $\delta(z)$ наблюдается при возрастании вклада многократного рассеяния, связанного с превышением концентраций частиц в слое относительного фона, и при однократном рассеянии асферическими частицами планктона и взвеси. Кроме того, эффект двулучепреломления, возникающий на кальците в составе частиц кокколитофоридов, также является причиной деполяризации света в воде [1, 68].

Поляризационный метод [7] позволяет рассчитывать по временной зависимости степени деполяризации $g(t)$ (3) вертикальный профиль показателя рассеяния $b(z)$ (4). Важно отметить, что $b(z)$ более чувствителен к изменениям количественного и качественного состава взвеси, чем $\beta(\pi)$. Пример придонного слоя, образованного, предположительно, минеральной взвесью, зарегистрированного с использованием авиационного лидара АПЛ, приведен на рис. 6. Представлен 16-километровый участок разреза, выполненного над мелководным атлантическим шельфом вблизи побережья США. Наличие слоя было подтверждено синхронными сопутствующими измерениями показателя ослабления, выполненными погружаемым прозрачномером с борта судна. Профиль дна построен также по данным лидарного зондирования.

Возможности по регистрации светорассеивающих слоев с использованием радиометрических лидаров продемонстрированы в разных районах — вблизи атлантического побережья [6], Восточно- и Южно-Китайские моря [33, 69], Баренцево море [31], а также во внутренних водоемах — озера Йеллоустоун [70] и озера Цяньдаоху [71].

При продолжении исследований возможностей лидарной регистрации наличия светорассеивающих слоев и их структуры следует повысить разрешающую способность лидара, а также разработать новые алгоритмы получения профилей абсолютных значений гидрооптических характеристик без привлечения данных сопутствующих измерений.

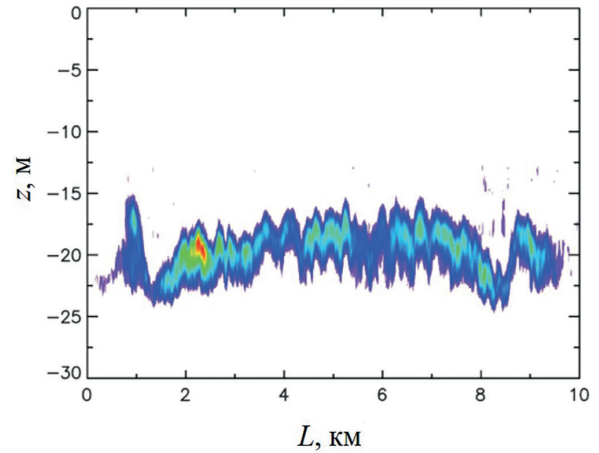


Рис. 5. Тонкий светорассеивающий слой, зарегистрированный с использованием авиационного лидара [6]

Fig. 5. Thin scattering layer registered using airborne lidar [6]

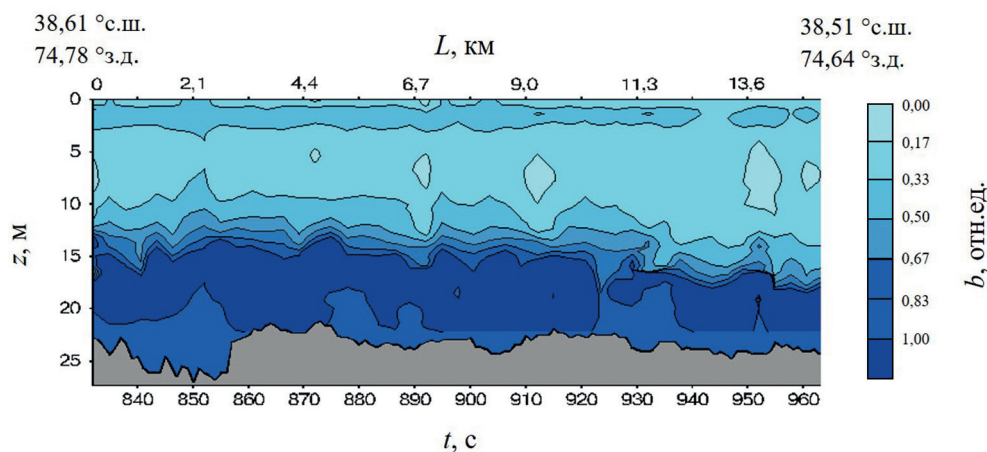


Рис. 6. Придонный слой повышенного светорассеяния, зарегистрированный с использованием авиационного лидара АПЛ [7]

Fig. 6. Bottom scattering layer registered using the APL airborne lidar [7]

3.4. Наблюдение внутренних волн

Лидарная регистрация вертикальных профилей гидрооптических характеристик открывает возможности наблюдения внутренних волн и оценки их параметров. Во многих случаях параметры стратификации гидрооптических характеристик хорошо коррелируют с параметрами стратификации гидрологических характеристик, в частности, слой повышенного градиента изменения показателя ослабления или слой повышенного светорассеяния бывают приурочены к положению пикноклина. Например, для ряда морей России (Белое море, прибрежные районы Баренцева моря, Карское море) в летний период экспериментально зарегистрирована высокая корреляция между горизонтом максимального градиента изменения показателя ослабления и глубиной залегания пикноклина (коэффициент корреляции равен 0,9) [72]. Это позволяет оценивать глубину залегания пикноклина по данным лидарного зондирования, а при соответствующей организации лидарной съёмки регистрировать внутренние волны и оценивать их характеристики.

Первые экспериментальные наблюдения внутренних волн с помощью морских лидаров были проведены в 1970–80-х гг. [11, 73]. В обоих случаях использовались морские лидары, погруженные в шахту судна. Внутренние волны были зарегистрированы на глубинах 40–50 м. В работе [11] прохождение внутренней волны было подтверждено данными контактных измерений с использованием гирлянды распределенных температурных датчиков. При этом о проведении сопутствующих измерений величин и вертикальных профилей гидрооптических характеристик не сообщается, что затрудняет анализ представленных данных.

Процессам формирования лидарных изображений внутренних волн в водах с различными типами стратификации гидрооптических характеристик посвящена серия работ [74–79]. Лидарным изображением называется мощность лидарного эхо-сигнала как функция горизонтальной координаты положения лидара x и глубины z , с которой приходит сигнал [74]. Для формирования лидарного изображения задается модельный профиль плотности $\rho(z)$ и соответствующий ему профиль показателя ослабления $c(z)$. Модуляция профилей под действием внутренней волны осуществляется периодической функцией с параметрами, рассчитанными для данной стратификации $\rho(z)$. Изображение внутренней волны формируется за счет движения лидара вдоль оси x , совпадающей с направлением распространения внутренней волны, со скоростью, много большей скорости её распространения. Авторы выделяют две компоненты формирования лидарного изображения внутренней волны — отражательное и теневое. Отражательное изображение внутренней волны формируется вследствие локальных возмущений профиля показателя рассеяния назад в области внутренней волны и описывается соответствующим множителем в лидарном уравнении (1). Теневое изображение формируется в результате вариации потерь при прямом и обратном прохождении светового импульса через водный слой, в котором внутренняя волна нарушила горизонтальную однородность гидрооптических характеристик. Оно несет информацию о возмущениях коэффициента пропускания этого слоя и описывается экспоненциальным множителем в уравнении (1) [74].

Наиболее благоприятным для лидарной регистрации внутренних волн является случай наличия слоя повышенного светорассеяния, приуроченного к положению пикноклина. Результаты расчетов лидарного изображения внутренней волны для этого случая представлены на рис. 7. На рис. 7, *а* изображен модельный профиль $c(z)$, на рис. 7, *б* — лидарное изображение одного полупериода внутренней волны первой моды при вертикальном движении жидкости в сторону увеличения глубины. Слою повышенного светорассеяния соответствует пик на спаде эхо-сигнала. В лидарном изображении присутствуют обе компоненты — отражательная и теневая. Отражательное изображение сформировано одиночным слоем повышенного светорассеяния. Теневое изображение проявляется в ослаблении сигналов, приходящих из водной толщи, расположенной ниже этого слоя. Оно возникает вследствие увеличения толщины верхнего более мутного слоя под влиянием внутренней волны. Вид лидарного изображения показывает, что для регистрации внутренней волны необходимо отслеживать положение пика на спаде лидарного эхо-сигнала (позволяет определить амплитуду и период внутренней волны), либо амплитуду на фиксированной глубине под светорассеивающим слоем (позволяет определить период внутренней волны) [77].

О регистрации внутренних волн в натурных условиях при наличии слоя повышенного светорассеяния на небольшой глубине сообщается в работах [12, 13]. Лидарная съёмка в [12] проводилась вблизи тихоокеанского побережья штата Вашингтон в проливе Хуан-де-Фука. Сопутствующие измерения *in situ*, выполненные в районе съёмки показали наличие слоев повышенного светорассеяния на глубинах 4–10 м. Использован авиационный поляризационный лидар FLOE (см. раздел 2). Обработка данных лидарной съёмки производилась методом, описанным в разделе 3.3. Результаты обработки представлены на рис. 8. В результате прохождения внутренней волны глубина залегания слоя менялась от 4 до 7,5 м (рис. 8, *а*). Другой пример лидарной регистрации внутренней волны в том районе при глубине залегания слоя повышенного светорассеяния более 10 м показан на рис. 8, *б*.

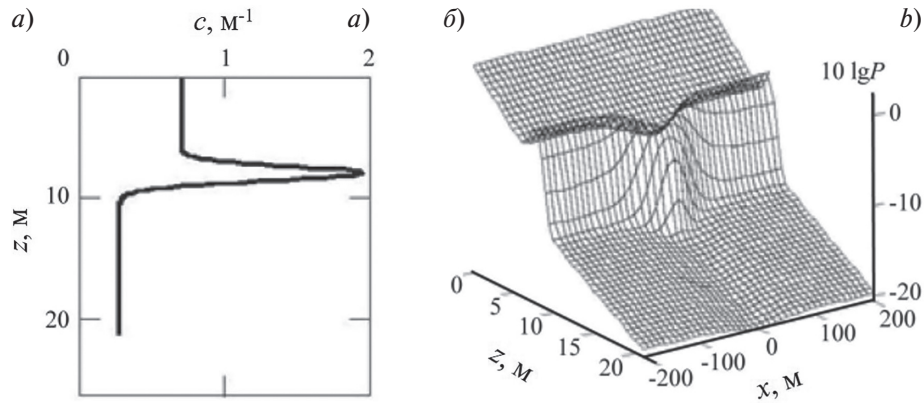


Рис. 7. Результат расчета лидарного изображения внутренней волны при наличии слоя повышенного светорассеяния: *a* — модельный профиль $c(z)$; *b* — лидарное изображение полупериода внутренней волны [77]

Fig. 7. The result of simulations of the lidar IW image in the presence of a scattering layer: *a* — the model profile of $c(z)$; *b* — the lidar image of the half-period of the internal wave [77]

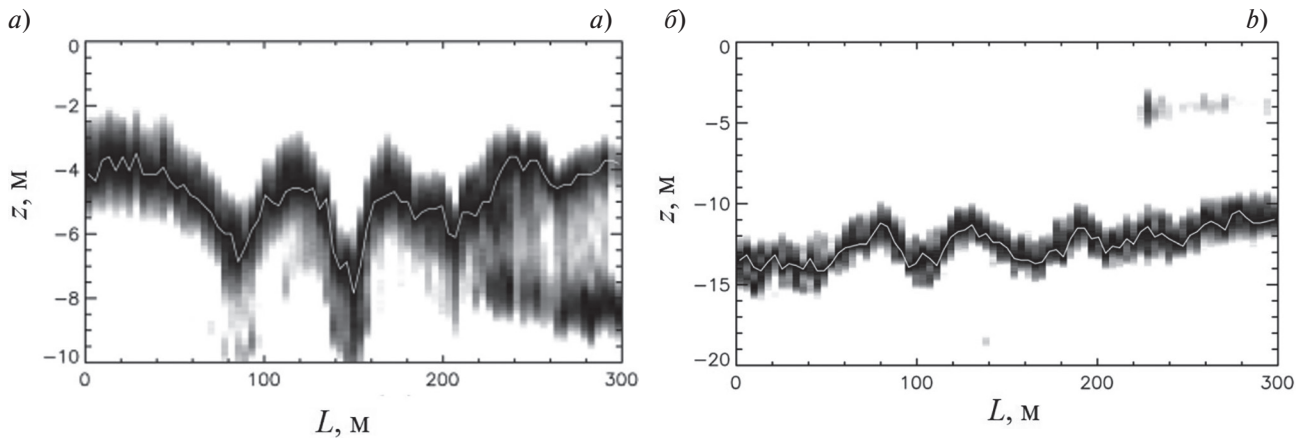


Рис. 8. Распределения положения светорассеивающих слоев, залегающих на глубине 4,5 м (*a*) и 14 м (*b*), вдоль трассы полета самолета в местах прохождения внутренних волн [12]

Fig. 8. The positioning of the scattering layers located at depths of 4.5 m (*a*) and 14 m (*b*) along the flight path of the aircraft at the locations where the IWs pass [12]

Модельный профиль $c(z)$ для случая двухслойной стратификации с более мутным верхним слоем показан на рис. 9, *a*. Результаты расчета лидарного изображения одного полупериода внутренней волны представлены на рис. 9, *b*. В области границы между слоями наблюдается изменение формы спада эхо-сигнала. В верхней части водного слоя наблюдается слабое отражательное изображение, выраженное в увеличении мощности сигнала, а в нижней — теневое, выраженное в ослаблении сигнала. Регистрация внутренней волны возможна при отслеживании глубины области перегиба спада эхо-сигнала и амплитуды над и под перегибом.

Результаты наблюдения внутренних волн в натурных условиях при двухслойной стратификации гидро-оптических и гидрологических характеристик представлены в работах [14, 15]. Лидарная съемка проводилась в прибрежных районах Черного моря с использованием судового поляризационного лидара ПЛД-1 (см. раздел 2). Для обработки данных лидарной съемки использовались аппроксимационный метод и метод вейвлет-анализа. Аппроксимационный метод позволяет отслеживать глубину перегиба спада эхо-сигнала. Суть аппроксимационного метода заключается в выделении квазиоднородных участков спада эхо-сигнала и подборе для них параметров аналитической функции аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения (1). Границы участков аппроксимаций определялись по особенностям формы затухания эхо-сигнала с глубиной. Критерием правильности выбора интервалов глубин и параметров аппроксимации

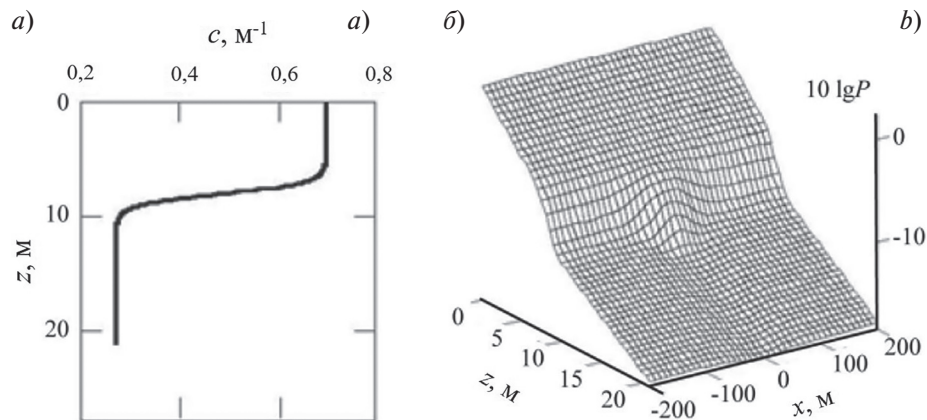


Рис. 9. Результат расчета лидарного изображения внутренней волны для случая двух-слойной стратификации с более мутным верхним слоем: *a* — модельный профиль $c(z)$; *б* — лидарное изображение полупериода внутренней волны [77]

Fig. 9. The result of simulation of the lidar IW image for the case of two-layer stratification with a more turbid upper layer, *a* — the model profile of $c(z)$, *b* — the lidar image of the half-period of the IW [77]

является точность аппроксимации заданных участков, оцениваемая методом наименьших квадратов. Точка пересечения аппроксимационных кривых участков спада эхо-сигнала является характерной точкой, указывающей положение границы между слоями. На рис. 10, *a* показан профиль гидрологических характеристик морской воды и показателя ослабления, зарегистрированный в точке лидарного зондирования. На рис. 10, *б* показано положение верхней и нижней границ слоя повышенного изменения градиента

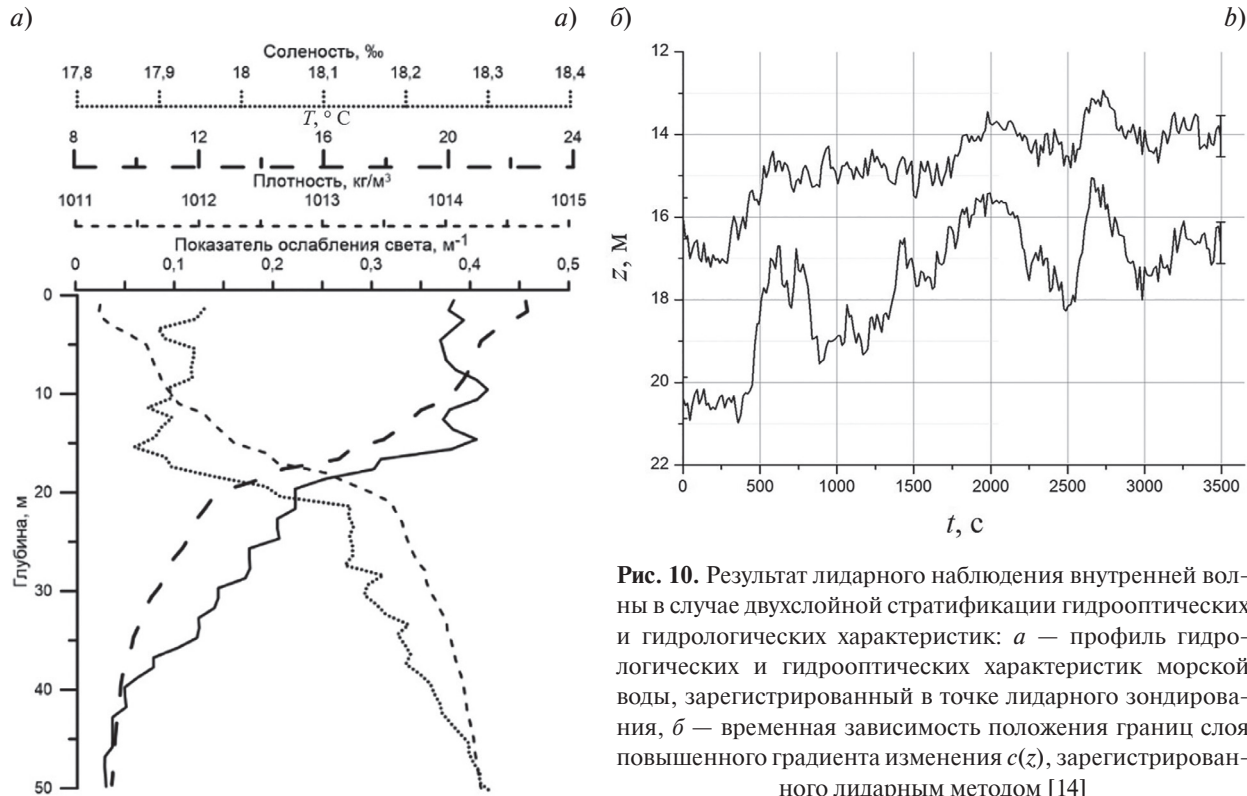


Рис. 10. Результат лидарного наблюдения внутренней волны в случае двухслойной стратификации гидрооптических и гидрологических характеристик: *a* — профиль гидрологических и гидрооптических характеристик морской воды, зарегистрированный в точке лидарного зондирования, *б* — временная зависимость положения границ слоя повышенного градиента изменения $c(z)$, зарегистрированного лидарным методом [14]

Fig. 10. The result of lidar IW observation in the case of two-layer stratification of hydrooptical and hydrological characteristics: *a* — the distribution of the hydrological and hydrooptical characteristics of seawater recorded simultaneously with the lidar sounding, *b* — the time dependence of the position of the boundaries of the layer of the increased gradient of change $c(z)$ recorded by the lidar method [14]

показателя ослабления, зарегистрированных в результате обработки кросс-поляризационной компоненты лидарного эхо-сигнала. Погрешность измерения глубины составляла 45 см. Данные лидарного зондирования позволили зарегистрировать периодическое изменение положения этого слоя. Полученный результат позволяет оценить амплитуду и период изменения положения слоя. Максимальная зарегистрированная амплитуда составляет 3 м, а средний период колебаний — 8,5 мин. Эти значения характерны для короткопериодных внутренних волн, распространяющихся в районе работ [80, 81]. Другой метод обработки массива данных лидарной съемки основан на спектральном анализе изменения амплитуд эхо-сигналов с фиксированных глубин. В этом случае анализ данных лидарного зондирования представляет собой задачу поиска квазипериодических изменений амплитуды лидарного эхо-сигнала на заданных горизонтах. Такой метод позволяет определить период и локализацию квазипериодических процессов. Результат обработки рассматриваемой серии зондирований показал наличие квазипериодической структуры с периодом в диапазоне от 6 до 10 мин на глубинах 16–20 м [15].

Случай, при котором $\rho(z)$ и $c(z)$ линейно убывают с глубиной, является неблагоприятным вариантом для лидарной регистрации внутренних волн. Расчеты показали, что в этом случае изменения потерь при прямом и обратном прохождении сигнала через водный слой «замазывают» информацию об изменениях профиля показателя рассеяния назад. В результате эхо-сигнал монотонно спадает с глубиной. Регистрация внутренней волны возможна при анализе пространственного распределения амплитуды эхо-сигнала на фиксированных глубинах или скорости спада эхо-сигнала на достаточно коротких участках подводной трассы зондирования.

Рассмотренные модельные ситуации позволяют понять процесс формирования лидарных изображений внутренних волн. Но они не исчерпывают ситуаций, встречающихся в реальных водах, где, как правило, наблюдается сочетание рассмотренных распределений.

3.5. Применение лидаров в промысловой океанологии

Впервые возможность использования лидаров для обнаружения, регистрации и оценки характеристик косяков пелагических рыб была продемонстрирована в конце 70-х годов прошлого века [20, 21]. С конца 1980-х гг. проводились систематические исследования в этой области. Целью исследования было получение количественных оценок (пространственные размеры, положение, численность, средняя плотность косяков, величина биомассы), картирование пространственного распределения концентрации рыбы, оценки дальности действия лидаров в разных условиях, сравнения возможностей лидара с возможностями традиционных средств и определения места лидарного зондирования в комплексе методов и средств исследования рыбных запасов [8, 9, 82–86].

При лидарной локализации рыбных косяков используются зондирующие пучки с достаточно большой расходимостью. Для регистрации рыбных косяков используются сигналы кросс-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала [9]. Попадание рыбы в лазерный пучок приводит к появлению дополнительного вклада в амплитуду эхо-сигнала на соответствующей глубине, зависящего от коэффициента отражения рыбы. В предположении однородного по гидрооптическим характеристикам слоя воды множитель $\beta'(\pi, z)$ в лидарном уравнении (1) можно заменить на следующее выражение — $\beta'(\pi, z) = \beta_f(\pi, z) + \beta_w(\pi, z)$, где β_f и β_w — коэффициенты обратного рассеяния рыбы и воды, соответственно [9]. Обработка лидарных эхо-сигналов с целью поиска рыб аналогична обработке сигналов в присутствии светорассеивающих слоев. Она позволяет разделить сигналы на две составляющие — от воды и от рыбного косяка. Форма эхо-сигнала позволяет оценить размеры рыбного косяка. Абсолютная калибровка лидара для разных видов рыб была выполнена в лаборатории, а также в глубоководном бассейне с живыми рыбами [9, 87]. Такая калибровка позволяет оценивать плотность рыбного косяка и величину биомассы для разных видов рыб [9, 82, 86, 87]. Пример регистрации авиационным лидаром FLOE косяка сардин показан на рис. 11.

В 2001–2007 гг. выполнялась регулярная авиационная лидарная съемка промысловых акваторий

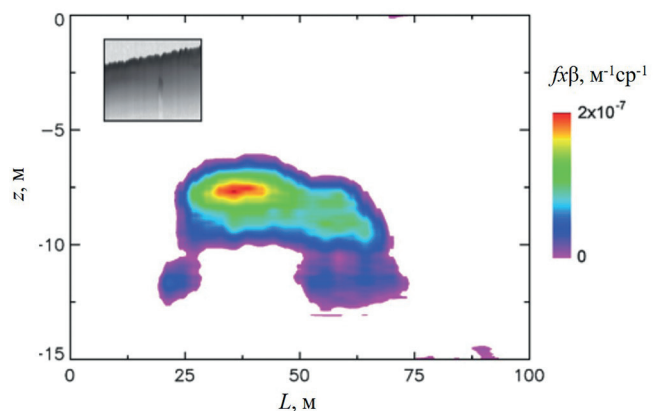


Рис. 11. Прокалиброванные значения величины кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала от косяка сардин вдоль трассы полета самолета в зависимости от глубины [88]

Fig. 11. Calibrated values of the cross-polarized echo signal from a school of sardines along the aircraft flight path [88]

Баренцевого, Норвежского и Северного морей с использованием специально разработанных авиационных лидаров ПАЛ-1 и ПАЛ-1М (см. п. 2.2) с борта самолета лаборатории Ан-26 «Арктика» [89–91]. Результаты съемки оформлялись в форме лидарограмм, показывающих форму и размеры рыбных косяков, и карт с указанием зарегистрированных мест скопления рыбы. Данные лидарной съемки использовались для оценки промыслового потенциала исследуемых акваторий.

4. Заключение

Лидарное зондирование морских акваторий развивается почти пол века. За это время разработаны интересные образцы морских лидаров, в том числе поляризационные. Непрерывно совершенствуются конструкции лидаров в первую очередь за счет появления широкополосных АЦП с высокой частотой дискретизации. Разработаны методы определения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя, слоев повышенного светорассеяния, наблюдения внутренних волн и решения задач промысловой океанологии.

Среди первоочередных задач при совершенствовании конструкций морских лидаров можно выделить повышение пространственного разрешения за счет сокращения длительности зондирующего импульса и увеличения временного разрешения приемо-региструющей системы, увеличение динамического диапазона регистрирующей системы для обеспечения больших глубин зондирования, оптимизацию параметров лидаров с учетом требований конкретных задач, а также создание малогабаритных и автономных лидарных систем, работающих без участия оператора.

При развитии теории лидарного зондирования особое внимание следует уделить разработке методов решения обратных задач определения различных гидрооптических характеристик и их пространственных распределений для разных условий зондирования без привлечения данных сопутствующих измерений. Следует обратить внимание также на разработку методов поляризационного зондирования, обеспечивающих ряд дополнительных возможностей.

Перспективными представляются размещение автономных морских лидаров на беспилотных летательных аппаратах, а также проведение лидарного зондирования с высоко летящих авианосителей.

Финансирование

Работа была выполнена в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024–0028.

Funding

The review was conducted as part of a state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology No. № FMWE-2024-0028.

Литература

1. Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J. et al. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59, № 15. P. 4650–4662. <https://doi.org/10.1364/AO.389845>
2. Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Лидарные и in situ измерения оптических параметров поверхностных слоев воды в озере Байкал // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24, № 5. С. 377–385.
3. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В. и др. Лидарные исследования в первом этапе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 4. С. 107–115. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-9
4. Peituo Xu, Dong Liu, Yibing Shen et al. Design and validation of a shipborne multiple-field-of-view lidar for upper ocean remote sensing // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. Vol. 254. P. 107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201
5. Hoge F., Wright C., Krabill W. et al. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // *Applied Optics* 1988. Vol. 27. P. 3969–3977. doi:10.1364/AO.27.003969
6. Churnside J.H., Donaghay P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science*. 2009. Vol. 66, N 4. P. 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
7. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A. et al. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Applied Optics*. 2001. Vol. 40, N 24. P. 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353
8. Chernook V.I., Goldin Yu.A., Vasilyev A.N. et al. Oceanological monitoring of fishing areas using lidars // *Proceedings 2014 International Conference Laser Optics*. IEEE Xplore. 2014. P. 137–141. doi:10.1109/LO.2014.6886388
9. Churnside J.H., Wilson J.J., Tatarskii V.V. Airborne lidar for fisheries applications // *Optical Engineering*. 2001. Vol. 40. P. 406–414. doi:10.1117/1.1348000

10. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S. et al. Airborne remote sensing of a biological hot spot in the southeastern Bering Sea // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3, N 3. P. 621–637. doi:10.3390/rs3030621
11. Bukin O.A., Major A.Y., Pavlov A.N. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19, N 4. P. 707–715. doi:10.1080/014311698215946
12. Churnside J.H., Marchbanks R.D., Le J.H. et al. Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012. Vol. 6, N 1. P. 063611–063611. doi:10.1117/1.JRS.6.063611
13. Churnside J.H., Ostrovsky L.A. Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave train in the Gulf of Alaska // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, N 1. P. 167–177. doi:10.1080/01431160410001735076
14. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 3. С. 86–97. doi:10.7868/S2073667321030084
15. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 27–42. doi:10.48612/fpg/26nu-3hte-3n48
16. Kattawar G.W., Plass G.N. Time of Flight Lidar Measurements as an Ocean Probe // *Applied Optics*. 1972. Vol. 11, N 3. P. 662. doi:10.1364/ao.11.000662
17. Hoge F.E., Swift R.N., Frederick E.B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system // *Applied Optics* 1980. Vol. 19. P. 871–883. doi:10.1364/AO.19.000871
18. Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С., Моченев С.Б. Определение показателей поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света // *Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. По результатам исследований в 5-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев»*. Глава 5. С. 153–158 / Под ред. А.С. Мониной, К.С. Шифрина. М. Наука, 1974. 328 с.
19. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21, N 16. P. 2996–3001.
20. Squire J.L., Krumboltz H. Profiling pelagic fish schools using airborne optical lasers and other remote sensing techniques // *Marine Technology Society Journal*. 1981. Vol. 15. P. 27–31.
21. Fredriksson K., Galle B., Nystrom K., Svanberg S., Ostrom B. Underwater laser-radar experiments for bathymetry and fish-school detection // *Chalmers Univ. of Tech., Göteborg Inst. of Physics Rep. GIPR-162*. 1978. 28 p.
22. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Савельев В.А. и др. Оптические методы диагностики океана. Лазерное дистанционное зондирование // *Дистанционные методы изучения океана*. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С. 84–125.
23. Гольдин Ю.А., Лучинин А.Г. Авиационные лидарные методы исследования вертикальной структуры оптических характеристик верхнего слоя океана // *Приповерхностный слой океана: физические процессы и дистанционное зондирование* / Под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. С. 345–381.
24. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar // *Optical Engineering*. 2014. Vol. 53, N 5. P. 051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405
25. Churnside J.H., Shaw J.A. Lidar remote sensing of the aquatic environment: invited // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59. P. 92–99. doi:10.1364/AO.59.000C92
26. Feigels V.I., Kopilevich Yu.I. Russian airborne lidar systems: comparative analysis and new ideas // *Proceedings SPIE 3761, Airborne and In-Water Underwater Imaging*, (28 October 1999). doi:10.1117/12.366475
27. Chen W., Chen P., Zhang H. et al. Review of airborne oceanic lidar remote sensing // *Intelligent Marine Technology Systems*. 2023. Vol. 1, N 10. doi:10.1007/s44295-023-00007-y
28. Liu X., Zhang L., Zhai X., et al. Polarization Lidar: Principles and Applications // *Photonics*. 2023. Vol. 10, N1118. doi:10.3390/photonics10101118
29. Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Опыт совместного зондирования моря судовым и самолетным лидарами // *Оптика атмосферы и океана*. 1993. Т. 6, № 01. С. 107–111.
30. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Родионов М.А. Авиационный поляризационный лидар для съемки морских акваторий // *Труды XXVIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*, г. Томск, 04–08 июля 2022 г. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2022. С. 187–190.
31. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey // *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters SPIE*. 2007. Vol. 6615. P. 126–136. doi:10.1117/12.740456
32. Шаманаев В.С. Самолетные лидары ИОА СО РАН для зондирования оптически плотных сред // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 03. С. 260–266.

33. *Chen P., Delu P.* Ocean optical profiling in South China Sea using airborne LiDAR // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, N 15. P. 1826. doi:10.3390/rs11151826
34. *Li K., He Y., Ma J.* et al. A dual-wavelength ocean lidar for vertical profiling of oceanic backscatter and attenuation // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, N 17. P. 2844. doi:10.3390/rs12172844
35. Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48. doi:10.7868/S207366731702006X
36. Степанов А.Н., Рогов С.А., Карнов С.Н. и др. Судовой лидар для гидрологических исследований // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75, № 2. С. 43–49.
37. *Qun L., Xiaoyu C., Weibiao C.* et al. A semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: Experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. Vol. 237. P. 106638. doi:10.1016/j.jqsrt.2019.106638
38. *Goldin Y.A., Gureev B.A., Ventskut Y.I.* Shipboard polarized lidar for seawater column sounding // *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters SPIE*. 2007. Vol. 6615. P. 152–159. doi:10.1117/12.740466
39. *Gray D.J., Anderson J., Nelson J., Edwards J.* Using a multiwavelength LiDAR for improved remote sensing of natural waters // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, N 31. P. 232–242. doi:10.1364/AO.54.00F232
40. *Kattawar G.W., Xu X.* Filling in of Fraunhofer lines in the ocean by Raman scattering // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31. P. 6491–6500. doi:10.1364/AO.31.006491
41. Ляшенко А.И., Гольдин Ю.А., Володина Е.М., Кукушкин В.А. Трёхволновая лазерная система на АИГ: Nd³⁺ для лидарного зондирования морских акваторий // *Светотехника*. 2022. № 5. С. 71–74.
42. *Allocca D.M.* et al. Ocean water clarity measurement using shipboard lidar systems // 2002. Vol. 4488. P. 106–114. doi:10.1117/12.452807
43. *Collister B.L., Zimmerman R.C., Sukenik C.I., Hill V.J., Balch W.M.* Remote sensing of optical characteristics and particle distributions of the upper ocean using shipboard lidar // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 215. P. 85–96. doi:10.1016/j.rse.2018.05.032
44. *Churnside J.H.* Polarization effects on oceanographic lidar // *Optic Express*. 2008. Vol. 16. P. 1196–1207. doi:10.1364/OE.16.001196
45. *Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S.* Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals // *Applied Optics*. 1998. Vol. 37. P. 1596–1601. doi:10.1364/AO.37.001596
46. *Becker W.* Advanced time-correlated single photon counting techniques // *Springer Series in Chemical Physics*. 2005. Vol. 81. 349 p.
47. *Shen X., Kong W., Chen P.* et al. A shipborne photon-counting lidar for depth-resolved ocean observation // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, N 3351. doi:10.3390/rs14143351
48. Долин Л.С., Савельев В.А. О характеристиках сигнала обратного рассеяния при импульсном облучении мутной среды узким направленным световым пучком // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1971. Т. 7, № 5. С. 505–510.
49. *Gordon H.R.* Can the Lambert — Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34, N 8. P. 1389–1409.
50. Шаманаев В.С., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П. Авиалидарные исследования морской акватории. Ч. 2. Длинные трассы // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15, № 7. С. 608.
51. Васильков А.П., Кондранин Т.В., Мясников Е.В. Определение профиля показателя рассеяния света по поляризационным характеристикам отраженного назад излучения при импульсном зондировании океана // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1990. Т. 26, № 3. С. 307–312.
52. *Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A.* Inverse problems of lidar sensing of the ocean // *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. SPIE*. 2007. Vol. 6615. P. 104–113.
53. *Churnside J.H., Marchbanks R.D.* Calibration of an airborne oceanographic lidar using ocean backscattering measurements from space // *Optic Express*. 2019. Vol. 27. P. A536–A542. doi:10.1364/OE.27.00A536
54. *Shipley S.T.* et al. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: theory and instrumentation // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22, N 23. P. 3716–3724. doi:10.1364/AO.22.003716
55. *Churnside J., Hair J., Hostetler C., Scarino A.* Ocean backscatter profiling using high-spectral-resolution lidar and a perturbation retrieval // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. P. 2003. doi:10.3390/rs10122003
56. *Zhou Y., Chen Y., Zhao H.* et al. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties // *Light: Science & Applications*. 2022. Vol. 11. P. 261. doi:10.1038/s41377-022-00951-0
57. *Schulien J.A., Behrenfeld M.J., Hair J.W.* et al. Vertically- resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar // *Optic Express*. 2017. Vol. 25. P. 13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577

58. *Liu D., Hostetler C., Miller I. et al.* System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar // *Optic Express*. 2012. Vol. 20, N 2. P. 1406–1420. doi:10.1364/OE.20.001406
59. *O'Connor C.L., Schlupf J.P.* Brillouin scattering in water: the Landau-Placzek ratio // *The Journal of Chemical Physics*. 1967. Vol. 47, N 1. P. 31–38. doi:10.1063/1.1711865
60. *Leonard D.A., Sweeney H.E.* Remote sensing of ocean physical properties: a comparison of Raman and Brillouin techniques // *Proceedings SPIE0925, Ocean Optics IX*, (12 August 1988). doi:10.1117/12.945749
61. *Zhou Y., Liu D., Xu P. et al.* Retrieving the seawater volume scattering function at the 180° scattering angle with a high-spectral-resolution lidar // *Optic Express*. 2017. Vol. 25. P. 11813–11826. doi:10.1364/OE.25.011813
62. *Sullivan J.M., Twardowski M.S.* Angular shape of the oceanic particulate volume scattering function in the backward direction // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48. P. 6811–6819. doi:10.1364/AO.48.006811
63. *Montes-Hugo M.A., et al.* Spatial coherence between remotely sensed ocean color data and vertical distribution of lidar backscattering in coastal stratified waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, 11. P. 2584–2593. doi:10.1016/j.rse.2010.05.023
64. *Ronald J., Zanaveld R.* Remotely sensed reflectance and its dependence on vertical structure: A theoretical derivation // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21. P. 4146–4150. doi:10.1364/AO.21.004146
65. *Churnside J.H., Marchbanks R.D., Vagle S. et al.* Stratification, plankton layers, and mixing measured by airborne lidar in the Chukchi and Beaufort seas // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2020. Vol. 177. P. 104742. doi:10.1016/j.dsr2.2020.104742
66. *Churnside J.H., Marchbanks R.D., Marshall N.* Airborne Lidar Observations of a Spring Phytoplankton Bloom in the Western Arctic Ocean // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. P. 2512. doi:10.3390/rs13132512
67. *Churnside J.H., Marchbanks R.D.* Subsurface plankton layers in the Arctic Ocean // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, N 12. P. 4896–4902. doi:10.1002/2015GL064503
68. *Dassow P., Engh G., Iglesias-Rodriguez D., Gittins J.R.* Calcification state of coccolithophores can be assessed by light scatter depolarization measurements with flow cytometry // *Journal of Plankton Research*. 2012. Vol. 34, N 12. P. 1011–1027. doi:10.1093/plankt/fbs061
69. *Chen P., Jamet C., Liu D.* LiDAR Remote Sensing for Vertical Distribution of Seawater Optical Properties and Chlorophyll-a From the East China Sea to the South China Sea // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. P. 1–21. doi:10.1109/TGRS.2022.3174230
70. *Roddewig M.R., Churnside J.H., et al.* Airborne lidar detection and mapping of invasive lake trout in Yellowstone Lake // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57, 15. P. 4111–4116. doi:10.1364/AO.57.004111
71. *Chen P., Mao Z., Zhang Z. et al.* Detecting subsurface phytoplankton layer in Qiandao Lake using shipborne lidar // *Optics Express*. 2020. Vol. 28, N 1. P. 558–569. doi:10.1364/OE.381617
72. *Родионов М.А., Долина И.С., Левин И.М.* Корреляции между вертикальными распределениями показателя ослабления света и плотности воды в Северных морях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5, № 4. С. 39–46.
73. *Walker R.E., Fraser A.B., Mastracci L., Hochheimer B.F.* Optical sounding for internal waves on the ocean thermocline // *Oceans 82 Conference P. 247–250*. Record (Washington, DC: American Geophysical Union). 1982. 20–22 September 1982.
74. *Долин Л.С., Долина И.С., Савельев В.А.* Лидарный метод определения характеристик внутренних волн // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 4. С. 501–501.
75. *Долин Л.С., Долина И.С.* Модель лидарных изображений нелинейных внутренних волн // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 2. С. 224–224.
76. *Долина И.С., Долин Л.С.* Влияние сдвиговых течений на структуру лидарных изображений нелинейных внутренних волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 4. С. 49–56.
77. *Долина И.С., Долин Л.С.* Моделирование лидарных изображений нелинейных внутренних волн в мелком море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 1. С. 31–36.
78. *Долина И.С., Долин Л.С.* Алгоритмы определения спектрально-энергетических характеристик случайного поля внутренних волн по лидарным эхо-сигналам // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 47–54. doi:10.7868/S2073667318030061
79. *Dolin L.S., Dolina I.S.* Algorithms for determining the spectral-energy characteristics of a random field of internal waves from fluctuations of lidar echo signals // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59, N 10. P. C78–C86. doi:10.1364/AO.381675
80. *Химченко Е.Е., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на Кавказском и Крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
81. *Иванов В.А., Шульга Т.Я., Багаев А.В. и др.* Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеяского полуострова: моделирование и наблюдение // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 332–340. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340

82. Churnside J.H., McGillivray P.A. Optical properties of several Pacific fishes // *Applied Optics*. 1991. Vol. 30, N 21. P. 2925–2927. doi:10.1364/AO.30.002925
83. Churnside J.H., Hunter J. Laser remote sensing of epipelagic fishes // *Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice*, Proceedings SPIE. 1996. Vol. 2964. P. 38–53. doi:10.1117/12.258352
84. Gauldie R.W., Sharma S.K., Helsley C.E. LIDAR applications to fisheries monitoring problems // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1996. Vol. 53. P. 1459–1468. doi:10.1139/cjfas-53-6-1459
85. Krekova M.M., Krekov G.M., Samokhvalov I.V., Shamonaev V.S. Numerical evaluation of the possibilities of remote laser sensing of fish schools // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, N 24. P. 5715–5720. doi:10.1364/AO.33.005715
86. Шаманаев В.С. обнаружение косяков морских рыб с помощью метода поляризационного лазерного зондирования // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31, № 4. С. 268–274. doi:10.15372/AOO20180404
87. Tenningen E., Churnside J.H., Slotte A., Wilson J.J. Lidar target-strength measurements on Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) // *ICES Journal of Marine Science*. 2006. Vol. 63. P. 677–682. doi:10.1016/j.icesjms.2005.11.018
88. Churnside J.H. et al. Comparisons of lidar, acoustic and trawl data on two scales in the Northeast Pacific Ocean // *CalCOFI Rep.* 2009. Vol. 50. P. 118–122.
89. Chernook V. et al. Lidar signals identification during aerial surveys of pelagic fishes // *International Symposium on Ecosystem Approach with Fisheries Acoustics and Complementary Technologies (SEAFACTS)*. Bergen, Norway, 16–20 June 2008. Book of Abstracts. P. 45.
90. Гольдин Ю.А., Черноок В.И., Алексеев А.М., Васильев А.Н. Авиационные лидары в промыслово-океанологических исследованиях // XII Международная конференция по промысловой океанологии. Тезисы докладов. Изд. АтлантНИРО. Калининград, 2002. С. 66–68.
91. Гольдин Ю.А., Черноок В.И., Васильев А.Н., Лисовский А.С., Алексеев А.М. Исследование пространственной изменчивости оптических характеристик морской воды с использованием поляризационного авиационного лидара // Труды 7-й Международной конференции «ГА-2004». С.-Петербург, 2004. С. 212–215.

References

1. Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J. et al. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom. *Applied Optics*. 2020, 59(15), 4650–4662. doi:10.1364/AO.389845
2. Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Penner I.E., Shamanaev V.S. Lidar and in situ measurements of the optical parameters of water surface layers in Lake Baikal. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011, 24, 5, 478–486. doi:10.1134/S1024856011050083
3. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V., et al. Lidar Research during the First Stage of the 89th Cruise of the R/V “Academic Mstislav Keldysh”. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16(4), 107–115. doi:10.59887/2073–6673.2023.16(4)-9
4. Peituo Xu, Dong Liu, Yibing Shen et al. Design and validation of a shipborne multiple-field-of-view lidar for upper ocean remote sensing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020, 254, 107201. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107201
5. Hoge F., Wright C., Krabill W. et al. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers. *Applied Optics*. 1988, 27, 3969–3977. doi:10.1364/AO.27.003969
6. Churnside J.H., Donaghay P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar. *ICES Journal of Marine Science*. 2009, 66(4), 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
7. Vasilkov A.P., Goldin Yu.A., Gureev B.A. et al. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean. *Applied Optics*. 2001, 40(24), 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353.
8. Chernook V.I., Goldin Yu.A., Vasilyev A.N. et al. Oceanological monitoring of fishing areas using lidars. Proceedings 2014 International Conference Laser Optics, *International Conference. IEEE Xplore*. 2014, 137–141. doi:10.1109/LO.2014.6886388
9. Churnside J.H., Wilson J.J., Tatarskii V.V. Airborne lidar for fisheries applications. *Optical Engineering*. 2001, 40, 406–414. doi:10.1117/1.1348000
10. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S. et al. Airborne remote sensing of a biological hot spot in the southeastern Bering Sea. *Remote Sensing*. 2011, 3(3), 621–637. doi:10.3390/rs3030621
11. Bukin O.A., Major A.Y., Pavlov A.N. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar. *International Journal of Remote Sensing*. 1998, 19(4), 707–715. doi:10.1080/014311698215946
12. Churnside J.H., Marchbanks R.D., Le J.H. et al. Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012, 6(1), 063611–063611. doi:10.1117/1.JRS.6.063611

13. Churnside J.H., Ostrovsky L.A. Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave train in the Gulf of Alaska. *International Journal of Remote Sensing*. 2005, 26(1), 167–177. doi:10.1080/01431160410001735076
14. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A. Method of Internal Waves Registration by Lidar Sounding in Case of Waters with Two-Layer Stratification of Hydrooptical Characteristics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021, 14(3), 86–97. doi:10.7868/S2073667321030084 (in Russian).
15. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Zhegulin G.V., Rodionov M.A. Complex processing of lidar survey data of marine areas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15(3), 27–42. doi:10.59887/fpg/26nu-3hte-3n48
16. Kattawar G.W., Plass G.N. Time of Flight Lidar Measurements as an Ocean Probe. *Applied Optics*. 1972, 11(3), 662. doi:10.1364/ao.11.000662
17. Hoge F.E., Swift R.N., Frederick E.B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Applied Optics*. 1980, 19, 871–883. doi:10.1364/AO.19.000871
18. Bravo-Zhivotovskiy D.M., Gordeev L.B., Dolin L.S., Mochenev S.B. Determination of absorption and scattering indicators of sea water based on some characteristics of the light field of artificial light sources. *Hydrophysical and hydro-optical studies in the Atlantic and Pacific oceans. Based on the results of research on the 5th cruise of the R/V Dmitry Mendeleev. Chapter 5*. Pp. 153–158 / Ed. by A.S. Monin, K.S. Shifrin. M., Nauka, 1974. 328 p. (in Russian).
19. Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*. 1982, 21(16), 2996–3001.
20. Squire J.L., Krumboltz H. Profiling pelagic fish schools using airborne optical lasers and other remote sensing techniques. *Marine Technology Society Journal*. 1981, 15, 27–31.
21. Fredriksson K., Galle B., Nystrom K., Svanberg S., Ostrom B. Underwater laser-radar experiments for bathymetry and fish-school detection. *Chalmers Univ. of Tech., Göttenborg Inst. of Physics Rep. GIPR-162*. 1978. 28 p.
22. Bravo-Zhivotovskiy D.M., Dolin L.S., Saveliev V.A. et al. Optical methods of ocean diagnostics. Laser remote sensing. Remote methods of ocean exploration. *Gorky, IAP of the USSR Academy of Sciences*, 1987, 84–125 p. (in Russian).
23. Goldin Yu.A., Luchinin A.G. Airborne lidar methods for studying the vertical structure of optical characteristics of the upper ocean layer. The near-surface layer of the ocean: physical processes and remote sensing / Ed. by E.N. Pelinovsky, V.I. Talanov. Nizhny Novgorod, IAP RAS, 1999, 345–381 p.
24. Churnside J.H. Review of profiling oceanographic lidar. *Optical Engineering*. 2014, 53(5), 051405–051405. doi:10.1117/1.OE.53.5.051405
25. Churnside J.H., Shaw J.A. Lidar remote sensing of the aquatic environment: invited. *Applied Optics* 2020, 59, 92–99. doi:10.1364/AO.59.000C92
26. Feigels V.I., Kopilevich Yu.I. Russian airborne lidar systems: comparative analysis and new ideas. *Proceedings SPIE 3761, Airborne and In-Water Underwater Imaging*, (28 October 1999). doi:10.1117/12.366475
27. Chen W., Chen P., Zhang H. et al. Review of airborne oceanic lidar remote sensing. *Intelligent Marine Technology Systems*. 2023, 1(10). doi:10.1007/s44295-023-00007-y
28. Liu X., Zhang L., Zhai X., et al. Polarization Lidar: Principles and Applications. *Photonics*. 2023, 10(1118). doi:10.3390/photonics10101118
29. Penner I.E., Shamanaev V.S. Simultaneous sounding of the sea with shipborne and airborne lidars. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 1993, 6(1), 65–69.
30. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Glitko O.V., Rodionov M.A. Airborne polarizing lidar for surveying marine areas. *Proceedings of the XXVIII International Symposium “Optics of the atmosphere and ocean. Atmospheric Physics”*, Tomsk, July 04–08, 2022. Tomsk, Publishing House of IOA SB RAS, 2022, 187–190 (in Russian).
31. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey. *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters SPIE*. 2007, 6615, 126–136. doi:10.1117/12.740456
32. Shamanaev V.S. Airborne lidars of the IOA SB RAS for sensing of optically dense media. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015, 28, 359–365. doi:10.1134/S1024856015040120
33. Chen P., Delu P. Ocean optical profiling in South China Sea using airborne LiDAR. *Remote Sensing*. 2019, 11(15), 1826. doi:10.3390/rs11151826
34. Li K., He Y., Ma J. et al. A dual-wavelength ocean lidar for vertical profiling of oceanic backscatter and attenuation. *Remote Sensing*. 2020, 12(17), 2844. doi:10.3390/rs12172844
35. Glukhov V.A., Goldin Yu.A., Rodionov M.A. Experimental estimation of the capabilities of the lidar PLD-1 for the registration of various hydro-optical irregularities of the sea water column. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017, 10(2), 41–48 (in Russian).
36. Stepanov A.N., Rogov S.A., Karpov S.N. et al. Marine lidar for hydrological research. *Optich. Zhurnal*. 2008, 75(2), 43–49. (in Russian).

37. Qun L., Xiaoyu C., Weibiao C. et al. A semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: Experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019, 237, 106638. doi:10.1016/j.jqsrt.2019.106638
38. Goldin Y.A., Gureev B.A., Ventskut Y.I. Shipboard polarized lidar for seawater column sounding. *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters SPIE*. 2007, 6615, 152–159. doi:10.1117/12.740466
39. Gray D.J., Anderson J., Nelson J., Edwards J. Using a multiwavelength LiDAR for improved remote sensing of natural waters. *Applied Optics*. 2015, 54(31), 232–242. doi:10.1364/AO.54.00F232
40. Kattawar G.W., Xu X. Filling in of Fraunhofer lines in the ocean by Raman scattering. *Applied Optics*. 1992, 31, 6491–6500. doi:10.1364/AO.31.006491
41. Goldin Yu.A., Volodina E.M., Kukushkin V.A. Three-wavelength YAG: Nd³⁺ laser system for lidar sounding of marine areas. *Light & Engineering*. 2022, 30(6), 84–89. doi:10.33383/2022–086
42. Allocca D.M. et al. Ocean water clarity measurement using shipboard lidar systems. *Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging. SPIE*. 2002, 4488, 106–114. doi:10.1117/12.452807
43. Collister B.L., Zimmerman R.C., Sukenik C.I., Hill V.J., Balch W.M. Remote sensing of optical characteristics and particle distributions of the upper ocean using shipboard lidar. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 215, 85–96. doi:10.1016/j.rse.2018.05.032
44. Churnside J.H. Polarization effects on oceanographic lidar. *Optic Express*. 2008, 16, 1196–1207. doi:10.1364/OE.16.001196
45. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals. *Applied Optics* 1998, 37, 1596–1601. doi:10.1364/AO.37.001596
46. Becker W. Advanced time-correlated single photon counting techniques. *Springer Series in Chemical Physics*. 2005, 81, 349 p.
47. Shen X., Kong W., Chen P. et al. A shipborne photon-counting lidar for depth-resolved ocean observation. *Remote Sensing*. 2022, 14(3351). doi:10.3390/rs14143351
48. Dolin L.S., Savelev V.A. Characteristics of the backscattering signal during pulsed irradiation of a turbid medium by a narrow directed light beam. *Izvestiya AS USSR, Atmospheric and ocean physics*, 1971, 7, 505–510 (in Russian).
49. Gordon H.R. Can the Lambert — Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? *Limnology and Oceanography*. 1989, 34(8), 1389–1409.
50. Shamanaev V.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P. Studies of sea areas with airborne lidar. Part 2. Long routes. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2002, 15, 07, 549–556.
51. Vasilkov A.P., Kondranin T.V., Myasnikov E.V. Determination of the light scattering index profile based on the polarization characteristics of back-reflected radiation during pulsed ocean sounding. *Izvestiya AS USSR, Atmospheric and Ocean Physics*. 1990, 26(3), 307–312 (in Russian).
52. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean. *Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. SPIE*. 2007, 6615, 104–113.
53. Churnside J.H., Marchbanks R.D. Calibration of an airborne oceanographic lidar using ocean backscattering measurements from space. *Optic Express*. 2019, 27, A536–A542. doi:10.1364/OE.27.00A536
54. Shipley S.T. et al. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. I: theory and instrumentation. *Applied Optics*. 1983, 22(23), 3716–3724. doi:10.1364/AO.22.003716
55. Churnside J., Hair J., Hostetler C., Scarino A. Ocean backscatter profiling using high-spectral-resolution lidar and a perturbation retrieval. *Remote Sensing*. 2018, 10, 2003. doi:10.3390/rs10122003
56. Zhou Y., Chen Y., Zhao H. et al. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties. *Light: Science & Applications*. 2022, 11, 261. doi:10.1038/s41377-022-00951-0
57. Schulien J.A., Behrenfeld M.J., Hair J.W. et al. Vertically- resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar. *Optic Express*. 2017, 25, 13577–13587. doi:10.1364/OE.25.013577
58. Liu D., Hostetler C., Miller I. et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar. *Optic Express*. 2012, 20(2), 1406–1420. doi:10.1364/OE.20.001406
59. O'Connor C.L., Schlupf J.P. Brillouin scattering in water: the Landau-Placzek ratio. *The Journal of Chemical Physics*. 1967, 47(1), 31–38. doi:10.1063/1.1711865
60. Leonard D.A., Sweeney H.E. Remote sensing of ocean physical properties: a comparison of Raman and brillouin techniques. *Proceedings SPIE0925, Ocean Optics IX*, (12 August 1988); doi:10.1117/12.945749
61. Zhou Y., Liu D., Xu P. et al. Retrieving the seawater volume scattering function at the 180° scattering angle with a high-spectral-resolution lidar. *Optic. Express*. 2017, 25, 11813–11826. doi:10.1364/OE.25.011813
62. Sullivan J.M., Twardowski M.S. Angular shape of the oceanic particulate volume scattering function in the backward direction. *Applied Optics*. 2009, 48, 6811–6819. doi:10.1364/AO.48.006811

63. Montes-Hugo M.A. et al. Spatial coherence between remotely sensed ocean color data and vertical distribution of lidar backscattering in coastal stratified waters. *Remote Sensing of Environment*. 2010, 114(11), 2584–2593. doi:10.1016/j.rse.2010.05.023
64. Ronald J., Zanaveld R. Remotely sensed reflectance and its dependence on vertical structure: A theoretical derivation. *Applied Optics*. 1982, 21, 4146–4150. doi:10.1364/AO.21.004146
65. Churnside J.H. et al. Stratification, plankton layers, and mixing measured by airborne lidar in the Chukchi and Beaufort seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2020, 177, 104742. doi:10.1016/j.dsr2.2020.104742.
66. Churnside J.H., Marchbanks R.D., Marshall N. Airborne Lidar Observations of a Spring Phytoplankton Bloom in the Western Arctic Ocean. *Remote Sensing*. 2021, 13, 2512. doi:10.3390/rs13132512
67. Churnside J.H., Marchbanks R.D. Subsurface plankton layers in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2015, 42(12), 4896–4902. doi:10.1002/2015GL064503
68. Dassow P., Engh G., Iglesias-Rodriguez D., Gittins J.R. Calcification state of coccolithophores can be assessed by light scatter depolarization measurements with flow cytometry. *Journal of Plankton Research*. 2012, 34(12), 1011–1027. doi:10.1093/plankt/fbs061
69. Chen P., Jamet C., Liu D. LiDAR Remote sensing for vertical distribution of seawater optical properties and chlorophyll-a from the East China Sea to the South China Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022, 60, 1–21. doi:10.1109/TGRS.2022.3174230
70. Roddewig M.R., Churnside J.H., et al. Airborne lidar detection and mapping of invasive lake trout in Yellowstone Lake. *Applied Optics*. 2018, 57(15), 4111–4116. doi:10.1364/AO.57.004111
71. Chen P., Mao Z., Zhang Z. et al. Detecting subsurface phytoplankton layer in Qiandao Lake using shipborne lidar. *Optics Express*. 2020, 28(1), 558–569. doi:10.1364/OE.381617
72. Rodionov M.A., Dolina I.S., Levin I.M. Correlations between depth distributions of water attenuation coefficient and density in the North Seas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2012, 5(4), 39–46 (in Russian).
73. Walker R.E., Fraser A.B., Mastracci L., Hochheimer B.F. Optical sounding for internal waves on the ocean thermocline. *Oceans 82 Conference Record (Washington, DC: American Geophysical Union)*. 1982, 247–250, 20–22 September 1982.
74. Dolin L.S., Dolina I.S., Savel'ev V.A. A lidar method for determining internal wave characteristics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48, 4, 444–453.
75. Dolin L.S., Dolina I.S. Model of lidar images of nonlinear internal waves. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014, 50, 2, 196–203. doi:10.7868/S0002351514020023
76. Dolina I.S., Dolin L.S. The effect of shear flow on the structure of lidar images of nonlinear internal waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014, 7(4), 49–56 (in Russian).
77. Dolina I.S., Dolin L.S. Simulation of lidar images of nonlinear internal waves in the shallow sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017, 10(1), 31–36 (in Russian).
78. Dolina I.S., Dolin L.S. Algorithms of determination spectral-energy characteristics of the internal wave's random field by lidar returned signals. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11(3), 47–54. doi:10.7868/S2073667318030061 (in Russian).
79. Dolin L.S., Dolina I.S. Algorithms for determining the spectral-energy characteristics of a random field of internal waves from fluctuations of lidar echo signals. *Applied Optics*. 2020, 59(10), C78–C86. doi:10.1364/AO.381675
80. Khimchenko E.E., Serebryany A.N. Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black sea (according to summer-autumn observations 2011–2016). *Journal of Oceanological Research*. 2018, 46(2).
81. Ivanov V.A., Shul'ga T. Ya., Bagaev A.V. et al. Internal waves on the Black Sea shelf near the Heracles Peninsula: Modeling and observation. *Physical Oceanography*. 2019, 26(4), 288–303. doi:10.22449/1573–160X-2019-4-288-304
82. Churnside J.H., McGillivray P.A. Optical properties of several Pacific fishes. *Applied Optics* 1991, 30(21), 2925–2927. doi:10.1364/AO.30.002925
83. Churnside J.H., Hunter J. Laser remote sensing of epipelagic fishes. *Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice, Proceedings SPIE*. 1996, 2964, 38–53. doi:10.1117/12.258352
84. Gauldie R.W., Sharma S.K., Helsley C.E. LIDAR applications to fisheries monitoring problems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1996, 53, 1459–1468. doi:10.1139/cjfas-53-6-1459
85. Krekova M.M., Krekov G.M., Samokhvalov I.V., Shamonaev V.S. Numerical evaluation of the possibilities of remote laser sensing of fish schools. *Applied Optics*. 1994, 33(24), 5715–5720. doi:10.1364/AO.33.005715
86. Shamanaev V.S. Detection of schools of marine fish using polarization laser sensing. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018, 31, 358–364. doi:10.1134/S1024856018040103
87. Tenningen E., Churnside J.H., Slotte A., Wilson J.J. Lidar target-strength measurements on Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). *ICES Journal of Marine Science*. 2006, 63, 677–682. doi:10.1016/j.icesjms.2005.11.018

88. Churnside J.H. et al. Comparisons of lidar, acoustic and trawl data on two scales in the Northeast Pacific Ocean. *CalCOFI Rep.* 2009, 50, 118–122.
89. Chernook V. et al. Lidar signals identification during aerial surveys of pelagic fishes. *International Symposium on Ecosystem Approach with Fisheries Acoustics and Complementary Technologies (SEAFATS)*. Bergen, Norway, 16–20 June 2008. Book of Abstracts. P. 45.
90. Goldin Yu.A., Chernook V.I., Alekseev A.M., Vasiliev A.N. Airborne lidars in commercial oceanological research. *XII International Conference on Commercial Oceanology. Book of abstracts. AtlantNIRO Publishing house. Kaliningrad*, 2002, 66–68 (in Russian).
91. Goldin Yu.A., Chernook V.I., Vasiliev A.N., Lisovsky A.S., Alekseev A.M. Investigation of spatial variability of optical characteristics of seawater using a polarizing aviation lidar. *Proceedings of the 7th International Conference “GA-2004”*. St. Petersburg, 2004, 212–215.

Об авторах

ГЛУХОВ Владимир Алексеевич, научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0003-4555-8879,
WoS ResearcherID: GSD-4886–2022, Scopus Author ID: 57191414331, SPIN-код: 9449-2307,
e-mail: vl.glukhov@inbox.ru

ГОЛЬДИН Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,
ORCID ID: 0000-0001-5731-5458, Scopus Author ID: 6602648464, SPIN-код: 2750-1867,
e-mail: goldin@ocean.ru