# ПРОМРЫБОЛОВСТВО

# УДК (639.2.081.7+621.375.826):574.5

## В.И. Кудрявцев\*

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17

# ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ КОНТРОЛЕ ГИДРОБИОНТОВ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

Рассмотрены возможности современных средств активной лазерной локации при дистанционном обнаружении концентраций рыб и других водных животных. Приводятся основные характеристики лидаров для рыбохозяйственнных исследований и мониторинга гидробионтов, результаты их применения в реальных морских и океанических условиях, в том числе при одновременном использовании других средств наблюдения. Описываются конкретные примеры лазерной локации с летательных аппаратов скумбрии в Норвежском море, мойвы в северной части Тихого океана и других рыб. Рассматриваются результаты использования сканирующих лидарных систем в буксируемых носителях при обнаружении в районе Аляски крабов, а также других донных гидробионтов.

Ключевые слова: лазерная локация рыб, лазер, лидар, планктон, электромагнитные волны.

**Kudryavtsev V.I.** Possibilities of laser location for remote monitoring of marine organisms (analytic review) // Izv. TINRO. — 2014. — Vol. 176. — P. 261–287.

Possibilities of lidar detection of fish and plankton are overviewed on cited results of nature experiments in the sea. Volume-backscattering coefficients for the lidar with wave-length 532 nm and the acoustic sonar are compared for schools of some fish species. Examples of effective detecting of fish schools and assessment of their abundance by lidar are demonstrated for cases of sardine and anchovy at California coast, capelin and herring in the North Pacific, mullet at the west coast of Florida, juvenile mackerel in the coastal Atlantic waters of southern Europe, menhaden in the Chesapeake Bay, and others. In some experiments, the per-kilometer costs of airborne lidar surveys are estimated as 10 % or less as compared to ship-based sampling. Besides, the lidar surveys take a shorter time and their results are not distorted by avoidance behavior of fish caused by ship and sampling gear noises. Experimental surveys of thin scattering layers (probably formed by plankton) made by NOAA fish lidar are overviewed, as well, including the first tests of the system in the South California Bay in April 1997, the tests in the North-West Atlantic at Iberian coast in August-September 1998, in the Gulf of Alaska in July-September 2001 and May-August 2002, in the Norwegian Sea in July 2002, in the North-East Pacific at the coast of Oregon and Washington in July 2003, and in the Gulf of Alaska in July 2003. Some aspects of future development for improvement of school-detecting capabilities of lidar are discussed, as additional scanning for 2D-images and adding of second receiver co-polarized with the laser light for better identification of fish species and other scatterers in the sea.

Key words: lidar detection of fish, laser location, plankton, electromagnetic wave.

<sup>\*</sup> Кудрявцев Валерий Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: vkudry@vniro.ru.

Kudryavtsev Valery I., D.Sc., chief researcher, e-mail: vkudry@vniro.ru.

#### Введение

Обеспечение более достоверных оценок биоресурсов и их состояния является одной из основных проблем современного промышленного рыболовства. Её решению может способствовать широкое использование современных технических средств подводного наблюдения и контроля. К ним, несомненно, относится и применение методов и техники лазерной локации гидробионтов, развитию и совершенствованию которых в последние два десятилетия уделяется большое внимание.

Лазерная локация базируется на использовании свойств электромагнитных волн. Возможность использования свободного распространения электромагнитных волн для получения и передачи информации в воде в общем сильно затруднена из-за значительного поглощения в ней энергии этих волн, особенно в полупроводящей морской среде. Величина коэффициента затухания электромагнитных волн в полупроводящей среде б определяется из уравнений Максвелла. В общем случае он выражается как

$$\delta = (2\pi/\lambda) \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ -\varepsilon_{\partial} + \sqrt{\varepsilon_{\partial} + \left(60\lambda\sigma_{cp}\right)^2} \right]} \, 1/\mathrm{M},\tag{1}$$

где  $\varepsilon_{a}$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды (для морской воды  $\varepsilon_{a} = 80$ );  $\sigma_{cn}$  — удельная проводимость среды, 1/(ом·м);  $\lambda$  — длина волны в воздухе, м.

Для случая распространения электромагнитной энергии в морской воде эта формула может быть упрощена (так как  $\varepsilon_n \ll 60 \ \lambda \sigma_{_{M,B}}$ ) и записана в следующем виде:

$$\delta = (2\pi/\lambda) \sqrt{30\lambda\sigma_{_{M,B}}} \approx 34.5 \sqrt{\frac{\sigma_{_{M,B}}}{\lambda}} \, 1/\mathrm{M},\tag{2}$$

где  $\sigma_{_{\!\!M\!,\!6\!}}$  — средняя проводимость морской воды, 4 (1/ом·м). Для частот 15; 10; 1 и 0,1 кГц  $\delta$  равен соответственно 0,486; 0,4; 0,1 и 0,04 (1/м).

Расстояние х, после прохождения которого амплитуда напряжённости поля электромагнитной волны, распространяющейся в морской воде, уменьшится в 10<sup>6</sup> раз, можно определить по формуле:

$$x = \frac{13,81}{\delta} = \frac{13,81}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{30\sigma_{\scriptscriptstyle M,6}}} M.$$

Зависимость величины x, характеризующей дальность распространения электромагнитной энергии в морской воде, от частоты в диапазоне сверхдлинных волн приведена на рис. 1 (Кудрявцев, 1978), на котором видно, что с уменьшением частоты дальность распространения электромагнитных волн в воде увеличивается. Длина электромагнитной волны в морской воде определяется по формуле:

$$\lambda_{M,G} = a/f = (a/c)\lambda,$$

где  $f, \lambda, c$  — соответственно частота, длина и скорость распространения волны в воздухе, Гц, м, м/с; а — скорость распространения электромагнитной волны в морской воде:

$$a \approx \sqrt{\frac{c}{30\sigma_{_{M,6}}}} \,\mathrm{M/c}$$

Тогда  $\lambda_{M,B} \approx \sqrt{\frac{\lambda}{30\sigma_{M,B}}}$ .

Ниже приведены значения  $\lambda$  и  $\lambda_{ms}$ : 100 200 500 1000 2000 5000 частота f, Гц 10000 15000 длина волны  $3,0\cdot10^6$   $1,5\cdot10^6$   $0,6\cdot10^6$   $3,0\cdot10^5$   $1,5\cdot10^5$   $0,6\cdot10^5$   $3,0\cdot10^4$   $2,0\cdot10^4$ в воздухе  $\lambda$ , м длина волны в морской 22,3 50,0 35.4 15.8 158.0 114.0 108.0 12.9 воде  $\lambda_{M,B}$ , м

Рис. 1. График зависимости дальности распространения низкочастотных электромагнитных волн в морской воде от частоты

Fig. 1. Dependence of propagation length for electromagnetic waves in seawater on their frequency



При одинаковых частотах длины электромагнитных волн в морской воде хотя и имеют значительно меньшие величины, чем в воздухе, однако остаются достаточно большими. Поэтому электромагнитные волны длинноволнового диапазона используются лишь для узкополосной связи с подводными лодками.

В то же время имеется так называемое «окно прозрачности», где поглощение этой энергии в воде минимально и сравнимо с затуханием сверхдлинных волн. Оно находится в зелено-голубой части видимого спектра электромагнитных волн (в диапазоне длин волн  $\lambda = 450-550$  нм) (Лазеры ..., 1968\*; Власов и др., 1971; Кудрявцев, 1978).

Указанное «окно прозрачности» и используется для дистанционного обнаружения гидробионтов посредством активной лазерной локации.

## Результаты и их обсуждение

Лазер — это источник когерентного электромагнитного излучения с малой дифракционной расходимостью и высокой направленностью, способный осуществлять предельно возможную концентрацию энергии излучения в пространстве, времени и спектральном диапазоне. Лазеры появились в начале 1960-х гг. С разработкой импульсных лазеров в оптическом диапазоне длин волн стала возможной передача световых импульсов на значительные расстояния и создание лидаров (Lidar — сокращение от «light detection and ranging»). Блок-схема лидара представлена на рис. 2. Основными

компонентами лидара являются, вопервых, источник оптического излучения — лазер — и оптика управления лучом, во-вторых, приёмная оптика (телескоп) и детектор; и в-третьих, компьютер сбора данных и дисплей отображения.



Рис. 2. Блок-схема рыбопоискового лидара NOAA (Churnside et al., 2003) Fig. 2. Block diagram of NOAA fish lidar (from: Churnside et al., 2003)

<sup>\*</sup> Лазеры для обнаружения рыбы // Рыб. хоз-во. 1968. № 8. С. 30.

Лидар содержит источник оптического излучения — лазер, фотоприёмник, устройство управления, систему обработки результатов зондирования, регистрации и отображения информации и блок питания. Направленный пучок фотонов рассеивается по мере распространения, рассеяние в обратном направлении фиксируется высокочувствительным фотоприёмником. Величина сигнала определяется коэффициентом рассеяния в обратном направлении и потерями, обусловленными поглощением световой энергии.

В лазерных системах (лидарах) дистанционного контроля получение информации о водных биологических объектах осуществляется за счет энергии электромагнитных волн видимой части их спектра. Если в начальный период лидары устанавливались на судах и использовались в основном при изучении планктона, то в настоящее время они устанавливаются также на летательных аппаратах и в буксируемых устройствах и с их помощью активно проводятся натурные экспериментальные исследования по обнаружению промысловых биологических объектов.

В общем случае лидар работает следующим образом. Луч лазера проходит коллиматор, делающий его параллельным, и излучается сканируемой оптической системой. Эхосигнал проходит приемную оптическую систему, частотные фильтры, стробирующий детектор и подается на индикатор. В качестве детектора используется фотодиод или фотоэлектронный умножитель, в качестве индикатора — дисплей изображения. Синхронизация генератора строба осуществляется от лазера, а синхронизация индикатора — от системы сканирования.

Излучённый параллельный монохроматический луч лазера, проходя через границу воздух-вода, распространяется в водной среде, часть энергии отражается от подводных объектов, вторично проходит через границу раздела двух сред и фиксируется приемным устройством на летательном аппарате.

При этом морская поверхность рассматривается как случайное распределение элементарных участков, описывающееся теорией вероятностей и математической статистикой. Преломление лазерного луча элементами поверхности океана является некогерентным, и поэтому интенсивность преломленного сигнала в точке расположения цели определяется суммой интенсивностей воздействия всех элементарных преломляющих участков, охватываемых поперечным сечением лазерного луча. Для расширения зоны обзора, т.е. скорости обследования, применяются сканирующие системы в плоскости, перпендикулярной направлению движения носителя аппаратуры лидара.

Хотя имеется много данных по распространению энергии лазерных источников в водной среде, из которых можно сделать предположение о возможности перекрытия ими глубин поверхностного слоя океана в пределах 200 м, сведений о реальных возможностях лазерных систем (лидаров) по обнаружению водных биологических объектов до последнего времени было не очень много.

Затухание электромагнитных волн в вышеуказанном диапазоне спектра имеет примерно один порядок с затуханием сверхдлинных волн (с частотой порядка 100 Гц). На рис. 3 приведен график затухания электромагнитных волн в морской воде (Власов и др., 1971).



Рис. 3. Затухание электромагнитных волн в водах океанов

Fig. 3. Absorption of electromagnetic waves in seawater in dependence on wave length

При испытаниях лазеров с зеленым лучом было установлено, что в случае углового отклонения луча до  $\pm 1,5^{\circ}$  интенсивность светового потока луча лазера соответствует прямому лучу до расстояния около 50 м. При бо́льших расстояниях уменьшается

направленность луча лазера и увеличивается влияние фона, создаваемого рассеянным светом. Особенно резко происходит ослабление интенсивности луча лазера на близких расстояниях от источника при различной прозрачности морской воды. При больших расстояниях влияние прозрачности сказывается меньше. Так, например, при относительной прозрачности воды 5 м интенсивность луча лазера на расстоянии 5 м уменьшается в 1000 раз, а при прозрачности воды 15 м — в 100 раз. При расстоянии от лазера 50 м относительное уменьшение интенсивности луча света лазера примерно одинаково как для вод с относительной прозрачностью 5 м, так и для вод с прозрачностью 15 м (Егоров, 1974). Приведённые примеры относительной прозрачности (глубина исчезновения белого диска) относятся к достаточно мутным водам, если сравнивать с водными массами открытой части Мирового океана.

Распространяясь в морской воде, луч лазера претерпевает пространственное затухание, вызванное совокупностью эффектов поглощения и рассеяния света частицами воды и морскими микроорганизмами. Величина ослабления света описывается коэффициентом пространственного затухания  $\gamma$  (1/м), который зависит от частоты, а также от глубины, температуры, солености воды, количества содержащихся в ней газовых пузырей и микроорганизмов и может колебаться в широких пределах. Величина отражения лазерного луча целью в направлении приемника характеризуется поперечным сечением обратного рассеяния  $\sigma$  (см<sup>2</sup>), которое зависит от размеров цели, и коэффициентом отражения *a*, зависящим от ее вещества. В случае регистрации плотных скоплений рыбы, когда в пределах объема, ограниченного эффективной шириной луча лазера и выбранным интервалом глубин, находится множество рыб, для определения величины эхо-сигнала необходимо произвести суммирование отражения света каждой рыбой с учетом характеристики направленности лазерной системы.

В работе Murphree с соавторами (1974) приводится теоретическое расчётное обоснование возможности обнаружения рыбы с помощью лазерного устройства (лидара). В связи с тем что мощности лазеров лидаров, волнение моря (сила ветра), величина затухания света в воде и отражательные свойства рыбных скоплений колеблются в чрезвычайно широких пределах, в проведенных расчетах фигурируют некоторые средние параметры, соответствующие характеристикам аппаратуры, реальному состоянию воды, ветра и реальному скоплению рыб. Определенные теоретические зависимости величины эхо-сигнала от указанных факторов дают возможность пересчитать результаты расчетов для других параметров аппаратуры, среды и рыбных концентраций.

При распространении излучения лазера через морскую воду оно как поглощается, так и рассеивается. Удельная мощность световой энергии P(r) на расстоянии r от поверхности воды в параллельном луче определяется как

$$P(r) = P(o)e^{-\gamma r},$$

где *P*(*o*) — мощность при *r* = 0; *γ* — объемный коэффициент ослабления, равный сумме объемного коэффициента поглощения и объемного коэффициента рассеяния.

Кроме того, происходит уменьшение удельной мощности с глубиной за счет расширения луча, которое зависит от состояния поверхности, т.е. от силы ветра (расчеты проводились при значениях скорости ветра 10, 5 и 1 м/с). Отраженная энергия при распространении к поверхности воды также ослабляется по тем же самым причинам.

Чем меньше минимальная мощность, принимаемая приемником Р<sub>прин</sub>, т.е. чем выше его пороговая чувствительность, тем на большей глубине может быть обнаружен объект. Увеличение мощности лазера также увеличивает глубину обнаружения объектов при одной и той же высоте полета. При увеличении мощности лазера или чувствительности приемника высота полета самолета может быть больше или рыбы могут находиться на большей глубине.

Для получения больших глубин обнаружения рыбы при ее поиске целесообразнее настраивать лазер на оптимальную с точки зрения минимума затухания длину волны, чем использовать лазер высокой мощности с фиксированной длиной волны. Также необходимо знать зависимость коэффициента отражения и поперечного сечения обратного рассеяния рыбы и рыбных скоплений от длины световой волны излучения лазера. Для нормальной работы требуется применение оптических анализаторов спектра, узкополосных и пространственных фильтров, исключающих влияние естественных излучений, флюоресценции и других источников световой энергии вне длины волны излучения лазера. Пространственная фильтрация и стробирование предназначены для уменьшения воздействия на принимаемую полезную информацию поверхностных отражений и подводного рассеяния.

Проведенные расчеты (Murphree et al., 1974) показали возможность обнаружения рыбных скоплений в поверхностных слоях воды методом лазерной локации с летательного аппарата. В качестве примера в указанной работе рассмотрен типовой режим работы самолетной лазерной (лидарной) системы. Скорость полета самолета 160 км/ч, высота 152,5 м, частота посылок лазера 500 имп./с. Для сохранения постоянства диаметра освещаемой в каждый момент времени зоны на поверхности воды (в пределах 1 м) максимальный угол сканирования луча в плоскости, перпендикулярной направлению полёта, был ограничен (13,8°). В этом случае лазер просматривает 75-метровую полосу океана, затрачивая 31 посылку на период сканирования луча от одного края полосы до другого. При этом расстояния между центрами кругов поверхности океана, освещенными двумя следующими друг за другом посылками, равны 2,7 м в направлении движения самолета и 2,5 м в поперечном направлении. Скорость обследования акватории — 12 км/ч.

Лазеры на твердом теле из сплава алюминия и граната иттрия или из сплава стекла и ниодима имеют импульсную мощность 10–20 МВт при  $\lambda = 1,06 \cdot 10^{-6}$  м. Чтобы уменьшить поглощение света в воде, обусловливающее потери мощности, применяют удвоитель оптической частоты (например, из ниобата лития или кристалла дегидрофосфата калия), преобразующий инфракрасное излучение лазера в импульсы синезеленой спектральной области. После преобразования в удвоителе исходная мощность импульса снижается до 1 МВт при  $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$  м.

При оптической локации промысловых концентраций рыб неизбежны помехи из-за объемного рассеяния лазерного луча частицами воды и морскими микроорганизмами. Объемное рассеяние преобладает в прямом направлении, резко уменьшаясь при отклонении от направления падения лазерного луча. Помеха создается объемным рассеянием в обратном направлении, которое незначительно зависит от угла наблюдения. Мощность помехи связана с коэффициентом обратного рассеяния луча. Поскольку в морской воде всегда имеются частицы и микроорганизмы самых различных размеров, величина объемного обратного рассеяния света практически зависит от частоты.

Проведенные расчеты показывают, что в реальных условиях при принятых выше параметрах рыбного скопления и водной среды отношение сигнал/шум (S/N) составляет  $3 \le S/N \le 24$ . Увеличение размера рыбы или плотности концентрации рыб в скоплении, а также увеличение коэффициента отражения света от рыбы, связанное, например, с поворотом рыбы серебристым боком к лазеру, приводит к возрастанию отношения сигнал/шум.

Для получения оптимальных результатов лазерная система, предназначенная для локации рыбных скоплений, должна удовлетворять определенным требованиям. Для минимального ослабления луча лазер должен работать в зелено-голубой части спектра. Приемник должен обладать способностью детектировать сигнал с весьма низкой мощностью в очень короткие промежутки времени, а также он должен включать в себя частотные и временные устройства подавления помех, а именно фильтры и устройства стробирования.

Таким образом, приведенный анализ взаимодействия лазерного луча с реальными рыбными концентрациями, учитывающий возможности современной аппаратуры, показал, что мощность эхо-сигнала от рыбных стай и скоплений вполне достаточна для их локации с помощью самолетной лазерной системы.

При разработке лидарной системы существует некоторое число ключевых параметров, которые нужно оптимизировать для максимализации ее эффективности. Такими ключевыми параметрами являются:

- действующая мощность в импульсе;
- выбор длины волны лазера;
- длительность импульса;
- частота повторения импульсов;
- чувствительность фотокатода приемника;
- апертура приемника.

Хотя современные лидарные системы с энергетической точки зрения могут обеспечивать большие глубины проникновения их излучения в водную среду, основное ограничение их применения для дистанционного обнаружения гидробионтов обусловлено опасностью повреждения ими зрительных систем человека и млекопитающих. В связи с большим затуханием света в воде энергия лазера быстро уменьшается после вхождения его луча в водную среду. Поэтому основная потенциальная опасность контакта луча лазера с китообразными и ластоногими возникает при нахождении их на поверхности воды.

В 1973 г. американским Институтом национальных стандартов (ANSI) был предложен стандарт безопасного излучения лазера, который был откорректирован в 1993 г. ANSI были разработаны пределы безопасной энергии и мощности, названные максимально допустимыми воздействиями (MPE) на глаза и кожу. MPE основывается на длине волны лазерного излучения и времени воздействия и выражается в энергии на единицу площади (поверхности) — джоуль/см<sup>2</sup> — или мощности на единицу поверхности — Вт/см<sup>2</sup>. Большинство океанографических лидаров работает в зелёно-голубой области (450-550 нм) видимого спектра (400-700 нм). Обычно в них применяется лазер с длиной волны 532 нм. Длительность излучаемого импульса при этом составляет примерно (около) 10 нс, обеспечивая разрешающую способность по глубине около 1 м. Импульсы большей длительности приводят к снижению разрешающей способности и соответственно к ухудшению различения подводных целей. При указанной длине волны и длительности импульса энергия лазера должна быть выше, чем 2 · 10<sup>-2</sup> Дж/см<sup>2</sup> для повреждения кожи человека. В связи с фокусированием глаза повреждения сетчатки могут наблюдаться и при меньшей энергии. МРЕ для возможного повреждения глаза человека энергией лазера составляет 5 · 10<sup>-7</sup> Дж/см<sup>2</sup> при длине световой волны между 400 и 700 нм и временем воздействия  $10^{-9} - 1.8 \cdot 10^{-5}$  с. В работе Zorn с соавторами (2000) по результатам исследований шести видов китообразных и пяти видов ластоногих указывается, что человеческий глаз является более чувствительным, чем глаз китообразных или ластоногих. Исходя из этого они пришли к выводу, что энергия лазера, которая безопасна для человека, также будет безопасной и для морских млекопитающих и что излучение лазера большей интенсивности может допускаться, если избегать его воздействия на людей.

Кроме вышеприведённых расчётов Murphree с соавторами (1974) о возможностях обнаружения рыбы лидарами, Squire и Krumboltz (1981) показали, что зелено-голубой свет распространяется по глубине вплоть до 100 м и более и что косяки рыбы могут быть обнаружены лидаром с воздуха. Кrekova с соавторами (1994) представили результаты численного моделирования, показывающего, что из эхо-сигналов лидаров может быть выделена полезная информация о рыбных косяка.

В первой половине 1990-х гг. NOAA (США) была разработана лидарная система Fish Lidar Oceanic Experimental (FLOE) и усовершенствована техника обработки сигналов для различения рыбных эхосигналов среди отражений от малых частиц в водной среде (Churnside et al., 1997, 1998, 2001а). В качестве лазера использовался ниодимо-иттриевый алюминиевый гранат (Nd:YAG). Лазер системы FLOE вырабатывает 10-наносекундные импульсы линейно поляризованного зелёного света (532 нм) с частотой 30 имп./с. Кросс-поляризованный отражённый свет собирается телескопом в фотоэлектронный умножитель и оцифровывается со скоростью 1 гиг/с на выборку, обеспечивая интервалы выборок по глубине, равные 11 см. Использование кроссполяризованного возврата обеспечивает более низкий уровень сигнала, чем сополяризованный возврат, но больший контраст между рыбой и водным фоном. Вначале Churnside с соавторами (1997) испытали эту систему с судна и выполнили измерения силы цели живой сардины в баке для демонстрации возможности определения биомассы. Затем (Churnside et al., 2001а) представили результаты нескольких испытаний лидара с ряда летательных аппаратов.

На рис. 4 (а) представлен пример обработанной световой эхограммы лидара, показывающий косяк рыбы, эхограмма которого была получена с помощью судовой гидроакустической аппаратуры вертикальной локации (рис. 4, б).



Рис. 4. Сравнение эхограмм лидара (**a**) и гидроакустической аппаратуры вертикального зондирования (**б**) при лоцировании одного и того же косяка сардины в районе южного побережья Калифорнии (Churnside et al., 2001b)

Fig. 4. Echograms of lidar (a) and sonar ( $\mathbf{6}$ ) for the same sardine school at southern California (Churnside et al., 2001b)

Глубина действия системы FLOE составляет до 50 м, и она уже использовалась в зоне побережья Калифорнии для съёмки анчоуса и сардины (Hunter and Churnside, 1995; Churnside et al., 1997; Lo et al., 2000), а также для дистанционного мониторинга планктона, кальмара и морских млекопитающих (Churnside et al., 2001а). Сравнения данных лидара с акустическими данными были близкими, т.е. эти методы могут давать подобные результаты (Churnside et al., 2001b; Brown et al., 2002).

В 2000 г. система FLOE с цифровой цветной видеокамерой была установлена на самолёте и испытана в полевых условиях в трёх отдельных районах восточной части северной зоны Тихого океана. Оба устройства были направлены под углом 15° относительно вертикали для минимизации зеркальных отражений от морской поверхности и обеспечения возможности визуальных наблюдений перекрывающихся данных лидара и видеоизображений. Для сокращения возможной вариабельности получаемых данных во всех районах высота полёта самолёта была в пределах 305 м при скорости 222 км/ч (120 уз). Данные каждого устройства запоминались в электронном виде с привязкой к географическим координатам с помощью навигационной системы GPS через интервалы 1 с. Измерялись также углы бортовой, килевой качки и рыскания самолёта для коррекции при постобработке изменений в углах приема информации. В каждом районе исследования лидарные съёмки координировались с судовыми исследовательскими программами, которые могли обеспечить идентификацию биологических целей для интерпретации самолётных данных.

При указанных лидарных съёмках обеспечивался диаметр освещаемого лазером пятна и соответственно ширина полосы обзора (пропускания) 5 м днём и 15 м ночью. Полоса обзора видеокамеры составляла от 150 до 200 м при высоте полёта 305 м. Разрешающая способность одного пикселя изображений была примерно 6 см. Частота повторения импульсов лазера составляла 30 в секунду, один файл включал 66 с и представлял собой набор данных с дистанции примерно 4,5–5,0 км (в зависимости от скорости полёта). Типичный полёт содержал несколько часов данных, соответственно порядка 150–200 файлов.

В связи с затуханием света с глубиной отражённый сигнал становится слабее, поэтому устанавливался порог, превышающий уровень фона. Глубина проникновения света лазера была меньше в более «зелёной» воде в связи с более высокой концентрацией в ней фитопланктона.

При оценке значений плотностей рыбы и зоопланктона проводилось сравнение данных обратного рассеяния от акустических эхолокаторов, работающих на частотах 43, 120, 200 и 420 кГц, и лидара, хотя не удалось получить информацию непосредственно от полностью совпадающих по всем параметрам зон наблюдения. Акустические данные на каждой частоте переводились от децибелов к цифровым и затем интегрировались в пределах перекрываемого диапазона действия лидара. Проинтегрированные численные значения затем делились на среднюю силу цели –70 дБ (Coyle K.O., персональное сообщение) — для получения общего акустического обратного рассеяния на бин. Обратное рассеяние лидара оценивалось как сумма общего сигнала выше уровня фона в пределах данного бина.

Для дополнительного сравнения плотностей планктона, оцененных двумя дистанционными методами, обратное рассеяние от лидара сравнивалось с выборками планктонной сети. Наблюдалось хорошее пространственное и временное перекрытие между самолётными съёмками и выборками зоопланктона при трёх 2-часовых пролётах над каждой из станций планктонных выборок. Среднее значение проинтегрированного сигнала лидара в пределах диапазона глубин 0–20 м сравнивали с учётом охватываемого объёма воды (см<sup>3</sup>) при соответствующих сетных выборках. Так как сетные выборки выполнялись в дневное время, их результаты сравнивались с данными дневной лидарной съёмки.

В общем в течение июля и августа 2000 г. было перекрыто съёмками 15000 км в трёх пространственно разных районах: в прибрежных зонах южной части British Columbia, северной части Southeast Alaska и от Prince Willam Sound до свала континентального шельфа Gulf of Alaska.

Глубина проникновения света лидара изменялась от 18 до 50 м, в основном удваивалась ночью, а также между прибрежными и более глубокими шельфовыми водами. Наиболее низкой она была в илистых речных районах (< 10 м), промежуточной — в заливах и фьордах (18–30 м) и наибольшей — в открытых океанических зонах, а также в районах континентального шельфа (25–50 м). Обратная величина глубины проникновения существенно связана с показателем «зелёности» (хлорофилла), что подтверждает связь между первичной продуктивностью водной среды и затуханием в ней света.

Данные от всех четырёх акустических частот больше согласовывались с информацией от лидара с коэффициентом корреляции в диапазоне от 0,550 до 0,592, с наилучшим для частоты 200 кГц.

Отмечено общее согласие между объёмом выборок зоопланктона и средним интегрированным сигналом лидара по семи оцененным станциям выборок. Средний сигнал был низким на станциях с небольшими объёмами выборок, а станция с наибольшим объёмом выборки имела самый большой сигнал. Хотя не было много вариаций в среднем сигнале лидара между тремя пролётами самолёта, однако имелась значительная изменчивость в сигнале в пределах блока обзора лидара вокруг станции. Она увеличивалась с плотностью зоопланктона. Вариабельность сигнала в пределах блока, по мнению авторов, была обусловлена высоким показателем пространственной «пятнистости» и вариациями в плотности в пределах пятен.

В 2000 г. сообщалось о непонятно большом обилии мойвы в Аляскинском заливе. Над шельфом мойва в основном находилась в зонах, где глубина была от 100 до 180 м. Поэтому мойва, наблюдаемая в пределах верхнего 50-метрового слоя, вероятно, представляла лишь часть всей популяции в районе. Тем не менее лидаром обнаруживалось много крупных косяков (рис. 5). Более высокие концентрации объектов в 50-метровом приповерхностном слое наблюдались в дневное время. Скопления мойвы обычно имели размер вдоль трансекты > 1 км, протяжённость по вертикали часто составляла 20 м и более. Агрегации косяков простирались вплоть до 10 км.



Рис. 5. Пример эхограммы лидара вдоль 20-километровой трансекты при лазерной локации крупных косяков мойвы ночью в зал. Аляска (Brown et al., 2002)

Fig. 5. Airborne lidar echogram of capelin schools at night along 20-km transection in the Gulf of Alaska (Brown et al., 2002)

Преимущество дистанционного мониторинга с летательных аппаратов в рыбохозяйственных исследованиях и морской экологии заключается в возможности быстрого обследования крупных регионов со сбором физических и биологических данных с помощью различных устройств. Одновременно может быть получена информация о поверхностной температуре морской воды и её солёности, цвете океана, распределениях морских птиц и млекопитающих, пространственной «пятнистости» и плотности зоопланктона, а также концентраций рыбы.

Недостаток съёмок водной среды с летательных аппаратов состоит в том, что большинство дистанционных измерений ограничено зоной вблизи водной поверхности и в случае применения безопасного для воздействия на глаза лидара верхним 50-метровым или несколько большим приповерхностным слоем. При дистанционных исследованиях пелагических видов рыб, таких как мойва, с использованием указанных средств весьма существенными являются акустические измерения с надводных судов и буксируемых систем для интерпретации распределения объектов ниже глубины проникновения излучения лидара.

Другим ограничением дистанционного мониторинга с летательных аппаратов является влияние ветра и волн на качество и вариабельность получаемых данных. Любые увеличения килевой, бортовой качки и рыскания летательного аппарата, а также неровностей морской поверхности уменьшают и маскируют особенности поверхности, такие как нахождение на ней стай птиц и млекопитающих.

Отсутствие данных о пространственной «пятнистости» также может оказывать влияние на точность оценок плотности планктона. Пространственная «пятнистость» может быть особенно большой в прибрежных районах, где локальные турбулентности от течений и вихрей могут влиять на распределение зоопланктона. Так, измерения плотности зоопланктона были весьма важны при исследованиях в 2000 г. учеными Аляски процессов роста и выживания молоди лососевых в течение их ранней морской стадии жизни. Однако при наличии высокой «пятнистости», вариабельности в размерах пятен и плотности её оценки при отдельных сетных выборках могут иметь существенные погрешности. Измерения с летательных аппаратов могли бы быть использованы для картирования пятен зоопланктона и получения более ясного представления о соотношении между ростом и перемещением рыб в этих весьма изменчивых прибрежных регионах.

Стробированные видеоизображения, синхронизированные с импульсами лидара, позволяют выделять затенённые изображения характеристик, освещаемых лазером. Эти изображения могут помочь в идентификации целей и усовершенствовании интерпретации эхосигналов.

Авторы считают, что необходимы исследования силы цели рыб и планктона в естественных и искусственных условиях. Измерения силы цели для лидара базируются скорее на оптических, чем на акустических характеристиках. Оптическая сила цели определяется функцией отражательной способности зелёного света и оценивалась на замороженных образцах нескольких видов рыб (Churnside and McGollivary, 1991), а также на живой сардине при экспериментах в резервуаре (Churnside et al., 1997). В этой области развитие лидара существенно отстаёт от акустических технологий.

Целесообразна разработка лидарной системы с улучшенной глубиной действия и более высоким разрешением, что позволило бы картировать намного меньшие по размерам (более тонкие) характеристики водной среды по сравнению с существующими возможностями.

В результате могла быть реализована возможность обнаружения индивидуальных объектов, например отдельных мигрирующих лососей и хищников вблизи поверхности, в том числе в прибрежных районах и пресноводных водоёмах, а также выявления особенностей распределения гидробионтов и характеристик водной среды. Однако наибольшим препятствием в развитии дистанционного мониторинга с летательных аппаратов может быть общее непринятие его правительственными учреждениями, а также рядом исследователей. Это непринятие может быть связано с неготовностью менять издавна существующие методы наряду с отсутствием желания выделять ресурсы для дистанционного мониторинга. Необходимо понимать, что переход к этой технологии не является тривиальной задачей и будет требовать существенных усилий.

Для эффективного управления прибрежным рыболовством необходимо определять наличие рыбных запасов, их географическое положение и сезонное обилие, используя быстро развёртываемые, независимые от рыболовства методы. Это может быть обеспечено развитием независимых от рыболовства методов съёмок.

Уже достигнуты определённые успехи в развитии независимых от рыболовства методов съёмок, воздушных визуальных, фотограмметрических, инфракрасно-фотограмметрических и судовых гидроакустических съёмок. Однако все они имеют как свои особенности, возможности, так и недостатки, в той или иной мере проявляющиеся в зависимости от характера и целей исследований.

В работе Churnside с соавторами (2003) проводится сравнение акустических и лидарных (с лидаром NOAA) эхолокационных измерений косяков рыбы в Мексикан-

ском заливе. Авторами отмечается, что Комиссия сохранения рыбы и дикой природы Флориды ежегодно проводит акустико/траловые съёмки для оценки рыбных ресурсов вдоль западного побережья Флориды. Хотя эти съёмки показали, что могут быть эффективным методом мониторинга динамики размера запасов, они являются затратными и обычно слишком неэффективными для целей быстрой оценки. Задачей исследования было сравнение in situ сил обратного объёмного рассеяния, измеренных оптическими и акустическими методами, для косяков разных видов рыб. Следуя общему применению символов, сила оптического объёмного обратного рассеяния обозначалась как  $\beta(\pi)$ , а акустические величины как s<sub>v</sub> для линейной шкалы и S<sub>v</sub> — для соответствующих значений в децибелах. Отметим, что  $\beta$  и s<sub>v</sub> являются в данном случае эквивалентными величинами.

Рыбопоисковая импульсная лидарная система NOAA является несканирующей и радиометрической (Churnside et al., 2001а). Первое означает, что угол падения её луча на воду является фиксированным при постоянном уровне полёта летательного аппарата. Термин радиометрическая означает, что системой измеряется абсолютный уровень отражённого света лазера. Летательный аппарат с NOAA-лидаром работал при высоте полёта 300 м. Для уменьшения прямых отражений от поверхности лидар направлялся под углом 15° от надира. В лазере использовался быстрый оптический переключатель (известный как Q-переключатель — дазерный затвор), который открывается после того, как кристалл полностью заряжается, обеспечивая излучение всей энергии в виде короткого импульса. С помощью нелинейного оптического кристалла осуществляется удвоение частоты, а именно преобразование инфракрасного (1064 нм) света в зелёный (532 нм). Уровень освещения лидаром поверхности моря удовлетворяет стандартам США для лазерных вспышек в рабочем пространстве и безопасен для морских млекопитающих (Zorn et al., 2000).

Приёмная оптика включает преломляющий телескоп диаметром 17 см с поляризационным фильтром. Фильтр пропускает только ту компоненту отражённого света, для которой линейная поляризация ортогональна поляризации лазера. Кроссполяризационная компонента используется в связи с тем, что она обеспечивает наилучший контраст между отражениями от рыбы и более мелких рассеивателей в водной среде. Это было определено во время судовых испытаний лидара, где деполяризация возврата света от рыбы была примерно 30 %, а деполяризация от водной среды составляла только около 10 % (Churnside et al., 1997).

Чтобы исключить световой фон, свет, собираемый телескопом, проходит через интерференционный фильтр. Результирующий свет попадает на фотоумножитель, который преобразует подаваемый на него отражённый свет в электрический сигнал и оцифровывает его.

Компьютер обеспечивает во время полёта отображение данных на дисплее в реальном времени. В результате во время прохода летательного аппарата над косяком можно определить, попадает ли луч лазера на рыбу.

В качестве акустической аппаратуры использовался эхолокатор ДТ4000 фирмы Биосоник (США) с рабочей частотой 208 кГц, антенной с «расщеплённым лучом» и круговой характеристикой направленности шириной 6,3° на уровне половинной мощности. Эхолокатор был установлен на небольшом судне длиной 9,5 м, акустическая антенна размещалась на забортном устройстве. В процессе съёмки акустические импульсы длительностью 1 мс излучались с частотой повторения примерно 6 Гц при уровне источника 221,1 дБ и чувствительности приёмного устройства –52,5 дБ. Данные силы объёмного обратного рассеяния (S<sub>v</sub>) вводились с информацией о географическом местоположении и времени с помощью спутниковой радионавигационной системы GPS. Также были определены значения температуры, солёности и коэффициент затухания на частоте 208 кГц, которые были равны 17 °C, 35,6 ‰ и 46,6 дБ/км.

Было выполнено 5 полётов 4–8 декабря 2000 г. при следующей методике работ: наблюдатель на борту самолёта визуально обнаруживал косяк рыбы, лидар несколько раз проводился над обнаруженным косяком, судно с эхолокатором направлялось к нему и несколько раз проходило над косяком возможно ближе к его центру. По выловам рыб

из косяка оценивался их видовой и размерный состав. Хотя лидаром обнаруживалось много косяков, не видимых наблюдателем, не всегда удавалось направить к ним судно с эхолокатором. Поэтому в данном исследовании принимались во внимание только косяки, видимые визуально.

В связи с поставленной задачей сравнения отражательных способностей косяков двумя методами экспериментальные исследования проводились на приповерхностных скоплениях кефали (лобана), сельди, сардины и др. в мелководных районах.

Постобработка данных лидара выполнялась с использованием среднего алгоритма, описанного в работе Churnside с соавторами (2001а). При применении этого алгоритма использовались данные средней интенсивности обратного рассеяния по глубине для 500 импульсов лидара или его световых «пятен». Эти данные использовались для оценки уровня фонового обратного рассеяния, т.е. обратного рассеяния от по существу «пустой» воды. Указанная оценка была обоснованной для данных проведённого исследования, так как косяки рыбы занимали значительно меньше половины «пятен» на любой глубине. Затем уровень фона вычитался из возврата каждого «пятна» лидара, и эта разность интерпретировалась как обратное рассеяние от косяков рыбы; на краях косяка эта разность была меньше нуля.

Калибровка проводилась по цели Кодак размером 0,203 х 0,254 м с коэффициентом отражательной способности 18 %.

В работе приведена применённая методика расчёта коэффициента объёмного обратного рассеяния лидара. Акустические данные обрабатывались стандартными методами эхоинтегрирования с применением программы обработки Эховью (V2.2/50). Результирующие скачкообразные (импульсные) помехи от другого судового акустического эхолокатора и других источников усложняли количественный анализ данных по большим дистанциям трансект. Однако для большинства индивидуальных косяков рыбы мог быть выполнен точный анализ (эхосигналы от которых были без всплесков помех). Данные S,, относящиеся к косякам рыбы, суммировались по их вертикальной протяжённости и усреднялись по горизонтальной протяжённости косяка. Это результировалось в мильный коэффициент поверхностного рассеяния (NASC: м<sup>2</sup>/морская миля<sup>2</sup>) или площадь обратного поперечного рассеяния рыбы на единичную морскую милю площади поверхности моря (1 морская миля<sup>2</sup> — 3,4299 · 10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>). Границы косяка оценивались с порогом S<sub>v</sub> = -70 дБ. При этом полагали, что NASC пропорционален численному обилию рыбы в этом косяке. В табл. 1 приведены некоторые результаты лидарных и акустических измерений косяков с указанием количества проходов лидара над косяком, средней отражательной способности и средними стандартными девиациями (при трех и более проходах — в остальных случаях удалось получить лишь одно хорошее измерение для каждого косяка). Также приведены число акустических «проходов» над косяком, средние S<sub>и</sub> и NASC.

Таблица 1

Некоторые результаты лидарных (2–4) и акустических (5–7) измерений косяков Table 1

	Косяк	Число проходов	Средняя отражательная способность	Стандартная девиация	Число проходов	Средний коэффициент обратного объёмного рассеяния, дБ	Мильный коэффициент поверхностного рассеяния, м <sup>2</sup> /морская миля <sup>-2</sup>
	А	1	$2,40 \cdot 10^{-3}$	_	2	-31,02	84 780
Ī	В	9	2,14 · 10 <sup>-3</sup>	7,97 · 10 <sup>-4</sup>	4	-31,57	208 337
	С	6	6,50 · 10 <sup>-4</sup>	9,63 · 10 <sup>-5</sup>	14	-37,97	10 992
	D	1	5,59 · 10 <sup>-4</sup>		3	-45,14	2 127
	Е	1	5,35 · 10 <sup>-4</sup>		2	-46,04	2 137
	F	1	5,85 · 10 <sup>-4</sup>		4	-43,66	4 639
	G	1	4,61 · 10 <sup>-4</sup>		4	-41,49	3 904

#### Some results of lidar (2-4) and sonar (5-7) assessments of fish schools

Во время первого полёта судно нацеливали на несколько косяков, обнаруженных лидаром, но оно лишь в одном случае с достаточной достоверностью прошло над указанным косяком. Этот косяк был пересечён 11 последовательными импульсами лидара, что соответствовало времени 0,37 с. На основании информации GPS при скорости полёта 48 м/с указанное время пересечения косяка соответствовало дистанции 18 м. С учётом диаметра светового «пятна» на поверхности моря протяжённость косяка в горизонтальной плоскости была оценена равной примерно 13 м.

Акустические измерения выполнялись в том же самом районе. В связи с волнением моря большинство эхограмм маскировалось помехами из-за поверхностной турбулентности. Тем не менее были выполнены два прохода над косяком лобана с размерами примерно 12,0 м длиной и 4,5 м высотой, находящимся на глубине от 3,0 до 7,5 м. В то время как горизонтальные размеры косяка были подобны наблюдениям лидаром, положение по вертикали заметно отличалось (он был на большей глубине). Это могло быть вызвано реакцией избегания рыбой судна.

Представленные данные относятся к косякам рыбы, находящимся вблизи поверхности. Это было обусловлено необходимостью визуального обнаружения косяков для обеспечения направления поискового судна непосредственно на выбранный косяк. Фактически лидар имел более широкие возможности обнаружения. За исключением нескольких районов с особенно мутными водами вблизи побережья эхо-сигналы лидара от дна наблюдались с глубины вплоть до примерно 50 м.

В табл. 2 приведены глубины верхних кромок косяков, измеренных лидаром и акустической аппаратурой. В большинстве случаев лидар фиксировал косяки непосредственно у поверхности. В связи с ограниченной разрешающей способностью лидара по глубине они могли быть на глубине 20–30 см. По всей вероятности, бо́льшая глубина регистрации косяков акустическим эхолокатором связана с избеганием рыбы при приближении судна.

Таблица 2

Глубины верхних кромок косяков, измеренных лидаром и акустической аппаратурой Table 2

Косяк	Глубина по лидару, м	Глубина по акустике, м				
Α	0	_				
В	0	0-1				
C	2–3	2–3				
D	0,5	2–3				
Е	1	2–3				
F	0	2–3				
G	0	9–14				

Upper edges of fish schools measured by lidar and sonar

Отмечается высокая степень корреляции между акустической s<sub>v</sub> и лидарной  $\beta(\pi)$  отражательной способностью косяков нескольких видов рыбы в районе западного побережья Флориды. Представлена регрессионная функция коэффициентов объёмного обратного рассеяния акустического эхолокатора вертикального действия и лидара в виде

$$s_v = 1,68\beta(\pi) - 1,55 \cdot 10^{-4}$$
.

Наклон регрессионной функции больше 1, что означает, что для каждой рыбы акустическое рассеяние больше, чем оптическое. Это согласуется с расчётами Churnside с соавторами (2001b), однако лидарные измерения силы цели должны быть выполнены на большем количестве видов рыб для обеспечения сравнения плотностей концентраций рыбы.

Некоторые виды рыб, например скумбрия, являются достаточно сложным объектом для оценки при использовании стандартных акустических методов в связи с отсутствием у них плавательного пузыря. Это обусловливает их очень низкую силу цели по сравнению с видами, имеющими плавательные пузыри, на типичных рабочих частотах акустической эхолокационной аппаратуры. Погрешности в распределении видов в процессе эхоинтегрирования могут приводить к большим ошибкам при оценке биомасс. В некоторых условиях при оценке распределения и плотности рыбных концентраций лидар может быть более эффективным, чем акустические эхолокаторы. Основным преимуществом лидарных съёмок с летательных аппаратов является способность перекрывать большие пространства за короткое время и отсутствие проблемы избегания рыбой судна. В то же время основные проблемы лидаров обусловлены ограничениями по глубине действия (порядка 50 м и, может быть, 100 м) и зависимостью от погодных условий (необходимо отсутствие тумана или облаков ниже высоты полёта). Во время летнего нагула скумбрии в Норвежском море погода обычно ясная, косяки находятся вблизи поверхности (меньше 50-метровой глубины) и избегание рыбой судна является проблемой при акустических съёмках. В этих условиях лидар может быть вполне эффективным средством.

Другое преимущество лидара по отношению к акустической активной локации связано с различием в физике рассеяния. В связи с разными механизмами рассеяния оптическая сила цели рыбы является менее зависимой от угла падения на неё луча лазера, чем акустическая на обычных частотах эхолокации. Кроме того, акустическая сила цели зависит от некоторых переменных свойств внутренней структуры тела рыбы, которые трудно смоделировать, включая зависимость объёма плавательного пузыря от глубины, размера гонад и содержания желудка. Оптическое рассеяние зависит лишь от внешних характеристик рыбы, которые не чувствительны к изменению глубины.

Таким образом, важно знать силу цели рыб, относящуюся к их отражательной способности, а также иметь возможность их видовой классификации. Сила цели — это мера части падающей на объект энергии, которая обратно отражается объектом. Оптическая сила цели рыбы определяется функцией отражательной способности ею зелёного света. Churnside с соавторами (1997) измеряли отражательную способность живых рыб (сардины) при излучении импульсов лидара. Было определено, что сардина отражала от 0,097 до 0,031 света в зависимости от характера поляризации. До этого были проведены измерения на снулых рыбах 5 видов и одном кальмаре (Churnside and McGillivary, 1991) с полученным диапазоном общей отражательной способности зелёного света от 0,072 для рыб и 0,148 для кальмара.

В июле 2002 г. Tenningen с соавторами (2003) провели исследования по картированию сравнительных характеристик распределения и плотности северо-восточной атлантической скумбрии в Норвежском море с использованием лидара, акустических гидролокаторов и тралов. Лидарные съёмки перекрывали район между 60 и 70° с.ш. Лидар был установлен на самолёте и перекрывал Норвежское море за две недели полёта. Основной целью экспериментальных работ была проверка эффективности лидара в качестве средства обеспечения съёмок скумбрии.

При исследованиях использовался лидар NOAA (США) и два промысловых траулера с гидролокаторами SP72 норвежской фирмы Симрад, работающими на частотах 24–36 кГц. Гидролокаторы были соединены с персональным компьютером для сохранения данных о косяках, таких как время, положение, объём, глубина нахождения, скорость и направление перемещения. При обнаружении косяка, который судоводителем оценивался как скумбриевый, включался режим слежения за ним. Информация сонара использовалась для определения типичных глубин нахождения косяков скумбрии, чтобы выяснить, находится ли их основная часть в пределах глубины < 40 м (предполагаемые глубины обнаружения рыбы лидаром).

Линейно поляризованный луч лазера сводился с помощью линз, обеспечивая получение круга на поверхности воды диаметром примерно 5 м. Интерференционный фильтр обеспечивал излучение света в полосе 1 нм относительно длины волны лазера для уменьшения влияния других источников света, таких как прямой солнечный свет, и отражений от поверхности моря.

Эхосигналы интегрировались послойно через 1 м по глубине и по 100-метровым участкам трассы полёта. В результате получали данные об относительной плотности в связи с отсутствием калибровки по рыбе. Собранные данные сравнивались с данными систематических траловых выборок продолжительностью 30 мин в основном

для видовой идентификации. Скумбрия была в 68 из общего количества траловых выборок. Уловы составляли от 1 до 1600 кг. Скумбрия преобладала в 69 % общего улова по массе. Из других видов преобладающими были сельдь и путассу. В южной части фиксировались продолжительные слои планктона, среди которых можно было видеть отражения от косяков скумбрии (рис. 6).



Рис. 6. Плотный косяк скумбрии в слое планктона Fig. 6. Lidar echogram of dense school of scomber within the plankton layer

На рис. 7 представлена лазерная эхограмма косяка рыбы (южная часть района съёмки в Норвежском море вдоль побережья Норвегии (Churnside et al., 2008)), по всей вероятности, скумбрии (согласно облову тралом). Из 64 прослеженных сонарами косяков скумбрии лишь один был зарегистрирован на глубине более 100 м и 64 % находились в пределах верхнего 40-метрового слоя. Глубина действия лидара находилась в пределах 25–35 м. Как и ожидалось, глубина проникновения света лидара в Hardangerfjord была очень ограниченной (до 10–15 м) в связи с большим количеством планктона. Эхо от слоёв планктона не удаляли с помощью стандартных методов постобработки из-за большой их концентрации.



Рис. 7. Эхограмма косяка скумбрии, полученная с помощью лидара (Churnside et al., 2008)

Fig. 7. Lidar echograms of scomber school (Churnside et al., 2008)

Первые испытания лидара в качестве средства дистанционного мониторинга скумбрии являются вполне обещающими, хотя остаются некоторые неопределённости селекции других рассеивателей, таких как слои планктона. Если имеются два смешанных вида, остаются определённые ограничения в его применении. Выполнение полётов во второй половине дня вместо утренних может обеспечивать получение более качественных результатов в связи с тем, что косяки становятся более плотными и находятся ближе к поверхности. Добавление сканирования в системе и второго приёмника с другим характером поляризации может повысить возможности лидара, в том числе облегчить различение между рыбой и другими рассеивателями в море.

Как уже указывалось, для того чтобы оценить возможности лидара, важно знать оптическую силу цели рыб и его способность различать разные виды. Поэтому после окончания полётов лидар использовался на станции норвежского института морских исследований для определения отражательной способности и силы цели скумбрии.

Оценка оптической отражательной способности рыб до этого проводилась лишь для сардины (Churnside et al., 1997). Было установлено, что сардина отражала 9,7 % света, когда приёмник был сополяризован с лазером и 3,1 % при его кросс-поляризации с приёмником, обеспечивая деполяризацию 24 %. Различие в деполяризации и соотношения между кросс-поляризованным и сополяризованным возвратом (отражённым светом) могут быть использованы для распознавания видов.

Churnside с соавторами (2001b) сравнивали характеристики рассеяния звука и света рыбой и установили, что измерения акустической эхолокационной аппаратуры намного больше зависели от углового положения рыбы, чем измерения лидаром. В этих экспериментальных исследованиях использовались зелёный линейно поляризованный лазер и цифровая видеокамера.

В работах Tenningen с соавторами (2003, 2006) приводятся результаты измерения средней оптической отражательной способности рыбы ( $R_p$ ) и лидарной (световой) силы цели (TS) скумбрии в зависимости от размера. Измерения проводились с живой скумбрией в садке размерами 12 х 12 х 10 м<sup>3</sup> посредством сравнения со стандартной квадратной целью площадью 12,7 м<sup>2</sup>, имеющей известную общую отражательную способность 20 %. Цель была на 50 % деполяризована, что результировалось в 10 %-ную отражательную способность в сополяризованной плоскости и 10 %-ную кросс-поляризованной плоскости. Общее количество рыб было 151 с размерами от 0,0042 до 0,0118 м<sup>2</sup>. Размер рыбы рассчитывался как площадь её поверхности, видимой (освещаемой) лидаром. Садок был частично закрыт для уменьшения влияния прямого солнечного света и поверхностных отражений, так как видеокамера не имела узкополосного оптического фильтра для исключения светового фона.

Лазер FLOE с цифровой видеокамерой Панасоник (с вращающимся поляризационным фильтром) располагались рядом друг с другом на расстоянии 2 м от поверхности воды с углом наклона 15° для уменьшения влияния поверхностных отражений. Луч лазера сводился к кругу на поверхности воды площадью примерно 1 м<sup>2</sup> и находился в пределах зоны обзора видеокамеры.

Постобработка включала выделение изображений, где по меньшей мере была одна скумбрия в пределах лазерного луча (пучка) и не было рыбы, перекрывающей цель. Рыба также должна быть находящейся на той же глубине, как и цель, чтобы избежать различий в затухании световой энергии. Путём отбора изображений, в которые цель и рыба попадали полностью, мог быть рассчитан размер рыбы, так как размер стандартной цели был известен. Предусматривалось исключение изображений, в которых наблюдался определённый уровень насыщения эхо.

Рассчитывалось среднее значение пикселей в зелёном канале для области цели, чтобы получить величину I<sub>t</sub>, и для области рыбы, чтобы получить величину I<sub>t</sub>, где I<sub>f</sub> и I<sub>t</sub> — средняя интенсивность света соответственно от рыбы и цели. Средняя отражательная способность рыбы R<sub>f</sub> при неполяризованном приёмнике рассчитывалась как R<sub>f</sub> = 0,2 I<sub>f</sub>/I<sub>t</sub>. Сополяризованная и кросс-поляризованная отражательные способности затем определялись как R<sub>f.co</sub> = 0,1 I<sub>f</sub>/I<sub>t</sub> и R<sub>f.кpocc</sub> = 0,1 I<sub>f</sub>/I<sub>t</sub> в связи с 50 %-ной деполяризацией цели. Отражательная способность на единичный телесный угол равна R<sub>f</sub>/π, вклад рыбы в объёмное обратное рассеяние равен отражательной способности на единичный телесный угол, умноженный на площадь поверхности рыбы. Считая, что размер цели равен 0,04 м<sup>2</sup>, получаем TS, или поперечное сечение обратного рассеяния, как TS = 0,04R<sub>f</sub> N<sub>f</sub>/πN<sub>t</sub>, где R<sub>f</sub> равно R<sub>f.co</sub> для сополяризованного или R<sub>f.кpocc</sub> для кроссполяризованного случая (ситуации) и N<sub>f</sub> и N<sub>t</sub> — количество пикселей соответственно от рыбы и цели.

По данному определению TS имеет размерность  $M^2 \cdot \text{стеррадиан}^{-1}$ . Полное объёмное обратное рассеяние равно произведению силы цели на численную плотность рыбы, которая имеет размерность  $M^{-3}$ . Тогда полное объемное обратное рассеяние будет иметь размерность  $M^{-1} \cdot \text{стеррадиан}^{-1}$ .

Установлено, что скумбрия отражает 8,6 % света в плоскости, сополяризованной с лазером, и 6,1 % в кросс-поляризованной. В результате общая средняя отражательная

способность, представляющая свет, отражающийся во всех направлениях, является суммой двух типов поляризации и равна 14,7 %.

Поперечное сечение обратного рассеяния, или сила цели (TS), при сополяризации изменялось от 1,06  $\cdot$  10<sup>-4</sup> до 3,61  $\cdot$  10<sup>-4</sup>(м<sup>2</sup>  $\cdot$  стеррадиан<sup>-1</sup>), или от 39,76 до 34,42 дБ. Размер рыбы определялся как площадь поверхности рыбы, видимой лидаром, в отличие от длины рыбы, как это применяется при акустических измерениях. Это делалось отчасти из-за удобства при сравнении количества пикселей от цели и пикселей от рыбы и частично из-за того, что лидар зависит от отражений света от всей поверхности рыбы. Необходимо установление соотношения между размером рыбы и её длиной. Сила цели в случае кросс-поляризации находилась между 8,92  $\cdot$  10<sup>-5</sup> и 2,21  $\cdot$  10<sup>-4</sup> (м<sup>2</sup>  $\cdot$  стеррадиан<sup>-1</sup>), или между –40,50 и –36,55 дБ.

При отражении скумбрией 8,6 % в плоскости, сополяризованной с лазером, и 6,1 % в кросс-поляризованной обеспечивается деполяризация 41 %. Большое различие в деполяризации между скумбрией и сардиной позволяет полагать возможность использования этой характеристики для видового распознавания.

Использование лидара, имеющего два приёмника с разным характером поляризации, по одному для каждого, могло бы применяться для различения отражения света лазера от скумбрии и других рыб (например, сельди). Добавление второго приёмника также должно быть целесообразным при применении лидара в районах с большим количеством планктона, как в ситуации в Норвежском море в июле. Планктон имеет тенденцию поляризовать свет в меньшей степени, чем рыба (Churnside et al., 1997).

Корреляция между отражательной способностью и размером требует некоторого внимания. Она рассчитывается как среднее обратное рассеяние от всех пикселей поверхности рыбы. Пока представляется, что более крупные рыбы до некоторой степени отражают больше, чем мелкие, однако необходимо дополнительное изучение этого вопроса. То же относится и к углу наклона рыбы, как это отмечено и в отношении акустики. Боковая сторона скумбрии отличается от верхней по цвету и, вероятно, будет давать другие значения своей отражательной способности.

Лидар уже применялся для обнаружения тунцов в Тихом океане (Oliver et al., 1994), пелагических видов, таких как сардина (Churnside et al., 1997), мойва (Brown et al., 2002), кефаль (Mugilidae) (Churnside et al., 2003) и планктона (Churnside, Thorne, 2005). Была продемонстрирована обработка сигналов лидара для получения величин, пропорциональных количеству рыб в пределах диапазона обнаружения по глубине, хотя перевод данных лидара в биомассу требует видовой идентификации и знания экспериментальных данных об отражательной способности рыб.

Одной из наиболее важных проблем управления рыболовством является оценка состояния годовых классов гидробионтов прежде их вступления в промысел. Это особенно важно для контроля и управления состоянием запасов короткоживущих видов рыб. Акустические методы традиционно применяются для этой цели, однако оценка ранней молоди часто затруднена, так как она нередко находится в верхних слоях воды и часто в прибрежных водах, в том числе в некоторых случаях в мелководных районах. Все эти потенциальные проблемы требуют как совершенствования гидроакустических методов, так и использования дополнительных методов и техники.

Сагтега с соавторами (2006) исследовали возможность использования лидара для дистанционной оценки биомасс ранней молоди основных пелагических видов рыб прибрежных атлантических вод южной Европы (анчоуса, сардины, скумбрии и ставриды). Объективная оценка молоди даёт возможность качественного предсказания будущих пополнений промысловых объектов. Обычно она находится в верхних слоях воды или в мелководных прибрежных районах. Как указывают авторы, это, например, относится к сардине и анчоусу.

При указанных исследованиях проводилось сравнение результатов с данными традиционных судовых эхолокационных систем. Были проведены две экспериментальные съёмки. Картирование распределения рыбы и видовая идентификация выполнялись с помощью судовой эхолокационной аппаратуры, траловых уловов и лидарной локации. Авторы указывают, что сравнение полученных результатов акустической и оптической локации демонстрирует их общую согласованность в определении распределения исследуемых видов рыб в исследованном районе. Однако для применения лидаров при количественной оценке биомасс необходимо ещё проведение широких исследований в отношении моделирования и измерения оптических сил цели в зависимости от размеров для доминирующих видов рыб и планктона, усовершенствования алгоритмов видовой идентификации в системах обработки эхосигналов лидара. Наиболее рациональным при проведении съёмок представляется комбинирование использования самолётных лидаров, судовых акустических эхолокационных систем и непосредственных уловов.

В работе Churnside и Donaghay (2009) представлены результаты исследований тонких рассеивающих слоёв с помощью самолётного лидара NOAA (США) в северо-восточных районах Тихого и Атлантического океанов, в частности в районах Аляскинского залива, Норвежского моря, в прибрежных зонах Португалии и др. Было идентифицировано более 2000 км тонких (<3 м) слоёв в примерно 80000 км данных лидара, собранных во многих океанических и прибрежных водах. Указанные слои проявляют значительную пространственную вариабельность, которую сложно выявлять традиционными методами.

На основании анализа результатов работ учёные считают, что лидары, устанавливаемые на самолётах, могут быть серьёзным инструментом таких исследований не только для обнаружения и картирования пространственного распределения и протяжённости тонких рассеивающих слоёв и связи их изменений с крупномасштабными физическими процессами, но и для слежения за их эволюцией во времени. В то же время отмечается, что в существующей конфигурации этот лидар не способен разрешать слои тоньше примерно 1 м. Он также может переоценивать толщину слоёв, которые имеют наклон относительно освещаемой лидаром плоскости или не являются плоскими.

Две модификации позволили бы обеспечивать разрешение слоёв до 20–30 см. Первая связана с укорочением длительности излучаемого импульса от текущего значения 12 нс до 1 нс. Это обеспечило бы разрешающую способность в воде примерно 10 см. Вторая сводится к сужению луча и поля обзора приёмника примерно до радиуса 1,7 м. Другим усовершенствованием при съёмках тонких слоев было бы дополнение второго приёмного канала для получения деполяризационных соотношений. Это помогло бы в идентификации типа присутствующих рассеивающих частиц и было особенно полезным при мониторинге рассеивающих слоёв у поверхности. Это обусловливается тем, что пузырьки почти сохраняли бы поляризацию, в то время как частицы с несферическими формами, такие как планктон, имели бы тенденцию деполяризовывать рассеянный свет.

Хотя самолётный лидар может характеризовать пространственные характеристики тонких рассеивающих слоёв в масштабах, которые невозможны с судовыми in situ измерениями, остаётся вопрос видовой идентификации их состава. Таким образом, для полного представления характеристик слоёв будут требоваться in situ измерения их детальных свойств в выбранных районах.

Характеристики самолётного лидара с излучением светового луча вблизи надира были сравнены с данными самолётной видеосистемы при съёмках атлантического менхадена (*Brevoortia tyrannus*) в заливе Chesadepeake (США) (Churnside et al., 2011). Менхаден поддерживает один из наиболее важных коммерческих рыбных промыслов вдоль атлантического побережья США. Поэтому имеется необходимость применения методов оценки состояния его запасов, не зависимых от рыболовной статистики. Авторы рассматривали две возможных системы для решения указанной задачи, сравнивая их недостатки и преимущества.

Одной является самолётный лидар с излучением вблизи надира, обеспечивающий получение вертикальных разрезов обратного рассеивания через 3-метровые интервалы вдоль трассы съёмки. Другой могла бы быть самолётная видеокамера благодаря меньшим затратам по сравнению с лидаром и существенно более широкой полосой обзора ею водной среды. Исходя из этого видеосъёмки могли бы быть основным средством мониторинга менхадена и других находящихся вблизи поверхности косячных видов рыб, если бы они могли обеспечивать несмещённые и достаточно точные оценки размера популяций.

Для окончательного вывода в 2007 г. с 27 июля по 1 августа и с 17 по 22 сентября были проведены сравнительные испытания обеих систем в процессе нескольких повторяющихся съёмок с использованием случайно симметричного проекта галсов съёмок. Данные были собраны вдоль широтных трансект (вдоль широт) с расстояниями между ними с севера на юг примерно 3,7 км (рис. 8). Залив был разделён на три страты: верх-



нюю, среднюю и нижнюю. Положение первой трансекты выбиралось случайно, а остальные 69 были на равных расстояниях друг от друга, так что они перекрывали все три страты. Общая продолжительность сбора данных составляла примерно 44 ч, а общее перекрытое расстояние было свыше 14000 км.

Рис. 8. Карта съёмки лидаром в заливе Chesadepeake (США) (Churnside et al., 2011): более *тонкие линии* — трассы пролётов самолёта, более *толстые* разделяют три зоны залива (верхнюю, среднюю и нижнюю), *круги* показывают положение станций погоды

Fig. 8. Lidar survey in the Chesapeake Bay (Churnside et al., 2011). *Thin lines* — flight routes; *thick lines* — margins of the upper, middle and lower zones of the Bay, *open circles* — weather stations

Излучаемый луч центрировался (выравнивался) двумя приёмными телескопами, которые собирали два ортогонально поляризованных обратно отражённых света. Первый приёмный канал использовал преломляющий телескоп диаметром 7 см с поляризатором, выровненным (центрированным) с поляризацией лазера для измерения сополяризованного эхо-сигнала лидара. Другой (второй) канал использовал телескоп диаметром 17 см с поляризатором, ориентированным перпендикулярно поляризации лазера для измерения кросс-поляризованного эхо-сигнала лидара. Каждый из телескопов собирал свет в интерференционном фильтре для исключения светового фона.

Фотоумножитель после каждого из телескопов преобразовывал эхо-сигнал лидара в электронный сигнал, который проходил через логарифмический усилитель. Усиленный сигнал оцифровывался с частотой повторения 109 выборок в секунду. Компьютер регистрировал оцифрованные показания наряду с данными о местоположении и времени от приёмника спутниковой радионавигационной системы.

Косяки идентифицировались вручную путём визуальной оценки обработанных данных лидара, отображаемых на экране в черно-белом цвете (шкале) (рис. 9). Использовались только кросс-поляризованные принимаемые сигналы (возвраты) лидара в связи с тем, что контраст между уровнями обратного отражения света от рыбы и уровнем рассеянного светового фона для них был больше, чем при сополяризованных возвратах. К принимаемым данным применялась коррекция по дистанции для учёта геометрических потерь. Затем оценивался зависимый от глубины световой возврат от воды вблизи каждого косяка, используя среднее от пяти излучений лидара непосредственно перед косяком и от пяти непосредственно после него. Это среднее значение вычиталось из

каждого возврата в пределах косяка для учёта рассеяния мутной водой. Среднее значение также использовалось для оценки затухания энергии лидара. Кроме того, глубина проникновения света лидара оценивалась как глубина, на которой сигнал лидара достигал уровня сигнала от светового фона при отсутствии рыбы.

Рис. 9. Участок «сырых» данных лидара (вверху — «логарифмические» эха) и изображение эха от косяка после обработки (внизу — линейные эха): *z* — глубина, м; *d* — расстояние вдоль трассы полёта, м

Fig. 9. Fragment of unprocessed lidar echogram. **Top panel** — logarithmic signal before processing; **bottom panel** — linear signal after processing; z — depth, m; d distance along the route, m



После того как косяки идентифицировались, для каждого из них рассчитывалось несколько характеристик. Длина косяка вдоль трассы полёта оценивалась исходя из количества импульсов лидара поперек косяка, промежутка времени между импульсами и скорости полёта самолёта. Площадь оценивалась исходя из его длины, при предположении, что измерения осуществляются при прохождении луча лидара через центр некоторого круглого косяка. Средняя дистанция между поверхностью воды и максимумом возврата импульса лидара в пределах косяка использовалась в качестве меры глубины его нахождения. Для каждой из съёмок плотность заселения косяков рассчитывалась как количество косяков, делённое на площадь съёмки, которая является произведением 5-метровой ширины освещаемого пятна на общую длину всех трансект полёта во время съёмки.

В качестве видеосистемы использовалась камера Canon XH-G1 HD, соединённая с компьютером. Внутренние часы этой камеры были синхронизированы с часами радионавигационной системы, так что ближайший импульс лидара мог быть отнесён к каждому видеокадру. Камера была отрегулирована так, чтобы лидар освещал пятно вблизи центра её поля обзора. Разрешающая способность была достаточна для идентификации косяков даже при максимальной ширине поля обзора. Данные видеокамеры также обрабатывались вручную при визуальной идентификации косяков. Когда косяк был идентифицирован, он обводился линией вокруг его изображения на экране дисплея компьютера, и регистрировалось положение косяка на изображении, его поверхностная площадь и время кадра. Косяки, обнаруживаемые на видео, через которые проходило пятно луча лидара, идентифицировались для дальнейшего анализа. Для каждой из съёмок плотность заселения косяков определялась как их количество, делённое на площадь зоны съёмки, которая является произведением соответствующей ширины полосы видеообзора на общую длину всех трансект съёмки. Всего в данных лидара было идентифицировано 456 косяков и 1345 — в видеоданных. Площадь лидарной съёмки составила 71 км<sup>2</sup> и видеосъёмки — 3500 м<sup>2</sup> (общая площадь водного зеркала залива составляет 11 600 км<sup>2</sup>). Лидар имел бо́льшую вероятность обнаружения косяка (0,93 против 0,73) в результате его бо́льшей глубины действия, меньшую вероятность ошибочной идентификации (0,05 против 0,13), так как лидар имел меньшую зависимость от характера поверхности воды и окружающего светового фона, а также меньшую вариабельность (коэффициент вариабельности 0,34 против 0,73) при повторяющихся съёмках. Видеосистема имела более низкую статистическую неопределённость при обнаружении косяков (относительная стандартная погрешность была 0,04 против 0,07) благодаря более широкой зоне её обзора. Средняя глубина проникновения импульсов лидара была 12 м, средняя глубина обнаруженных косяков — 3 м.

Возможности обеих систем ухудшались при увеличении скорости ветра, хотя его влияние было меньшим для лидара. Площадь косяка, определяемая двумя системами, была примерно одинаковой. Авторы считают, что оценка пропущенных косяков и ошибочных идентификаций у лидара и видеокамеры позволяет полагать, что комбинированное использование двух этих типов средств уменьшило бы большинство неопределённостей, ассоциирующихся с применением лишь одного типа аппаратуры. Результаты данного исследования, вероятно, являются типичными для мутных, частично закрытых районов. В более чистых океанических районах контраст между возвратом эха лидара от рыбы и возвратом от фона будет бо́льшим, что увеличивает глубину действия обоих типов систем.

Лидар имеет преимущество по отношению к видео в связи с поляризационными характеристиками рассеивающих частиц. Также в информации лидара не присутствуют мутные шлейфы и водорослевые пятна, которые приводят к ошибочным обнаружениям. С другой стороны, многие проблемы в видеоданных обусловливаются неровностями поверхности моря, и результаты могли бы ухудшаться в менее закрытых водах.

Лидар, установленный на летательном аппарате, представляется эффективным средством для обнаружения эпипелагических рыб, таких как сардины, скумбрия, менхаден, распределяющихся на больших пространствах приповерхностных слоёв водной среды. Повторяющиеся импульсы излучения лазера при полёте летательного аппарата позволяют получать на дисплее аппаратуры эхограммы профилей рассеивателей в водной среде вдоль трассы полёта.

Сложность получения качественных изображений объектов в океане обусловлена тем, что морская вода имеет тенденцию быть заполненной малыми частицами (неоднородностями), рассеяние от которых в зоне между аппаратурой и объектом маскирует его изображение. Определённую помощь в разрешении указанной проблемы может оказать применение стробирующих устройств. Одним из главных преимуществ лазерных систем со стробированием является то, что влияние обратного рассеяния от слоев выше и ниже исследуемого существенно снижается. Это повышает надёжность распознавания. Основной принцип их действия заключается в следующем. Короткий импульс лазера используется для «освещения» объекта. Приёмный тракт с очень быстрым затвором таймируется таким образом, что затвор не открывается до тех пор, пока не наступает момент начала «освещения» объекта. В результате рассеяние от частиц, находящихся перед данным объектом, не влияет на его изображение. Используется также и другой вариант реализации: затвор таймируется для его открытия после того, как импульс лазера проходит объект. В этом случае изображение объекта представляется в виде теневого на светлом фоне рассеяний от частиц, находящихся за объектом\*. Многокамерные лидарные системы (со многими приёмниками) со стробированием позволяют получать изображения одновременно со многих водных слоёв. При применении лазерных линейных сканирующих систем (LLS) возможна реализация и трёхмерных изображений\*.

<sup>\*</sup> ICES Cooperative Research Report. № 312. April 2012. Fishery applications of optical technologies. 91 p.

Системы LSS со стробированием уже применялись для получения изображений взрослых лососей (Churnside and Wilson, 2004; ICES, 2012\*). На рис. 10 представлен пример изображения горбуши\*. Исследования проводились с помощью FLOE-лидара, снабжённого устройством стробирования. При этом в качестве опорного использовалось световое эхо, отражённое от поверхности воды, и диапазон экспозиции поддерживался постоянным, равным 3 м, независимо от флюктуаций летательного аппарата по высоте, которая составляла 150 м.



Рис. 10. Изображение скопления взрослой горбуши, полученное с помощью лазера со стробированием по дальности вблизи о. Кодьяк, Аляска. Размер кадра примерно 3,8 x 2,8 м\*

Fig. 10. Range-gated-laser image of adult pink salmon at Kodiak Island, Alaska. Imaged area is ca. 3.8 x 2.8 m

Кроме лидаров на летательных аппаратах, лазерная локация начинает находить применение и в подводных буксируемых системах. Для применения в рыболовстве и при исследовании окружающей водной среды линейные лазерные сканирующие системы размещаются в носителе, буксируемом вблизи морского дна. Общая ширина просматриваемой полосы зависит от угловой ширины сканирования в перпендикулярной плоскости относительно направления перемещения носителя и высоты (расстояния) системы от дна. Чем больше отстояние системы от дна, тем шире полоса просмотра. Максимальная дальность обнаружения в конечном счёте ограничивается затуханием света.

У любой аппаратуры, формирующей «полосу» обзора, всегда имеется определённое противоречие между максимальной шириной «полосы» (для увеличения площади — объёма выборок и минимизации объёма выборок) и получением наибольшей разрешающей способности. Когда расстояние от системы до объекта наблюдения увеличивается, соответственно увеличивается размер луча (в данном случае освещаемого пятна) и разрешающая способность уменьшается. Она может быть повышена посредством уменьшения ширины луча или с помощью приближения аппаратуры к объекту. Первый способ наиболее целесообразен, так как при этом буксируемый носитель может находиться дальше от морского дна, однако технологические ограничения не позволяют осуществить формирование очень узкого луча. Монохроматический свет с длинами

<sup>\*</sup> ICES ..., 2012.

волн в диапазоне 450–550 нм характеризуется наименьшим затуханием в морской воде, и системы линейного сканирования используют это свойство, создавая лучи лазера в зелёно-голубом спектре длин световых волн. Для системы с угловой шириной 70°, как это реализовано в SM-2000, при отстоянии от дна 45 м и чистой воде ширина полосы составляет примерно 63 м, а разрешающая способность 3 см. При высоте над дном 3 м разрешающая способность будет уже равной 0,2 см. На рис. 11 представлены примеры изображений сканирующего лидара при локации донных гидробионтов.



Рис. 11. Изображение лидаром SM-2000 (ширина полосы 4,0 м) электрического ската (**a**) и калифорнийского палтуса (ширина полосы 4,3 м) (**б**) (Yoklavich et al., 2003)

Fig. 11. Lidar SM-2000 images of pacific electric ray *Torpedo californica* (**a**, swath width 4 m) and california halibut *Paralichthys californicus* (**6**, swath width 4.3 m) (Yoklavich et al., 2003)

Наиболее общим применением LLS в рыбохозяйственных исследованиях являются картирование и классификация морского дна. Эта информация часто используется для характеризации донных рыб, бентоса и беспозвоночных, которые обитают в донных осадках, на дне или вблизи дна океана. SM-2000 позволяет отображать биообъекты, такие как, например, актинии, водоросли и др., с достаточным разрешением для их идентификации (см. рис. 138, 139\*). Преимущество LLS по сравнению с фото- и видеоизображениями заключается в значительно более широкой зоне обзора (нередко на 1–2 порядка).

Использование монохроматического света имеет преимущества при сборе и постобработке данных, однако в чёрно-белых изображениях отсутствует дополнительная информация, которая могла бы быть полезной при классификации и идентификации целей. В конце 1990-х гг. была разработана мультиспектральная LLS, которая показала определённые перспективы (Coles et al., 1998).

В работе Tracey с соавторами (1998) рассматриваются результаты исследований по определению возможностей использования сканирующей лазерной системы для обнаружения физических и биологических изменений в донных местах обитания гидробионтов, связанных с тралениями и сбором данных при оценке запасов. В 1996 г. ими были проведены также лидарные съёмки мест обитания крабов в водах зал. Аляска и вблизи о. Кодьяк. Основными задачами исследований были: а) сравнение лазерных и видеоизображений известных донных поверхностей; б) определение возможностей различения лидаром старых следов тралений на дне и новых и с) оценка запасов крабов (определить, может ли лидарная система различать и численно оценивать виды крабов).

Лидарные съёмки проводились в комбинации с тралениями в известных районах обитания крабов на 30-метровом поисковом судне Resolution в течение 8 сут. Буксируемое устройство с лидаром в заливе перемещалось на расстоянии 3 м от дна и вплоть до 8 м в соседних водах с рабочей скоростью от 1 до 6 уз. Ширина полосы обзора вдоль трансекты была примерно в 1,4 раза превышающей расстояние буксируемого устройства от дна. Разрешающая способность изображений находилась в диапазоне от 1 см до 1 мм (табл. 3). Лидарная система включала твёрдотельный ND-YAG зелёноголубой лазер с двумя 4-гранными зеркалами и синхронизированный приёмник света.

<sup>\*</sup> ICES ..., 2012.

Таблица 3

Основные тактические характеристики лидарной системы LLS

Table 3

	Типичный	Ширина полосы, м	Площадь перекрытия	Разрешающая				
Прозрачность воды	диапазон		при скорости 3 уз,	способность				
	изображения, м		$M^2 \cdot H^{-1}$	(2,048 пикселей), см				
Очень чистая	45	65	346	3,0				
(Гавайские острова)								
Чистая (Iolian Island)	22	30	161	1,5				
Умеренная	0	13	69	0,6				
(Массачусетский залив)	9							
Плохая (гавань Бостона)	3	4	23	0,2				

Main performance characteristics of the laser Line Scan System

Узкий луч лазера непрерывно сканирует в плоскости, перпендикулярной продольной оси буксируемого носителя, в пределах угла обзора 70°. В результате при движении буксируемого устройства формируется растровая картина последовательных пикселей отражения света от объектов в толще водной среды.

Результаты исследования выявили широкие возможности лидарной системы по обнаружению популяций королевского краба, а также характеристик типов мест их обитания (с которыми они ассоциированы или, наоборот, не связаны). Рис. 12 демонстрирует изображение (эхограмму лидара) кластерных групп крабов при движении носителя на расстоянии 8 м от дна.

Обычно быстрое картирование донной морской поверхности и объектов на ней для многих практических применений выполняется с помощью буксируемых акустических систем бокового обзора. Ширина полосы просмотра обычного 50-килогерцевого

еких систем обкового обзора. Ширина и акустического гидролокатора бокового обзора примерно в 10–15 раз превышает расстояние буксируемого устройства от дна. Как уже указывалось, ширина обзора лидарной системы LLS составляет примерно 1,4 от отстояния устройства от дна, т.е. на порядок меньше. Однако в отличие от акустических систем бокового обзора разрешающая способность лидарной потенциально может быть в пределах от нескольких миллиметров до сантиметра.

Рис. 12. Две агрегации крабов, наблюдаемые с помощью лидара LLS у о. Кодьяк при движении носителя на расстоянии 8 м от дна. Примерная ширина просматриваемой полосы составляет 10 м (Tracey et al., 1998)

Fig. 12. Lidar image of two crab aggregations at Kodiak Island made by the Line Scan System transported in 8 m from the bottom, swath width 10 m (Tracey et al., 1998)



Система SM-2000 (последняя версия) характеризуется следующими параметрами: рабочая глубина буксируемого устройства с нейтральной плавучестью — свыше

1500 м;

расстояние от дна — примерно от 3 до 50 м в зависимости от качества воды; скорость перемещения — от 0,5 до 6,0 уз; угловая ширина просмотра, или сканирования, — от 15 до 70°; длина волны лазера — 488 или 514 нм (аргоновый газовый лазер); оптическая мощность (в воде) — 1,5 кВт; габариты — 175 см (длина) х 28 см (диаметр); электропитание — 120 В 3-фазного тока мощностью 5 кВт; масса — 50 кг в воде, 107 кг в воздухе. В настоящее время уже имеются лазерные системы, устанавливаемые на беспилотных летательных аппаратах, которые могли бы использоваться на научно-исследо-

вательских рыболовных судах или на крупных промысловых траулерах. Используя лазерные системы, настраиваемые на специфические условия водной среды, можно получать более качественные изображения отражённых сигналов. Вы-

среды, можно получать более качественные изображения отражённых сигналов. Выгодным методом повышения глубины действия лидарной системы является использование лазера с более короткой длиной волны. Это может быть достигнуто смещением с зелёной в синюю часть видимого спектра, 450 нм.

# Заключение

Выполненный анализ результатов натурных исследований лазерной локации различных видов промысловых рыб и других водных биологических объектов в разных морских и океанических районах Атлантического и Тихого океанов показывает реальные практические возможности их дистанционного лидарного обнаружения, а также распределения. Рассмотрены возможные ограничения лазерной локации гидробионтов и способы повышения эффективности их обнаружения. Что касается использования лидаров для количественной оценки биоресурсов и их состояния, в этом отношении необходимы дополнительные исследования, как это, например, происходило при развитии акустического метода определения запасов гидробионтов и их состояния.

В российском рыболовстве лидарные системы целесообразны для применения в промысловых районах Атлантики, Баренцова моря и тихоокеанских морей в качестве как дополнительного, так и в некоторых ситуациях основного средства дистанционного мониторинга. Последнее, к примеру, относится к контролю подходов лососевых к зонам нереста, оценке характера и степени заполнения нерестилищ. Развитие лидаров, которые могли бы устанавливаться на небольших беспилотных летательных аппаратах, способствовало бы расширению их применения в промышленном рыболовстве, в том числе в комплексе с фотографической аппаратурой.

В связи с тем что для рыбного хозяйства представляют интерес лишь районы морей и океанов, достаточно богатые водными животными, максимальные глубины действия в водной среде лидаров, устанавливаемых на летательных аппаратах, будут, пожалуй, в большинстве случаев ограничиваться вышеуказанным установленным пределом безопасного излучения лазера.

### Список литературы

Власов Г.И., Пивоваров С.П., Чикрызов В.Г. Бескабельная передача сигналов телевидения под водой // Техника кино и телевидения. — 1971. — № 2. — С. 64–66.

Егоров Н.И. Физическая океанография : монография. — Л. : Гидрометеоиздат, 1974. — 351 с.

**Кудрявцев В.И.** Промысловая гидроакустика и рыболокация : монография. — М. : Пищ. пром-сть, 1978. — 312 с.

**Brown E.D., Churnside J.H., Collins R.L. et al.** Remote sensing of capelin and other biological features in the North Pacific using lidar and video technology // ICES Journ. of Marine Science. — 2002. — Vol. 59(5). — P. 1120–1130.

**Carrera P., Churnside J.H., Boyra G. et al.** Comparison of airborne lidar with echosounders — a case study in the coastal Atlantic waters of southern Europe // ICES Jour. of Marine Science. — 2006. — Vol. 63(9). — P. 1736–1750.

**Churnside J., Tenningen E. and Wilson J.** Comparison of data processing algorithms for fishlidar detection of mackerel in the Norwegian sea // Seafacts Symposium. — Bergen, 2008 (poster).

**Churnside J.H. and Donaghay P.L.** Thin scattering layers observed by airborne lidar // ICES Journ. of Marine Science. — 2009. — Vol. 66(4). — P. 778–789.

**Churnside J.H. and McGollivary P.A.** Optical properties of several Pacific fishes // Applied Optics. — 1991. — Vol. 30(21). — P. 2925–2927.

**Churnside J.H. and Wilson J.J.** Airborne lidar for fisheries applications // Optical Engineering. — 2004. — Vol. 42. — P. 406–416.

**Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Shetter S. et al.** Airborne remote sensing of a biological hot spot in the southeastern Bering Sea // Remote Sensing. — 2011. — Vol. 3. — P. 621–637.

**Churnside J.H., Demer D.A., and Mahmoudi B.** A comparison of lidar and echosounder measurements of fish schools in the Gulf of Mexico // ICES Journ. of Marine Science. — 2003. — Vol. 60(1). — P. 147–154.

**Churnside J.H., Tatarskii V.V. and Wilson J.J.** Oceanographic lidar attenuation coefficients and signal fluctuations measured from a ship in the southern California Bight // Applied Optics. — 1998. — Vol. 37(15). — P. 3105–3112.

**Churnside J.H., Thorne R.E.** Comparison of airborne lidar measurements with 420 kHz echosounder measurements of zooplankton // Applied Optics. — 2005. — Vol. 44(26). — P. 5504–5511.

**Churnside J.H., Wilson J.J., and Tatarskii V.V.** Airborne lidar for fisheries applications // Optical Engineering. — 2001a. — Vol. 40(3). — P. 406–414.

**Churnside J.H., Sawada K. and Okumura T.** A comparison of airborne lidar and echo sounder performance in fisheries // Journ. of the Marine Acoustical Society of Japan. — 2001b. — P. 49–61.

Churnside J.H., Wilson J.J., and Tatarskii V.V. Lidar profiles of fish schools // Applied Optics. — 1997. — Vol. 36(24). — P. 6011–6020.

**Coles B.W., Radzelovage W., Jean-Laurant P.J.K.** Processing techniques for multi-spectral line laser scan images // Oceans 98 : Proceeding of the IEEE/OES Oceans Conference. — Nice, France, 1998. — Vol. 3. — P. 1766–1179.

**Hunter J.R., and Churnside J.H. (eds)** Airborne Fishery Assessment Technology — a NOAA workshop report : South West Fisheries Sceince Center Administrative Report. — La Jolla, 1995. — 71 p.

**Krekova M.M., Krekov G.M., Samokhvalov I.V., Shamanaev V.S.** Numerical evaluation of the possibilities of remote laser sensing of fish schools // Applied Optics. — 1994. — Vol. 33(24). — P. 5715–5720. doi: 10.1364/AO.33.005715.

Lo N.C.H., Hunter J.R., and Churnside J.H. Modeling statistical performance of an airborne lidar survey system for anchovy // Fish. Bull. (US). — 2000. — Vol. 98(2). — P. 264–282.

Murphree D.L., Taylor C.D., Mc. Clendon R.W. Mathematic modelling of detection fish airborne laser // AJAA Journ. — 1974. — Vol. 12, № 12. — P. 12–18.

**Oliver C.W., Armstrong W.A., and Young J.A.** Development of an airborne lidar system to detect tunas in the eastern tropical Pacific purserseine fishery : NOAA Technical Memorandum NOAA-TM-NMFS-SWFSC-204. — La Jolla, 1994. — 67 p.

**Squire J.L. and Krumboltz H.** Profiling pelagic fish schools using airborne optical lasers and other remote sensing techniques // Marine Technological Society Journ. — 1981. — Vol. 15. — P. 27–31.

**Tenningen E., Churnside J.H., Slotte A., Wilson J.J.** Lidar target-strength measurements on northeast Atlantic mackerel (Scomber scombrus) // ICES Journ. of Marine Science. — 2006. — Vol. 63(4). — P. 677–682.

**Tenningen E., Godø O.R., Iversen S. et al.** Comparison of Northeast Atlantic mackerel (Scomber scombrus) distribution patterns in Norwegian Sea using lidar, sonar and trawl // ICES CM. — 2003/V:04.

**Tracey G.A., Saade E., Stevens B. et al.** Laser line scan survey of crab habitats in Alaskas waters // Journ. of shellfish Res. — 1998. — Vol. 17, № 5. — P. 1483–1486.

**Yoklavich M.M., Grimes G.B. and Wakefield W.W.** Using laser line scan imaging technology to assess deepwater habitats in the Monterey Bay National Marine Sanctuary // Marine Technology Society Journ. — 2003. — Vol. 37. — P. 18–26.

**Zorn H.M., Chrurnside J.H. and Oliver C.W.** Laser safety thresholds for cetaceans and pinnipeds // Marine Mammal Science. — 2000. — Vol. 16(1). — P. 186–200.

Поступила в редакцию 28.10.13 г.