

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-176-188
УДК 551.46.09:533.9.082.5

А.К. Завьялов, Ю.М. Патраков
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ИНДИКАЦИИ ЗАТОПЛЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Объект, цель научной работы. Лазерная диагностика, анализ отраженного оптиколокационного поля (ОЛП) неподвижных подводных объектов (ПО), совершенствование технологии лазерных оптических методов, средств исследования ПО, развитие лазерных локационных систем (ЛЛС), определение вероятности лазерной индикации неподвижных ПО.

Материалы и методы. ЛЛС, аналитические, расчетные методы, программы для ЭВМ, аналитические средства обработки результатов измерений, лазерная диагностика отраженного ОЛП ПО с учетом показателей рассеяния и поглощения среды в области атмосферы, гидросферы.

Основные результаты. Совершенствование технологии и методов диагностики отраженного оптиколокационного поля (поле обратного рассеяния), определение границ достоверной индикации отраженных ОЛП неподвижных подводных объектов, программы для ЭВМ, лазерная диагностика, анализ эффективности работы ЛЛС.

Заключение. Показано, что высокая эффективность работы ЛЛС существенным образом зависит от выбранной технологии, методов индикации отраженного ОЛП, обработки ОЛП, от вероятностных методов оценки яркости отраженного ОЛП и знания параметров гидросферы.

Ключевые слова: лазерные локационные системы, лазерная диагностика, расчетные методы, программы для ЭВМ, трасса зондирования, коэффициент габаритной яркости, эффективная площадь рассеяния, коэффициент отражения, отраженный оптиколокационный сигнал, вероятность индикации.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-176-188
UDC 551.46.09:533.9.082.5

A. Zavyalov, Yu. Patrakov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

UNIVERSAL ASSESSMENT METHOD FOR LASER DETECTION PROBABILITY OF SUNKEN ENGINEERING STRUCTURES

Object and purpose of research. Laser diagnostics, analysis of reflected laser signal from fixed underwater objects, improvement of laser optical methods, technologies and tools for underwater object studies, development of laser detection systems, determination of laser indication probability for fixed underwater objects.

Materials and methods. Laser detection systems, analytical and computational methods, software programs, analytical tools for measurement data processing, laser diagnostics of reflected laser signal from underwater objects taking into account dissipation and absorption in atmosphere and hydrosphere.

Main results. Improvement of technology and methods for diagnostics of reflected laser signal (back-scattering), determination of reliable detection limits for laser signals reflected from fixed underwater objects, software programs, laser diagnostics, efficiency analysis of laser detection systems.

Для цитирования: Завьялов А.К., Патраков Ю.М. Универсальный метод оценки вероятности лазерной индикации затопленных инженерных конструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 176–188.

For citations: Zavyalov A., Patrakov Yu. Universal assessment method for laser detection probability of sunken engineering structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 176–188 (in Russian).

Conclusion. The study showed that high efficiency of laser detection systems considerably depends on the selected technology, reflected laser signal display and processing techniques, and also on the probabilistic methods adopted to estimate the reflected signal luminance and the knowledge of hydrosphere parameters.

Keywords: laser detection systems, laser diagnostics, calculation methods, software programs, probing paths, overall luminance coefficient (OLC), laser cross-section (LCS), reflection coefficient (RC), reflected laser signal, detection probability.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В настоящее время лазерные локационные системы нашли широкое применение при проведении поисковых работ в области гидросферы. Основные направления применения ЛЛС в этой области связаны с решением экологических проблем, исследованием донных структур, проведением спасательных и научно-исследовательских работ, поиска и добычи природных ресурсов: минеральных ископаемых, углеводородов, рыбных ресурсов. Существует определенная классификация ЛЛС по назначению: например, применяются лазерные эхолоты, батометры [1, 2], средства расчета, индикации гидродинамической неоднородности (ГДН) и углеводородов [3–8]. С целью освоения ресурсов углеводородов шельфовой зоны Российской Федерации сделана оценка возможности применения лазерно-оптических методов дистанционного химического анализа, выбора и разработки наиболее оптимального дистанционного лазерного спектроскопического комплекса (ЛСК) [9] для поиска естественных нефтегазопоявлений в субаквальных зонах. В Крыловском государственном научном центре совместно с АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» и Университетом ИТМО был разработан ЛСК [9] для обнаружения субаквальных проявлений углеводородов. Для поиска углеводородов успешно применялась новая рамановская гиперспектральная технология дистанционного лазерного зондирования углеводородных геохимических полей [10]. Кроме того, в ОАО ЦНПО «Ленинец» на базе самолета Ил-38, оснащенного ЛЛС, была создана эффективная система мониторинга Северного морского пути и прибрежных территорий. Разработаны метод оценки количественных характеристик нефтяных загрязнений с помощью оптиколокации [11] и технология многоуровневого экологического мониторинга в целях информационного обеспечения безопасности морской добычи нефти и газа [12]. Лазерные локационные системы используются в экологических целях для обнаружения на воде разливов нефти. В работе [13] изложены технология и общие пути построения изображения лазерных систем видения, предназначенных для ди-

станционного наблюдения ПО. Весьма успешно используются лазерные технологии при решении задач специального назначения [14, 15].

При проведении поисковых работ в области гидросферы одним из основных способов освещения подводной обстановки является использование мобильной ЛЛС, которая излучает и принимает отраженный сигнал, содержащий информацию о подводных объектах, находящихся в поле зрения. Излучающее оптиколокационное поле ЛЛС, находящейся на воздушном, надводном, подводном носителе, даже при высоких показателях рассеяния, поглощения, ослабления воды в области гидросферы может достигать значительных глубин, создавая информационный канал, по которому может осуществляться лазерная дистанционная диагностика структуры исследуемого ПО. В данной работе используется метод оценки яркости отраженных оптиколокационных полей и вероятности индикации неподвижных ПО, которые существенным образом зависят от состояния атмосферы, гидросферы, удаленности, параметров зондирующей аппаратуры, оптических характеристик трассы зондирования, глубины расположения неподвижных ПО и их размеров, а также от отражающих характеристик поверхности ПО и подстилающей поверхности (грунта), на которой находится ПО, и от окружающей растительности. При этом очевидно, что яркость и вероятность индикации неподвижных ПО, находящихся на грунте в виде неподвижных конструкций, являются основными характеристиками, которые определяют целесообразность принятия решения о необходимости проведения соответствующих работ. Рассмотрим именно этот аспект и сделаем оценки коэффициента габаритной яркости (КГЯ), эффективной площади рассеяния (ЭПР), яркости и вероятности индикации неподвижных ПО.

Анализ возможности индикации неподвижных ПО, расположенных на дне области гидросферы

Analysis of detection possibility for fixed underwater objects on seabed

С исторических времен в наших, нейтральных и иностранных акваториях морей, океанов на дне

находятся неизвестные аварийно затопленные инженерные конструкции (ЗИК), суда, взрывчатые предметы, самолеты, которые остаются на долгие времена затопленными ПО. Эти затопления представляют значительную опасность для судоходства, добычи углеводородов (УВ), строительства портов, экологии. Анализируя современное состояние гидросферы с точки зрения экологии, приходим к выводам, что в настоящее время существенным образом уменьшается потенциальная способность окружающей водной среды к самоочищению, в то же время увеличивается интенсивность человеческой деятельности, максимальным образом усиливается антропогенное воздействие человека на окружающую среду.

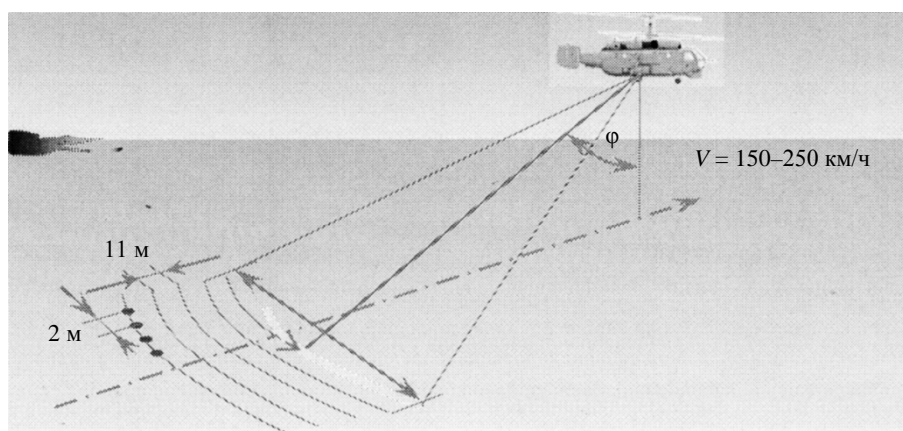
С этими обстоятельствами связаны особая необходимость и большой практический интерес к технологиям, методам, средствам лазерной батиметрии в области гидросферы. В океанах и морях постоянно ведутся интенсивные научные исследования, поисковые работы с использованием ЛЛС, расположенных на подводных, надводных судах, авиационных и космических носителях. Например, в российских и зарубежных акваториях идет интенсивное освоение месторождений углеводородов, постоянный или сезонный вылов рыбы и морепродуктов, поиск затопленных ПО с использованием ЛЛС. Все эти реалии являются мотивированной причиной разработки новых технологий и методов эффективных средств индикации и диагностики различного рода загрязнений, естественных субаквальных зон и аномальных природных явлений, придонных неподвижных ПО. Неподвижные ПО рассматриваются в виде двух различных объектов: субаквальной природной зоны и затопленных инженерных конструкций, при этом для оценки яркости отраженного оптиколокационного поля и вероятности их индикации используются сходные технологии и методы. Анализируя существующие и перспективные методы и средства индикации ПО, приходим к выводам, что лазерно-оптическая аппаратура и методы диагностики при дистанционном исследовании гидросферы являются наиболее эффективными, обладают высокой информативностью [6–8] и универсальностью. Использование этих методов и средств ориентировано на следующие основные направления: поиск и промышленная разработка субаквальных нефтеносных районов; поиск движущихся ПО, включая средства индикации китов и косяков рыбы; научные исследования структуры вод Мирового океана, морей, различных водоемов и рек; поиск и координация движущихся

ПО специального назначения; поиск неподвижных ПО в шельфовых акваториях глубиной до 300 м. Высокая эффективность работы ЛЛС в основном определяется высокой вероятностью индикации неподвижных ПО с учетом многих факторов: различных состояний гидросферы [3]; взволнованности свободной поверхности; взаимного расположения ЛЛС и неподвижных ПО; мощности полезного сигнала на входе приемника; глубины расположения неподвижных ПО; показателя ослабления излучения в воде Γ_w ; отражающей способности геологических структур донных отложений. Так как величина показателя ослабления зависит от длины волны излучения, то лазерная локация осуществляется в синезеленой части спектра излучения на длинах волн, лежащих в интервале от 0,45 до 0,55 мкм (в этом интервале эффективный показатель ослабления имеет минимальное значение, а прозрачность воды – максимальное). Мутность воды приводит к увеличению помехи обратного рассеяния, наличие взволнованной поверхности моря приводит к искажению отраженного сигнала, а также к добавочному расширению лучистых потоков, попадающих на объект, и отраженного сигнала, приходящего к приемнику. Эти и другие факторы, о которых сказано, вызывают уменьшение полезного сигнала на входе приемника. Влияние атмосферы аналогично влиянию воды, но выражено в значительно меньшей степени, кроме случая, когда имеет место туман, дымка и облачность, которые могут сделать невозможным индикацию неподвижного ПО. Таким образом, возникает необходимость учесть все эти факторы при поиске, индикации и исследовании ПО.

Необходимо учитывать, что ЛЛС для зондирования в области гидросферы должна работать в импульсном режиме со стробированием, что позволит существенно снизить помеху обратного рассеяния. При проведении расчетов следует учитывать, что до настоящего времени отсутствуют карты многих гидрооптических характеристик для различных акваторий океана. До начала проведения поисковых работ необходимо проводить аналитические исследования и расчеты оптимальных параметров движения надводных, подводных носителей ЛЛС; яркости отраженного ОЛП, вероятности индикации неподвижных ПО; соответствующего влияния параметров среды [5]. Естественно, что используемые сегодня методы оценки яркости отраженных оптиколокационных полей и вероятности индикации различных неподвижных ПО не могут быть универсальными, они имеют различия в соответствии с предназначением. Например, лазерные техноло-

Рис. 1. Параметры полета авианосителя, сканирующего область гидросферы

Fig. 1. Flight parameters of the airborne asset scanning the hydrosphere



гии определения нефтегазоносности в реальных субаквальных условиях позволяют проводить дистанционный экспресс-анализ. Новые высокотехнологические оптиколокационные технологии с методами и аппаратурой морской геологической разведки, контроля экологической безопасности [7, 9, 10, 12, 13] обеспечивают возможность решить многие задачи поиска, геоэкологического контроля субаквальных естественных нефтегазопоявлений. Например, метод дистанционного поиска месторождений углеводородов, разработанный Крыловским центром, АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» и Университетом ИТМО [7], отличается ультравысокой чувствительностью, спектральной селективностью, высокой скоростью детектирования (порядка 10^{-6} с). Этот метод обладает другими достаточно большими преимуществами: дистанционностью, бесконтактностью, возможностью непрерывного площадного и профильного сканирования местности с одновременным выделением зон газовых аномалий за счет определения концентрации набора индикаторных химических элементов и соединений. В основе метода заложены геохимическая модель и методические приемы, основанные на общепринятых представлениях о диффузных и фильтрационных процессах миграции углеводородов и образования газовых аномалий над залежами УВ. Метод лазерного геохимического зондирования используется совместно с геофизическим методом, т.к. реализован на применении лазера, работающего по принципу комбинационного рассеяния [9] с возможностью непрерывного площадного и профильного сканирования с борта корабля, вертолета/самолета или батискафа. К настоящему времени большая часть промышленных запасов УВ-сырья либо уже выработана, либо находится в заключительной стадии разработки. Поэтому важной задачей воспол-

нения углеводородной минерально-сырьевой базы является ревизия известных нефтегазоносных бассейнов, а также вовлечение в геологоразведочный процесс новых перспективных территорий, расположенных, как правило, в труднодоступных местах, включая акватории континентального шельфа. Применение новой инновационной технологии дистанционной подводной разведки и мониторинга месторождений углеводородов в суровых природно-климатических условиях континентального шельфа позволяет осуществлять более результативный поиск месторождений нефти и газа, повышать производительность работ на слабо изученных российских акваториях с минимальными затратами времени. При использовании авиации большое значение имеют режим полета авиационного носителя, параметры полета авианосителя, сканирующего область гидросферы: например, рис. 1.

Для воздушного носителя наиболее рациональным режимом полета и сканирования являются следующие параметры: диапазон высоты полета $H = 150-500 \text{ м}$; скорость полета авиационного носителя $V = 150-250 \text{ км/ч}$; частота зондирования $\Omega_z = 400 \text{ Гц}$; частота сканирования $\Omega_c = 6 \text{ Гц}$; ширина обзора $H = 150-270 \text{ м}$; расстояние между сканами $b \approx 11 \text{ м}$ ($V = 200 \text{ км/ч}$); расстояние между импульсами, $d \sim 2 \text{ м}$ ($H = 300 \text{ м}$). Однако этот режим полета не является универсальным, он в большей части приемлем для зондирования с авиационного носителя при дистанционной подводной разведке нефтегазовых бассейнов. При проведении работ на континентальном шельфе в мелководных прибрежных акваториях необходимо учитывать особенности гидрооптических характеристик воды (прозрачности) и отражательных характеристик донных геологических структур и донной растительности. Однако до последнего времени нет научно обоснованных реко-

мендаций и тем более методов расчета оптиколокационного контраста, отраженного ОЛП ПО и их вероятности индикации в прибрежных районах морей и океанов. Разработка программы расчета вероятности индикации углеводородов является наиболее актуальной. Расчетные программы позволяют повысить эффективность индикации углеводородов, учитывая гидрооптические свойства воды и отражательные свойства морских геологических структур на дне прибрежной акватории.

Прозрачность воды в морях, океанах, прибрежной зоне и яркость геологических структур донных отложений имеют значительный диапазон изменений. Например, прозрачность воды в пределах заданной акватории может достаточно быстро меняться под влиянием течений, апвеллингов, воздействия ветра, изменяющегося направления и других факторов. При работе ЛЛС в прибрежной зоне вероятность индикации углеводородов постоянно изменяется из-за изменения яркости геологических структур донных отложений и донной растительности, которая может иметь как ковровую структуру, так и локально пятнистую. В литературе [16–22] приведены ограниченные данные о яркости излучения донных геологических структур в зеленом диапазоне длин волн. Коэффициенты отражения, которые являются характеристикой яркости, лежат в интервале величин от $2 \cdot 10^{-3}$ для черного ила до 0,4–0,7 для кораллов и базальта в сине-зеленом диапазоне длин волн. В Крыловском центре на стенде светового моделирования в соответствии с принципами светового моделирования были измерены коэффициенты яркости гранита, щебенки, бетона, черных красок [23]. Результаты измерений показали, что коэффициенты отражения составляют следующие величины: для черных красок 0,01–0,015, для гранита 0,04–0,06, для щебенки 0,06–0,07, для бетона 0,06–0,08. Измерения коэффициентов отражения донных геологических структур свидетельствуют о том, что их величины могут отличаться на два порядка. Данных о коэффициентах отражения донной растительности нет. В этом состоит основная особенность функционирования ЛЛС в мелководных прибрежных районах вблизи морского дна. Таким образом, зная геологическую структуру донных отложений, можно существенным образом повысить вероятность индикации субаквальных проявлений углеводородов, а также месторождений углеводородов в области гидросферы. Аналогичным образом происходит оценка яркости и вероятности индикации отраженного ОЛП донных инженерных конструкций.

Метод оценки яркости и вероятности индикации отраженного ОЛП затопленных ПО, находящихся на дне в области гидросферы

Assessment method for luminance and detection probability for reflected laser signal from sunken underwater objects on seabed

В результате выполненных исследований было показано, что в качестве критерия вероятности индикации целесообразно использовать неравенство $p_{\text{инд}} \leq p_{\text{инд.Пр}}$. Объект, находящийся под водой, считается нерегистрируемым (не имеющим контраста), если его вероятность индикации $p_{\text{инд}}$ не превосходит заданного порогового значения $p_{\text{инд.Пр}}$, которое задается из технических соображений в соответствии с установленным техническим регламентом функционирования ЛЛС: например, можно принять $p_{\text{инд.Пр}} = 0,1$. Выполним расчет вероятности индикации отраженного ОЛП, пользуясь установленным порядком расчета [4].

Порядок расчета вероятности индикации затопленных ПО в чистой океанской воде

Задаем значения параметров гидролидара, например, шведского лазерного эхолота Hawk Eye («Соколиный глаз») [24], имеющего следующие параметры: длина волны $\lambda = 0,53$ мкм; импульсная мощность $P_{\text{и}} = 5 \cdot 10^8$ Вт; коэффициент пропускания приемной оптической системы $\gamma_{\text{П}} = 0,8$; чувствительность фотоприемника $\eta_{\text{ф}} = 0,2$ А/Вт; высота полета авиационного носителя $H = 200$ м; расходимость зондирующего излучателя $2\delta_{\text{и}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ рад; диаметр апертуры излучателя $2R_{\text{и}} = 0,05$ м; ширина сектора сканирования $2\delta_0 = 0,25$ рад; длительность импульса излучения $\tau_{\text{и}} = 10^{-8}$ с; диаметр входного зрачка приемника $R_{\text{П}} = 0,2$ м; количество импульсов $q_{\text{и}} = 1$.

Задаем гидрооптические характеристики воды, которые соответствуют длине волны 0,53 мкм. Для расчета вероятности индикации ПО в области гидросферы строится математическая оптиколокационная модель, куда закладываются значения натуральных гидрооптических параметров заданной акватории с учетом параметров: гидролидара, атмосферы, свободной поверхности, гидросферы и дна (подстилающей поверхности). Если гидрооптические характеристики заданной акватории отсутствуют, то можно воспользоваться данными, содержащимися в работах [6, 7, 16, 19], где представлены гидро-

Таблица 1. Зависимость функции эффективного радиуса a_w лазерного луча от глубины l в мутной прибрежной воде

Table 1. Effective radius function a_w of laser beam versus depth l of turbid littoral water

Глубина l , м	1	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120
Радиус a_w , м (мутная прибрежная вода)	0,04	1,15	3,2	5,7	8,4	11,2	13,9	16,6	19,1	23,8	28

оптические характеристики для мутной воды прибрежных районов, для морской воды средней мутности, для чистой океанской воды. В данной работе для расчета вероятности индикации области контраста отраженного ОЛП ПО в мутной прибрежной воде задаются следующие гидрооптические характеристики и параметры при строгом соблюдении последовательности: метеорологической дальности видимости (МДВ) S_M , эффективного показателя ослабления в воде Γ_w , коэффициента габаритной яркости КГЯ β ПО, фона $\beta_\phi = 2,3 \cdot 10^{-3}$ (мутная вода), $\beta_\phi = 5,7 \cdot 10^{-4}$ (чистая вода).

Обобщая представленную информацию, выполним оценку яркости и вероятности индикации отраженного ОЛП неподвижных подводных объектов на примере затопленных инженерных конструкций в мутной прибрежной воде.

Для расчетов оптиколокационных характеристик и вероятности индикации области контраста отраженного ОЛП затопленных инженерных конструкций в прибрежных акваториях с учетом яркости донных геологических структур исходим из того, что большинство донных отложений являются диффузными с индикатрисой рассеяния, совпадающей с ламбертовской. Это допущение свидетельствует о том, что величины коэффициента отражения и яркости совпадают, направление рассеяния охватывает заднюю, т.е. обратную полусферу, ширина индикатрисы излучения составляет 120° . В соответствии с экспериментальными и аналитическими данными [20, 21] можно считать, что в прибрежных водах показатель ослабления и показатель поглощения лазерного излучения совпадают с усредненными по глубине показателями. По существу, данное допущение является некорректным, но в практических расчетах им можно воспользоваться. Гидрооптические параметры мутной прибрежной воды должны соответствовать рассматриваемой акватории с учетом сезона, времени суток, глубины при заданных длине волны излучения и мощности. Данные гидрооптических характеристик воды взяты из таблиц, которые представлены в работах [25–27], но могут быть рассчитаны по

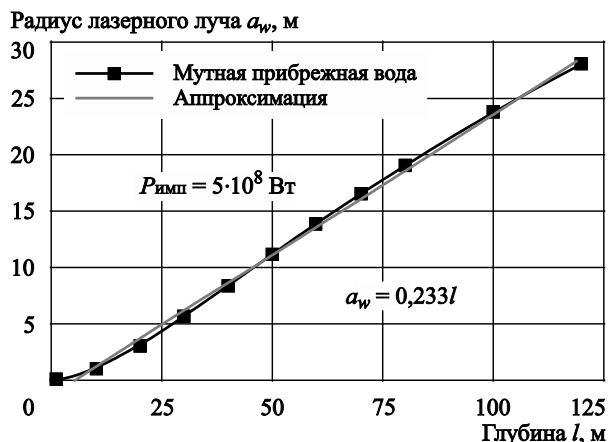


Рис. 2. Зависимости функции эффективного радиуса a_w лазерного луча в мутной прибрежной воде от глубины l с аппроксимирующей функцией

Fig. 2. Effective radius function a_w of laser beam versus depth l of turbid littoral water with approximation function

корреляционным зависимостям между различными характеристиками воды.

При выполнении расчетов вероятности индикации области контраста, отраженного ОЛП ЗИК в прибрежной мутной воде можно воспользоваться оптиколокационными характеристиками мутной прибрежной воды, представленными в табл. 1. Рассчитаем эффективный радиус a_w лазерного луча для различных глубин l (табл. 1 и рис. 2) для мутной прибрежной воды.

Аппроксимирующая функция, описывающая изменение эффективного радиуса a_w лазерного луча с изменением глубины l для мутной воды, соответствует квазилинейной функции вида $a_w = 0,233l$, импульсная мощность излучения $P_{имп} = 5 \cdot 10^8$ Вт (рис. 2).

Результаты расчета площади освещенного пятна $S(l)$ лазерного луча в месте расположения ЗИК на различных глубинах l представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Площадь освещенного пятна $S(l)$ лазерного луча от глубины l , построенную для мутной воды,

Таблица 2. Площадь освещенного пятна $S(l)$ лазерного луча при различных значениях глубины l , построенная для мутной прибрежной воды

Table 2. Illuminated spot area $S(l)$ for laser beam at different depths l of turbid littoral water

Глубина l , м	1	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120
Площадь $S(l)$, м ² (мутная прибрежная вода)	0,34	8	36,5	107	228	401	621	879	1200	1800	2500

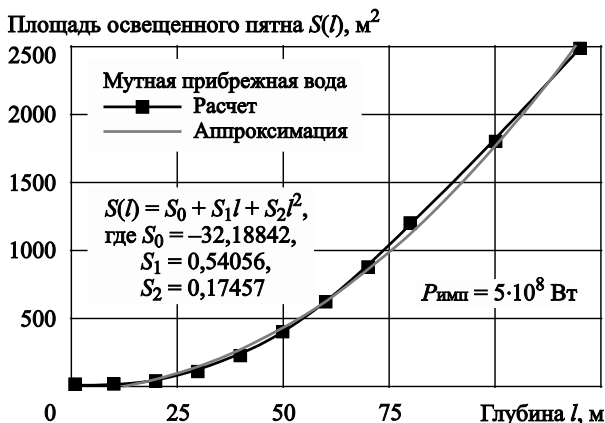


Рис. 3. Зависимость функции площади освещенного пятна $S(l)$ лазерного луча от глубины l , построенная для мутной прибрежной воды с аппроксимирующей функцией

Fig. 3. Illuminated spot area $S(l)$ for laser beam at different depths l of turbid littoral water with approximation function

Таблица 3. Формула расчета аппроксимирующей функции, описывающая изменение площади освещенного пятна $S(l)$ лазерного луча с изменением глубины l , вода мутная прибрежная

Table 3. Calculation formula for approximation function describing the change in the illuminated spot area $S(l)$ for laser beam at depth l of turbid littoral water

$S(l) = S_0 + S_1 \cdot l + S_2 \cdot l^2$ в интервале значений от 1 до 120	
S_0	-32,18842
S_1	0,54056
S_2	0,17457

Таблица 4. Значения частотно-контрастной характеристики k_w чистой и мутной воды

Table 4. Frequency contrast characteristic k_w for clear and turbid water

Глубина l , м	1	10	20	30	50	60	80	100	120	150
Параметр k_w (чистая вода)	0,999	0,942	0,888	–	0,775	–	–	0,638	–	0,589
Параметр k_w (мутная вода)	0,998	0,558	0,341	0,264	0,172	0,136	0,105	0,079	0,041	–

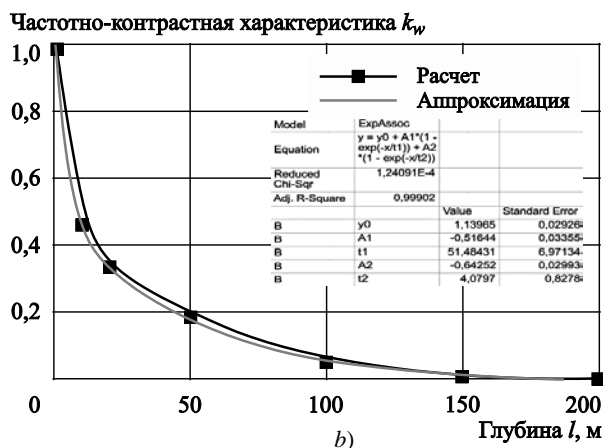
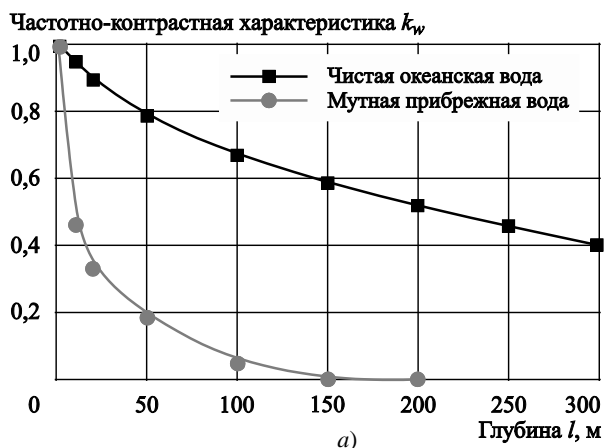


Рис. 4. Зависимости частотно-контрастной характеристики $k_w(l)$ от глубины l , построенные для чистой и мутной воды (а), для мутной воды с аппроксимацией (б)

Fig. 4. Frequency contrast characteristic $k_w(l)$ versus depth l for clear and turbid water (a) and for turbid water with approximation (b)

можно рассчитать по аппроксимирующей формуле, представленной в табл. 3.

Расчеты коэффициента яркости фона β_ϕ для чистой океанской воды и мутной прибрежной воды $\beta_{\phi m}$ соответственно имеют значения $5,7 \cdot 10^{-4}$; $2,3 \cdot 10^{-3}$. Величина мощности полезного сигнала $P(l)$ зависит только от мощности излучения. При мощности излучения $P_{изл} = 5 \cdot 10^9$ Вт полезная мощность $P(l)$ увеличивается на порядок относительно мощности $P_{изл} = 5 \cdot 10^8$ Вт. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) ПО для чистой и мутной воды имеет одно и то же значение. Результаты вычислений частотно-контрастной характеристики воды k_w показаны в табл. 4 и на рис. 4 для чистой океанской и для мутной прибрежной воды.

Частотно-контрастную характеристику $k_w(l)$ в зависимости от глубины l можно рассчитать по аппроксимирующей формуле, представленной в табл. 5.

Вычисления наблюдаемого контраста $K_H(l)$ выполняем по формуле:

$$K_H(l) = \frac{0,8k_w(l) \left(1 - \frac{\beta_\phi}{\hat{\beta}_0}\right)}{\left(1 + \frac{\beta_\phi}{\hat{\beta}_0}\right)^2},$$

где для чистой воды $\beta_\phi = 5,7 \cdot 10^{-4}$, для мутной воды $\beta_\phi = 2,3 \cdot 10^{-3}$, $\hat{\beta}_0 = 0,75\rho$, где ρ – коэффициент отражения поверхности ЗИК.

Результаты вычислений наблюдаемого контраста $K_H(l)$ в зависимости от глубины l для отраженного ОЛП ЗИК показаны в табл. 6 для чистой океанской и мутной прибрежной воды.

Наблюдаемый контраст $K_H(l)$ ОЛП ЗИК лазерного луча в зависимости от глубины l для чистой океанской воды можно рассчитать по аппроксимирующей формуле, представленной в табл. 7.

Результаты расчетов, представленных на рис. 5, свидетельствуют о существенных изменениях

Таблица 5. Формула расчета аппроксимирующей функции, описывающая изменение частотно-контрастной характеристики $k_w(l)$ с изменением глубины l для мутной воды

Table 5. Calculation formula for approximation function describing the change in frequency contrast characteristic $k_w(l)$ at depth l of turbid littoral water

$k_w(l) = k_{w0} + k_{w1} \cdot [1 - \exp(-l/c_1)] + k_{w2} \cdot [1 - \exp(-l/c_2)],$ в интервале значений от 1 до 200	
k_{w0}	1,13965
k_{w1}	-0,51644
c_1	51,48431
k_{w2}	-0,64252
c_2	4,0797

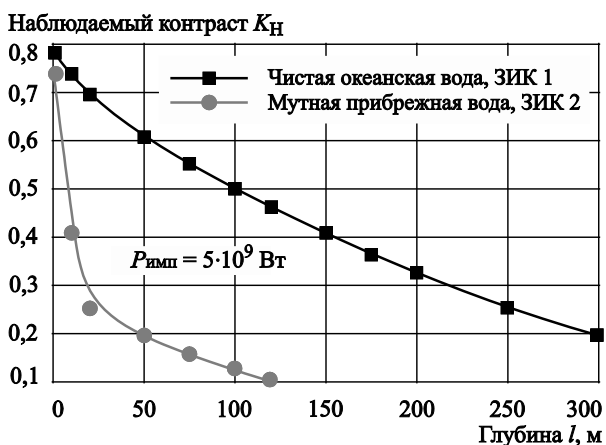


Рис. 5. Зависимости наблюдаемого контраста $K_H(l)$ от глубины l , построенные для чистой океанской и мутной прибрежной воды, для импульсной мощности $P_{имп} = 5 \cdot 10^9$ Вт

Fig. 5. Observed contrast value versus depth l , $K_H(l)$, for clear oceanic and turbid littoral water at pulse power $P_{pulse} = 5 \cdot 10^9$, W

Таблица 6. Результаты расчетов величины наблюдаемого контраста $K_H(l)$ для чистой океанской и мутной прибрежной воды для разных глубин l , от 1 до 300 м

Table 6. Calculation results for observed contrast value $K_H(l)$ for clear oceanic and turbid littoral water at depths l between 1 and 300 m

Глубина l , м	1	10	20	50	75	100	120	150	200	250	300
$K_H(l)$ ЗИК 1	0,79	0,74	0,7	0,61	0,56	0,5	0,47	0,41	0,33	0,25	0,2
$K_H(l)$ ЗИК 2	0,74	0,41	0,253	0,2	0,16	0,13	0,10	0,06	–	–	–

Таблица 7. Формула расчета аппроксимирующей функции, описывающей изменение наблюдаемого контраста $K_H(l)$ с изменением глубины l для чистой океанской воды

Table 7. Calculation formula for approximation function describing the change in observed contrast value depending on depth l , $K_H(l)$, for clear oceanic water

$K_H = K_{H0} + K_{H1} \cdot l + K_{H2} \cdot l^2$, в интервале значений от 1 до 300	
K_{H0}	0,76494
K_{H1}	-0,00297
K_{H2}	3,67471E ⁻⁶

наблюдаемого контраста отраженного ОЛП при удаленности ЗИК с изменением глубины в чистой океанской воде (рис. 5, ЗИК 1), мутной прибрежной воде, (рис. 5, ЗИК 2).

На следующем этапе вычисляем отношение сигнал/шум $\delta_0(l)$ для внутренних шумов по формуле

$$\delta_0(l) = 3,5 \cdot 10^9 K_H(l) \sqrt{P(l) \eta_{\phi} q_C \tau_C},$$

где $P(l)$ – мощность полезного сигнала, $\eta_{\phi} = 0,1$ А/Вт – чувствительность фотоприемника, $\tau_C = 10^{-8}$ с – продолжительность импульса, $q_C = 1$ – количество импульсов.

Таблица 8. Численные отношения сигнал/шум для внутренних шумов $\delta_{00}(l)$ на глубинах l в чистой океанской воде до глубины 300 м

Table 8. Numerical signal/noise ratios for internal noises at different depths l (down to 300 m) in clear oceanic water

Глубина l , м	1	10	20	50	100	150	200	250	300
Область $\delta_{00}(l)$	111,1	72,9	33,1	7,5	2,2	1	0,5	0,3	0,2

Таблица 9. Численные отношения сигнал/шум для внешних шумов $\delta_{00}(l)$ на глубинах l в чистой океанской воде

Table 9. Signal/noise ratios for external noises at depth l in clear oceanic water

Глубина, l , м	1	10	20	50	100	150	200	250	300
Область ЗИК $\delta_{00}(l)$	40,1	36,6	29	10,1	3	1,4	0,8	0,4	0,3

Таблица 10. Численные отношения сигнал/шум для внешних шумов шумов $\delta_0^0(l)$ на глубинах l в мутной воде

Table 10. Signal/noise ratio for external noises at depth l in turbid water

Глубина l , м	1	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120
Область ЗИК $\delta_0^0(l)$	71,5	37,9	18,6	10,2	5,9	3,6	2,3	1,4	0,9	0,4	0,1

Отношение сигнал/шум для внутренних шумов определяет уровень выходного сигнала. Основные результаты расчетов представлены в табл. 8.

Вычисления *сигнал/шум для внешних шумов* $\delta_{00}(l)$ в зависимости от глубины l для области контраста отраженного ОЛП ЗИК выполняются по формуле, которая имеет вид:

$$\delta_{00}(l) = \frac{\delta_0(l)}{\sqrt{1 + \frac{A \delta_0^2(l)}{K_H^2(l)}}},$$

где $A = 0,01$ – коэффициент вариации сигнала при наличии только внешних шумов из-за флуктуации гидрооптических характеристик воды (табл. 9).

В табл. 10 представлены численные значения отношения *сигнал/шум* $\delta_0^0(l)$ для мутной прибрежной воды, где A – коэффициент вариации сигнала внешних шумов из-за флуктуации гидрооптических характеристик воды, $A = 2,5 \cdot 10^{-5}$.

Результат вычислений *отношения сигнал/шум для внешних шумов* $\delta_0^0(l)$ является основным, применяется в формулах расчета *вероятности индикации* $P_{инд}$, в соотношении $\delta_n^0(l) - X_{пр}$, где $X_{пр}$ – порог ограничения. В разности значений отношения сигнал/шум для внешних шумов и порога ограничения $\delta_n^0(l)$ принимает значение от $\delta_0^0(l)$ до $\delta_n^0(l)$.

Вычисляем *вероятность индикации* $P_{инд}$ и *ложной тревоги* $P_{лт}$ отраженного ОЛП ЗИК с учетом

глубины. В расчетах использован интеграл вероятности [28] в формулах:

$$P_{лт} = \frac{\int_{\delta_{ПР}-x_n}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx}{\sqrt{2\pi}}, \quad \Phi = \frac{\int_0^{\delta_{ПР}-x_n} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt}{\sqrt{2\pi}},$$

$$P_{об} = 0,5 + \Phi.$$

$$P_{инд} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_n}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\delta_{ПР})^2}{2}\right] dx =$$

$$= 0,5 - \Phi_0(x_n - \delta_{ПР}) \equiv 0,5 + \Phi_0(\delta_{ПР} - x_n),$$

где $\delta_{ПР} - x_n$ – разность значений отношения сигнал/шум для внешних шумов и порога ограничения. Результаты расчетов представлены в табл. 11 и на рис. 6.

Результаты вычислений вероятности индикации $P_{инд}$ в соответствии с глубиной l для каждой области контраста отраженного ОЛП ЗИК представлены в табл. 11 и на рис. 6 для чистой океанской (а) и мутной прибрежной (б) воды.

Расчеты показали, что при импульсной мощности ЛЛС $P_{имп} = 5 \cdot 10^8$ Вт, при полете авиационного носителя в режиме, заданном и представленном на рис. 1, при сканировании ЛЛС возникают области контраста отраженного ОЛП ЗИК, которые регистрируются с различной вероятностью $P_{инд}$ в пределах глубины l от 0 до 120 м для мутной воды и соответственно от 0 до 300 м для чистой океанской воды. Для чистой океанской воды будем иметь:

- на глубинах до 50 м отраженное ОЛП ЗИК имеет вероятность индикации $P_{инд} = 1,0$;
- на глубинах от 50 до 75 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{инд}$ от 1,0 до 0,6;
- на глубинах от 75 до 100 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{инд}$ от 0,6 до 0,21;
- на глубинах от 100 до 125 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{инд}$ от 0,21 до 0,1;
- на глубинах от 125 до 150 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{инд}$ от 0,1 до 0;
- на глубинах от 150 до 300 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{инд} = 0$.

Таблица 11. Зависимости вероятности индикации $P_{инд}$ отраженного ОЛП ЗИК в мутной прибрежной воде и чистой океанской воде

Table 11. Detection probabilities P_{det} of reflected laser signal in turbid littoral and clear oceanic water

Глубина (мутная прибрежная вода)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120
Вероятность индикации ОЛП ЗИК 1	1	1	1	1	0,98	0,42	0,07	0	0	0	0
Глубина (чистая океанская вода)	1	10	20	50	75	100	125	150	200	250	300
Вероятность индикации ОЛП ЗИК 2	1	1	1	1	0,6	0,21	0,1	0	0	0	0

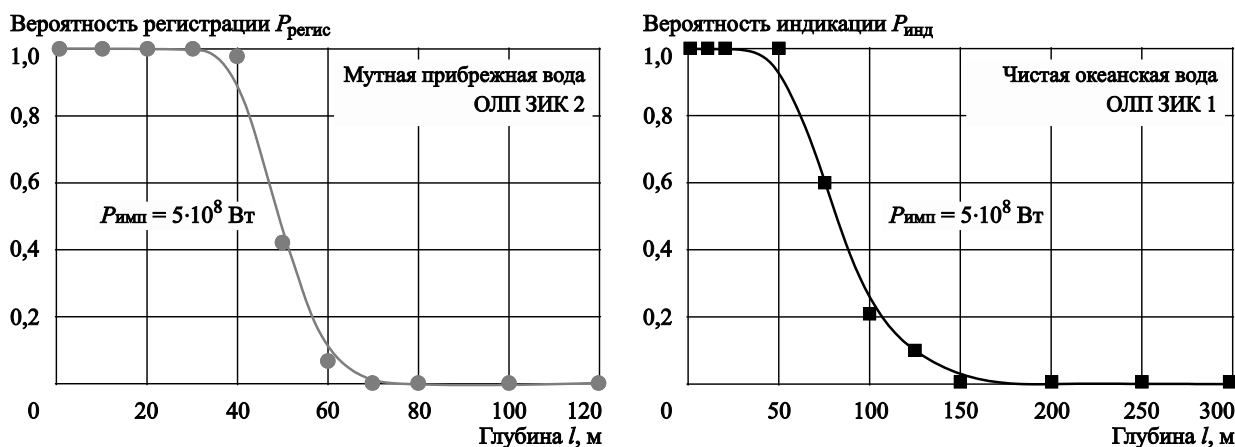


Рис. 6. Зависимости вероятности индикации $P_{инд}$ от глубины l , построенные для областей контраста отраженного ОЛП ЗИК для мутной прибрежной и чистой океанской воды при импульсной мощности излучения $P_{имп} = 5 \cdot 10^8$, Вт

Fig. 6. Detection probabilities P_{det} versus depth l for contrast zones of reflected laser signal in turbid littoral and clear oceanic water at pulse power $P_{pulse} = 5 \cdot 10^8$, W

Руководствуясь полученными данными, приходим к выводу, что для чистой океанской воды до глубины 50 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК имеет величину 100 %. На глубинах от 50 до 125 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК резко падает от 100 до критических 10 %. На глубинах от 125 до 150 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК снижается от 10 до 0 %, от 150 до 300 м вероятность индикации составляет 0 %.

Для мутной прибрежной воды будем иметь:

- на глубинах до 40 м отраженное ОЛП ЗИК имеет вероятность индикации $P_{\text{инд}} = 1,0$;
- на глубинах от 40 до 50 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{\text{инд}}$ от 1,0 до 0,4;
- на глубинах от 50 до 60 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{\text{инд}}$ от 0,4 до 0,1;
- на глубинах от 60 до 70 м отраженное ОЛП ЗИК имеет $P_{\text{инд}}$ от 0,1 до 0.

Таким образом, для мутной прибрежной воды до глубины 40 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК имеет величину 100 %. На глубинах от 40 до 60 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК резко падает от 100 до критических 10 %. На глубинах от 60 до 70 м вероятность индикации отраженного ОЛП ЗИК снижается от 10 до 0 %, от 70 до 120 м вероятность индикации составляет 0 %.

Особенностью представленных расчетов является то, что в них заложены реальные физические процессы, которые происходят в натуральных условиях при зондировании с воздушного носителя. Наблюдаемый контраст отраженного ОЛП ЗИК зависит от оптических параметров зондирующей аппаратуры, процессов, происходящих в атмосфере и гидросфере, глубины расположения ЗИК, размеров, отражательных характеристик ЗИК и геологических донных отложений. Мерой оценки является вероятность индикации, которая определяется с учетом отношения сигнал/шум для внутренних приборных и внешних гидрофизических шумов в области гидросферы. Универсальный метод оценки вероятности лазерной индикации затопленных инженерных сооружений базируется на основных положениях физико-математической модели (ФММ) [28].

Заключение

Conclusion

Предлагаемый универсальный метод оценки вероятности лазерной индикации подводных объектов позволяет по отраженному оптиколокационному полю с вероятностью от 0 до 100 % определять вероятность индикации ПО в местах их расположения.

При проведении поисковых работ необходимо обратить особое внимание на гидрологические и гидрофизические условия состояния атмосферы и гидросферы, для расчетов вероятности индикации ПО необходимо знание всех параметров среды, которое позволит существенным образом повысить эффективность работы ЛЛС.

Следует использовать информацию о гидрофизических характеристиках атмосферы и гидросферы, где происходят поисковые работы, для оптимизации маршрута движения авиационного, надводного или подводного носителя ЛЛС, выполняя условия соблюдения заданной вероятности обнаружения по критерию численного значения вероятности индикации $P_{\text{инд}}$ с учетом принятого порога обнаружения и вероятности ложной тревоги.

Универсальный метод оценки вероятности лазерной индикации ЗИК расширил возможности практического применения физико-математической модели лазерной батиметрии океана, на базе которой созданы программы и метод расчета отраженного ОЛП ПО в морской среде. Разработанные программы расчета позволяют определить наблюдаемый контраст, вероятность индикации ПО для мелководных районов прибрежных зон с учетом оптических характеристик донных геологических структур и флоры, представить рекомендации по повышению вероятности индикации ПО для российских ЛЛС.

Список использованной литературы

1. ВМС США намерены приобрести австралийский лазерный эхолот // Дайджест зарубежной прессы по вопросам кораблестроения. 1995. Вып. 12/13. С. 85–86.
2. *Banic J., Sizgoric S., O'Neil R.* Scanning lidar bathymeter for water depth measurement // *Geocarto International*. 1987. Vol. 2, № 2. P. 49–56. DOI: 10.1080/10106048709354094.
3. *Завьялов А.К., Патраков Ю.М.* Алгоритм расчета эффективности лазерной батиметрии в области гидросферы на основе физико-математической модели // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 1(395). С. 162–169. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-162-169.
4. Программа расчета оптических параметров турбулентной струи в чистой воде стратифицированного океана : свидетельство об офиц. регистрации № 2016660718 Рос. Федерация / *А.К. Завьялов*. № 2016618283; заявл. 28.07.2016; опубл. 20.10.2016. 1 с.
5. *Долин Л.С., Левин И.М.* Справочник по теории подводного видения. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 228, [1] с.

6. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск : Наука и техника, 1985. 327 с.
7. Разработка лазерно-оптических методов и аппаратуры для дистанционной подводной разведки и мониторинга месторождений углеводородов: отчет о НИР / Крыловский гос. науч. центр; рук. А.К. Завьялов. Санкт-Петербург, 2014. 192 с. № 47872.
8. Бузовский В.В., Конопляник А.А. Анализ стратегий освоения арктического шельфа России ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром» / В.В. Бузовский // Газовая промышленность. 2016. № 12(746). С. 16–24.
9. Лидарный комплекс комбинационного рассеяния для подводного поиска углеводородов : пат. 155916 Рос. Федерация / В.Г. Беспалов, А.П. Жевлаков, Е.А. Макаров, А.К. Завьялов, А.В. Матвеевцев, К.М. Ромодин. № 2014151056/28; заявл. 16.12.2014; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. 8 с.
10. Рамановские гиперспектральные технологии дистанционного зондирования углеводородных геохимических полей / А.П. Жевлаков, В.Г. Беспалов, О.Б. Данилов [и др.] // Оптический журнал. 2020. Т. 87, № 1. С. 16–22. DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-01-16-22.
11. Завьялов А.К., Патраков Ю.М. Метод оценки количественных характеристик нефтяных загрязнений с помощью оптиколокации // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2016. Вып. 93(377). С. 97–104.
12. Технология многоуровневого экологического мониторинга в целях информационного обеспечения безопасности морской добычи нефти и газа / Л. Лобковский, А. Зацепин, С. Ковачев [и др.] // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2007. № 2. С. 72–78.
13. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения: учебное пособие. Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
14. Катенин В.А. Лазерные технологии в зарубежных военно-морских силах // Экспертный союз, 2012. № 6. URL: <http://unionexpert.ru/lazernye-tehnologii-v-zarubezhnyh-voenno-morskih-silah> (дата обращения: 30.11.2021).
15. Волков В.Г. Мобильные лазерные приборы для спецтехники // Спецтехника и связь. 2011. № 2. С. 3–10. Окончание в № 3, с. 2–12.
16. Оптика океана : [В 2-х т.] / АН СССР, Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова; [Отв. ред. А.С. Монин]. Москва : Наука, 1983.
17. Межерис Р.М. Лазерное дистанционное зондирование. Москва : Мир, 1987. 550 с.
18. Варшавчик М.Л. Матрица яркости лакокрасочных покрытий // Оптический журнал. 1992. № 2. С. 33–38.
19. Климков Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. Москва : Советское радио, 1978. 262 с.
20. Долин Л.С., Савельев В.А. О характеристиках сигнала обратного рассеяния при импульсном облучении мутной среды направленным световым пучком // Известия Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7, № 5. С. 505–510.
21. Завьялов А.К., Патраков Ю.М. Проблемы и возможности измерений параметров внутренних волн в океане методом оптиколокации // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2017. Вып. 4(382). С. 129–137. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-129-137.
22. Некоторые вопросы теории видения в мутных средах / Д.М. Браво-Животовский, Л.С. Долин, А.Г. Лучинин, В.А. Савельев // Известия Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5, № 7. С. 672–684.
23. Исследование особенностей распространения импульсного лазерного излучения в водной среде в режиме использования телевизионной системы «Фотон» : отчет о НИР / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова; исполн. М.И. Варшавчик. Санкт-Петербург, 1993. 69 с. № 3608.
24. Шведский лазерный эхолот (авиационный носитель – вертолет) Hawk Eye («Соколиный глаз») // Дайджест зарубежной прессы по вопросам кораблестроения. 1994. Вып. 8. Реф. 5.7.1.
25. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанских фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
26. Федоров К.Н. О физической структуре приповерхностного слоя океана // Метеорология и гидрология. 1981. № 10. С. 58–66.
27. Степанов В.Н. Мировой океан. Москва : Знание, 1974, 256 с.
28. Митропольский А.К. Интеграл вероятности. 2-е изд., доп. Ленинград : Издательство Ленинградского университета, 1972. 86 с.

References

1. USN plans to buy Australian laser echo sounder // VMS i korablestroenie. Daidgest zarubezhnoi pressy (Navy and Defence Technology News), 1995, Issue 12/13, pp. 85–86 (in Russian).
2. Banic J., Sizgoric S., O'Neil R. Scanning lidar bathymeter for water depth measurement // Geocarto International. 1987. Vol. 2, № 2. P. 49–56. DOI: 10.1080/10106048709354094.
3. A. Zavyalov, Yu. Patrakov. Efficiency calculation algorithm for laser bathymetry in hydrosphere based on physical & mathematical model // Transactions of Krylov State Research Centre, 2021, Issue 1(395), pp. 162–169 (in Russian).
4. A. Zavyalov, Yu. Patrakov. Calculation software for optical parameters of turbulent jet in clear water of stratified

- ocean. State Registration Certificate for Computer Software No. 201660718 dt. 21.09.2016 (*in Russian*).
5. L. Dolin, I. Levin. Underwater vision theory. Reference book. Leningrad, Gidrometizdat, 1991 (*in Russian*).
 6. E. Zege, A. Ivanov, I. Katsev. Image transfer in a scattering medium. Minsk : Science and Technology, 1985. 327 p. (*in Russian*).
 7. Development of laser-optical methods and equipment for remote underwater exploration and monitoring of oil and gas fields: R&D report / St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2014. 192 pp. No. 47872 (*in Russian*).
 8. V. Buzovsky, A. Konoplyanik. Analysis of Rosneft and Gazprom strategies of Russian Arctic offshore developments // Gas Industry, 2016, No. 12(746), pp. 16–24 (*in Russian*).
 9. V. Bespalov, A. Zhelvakov, Ye. Makarov, A. Zavyalov, A. Matveentsev, K. Romodin. Combinational-scattering lidar complex for underwater search of hydrocarbons. Patent No. 155916, 2014 (*in Russian*).
 10. A. Zhevlakov, V. Bespalov, O. Danilov et al. Raman hyperspectral technologies for remote probing of hydrocarbon geochemical fields // Opticheskii Zhurnal (Journal of Optical Technology), 2020, Vol. 87, No. 1, pp. 16–22 (*in Russian*).
 11. A. Zavyalov, Yu. Patrakov. Quantitative assessment of oil contamination by means of laser systems // Transactions of Krylov State Research Centre. 2016. Issue. 93(377). pp. 97–104 (*in Russian*).
 12. L. Lobkovsky, A. Zatepin, S. Kovachev et al. Multi-level ecomonitoring technology for information support of offshore oil and gas production safety // Technologies of fuel and power industry, 2007, No. 2, pp. 72–78 (*in Russian*).
 13. V. Karasik, V. Orlov. Laser vision systems. Student's Guide. Bauman Moscow State Technical University, 2001, 352 pp. (*in Russian*).
 14. V. Katenin. Laser technologies in foreign navies // Ekspertny Soyuz (Union Expert), 2021, No. 6, URL: <http://unionexpert.su/lazernye-tehnologii-v-zarubezhnyh-voennomorskikh-silah> (accessed on 30.11.2021) (*in Russian*).
 15. V. Volkov. Mobile laser tools for special equipment // Special Hardware and Communications, 2011, No. 2, pp. 3–10. Ending in No. 3, pp. 2–12 (*in Russian*).
 16. Optics of the Ocean. In 2 vol. USSR Academy of Sciences, Shirshov Institute of Oceanology, Editor-in-charge A. Monin. Moscow, Nauka, 1983 (*in Russian*).
 17. R. Mejeris. Remote laser probing. Moscow, Mir, 1987. 550 p. (*in Russian*).
 18. M. Varshavchik. Luminance matrix of paint coatings // Opticheskii Zhurnal (Journal of Optical Technology), 1992. No. 2. pp. 33–38 (*in Russian*).
 19. Yu. Klimkov. Basics of calculating optoelectronic devices with lasers. Moscow, Soviet radio, 1978. 262 p. (*in Russian*).
 20. L. Dolin, V. Savelyev. On characteristics of back-scattered signal in pulse probing of turbid medium by directed light beam // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 1971, Vol. 7, No. 5, pp. 505–510 (*in Russian*).
 21. A. Zavyalov, Yu. Patrakov. Lidar measurements of internal waves in the Ocean: challenges and capabilities // Transactions of Krylov State Research Centre, 2017, Issue 4(382), pp. 129–137 (*in Russian*).
 22. D. Bravo-Zhivotovsky, L. Dolin, A. Luchinin, V. Savelyev. Certain problems of vision theory for turbid media // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 1969, Vol. 5, No. 7, pp. 672–684 (*in Russian*).
 23. Propagation peculiarities of laser pulse in water: experience of Foton television system. KSRI Report No. 3608, 1993, 69 pp. (*in Russian*).
 24. Hawk Eye heliborne laser echo sounder (Sweden) // VMS i korablestroenie. Daigest zarubezhnoi pressy (Navy and Defence Technology News), 1994, Issue 8, Ref. 5.7.1 (*in Russian*).
 25. K. Fyodorov. Physical nature and structure of Ocean fronts. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 296 pp. (*in Russian*).
 26. K. Fyodorov. On physical structure of sub-surface ocean layer // Meteorologiya i Gidrologiya (Meteorology and Hydrology), 1981, No. 10, pp. 58–66 (*in Russian*).
 27. V. Stepanov. The Ocean. Moscow, Znanie, 1974, 256 pp. (*in Russian*).
 28. A. Mitropolskiy. Probability Integral. 2nd ed., extended. Leningrad, Publishing house of Leningrad University, 1972. 86 p. (*in Russian*).
-
- Сведения об авторах**
Завьялов Александр Константинович, к.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@ksrc.ru.
Патраков Юрий Михайлович, к.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@ksrc.ru.
- About the authors**
Alexandr K. Zavyalov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Lead Expert. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@ksrc.ru.
Yury M. Patrakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Lead Expert. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-54. E-mail: krylov@ksrc.ru.