

10. Пискарев А.Л. О расчете усредненных распределений интенсивности звуковых полей в океане // Акуст. журн. 1989. Т. XXXV. Вып. 4. С. 724-731.
11. Митрофанов О.Г., Озерницкий И.М. Расходомеры EESilo, два метода измерения расхода жидкости – одна пара накладных датчиков. Часть I / http://www.diaword.ru/Article_5.htm.

Сальников Борис Александрович

Департамент науки и инноваций Дальневосточного государственного технического университета

E-mail: salnikovb@mail.ru

690106, Россия, г. Владивосток, ул. Нерчинская, 27, кв.5, тел.: +7(9242)425100

Сальникова Евгения Николаевна

Институт радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета

E-mail: en_salnikova@mail.ru

690106, Россия, г. Владивосток, ул. Нерчинская, 27, кв. 5, тел.: +7(9147)235843

Salnikov Boris Aleksandrovich

The leading scientific worker of the Department of a science and innovations of the Far Eastern State Technical University

E-mail: salnikovb@mail.ru

Flet. 5, 27, Nerchinskay St., Vladivostok, 690106, Russia, ph.: +7(9242)425100

Salnikova Evgeniya Nikolaevna

Vice director of the Institute of Radioelektronics, Information Science and Electric Engineering of the Far Eastern State Technical University

E-mail: en_salnikova@mail.ru

Flet. 5, 27, Nerchinskay St., Vladivostok, 690106, Russia, ph.: +7(9147)235843

УДК 534.222.2

В. Ю. Волощенко

НЕЛИНЕЙНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрена возможность расширения эксплуатационных возможностей «традиционных» средств кораблевождения и функционирование многочастотной импульсной доплеровской системы, которая позволяет увеличить точность измерения скорости судна как относительно дна, так и относительно воды по сигналам донной и объемной реверберации.

Нелинейная акустика; многочастотная импульсная доплеровская система; моностатический доплеровский измеритель скорости течений.

V.Y.Voloshchenko

THE NONLINEAR NAVIGATION SYSTEMS

The method of navigation system's upgrade and operation of the multifrequency impulse Doppler sonar system, which permit to increase of it's velocity measurement accuracy on the reverberation signals from sea bottom and moving water masses are considered.

Nonlinear acoustic; multifrequency impulse Doppler sonar system; monostatic Doppler current velocimeter.

Развитие технических средств экологических исследований, обусловленное повышением требований к достоверности результатов мониторинга водных экосистем, приводит к необходимости модернизации различных гидроакустических средств активной локации, в частности, использующих и доплеровский метод, что обеспечит расширение круга задач, решаемых с их помощью. При реализации доплеровского метода используется звуковая энергия, рассеянная дном или неоднородностями объема воды, что дает возможность измерения как «абсолютной» скорости судна, так и его «результатирующей» скорости - относительно массы воды. По этим причинам доплеровская локационная система используется не только для навигации судов, но и в качестве измерителя скорости течения, позволяющего регистрировать его вертикальный профиль непосредственно на ходу судна вследствие того, что разность доплеровских частот, принятых в близкие моменты времени сигналов донной и объемной реверберации, пропорциональна скорости течения на горизонте, с которого поступает сигнал объемной реверберации [1]. В [2] описана обобщенная структурная схема доплеровской локационной системы и сформулированы основные требования к ней, среди которых выделим следующие: 1) наличие двух приемно-излучающих трактов – высокочастотного и низкочастотного, причем, для упрощения электронной аппаратуры частоты излучаемых колебаний целесообразно выбрать кратными; 2) использование многочастотного импульсного режима.

Известно, что облучение рассеивающей донной поверхности под углом скольжения Θ_D коническим пучком ультразвуковых волн с шириной $\theta_{0,7}$ по уровню половинной мощности приводит к расширению доплеровского спектра частот, причем, ширина этого спектра приблизительно может быть оценена из соотношения [1]

$$\Delta f_D \approx 4 \cdot f \cdot v \cdot \sin \Theta_D \cdot (\theta_{0,7} / 2) \cdot c . \quad (1)$$

Появление доплеровского спектра частот вызывает погрешности в определении доплеровского сдвига по двум причинам:

1) величина мгновенной частоты доплеровского спектра флуктуирует относительно среднего значения частоты спектра, причем, в данном случае флуктуационная относительная погрешность измерения скорости судна $(\delta v/v)_{fl}$ доплеровским лагом может быть оценена из соотношения [1]

$$(\delta v/v)_{fl} = \sqrt{\sin \Theta_D \times \lambda_D \times \theta_{0,7}} / 2 \times \cos \Theta_D \times \sqrt{v \times T} , \quad (2)$$

где λ_D – доплеровская длина волны сигнала; T – время усреднения результатов N измерений мгновенных значений частоты f_D пришедшего сигнала. Из (2) следует, что для уменьшения флуктуационной погрешности желательно уменьшать ширину основного лепестка $\theta_{0,7}$ диаграммы направленности по уровню 0,7 и длину волны доплеровского λ_D рассеянного сигнала при увеличении времени усреднения T ;

2) максимум энергии доплеровского спектра не соответствует центральной доплеровской частоте и смещен в сторону низких частот, что обусловлено имеющимися различиями как в условиях распространения излученного сигнала в направлениях крайних лучей (ближний и дальний по курсу судна проходят разные

по длине трассы), так и в условиях их рассеяния дном, которое имеет угловую зависимость силы донного рассеяния. Относительная погрешность измерения скорости судна за счет деформации огибающей доплеровского спектра эхосигнала, обусловленная параметрами лага ($\theta_{0,7}$; Θ_D) и параметрами среды распространения (β – коэффициент затухания сигнала лага, χ – коэффициент обратного донного рассеяния для выбранного угла наклона акустической оси антенны, H – глубина под килем судна), может быть оценена из соотношения [1]

$$(\delta v/v)_{cm} = -[\chi \times (\theta_{0,7})^2 / 11,2 \times \text{tg} \Theta_D + \beta \times H \times (\theta_{0,7})^2 / 2,8 \times \text{cos} \Theta_D + (\theta_{0,7})^2 / 5,6]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что для уменьшения погрешности смещения максимума энергии доплеровского спектра следует уменьшать ширину основного лепестка $\theta_{0,7}$ диаграммы направленности по уровню 0,7 и не использовать в качестве рабочих акустические сигналы, испытывающие значительное пространственное затухание; знак (-) в правой части выражения (3) означает, что величины измеряемой скорости движения судна будут занижены по сравнению с истинной.

Ограничения по точности (флуктуационная погрешность (2) и погрешность за счет смещения максимума энергии (3) доплеровского спектра) косвенного измерения скорости движения судна обусловлены определенной пространственной избирательностью находящихся в среде лоцирования интерференционных излучающих и приемных преобразователей, т.е. их способностью излучать (принимать) звуковые волны в одних направлениях в большей степени, чем в других [3].

Существующие доплеровские системы для исследования тонкой вертикальной структуры поля скорости течения также имеют ограничения [4], связанные с остротой направленного действия и уровнем бокового поля антенной системы устройств:

1) в неоднородном поле течений измеренный радиальный компонент скорости, соответствующий акустической оси, может отличаться от скорости по другим направлениям, что приводит к расширению доплеровского спектра и ухудшению точностных характеристик устройства;

2) озвучиваемый объем воды увеличивается с расстоянием, что влияет на сопоставление результатов измерений и их точность;

3) для интерференционных антенн число рассеивателей, охваченных основным лепестком приемно-излучающей антенной системы, составляет лишь малую долю рассеивателей в сравнении с общим числом озвученных рассеивателей в объеме на данной дистанции, что расширяет доплеровский спектр эхосигнала и ухудшает точность измерения доплеровского сдвига частоты.

В промышленных образцах доплеровских лагов преимущественно используется импульсный режим излучения с низкой частотой следования зондирующих импульсов в двух разновидностях: с постоянными и переменными длительностью и периодом следования импульсов, причем, недостатком таких систем является ограничение по минимальной глубине под килем (особенно на малых скоростях судна), так как при малых длительностях излучаемых импульсов резко ухудшается точность измерения скорости вследствие расширения доплеровского спектра эхосигналов [2]. Для повышения помехоустойчивости и точности измерений в гидроакустических лагах используется импульсный режим с переменными в зависимости от глубины под килем судна длительностью импульсов τ_M и периодом их повторения $T_{СЛ}$ при постоянстве скважности $Q = T_{СЛ} / \tau_M$. Длительность излучаемых импульсов регулируется по закону $\tau_M = F(D) = 2D/c$, где D – текущее зна-

чение наклонной дальности до дна, C – скорость звука в воде, т.е. излучение зондирующего импульса продолжается до тех пор пока эхо-сигнал от переднего фронта излученного импульса, отразившись от дна, не подойдет к антенне, переключаемой с этого момента на прием. При увеличении глубины под килем судна формирующие эпоху импульсного режима стробы $\tau_{И}, \tau_{Р}$ и $\tau_{П}$ (длительности зондирующего импульса, подавления эхосигналов объемной реверберации и приема эхосигналов донной реверберации соответственно) пропорционально растягиваются, при уменьшении глубины – сжимаются, сохраняя заданное для них соотношение [5].

Основной недостаток импульсного режима работы существующих доплеровских лагов – неполное использование общего времени работы лага для целей измерения доплеровской частоты, причем, для устранения этого недостатка предложено использовать «линейный» многочастотный импульсный режим [2], совмещающий в себе достоинство непрерывного режима излучения, с точки зрения полного использования для целей измерения доплеровской частоты общего времени работы лага и преимущество импульсного режима, устраняющего реверберационную помеху. Так, излучение акустических сигналов с частотами f_1, f_2, f_3, f_4 , циклически чередующихся во времени, производится непрерывно одной антенной, а прием эхосигналов в этой же последовательности – другой антенной, причем, во временной эпохе предложенного четырехчастотного импульсного режима последовательности стробов «излучение» и «прием» на данных частотах сдвинуты друг относительно друга во времени так, что при приеме эхо-сигналов с частотой $(f_1 \pm f_{Д1})$ излучение будет происходить на частоте f_3 , а при приеме эхосигналов с частотой $(f_2 \pm f_{Д2})$ излучение будет происходить на частоте f_4 и т.д. Это обеспечивает исключение возможности попадания сигналов с частотой излучения в приемный тракт при постоянном наличии информационного доплеровского сигнала на измерительной схеме лага, причем, временная эпоха рассматриваемого многочастотного импульсного режима является сочетанием временных эпох нескольких обычных импульсных режимов, сомкнутых на временной оси.

Между тем водная среда обладает нелинейностью своих упругих свойств, что приводит к возникновению при распространении интенсивной ультразвуковой волны различных нелинейных эффектов [6,7].

Нелинейные эффекты в акустическом поле можно рассматривать как результат изменения свойств среды в области распространения мощного зондирующего сигнала накачки с частотой f , что приводит к искажению формы его волнового профиля при распространении к рассеивающей поверхности, т.е. генерации высших гармонических составляющих с частотами $2f, 3f, \dots, nf$. Акустические поля сигналов высших гармоник обладают интересными пространственными характеристиками: на акустической оси антенны изменение свойств среды под действием мощной волны накачки с частотой f происходит в наибольшей степени, в связи с чем главный максимум излучения для каждой последующей гармоники уже (острее), а в направлениях дополнительных максимумов излучения на основной частоте изменение свойств среды происходит в гораздо меньшей степени, что приводит к снижению эффективности генерации гармоник в этих направлениях, т.е. уровень бокового поля для каждой последующей гармоники меньше, чем у предыдущей. На рис.1 представлены полученные автором характеристики направленности многоэлементной антенны диаметром 0,19 м параметрической локаци-

онной системы ближнего подводного наблюдения для сигнала накачки основной частоты $f = 100$ кГц и сформировавшейся второй гармоники $2f = 200$ кГц; измеренные на расстоянии $z = 4$ м. Анализ полученных характеристик направленности показал следующее: для сигнала основной частоты $f = 100$ кГц уровень бокового поля $P_{БП(f)}$ составляет (-15) дБ и ширина ХН по уровню $0,7$ $\theta_{0,7(f)} = 4,9^\circ$; для второй гармоники $2f = 200$ кГц $P_{БП(2f)} = (-27)$ дБ и $\theta_{0,7(2f)} = 3,3^\circ$ [8].

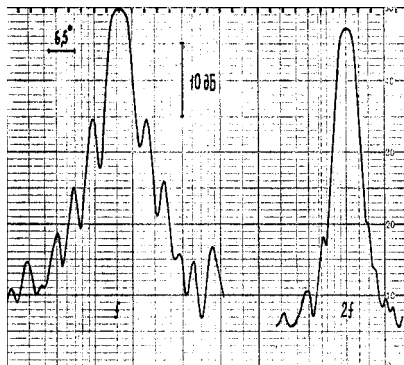


Рис.1. Характеристики направленности многоэлементной антенны для сигнала накачки основной частоты $f = 100$ кГц и сформировавшейся второй гармоники $2f = 200$ кГц

Оценим с точки зрения «линейности» или нелинейности режимы работы акустических антенных систем промышленных образцов доплеровских лагов, рабочие характеристики представлены в [2]. В импульсном лаге MRQ-2015A фирмы “Marquardt Corporation” (США), предназначенном для навигации в прибрежной зоне с глубинами до 210 метров (режим измерения абсолютной скорости) и в открытом море (режим измерения относительной скорости), антенный блок содержит образующие систему «Янус» четыре обратимых электроакустических преобразователя, формирующих излучение и прием акустических сигналов с частотой 300 кГц в пределах малых телесных углов величиной 3° , акустические оси пучков наклонены относительно горизонта на 60° . Выбор частоты акустического сигнала обусловлен тем, что в диапазоне от 200 кГц до 300 кГц суммарное влияние гидроакустических помех (шумы судна, шумы

моря), воспринимаемых приемным трактом лага, бывает наименьшим, а также возможностью получения значительных приращений частоты на узел скорости, т.е. высокой скоростной чувствительностью лага. Излучаемая акустическая мощность $W_{A1,2}$ устройства лежит в пределах от 10 Вт до 20 Вт по каждому лучу, что обуславливает диапазон изменения интенсивности волн как от $0,13$ Вт/см² до $0,26$ Вт/см². Используя известную связь между шириной характеристики направленности поршневого излучателя по уровню $0,7$ $\theta_{0,7(f)}$, длиной волны $\lambda_{(f)} = c/f$, можно вычислить диаметр преобразователя $d = 0,1$ м, в результате для него можно рассчитать длину ближней прожекторной зоны l_d , площадь излучающей поверхности S и коэффициент осевой концентрации $\gamma_{ИЗЛ}$, величины которых составили $6,28$ м, $78,5$ см² и 3944 соответственно. Пересчет величин излучаемой акустической мощности $W_{A1,2}$, сконцентрированной в малом телесном угле, в приведенное к расстоянию 1 метр в водной среде распространения звуковое давление акустического сигнала основной частоты, позволяет оценить соотношение амплитуд звукового давления акустических сигналов сформировавшейся второй гармоники $2f = 600$ кГц и основной частоты $f = 300$ кГц для расстояний $1,5 \times l_d = 9,5$ метров на акустической оси как 3% и 6% соответственно. В двухчастотном (25 кГц и 40 кГц)

импульсном лаге с высоким энергетическим потенциалом KNS-25-IVA (Instantaneous Velocity Acquisition – измерение мгновенной скорости) фирмы “Kent Navigation System”(США) предусмотрена возможность одновременной работы с использованием эхосигналов от дна (до 1500-1200 метров) и движущихся масс воды, что позволяет определять элементы течения на различных горизонтах. Антенный блок содержит три обратимых электроакустических преобразователя, формирующие излучение и прием акустических сигналов с частотами 25 кГц или 40 кГц в пределах малых телесных углов величинами $5,7^0$ или 3^0 , причем, излучаемая акустическая мощность по каждому лучу составляет 400 Вт, что обуславливает интенсивности волн $0,13 \text{ Вт/см}^2$ или $0,09 \text{ Вт/см}^2$. В результате проведения аналогичных оценочных расчетов можно получить следующие соотношения амплитуд звукового давления акустических сигналов сформировавшихся вторых гармоник $2f_{HЧ} = 50 \text{ кГц}$, $2f_{BЧ} = 80 \text{ кГц}$ и основных частот $f_{HЧ} = 25 \text{ кГц}$, $f_{BЧ} = 40 \text{ кГц}$ для расстояний 7,5 м и 17 м на акустической оси как 3,4 и 10% соответственно.

Таким образом, общая тенденция, свойственная всем гидроакустическим системам активной локации, при увеличении энергетического потенциала интерференционные антенны плавно переходят из традиционного «линейного» моночастотного режима излучения в достаточно нелинейный многочастотный режим, что выполняется и для доплеровских навигационных систем, причем, анализ представленной выше информации о пространственных характеристиках акустических полей локационных сигналов кратных частот $f, 2f, 3f, \dots, nf$ позволяет предложить вариант расширения эксплуатационных возможностей «традиционных» средств кораблевождения [9,10] в значительной степени соответствующий предложениям, описанным в [2].

Нелинейная генерация в водной среде высших гармоник мощного излученного сигнала существенно расширяет рабочий диапазон частот доплеровских навигационных систем, причем, высокая эффективность генерации данных сигналов, кратность частот при соответствующей обработке в n -канальном приемном тракте дает возможность оптимизации разрешающей способности устройства по дальности, угловым координатам и радиальной скорости движения объектов при анализе информативных эхосигналов, как донной, так и объемной реверберации. В предлагаемой многочастотной импульсной доплеровской навигационной системе [10] зондирующего акустического сигнала конечной амплитуды осуществляется на частоте f , а в нелинейной среде происходит генерация высших гармонических компонент с частотами $2f, 3f, \dots, nf$, амплитуды которых вблизи излучающей антенны еще невелики, что обуславливает незначительность маскирующей реверберационной помехи при работе на данных сигналах и позволяет одновременно с излучением сигнала с частотой f производить прием эхосигналов на частотах $2f, 3f, \dots, nf$.

Учитывая физические особенности нелинейной генерации и распространения акустических сигналов высших гармоник, состоящие в том, что максимальная амплитуда звукового давления сформировавшейся n -й гармоники обратно пропорциональна ее порядковому номеру, а пространственное затухание данных волновых процессов в водной среде пропорционально второй степени частоты сигнала, наибольшая дальность действия устройства будет обеспечена при работе на сигнале основной частоты f , а наименьшая – на частоте наивысшей используемой гармоники nf . Это обусловит использование для измерения абсолютной скорости

корабля v относительно рассеивающей донной поверхности преимущественно сдвига средней частоты спектра для сигнала основной частоты f (статистический момент первого порядка) и исключение сканирования приемного строба по дальности в этом канале во избежание потери акустического контакта с дном, в то время как в других более высокочастотных каналах режим измерения относительной скорости по сигналам объемной реверберации при сканировании приемного строба по дальности и длительности может дать требуемый результат – возможность точного косвенного определения направления и величины скорости течений на рассматриваемых глубинах.

При проектировании режима доплеровского измерения скорости течений для проведения экологического мониторинга водной экосистемы необходимо оценить возможное дополнительное информативное уширение доплеровского спектра эхосигналов в трактах, использующих сигналы объемной реверберации на высших гармониках $nf = nc/\lambda_{(nf)}$, где c – скорость звука в среде, $\lambda_{(nf)}$ – длина волны акустического сигнала с частотой nf . Так, в предположении, что рассеиватели пассивно переносятся течением, механизм уширения спектра обусловлен следующими причинами [4]:

1) турбулентными пульсациями показателя преломления, происходящими в рассеивающем водном объеме со среднеквадратичной скоростью $u_T = (0,1 \div 0,3) \times |v_T|$, где v_T – скорость течения в данном объеме. Уширение спектра для рабочих локационных сигналов в данном случае можно рассчитать

$$\Delta f_{D-T(nf)} = u_T / \lambda_{(nf)}; \quad (4)$$

2) конечностью размера озвучиваемого объема водной среды $V_{PEB(nf)} = (\pi \cdot z^2 / 4) \times (\theta_{0,7(nf)})^2 \times (c \cdot \tau_{И} / 2)$, где z – расстояние до рассеивающего объема, $\theta_{0,7(nf)}$ – острота направленного действия приемно-излучающей антенной системы на кратных частотах, $\tau_{И}$ – длительность излучаемого импульса. В данном случае уширение спектра

$$\Delta f_{D-L(nf)} = |v_T| \times (L_{(nf)} / \lambda_{(nf)} z), \quad (5)$$

где $L_{(nf)}$ – поперечный размер рассеивающего акустический сигнал с частотой nf водного объема;

3) пространственно-временной (x, t) неоднородностью поля средней скорости течений $v_{\text{СР ТЕЧ}}$. Соответствующие величины уширений спектра можно оценить из соотношений

$$\Delta f_{D-x(nf)} = (L_{(nf)} / \lambda_{(nf)}) \times (v_{\text{СР ТЕЧ}})'_x, \dots, \Delta f_{D-t(nf)} = (T_{И} / \lambda_{(nf)}) \times (v_{\text{СР ТЕЧ}})'_t, \quad (6),(7)$$

где $(v_{\text{СР ТЕЧ}})'_x, (v_{\text{СР ТЕЧ}})'_t$ – частные производные по x, t ; $T_{И}$ – время измерений.

Как следует из представленных выше соотношений (5) – (7), результирующее уширение доплеровского спектра эхосигналов кратных частот (статистический момент второго порядка) имеет большую величину для более высокочастотных сигналов, что обеспечит большую информативность, разрешающую способность и чувствительность устройства в режиме моностатического доплеровского измерителя скорости течений при дистанционном зондировании водных объемов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букатый В.М., Дмитриев В.И. Гидроакустические лаги. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 176 с.
2. Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В. Гидроакустические навигационные средства. – Л.: Судостроение, 1983. – 264 с.
3. Маленькая энциклопедия. Ультразвук. Глав. ред. И.П.Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400с.
4. Богородский В.В., Яковлев Г.В., Коретин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 263 с.
5. Гусев Н.М., Яковлев Г.В. Гидроакустические доплеровские лаги // Судостроение за рубежом. 1976. №5. С.53–66.
6. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
7. Т.Дж. Мюрр. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков //Акустика морских осадков/ Под ред. Ю. Ю. Житковского. – М.: Мир, 1977. – С.227 – 273.
8. Волощенко В. Ю., Максимов В. Н. Нелинейные гидроакустические системы // Сб. тез. докл. 1-го Всесоюз. совещ.-семина. молод. ученых. Глубоководные системы и комплексы. – Черкассы, 1986. – С. 73 – 77.
9. Волощенко В.Ю., Максимов В.Н., Волощенко А.П., Куповых В.Г. Пат.75062 РФ. 2008. МКИ G01S 15/00. Доплеровская локационная система. Оpubл.20.07.2008 г. Бюл.№20.
10. Волощенко В.Ю., Чернов Н.Н., Волощенко А.П., Куповых Г.В. Пат.79187 РФ. 2008. МКИ G01S 15/00. Многоуровневая импульсная доплеровская навигационная система. Оpubл.20.12.2008 г. Бюл.№35.

Волощенко Вадим Юрьевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: Vigcorp@mail.ru

347935, Россия, г.Таганрог, ул.Чехова, д.154 А, кв.10, тел.: 8(8634)37-17-95

Voloshchenko Vadim Yurievich

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: Vigcorp@mail.ru

Flat 10, corp. A, № 154, Chekhov Street, Taganrog, 347935, Russia

Ph: 8(8634) 37-17-95

УДК 639.2.081.7; 528.26 (268.45)

Е. Н. Гаврилов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ЗАПАСА
ЛАМИНАРИЕВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ**

В докладе представлены методические особенности мониторинга по оценке запаса ламинариевых водорослей с использованием технических средств гидро-