



УДК 551.463.2 (262)

Е. Н. Сибирцова, вед. инж.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИХ СЛОЁВ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ И МОРЯХ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО БАСЕЙНА: ОБЗОР

В результате анализа литературного материала описаны ключевые этапы открытия и исследования звуко-рассеивающих слоёв, показаны основные тенденции развития гидроакустических методов изучения водных экосистем. Раскрыты наиболее актуальные вопросы, определяющие преимущества и ограничения этого направления.

Ключевые слова: гидроакустика, планктон, нектон, миграции, Мировой океан, Средиземное море

Разработка и совершенствование акустических методов гидробиологических исследований становится всё более актуальной задачей, поскольку, являясь дистанционными, они не нарушают естественный ход процессов в биологических системах [6, 14, 31, 38]. Это позволяет экспрессно оценивать продуктивность регионов, особенности пространственно-временной структуры звуко-рассеивающих слоёв (ЗРС) и провести в ряде случаев идентификацию гидробионтов-рассеивателей. Это особенно важно для тех регионов Мирового океана, которые находятся в условиях выраженного антропогенного пресса. Именно к таковым относится бассейн Средиземного моря, к которому в последние десятилетия обращено внимание научных, общественных организаций и правительств Европейского Сообщества [19, 21, 22, 23], поскольку экосистемы некоторых его регионов (Адриатическое, Чёрное и Азовское моря, Тунисский пролив) находятся в критическом состоянии [39, 42, 48, 62]. Организация с помощью акустических экспресс-методов действенного мониторинга экосистемы морей Средиземноморского бассейна, обеспечивающей проживание в пределах своей акватории более 400 млн. жителей, относится к числу наиболее актуальных задач.

К сожалению, несмотря на важность развития представлений о методах гидроакустических исследований в океанологии и используемых при этом аппаратных комплексах, число литературных обзоров, в которых анализировались бы особенности опубликованных методик, не только крайне ограничено, но и вообще не проводилось в последнее десятилетие [7, 8]. Именно эта задача стала определяющей при подготовке данной публикации.

Известно, что глубина залегания ЗРС и интенсивность рассеяния в них акустической посылки зависит от состава, концентрации и распределения пелагической фауны, приуроченной к этим слоям и от частоты эхолоцирования [14]. Являясь скоплением мезопелагических рыб, головоногих моллюсков, сифонофор, ракообразных и других организмов, ЗРС широко распространены по Мировому океану и их изучению посвящена обширная литература [4, 14, 24, 31, 41, 44, 47, 51, 52, 62 и др.].

Впервые звуко-рассеивающие слои (ЗРС) зафиксировали в начале сороковых годов 20-го столетия, когда в целях обороны и военной навигации гидроакустические исследования вышли в открытый океан. Так, в 1942 г. американские учёные из Сан-Диего стали отмечать, кроме записей отражений от дна и от подводных лодок, появление характерных

помех на экранах гидролокаторов. Помехи напоминали слабое отражение от дна («ложное дно»), но регистрировались на глубине 1500 футов в то время, как исследования проводились в районе с глубиной 12000 футов. Кроме того, в отличие от записей компактных косяков рыб, обнаруженные слои охватывали большую акваторию, сохраняли определённое постоянство расположения по глубине в исследуемом районе [34]. Характерное свойство, присущее ЗРС – суточные вертикальные миграции (опускание до нескольких сот метров днём и подъём к поверхности ночью) – стало решающим доказательством гипотезы о биологической природе рассеивателей, т. к. вести себя подобным образом в океане могут только живые организмы.

Активные исследования в области эхолоцирования рыб с помощью навигационных эхолотов возобновились после второй мировой войны. Большое различие между интенсивностями эхосигналов, отражённых от грунта, на величины которых были настроены приёмные антенны эхолотов, и от рыбных скоплений, не давали реальной картины распределения рыбных косяков и тем более не могли применяться для исследования скоплений планктона. Успешность применения для этих целей методики взрывных источников звука (впервые использованной в 1951 г. и подробно описанной в 1952 г. [33]) неоднократно затем подвергалась критике И. Б. Андреевой. Вместе с тем, именно она совместно с Ю. Ю. Житковским предложила методику заглуплённого взрыва, разработанного в 1968 г. [2]. Оба метода требовали предварительного выбора наиболее подходящей глубины для точки излучения (взрыва) и приёма, которую выбирали в зависимости от глубины залегания изучаемых скоплений рассеивателей. Несмотря на методологические сложности и погрешности обоих методов, результатом анализа этих исследований стала одна из первых классификаций гидробионтов, населяющих ЗРС [1]. Для удобства акустических измерений биообъекты были классифицированы по их акустическим свойствам, а не по таксономической принадлежности. Было выде-

лено 3 группы организмов: с газовыми полостями в теле (в первую очередь, плавательные пузыри); животные с относительно жёсткими элементами тканей – скелетом, панцирем и т. д. и, наконец, гидробионты со студенистым телом без газовых полостей и жёстких включений [1]. Классической и часто используемой за рубежом является в настоящее время классификация [31], по которой организмы-рассеиватели также подразделяются на три группы: флюидообразные (эуфаузииды, копеподы); с плотными покровами (птероподы); с газовыми включениями (сифонофоры). Наиболее развёрнутая, состоящая из 5 групп организмов-рассеивателей, классификация составлена Э. П. Битюковым и Ю. Н. Токаревым [14].

Интенсивное развитие гидроакустики в течение 1970-х – 1980-х гг. способствовало разработке высокоэффективных научных эхолотов (двух- и сплитлучевые системы), с усовершенствованными механизмами калибровки и определения силы цели. Такая совершенная аппаратура позволяла изучать ЗРС, населённые не только рыбами, но и зоопланктоном [28]. Выявление пространственно-временных особенностей ЗРС верхнего деятельного слоя океана и надёжная идентификация биологических рассеивателей разного размера и различной видовой принадлежности стали возможным, благодаря применению современных многочастотных (многолучевых) систем (38, 70, 120, 200, 420 кГц), технические возможности которых позволяют отфильтровать «шумы» (помехи, имеющие физическую природу), разграничить рыб и планктон [11, 14, 40, 44, 54, 55]. Эти системы позволяют перейти на качественно новый уровень инструментальных исследований тонкой структуры ЗРС, которыми однолучевые акустические системы не обладают в принципе [17, 32, 37, 49, 53, 55]. При единичном зондировании однолучевые эхолоты отображают одномерную картину вертикального распределения рассеянного сигнала, многолучевые – двумерную. При движении или дрейфе судна эхолотами регистрируются соответственно двух- и трёхмерные картины рассеяния. Такие работы

важны не только для идентификации гидробионтов-рассеивателей, но и для понимания причин формирования их скоплений и динамики численности популяций [27].

Не решённой до сих пор проблемой гидроакустического метода исследования ЗРС является видовая идентификация рассеивателей и верификация измерений акустического рассеяния. Эта задача не относится к числу простых и решается на двух уровнях: 1) при сравнительно однородном в качественном отношении составе ЗРС достаточно ограничиться сравнением состава контрольных уловов на тех глубинах, где зарегистрированы скопления; 2) создание теоретических и эмпирических моделей, позволяющих рассчитать интенсивность рассеяния с учётом акустических свойств данного вида планктёров, их концентраций и размерной структуры популяций [6]. Важно принять во внимание также, что для гидробиологов не всегда приемлема предлагаемая теорией гидрофизических процессов жёсткая обусловленность масштабов временной и пространственной изменчивости ЗРС океана. Действительно, с этой точки зрения нельзя объяснить явление вертикальных миграций морских организмов с амплитудой в сотни метров, пересекающих значительные градиенты гидрологических параметров [14].

Необходимость сочетания акустического метода с биологическим с целью получения наиболее точных результатов была указана ещё в [15]. Но и такой подход требует определённых условий для получения достоверного материала. При использовании одночастотного эхолота может возникнуть проблема несоответствия акустических данных с материалами биологических проб. Например, вносящая существенный вклад в акустическое рассеяние сифонофора может быть не сохранена при отборе биологических проб, поскольку повреждается сетями и её пневматофор разрушается градиентом давления. Не удивительно, что данные акустики и биомассы в таких случаях не коррелируют. Существенно лучшие резуль-

таты получаются при использовании многочастотного эхолота [26].

Модели дают возможность детально оценить вклад отдельной особи в суммарную силу рассеяния ЗРС. Форма тела зоопланктёров, как правило, сложна, поэтому в создании математических моделей главным является оценка реальной формы гидробионтов. Это важно для их размерной идентификации, поскольку акустические параметры рассеивателей определяются поперечным сечением обратного рассеяния (σ), измеряемого в единицах площади [м²] или силой цели (TS) [дБ] [14, 46]. Значения TS и особенно её зависимость от частоты излучения гидроакустической аппаратуры и длины тела биообъекта устанавливают экспериментальным путём *in situ* или в специальных установках, а также рассчитывают по аналитическим моделям.

В моделировании параметров звукорассеяния одиночных биообъектов больше всего внимания уделялось копеподам и, особенно, эуфаузидам. В ранних моделях одиночных рассеивателей рассматривались гомогенные сферы без учёта формы тела [16, 29, 36, 56, 57]. В последующих усовершенствованных моделях были учтены все углы наклона биообъектов в пространстве [31, 59, 60] и влияние морфологических особенностей, включая изгибы продольной оси тела, заострённость форм, свойства покровных тканей и т.п. [45, 59]. С помощью моделирования было показано, что «флюидообразные» гидробионты могут считаться жидконаполненной сферой (например, копепода), для которых их экзоскелет при всех значениях силы целей не вызывает сдвиг волн. Другие гидробионты – эуфаузида, амфиподы, хетогнаты, сальпы – могут идентифицироваться как жидконаполненные цилиндры, могущими быть прямыми, изогнутыми, шершавыми или гладкими [60]. Кроме того, поскольку свойства тканей гидробионтов-рассеивателей исследуемых групп организмов близки к показателям воды (до нескольких процентов), малейшие изменения параметров среды вызывают серьёз-

ные изменения уровня акустического рассеяния.

Кроме того, малейшие изменения акустических свойств тканей могут привести к существенной ошибке в вычислениях. Поэтому в моделях [29] учитывались параметры, показывающие отношение величины плотности сферы к плотности окружающей среды и отношение скоростей звука в среде и покровных тканях гидробионтов. Одними из первых обратили внимание на этот факт российские исследователи [9], приведя расчёты эффективного поперечного сечения креветки и эуфаузииды с учётом малой толщины хитиновых покровов ракообразных. Она может меняться от самой тонкой, когда отношение внутреннего к внешнему радиусу $(r_2/r_1)_{\max}$ изменяется от 0.998 до 0.950.

Практическое моделирование рассеяния звука от единичных рассеивателей с твёрдыми эластичными покровами остаётся нерешённой проблемой из-за возрастания рассеяния за счёт суперпозиции целого ряда процессов (отражения звуковых волн от наружной поверхности покровов, а также вдоль покровов, внутренней стороны покровов и внутри самих покровов), вносящих вклад в общую энергию рассеяния [60]. Животные с газовыми включениями (сифонофоры, рыбы) создают рассеяние как от тканей, так и от газовых включений. В целой серии работ [58, 60] рассчитывалось рассеяние от сферической оболочки, прямого цилиндра конечной длины, вытянутого сфероида и универсально изогнутого цилиндра конечной длины, заполненных как водой, так и воздухом, и с разной толщиной оболочки. В результате для каждого отдельного случая были выведены индивидуальные и резко отличающиеся от других характеристики рассеяния – «акустические росписи». Результаты теоретических построений достаточно хорошо сочетались с результатами экспериментальных работ, которые проводились на рыбах [6, 10, 12, 20, 25], кальмарах [18], креветках [13, 18], эуфаузиидах [62], копеподах [62], гетероподах [18], желетелых [3, 18, 20, 35, 50, 52, 62]. Эксперименты подтвердили зависимость параметров силы цели рассеивателей от глубины нахождения биообъекта, ориентации в пространстве или угла наклона

Морський екологічний журнал, Отд. вып. № 2. 2011

тела относительно горизонтального положения, физиологических параметров (жирности, наполнения желудка, состояния гонад, объёма и формы плавательного пузыря) и от плотности скопления [6].

Показав существенные отличия в зависимостях рассеяния поперечного сечения эуфаузиид различных размеров от частоты излучения и организмов одного размера на разных частотах, исследователи пришли к основополагающим выводам [30]: с возрастанием линейных параметров рассеивателей возрастает сила рассеяния; при рассеянии на меньшей частоте проявляется наибольшая чувствительность к более крупным объектам, величина радиуса тела которых более 2 мм, а при возрастании частоты эхолоцирования большая чувствительность проявляется к мелким объектам, с радиусом тела менее 1 мм.

Обширный материал полевых исследований пространственно-временной структуры ЗРС верхнего продуктивного слоя Атлантического океана и морей Средиземноморского бассейна накоплен в отделе биофизической экологии ИнБЮМ НАН Украины в результате научных рейсов НИС «Академик Ковалевский», НИС «Профессор Водяницкий», НИС «Михаил Ломоносов», НИС «Академик Алексей Крылов» и ряда судов иных ведомств. Оценка пространственно-временных параметров акустического поля пелагиали в различных регионах Атлантики на синоптических и мезомасштабах показала высокую корреляцию СООРЗ с гидрологическими и биологическими характеристиками водных масс этого региона [14]. Также была показана зависимость величины СООРЗ от количественных характеристик (численности и биомассы) пелагических рассеивателей, их морфометрических и морфологических характеристик.

Специфическое использование гидроакустического метода описано в [43], где особенности акустического рассеяния (полученные с помощью теоретического моделирования и в результате экспериментов) были сгруппированы по акустическим категориям и проде-

монстрированы на новых синтетических моделях. Показано, что синтетические эхограммы с их алгоритмами колорирования могут эффективно применяться в случае исследования скоплений, стай и слоёв множественных целей (мезозоопланктона и рыб с плавательным пузырьём). Показано удобство визуализации различных категорий, когда они одновременно встречаются на одной эхограмме, но остаётся открытым вопрос о полезности системы категорий при присвоении подходящей категории какому-либо объёмному сегменту. В таком случае пространственное перекрытие одного сегмента другим не позволяет достоверно трактовать результаты.

Современный уровень инструментальной базы, усовершенствование методик получения и статистического анализа данных гидроакустических параметров позволяют накапливать объёмные массивы данных о природе ЗРС. Однако для успешной акустической регистрации рассеивателей важно учитывать следующие аспекты их биологии:

- реакцию гидробионтов-рассеивателей (например, мезопелагических рыб) на шум корабля, что может вызвать их перераспределение и, как правило, уход в более глубокие слои воды, в результате чего снижаются акустические оценки плотности скоплений рассеивателей;
- нахождение гидробионтов-рассеивателей во время гидроакустических съёмок в самых поверхностных слоях пелагиали или у самого дна (2 – 3 м), т. е. в так называемой «мёртвой зоне», которая недоступна гидроакустической аппаратуре вертикального зондирования;
- внутрисуточное перераспределение планктонтов, изменение их ориентации по направлению к излучателю акустического сигнала и скорости движения в дневное и ночное время при циркадных миграциях, от чего зависит сила цели;
- скорости и направления миграций в учётный период;

- предельные глубины обитания гидробионтов-рассеивателей данного вида, на которых необходимо проводить гидроакустическое зондирование для их полного учёта [6].

Актуален вопрос о вкладе скоплений желетелых организмов в формирование акустического поля [24]. В данном случае трудно однозначно определить, что именно вызывает рассеяние: сами желетелые организмы, высокие концентрации копепод и диатомей, рассеянные среди желетелых, либо остатки тел копепод в их желудках. Дифференцирование параметров рассеяния от медуз и от амфипод, находящихся в их желудках, демонстрирует возможность детального анализа подобных случаев [20]. При этом используются и аналитическое моделирование, и данные полевых наблюдений.

Чрезвычайно сложным является решение вопроса, поставленного ещё более 50 лет назад [5], о взаимообусловленном вертикальном распределении различных групп зоопланктона в ЗРС и механизмах их взаимодействия. В подобных работах последнего десятилетия при исследовании вертикального распределения *Calanus helgolandicus* и *Sagitta setosa* в Чёрном море [46] и выявлении доминирующих групп рассеивателей в Мексиканском заливе [52] успех был достигнут при одновременном использовании планктонных сетей, видеоаппаратуры и гидроакустических комплексов.

Таким образом, несмотря на очевидные достижения последних десятилетий в развитии гидроакустической аппаратуры и многочисленные публикации о географии, интенсивности и суточной variability ЗРС, акустические исследования всё ещё остаются достаточно приблизительными и пока не относятся к числу количественных методов гидробиологии. Это объясняется, прежде всего, тем, что различные методические приёмы и инструментальная база делают невозможным сравнительный анализ полученных разными исследователями результатов. Поэтому важной представляется задача оценки акустических характеристик

водных масс различных регионов, их изменчивости на различных масштабах пространства и времени, а также связи с биологическими и

гидрофизическими характеристиками по единой методике с использованием унифицированных комплексов акустической техники, созданной с применением современных информационных технологий [14].

1. Андреева И. Б. Природа рассеивателей и частотные свойства ЗРС океана // *Океанология*. – 1972. – **12**, № 6. – С. 982 – 986.
2. Андреева И. Б., Житковский Ю. Ю. Новые данные о ЗРС // *Океанология*. – 1968. – **13**, № 5. – С. 931 – 932.
3. Андреева И. Б., Самоволькин В. Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 104 с.
4. Андреева И. Б., Галыбин Н. Н., Тарасов Л. Л., Толкачёв В. Я. Акустическая интенсивность звукорассеивающих слоёв центральной Атлантики // *Акуст. журн.* – 2000. – **46**, № 1. – С. 21 – 27.
5. Беклемишев К. В. Звукорассеивающие слои в море и вопрос о вертикальном распределении зоопланктона и рыб // *Успехи совр. биол.* – 1956. – **41**, № 1. – С. 90 – 96.
6. Гидроакустический учёт ресурсов Байкальского омуля / В. И. Кудрявцев, Е. В. Дзюба / Новосибирск: Наука, 2009. – 244 с.
7. Житковский Ю. Ю., Мозговой В. А. Звукорассеивающие слои в океане (обзор) // *Океанология*. – 1980. – **20**, № 5. – С. 792 – 805.
8. Кашкин Н. И. Оценка распределения и концентрации планктона с помощью гидроакустической аппаратуры. – В кн.: *Современные методы количественной оценки распределения морского планктона*. – М.: Наука, 1983. – С. 222 – 237.
9. Лебедева Л. П. Рассеяние звука планктонными животными, малыми по сравнению с длиной звуковой волны // *Океанология*. – 1971. – **11**, № 6. – С. 1075 – 1096.
10. Мозговой В. А. Определение параметров рыб звукорассеивающих слоёв и их поведения при миграциях по спектрам рассеянных акустических сигналов // *Океанология*. – 1986. – **26**, № 5. – С. 751 – 760.
11. Николаев А. В. Практика использования эхолотов ЕК-500 в ТИНРО-Центре для оценок запасов гидробионтов // *Вопросы промысловой гидроакустики: Сб. научн. тр.* / – Москва : ВНИРО, 1999. – С. 6 – 25.
12. Самоволькин В. Г. Зависимость сечения обратного рассеяния звука небольших рыб, ракообразных и медуз от их ракурса // *Океанология*. – 1974. – **14**, № 5. – С. 806 – 812.
13. Самоволькин В. Г. Обратное рассеяние звуковых волн креветками // *Океанология*. – 1980. – **20**, № 36. – С. 1015 – 1020.
14. Токарев Ю. Н. Основы биофизической экологии гидробионтов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
15. Чиндонова Ю. Г., Кашкин Н. И. Сравнение биологического и акустического методов оценки звукорассеивающих слоёв // *Океанология*. – 1969. – **9**, № 3. – С. 528 – 539.
16. Andersen V. Sound scattering from a fluid sphere // *Acoust. Soc. Am.* – 1950. – № 22. – P. 426 – 431.
17. Axenrot T., Ogonowski M., Sandstroem A. et al. Multifrequency discrimination of fish and mysids // *ICES J. Mar. Sci.* – 2009. – № 66. – P. 1106 – 1110.
18. Benoit-Bird K. J., Whillow W. L. Au. Target strength measurements of Hawaiian mesopelagic boundary community animals // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2001. – **110**, № 2. – P. 812 – 819.
19. Bianchi C. N., Morri C. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research // *Mar. Pollution Bulletin*. – 2000. – **40**, № 5. – P. 367 – 376.
20. Briery A. S., Axelsen B. E., Boyer D. C. et al. Single-target echo detections of jellyfish // *J. Mar. Science*. – 2004. – № 61. – P. 383 – 393.
21. Boero F., Bonsdorff E. A. conceptual framework for marine biodiversity and ecosystem functioning // *Mar. Ecol.* – 2007. – **28**. – P. 134 – 145.
22. Boudouresque C. F., Verlaque M. Biological pollution in the Mediterranean Sea: invasive versus introduced macrophytes // *Marine Pollution Bulletin*. – 2002. – **44**, № 1. – P. 32 – 38.
23. Camiñas J. A., Báez J. C., García-Soto C. et al. Biodiversity changes of the water column large pelagic species in the Alboran Sea // *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.* – 2007. – № 38. – 442 p.
24. Colombo G. A., Mianzan H., Madirolas A. Acoustic characterization of gelatinous-plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf // *J. Mar. Science*. – 2003. – № 60. – P. 650 – 657.
25. Ding L. Direct laboratory measurement of forward scattering by individual fish // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1997. – **101**, № 6. – P. 3398 – 3404.
26. Flagg C. N., Smith S. L. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance // *Deep-Sea Res.* – 1989. – № 36. – P. 455 – 474.
27. Goodman R. R. A brief history of underwater acoustics / Ed. By Bass H. E., Cavanaugh W. J. in: *ASA at 75 // Acous. Soc. Amer. Melville*, 2004

28. Green C. H., Wiebe P. H. Bioacoustical oceanography: new tools for zooplankton and micronekton research in the 1990s // *Oceanography*, Wash. – 1990. – № 4. – P. 12 – 17.
29. Greenlaw C. F. Acoustical estimation of zooplankton populations // *Limnol.Oceanogr.* – 1979. – **4**, № 2. – P. 226 – 242.
30. Greenlaw C. F., Johnson R. K. Multiple-frequency acoustical estimation // *Biol. Oceanogr.* – 1983. – **2**, № 2-3-4. – P. 227 – 252.
31. Griffiths G., Fielding S., Roe H. S. J. Biological – Physical – Acoustical interactions // *The Sea*. 2002. – № 12. – P. 441 – 474.
32. Han Ch.-H. Quantification of the abundance and distribution of the common jellyfish *Aurelia aurita* s.l. with a Dual-frequency Identification SONar (DIDSON) // *J. Planct. Res.* – 2009. – **31**, № 8. – P. 805 – 814.
33. Hersey J. B., Jonson H. R., Davis L. C. Recent findings about the deep scattering layers // *J. Marine Res.* – 1952. – **11**, № 1. – P. 1 – 9.
34. Hersey J. B. A chronicle of man's use of ocean acoustics // *Oceanus*. – 1977. – **20**, № 2. – P. 8 – 21.
35. Hirose M., Mukai T., Hwang D., Kohji I. Target strength measurements on living jellyfish (*Stomolophus nomurai*) // Second International Symposium on Fisheries Science and Technology for Academic Exchange. – 2003. – Hakodate, Japan. – № 5. – P. 25 – 29.
36. Holliday D. V., Pieper R. E. Bioacoustical oceanography at high frequencies // *ICES J. Mar. Sci.* – 1995. – № 52. – P. 279 – 296.
37. Holliday D. V., Donaghay P. L., Greenlaw C. F. et al. Advances in defining fine- and micro-scale pattern in marine plankton // *Aquatic Living Resources*. – 2003. – №16. – P. 131 – 136.
38. Jaffe J. S. Sensing Plankton: acoustics and optical imaging. European Workshop on Harmful Algal Blooms. 2005.
39. Jackson J. B. C., Kirby M. X., Wolfgang H. et al. Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems // *Science*. – 2001. – **293**, № 5530. – P. 629 – 637.
40. Kang M., Furusawa M., Miyashita K. Effective and accurate use of difference in mean volume-backscattering strength to identify fish and plankton // *ICES J. Mar. Sci.* – 2002. – **59**. – P. 794 – 804.
41. Kelly J., Benoit-Bird K. J., Whitlow W. L. Au. Diel migration dynamics of an island-associated sound-scattering layer // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2004. – **51**, № 5. – P. 707 – 719.
42. Kideys A. E. Recent dramatic changes in the Black Sea ecosystem: the reason for the sharp decline in Turkish anchovy fisheries // *J. Mar. Systems*. – 1994. – **5**, № 2. – P. 171 – 181.
43. Korneliussen R. J., Ona E. Synthetic echograms generated from the relative frequency response // *J. Mar. Sci.* – 2003. – № 60. – P. 636 – 640.
44. Korneliussen R. J., Heggelund Yn., Eliassen I. K. et al. Combining multibeam-sonar and multifrequency echosounder data: examples of the analysis and imaging of large euphausiid schools // *ICES J. Mar. Sci.* – 2009. – № 66. – P. 991 – 997.
45. Lavery A. C., Stanton T. K., McGehee D., Chu D. Three-dimensional modeling of acoustic backscattering from fluid-like zooplankton // *J. Acous. Soc. America*. – 2001. – **111**, № 3. – P. 1197 – 1210.
46. Lavery A. C., Wiebe P. H., Stanton T. K. et al. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 2007. – **122**, № 6. – P. 3304 – 3326.
47. Liao C.-H., Lee K.-T., Lee M.-An., Lu Hs.-J. Biomass distribution and zooplankton composition of the sound-scattering layer in the waters of southern East China Sea // *J. Mar. Sci.* – 1999. – **356**. – P. 766 – 778.
48. Micheli F. Eutrophication, Fisheries, and Consumer-Resource Dynamics in Marine Pelagic Ecosystems // *Science*. – 1999. – **285**, № 5432. – P. 1396 – 1398.
49. Mitson R. B., Simard Y., Goss C. Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations // *ICES J. Mar. Sci.* – 1996. – № 53. – P. 209 – 215.
50. Mutlu E. Target strength of the common Jellyfish (*Aurelia aurita*): a preliminary experimental study with a dual-beam acoustic system // *ICES J. Mar. Science*. – 1996. – № 53. – P. 309 – 311.
51. Mutlu E. A comparison of the contribution of zooplankton and nekton taxa to the near-surface acoustic structure of three Turkish seas // *Mar. Ecol.* – 2005. – **26**. – P. 17 – 32.
52. Mutlu E. Acoustical Scattering Layers of two mesozooplanktons as a tool for hydrographic features of the Black Sea // *J. Appl. Biol. Sci.* – 2007. – № 3. – P. 1 – 8.
53. Patel R., Ona E. Measuring herring densities with one real and several phantom research vessels // *ICES J. Mar. Sci.* – 2009. – № 66. – P. 1264 – 1269.
54. Rudstam L. G., Hansson S., Lindem T., Einhouse D. W. Comparison of target strength distribution and fish densities with split- and single-beam echo sounders // *Fish. Res.* – 1999. – № 42. – P. 207 – 214.
55. Simmonds E. J., MacLennan D. N. *Fisheries Acoustics – Theory and Practice* (2nd edition). – Oxford: Blackwell Publishing. – 2005. – 437 p.
56. Stanton T. K. Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1988. – № 83. – P. 55 – 63.

57. Stanton T. K. Sound scattering by cylinders of finite length. II. Elastic cylinders // J. Acoust. Soc. Amer. – 1988. – № 83. P. 64 – 67.
58. Stanton T. K., Chu D., Wiebe P. H. Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups // ICES J. Mar. Sci. – 1996. – № 53. – P. 289 – 295.
59. Stanton T. K., Chu D. Review and recommendations for the modeling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods // ICES J. Mar. Sci. – 2000. – № 57. – P. 793 – 807.
60. Stanton T. K., Reeder D. B., Jech J. M. Inferring fish orientation from broadband-acoustic echoes // ICES J. Mar. Sci. – 2003. – № 60. – P. 524 – 531.
61. Viaroli P., Azzoni R., Bartoli M. et al. Evolution of the trophic conditions and dystrophic outbreaks in the Sacca di Goro lagoon (Northern Adriatic Sea) // Mediterranean Ecosystems: Structure and Processes / Eds. F. M. Faranda, L. Guglielmo, G. Spezie. – Italy: Springer-Verlag, 2001. – P. 467 – 476.
62. Wiebe P. H., Greene C. H., Stanton T. K., Burezynski J. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: empirical studies with a dual-beam acoustical system // J. Acoust. Soc. Am. – 1990. – 88, № 5. – P. 2346 – 2360.

Поступила 12 сентября 2011 г.

Розвиток уявлень про природу шарів, що розсівають звук, у Світовому океані і морях Середземноморського басейну: огляд. О. М. Сібірцова. У результаті аналізу літературного матеріалу описані ключові етапи відкриття і дослідження шарів, що розсівають звук, показані основні тенденції розвитку гідроакустичних методів вивчення водних екосистем. Розкрито найбільш актуальні питання, що визначають переваги та обмеження цього напрямку.

Ключові слова: гідроакустика, планктон, нектон, міграції, Світовий океан, Середземне море

Development of knowledge of sound scattering layers principles in the World Ocean and the Mediterranean seas basin: review. O. M. Sibirtsova. Milestone stages of the sound scattering layers discovery and research are described as a result of literary data analysis. The basic development trends of hydroacoustical methods of aquatic ecosystems exploration are presented. The most current concerning in the concept's advantages and limitations are revealed.

Key words: hydroacoustic, plankton, nekton, migrations, World ocean, the Mediterranean Sea