

**АКАДЕМИК Л.М. БРЕХОВСКИХ В
ОТДЕЛЕ АКУСТИКИ ОКЕАНА ИО РАН**

В.В. Гончаров¹, А.И. Веденёв¹, Т.И. Цыплакова¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: gvy@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 10.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Статья посвящена воспоминаниям о периоде жизни Л.М. Бреховских, когда он возглавлял Отдел акустики океана в Институте океанологии РАН и исследованиям, которые были инициированы им или реализованы под его руководством. Отмечается доброжелательное и внимательное отношение Л.М. к своим сотрудникам и ученикам, организация постоянного общения ученых разных поколений (в формате школы-семинара «Акустика океана»), что являлось залогом плодотворной научной работы коллектива. Представлены некоторые значимые, по мнению Л.М., результаты акустических экспериментов в океане на научно-исследовательских судах Академии наук: обнаружение слаборасходящихся лучевых пучков (1989–1990); эксперименты по акустической томографии как дна океана (пассивная томография 1980), так и водной толщи (1989–1994); обработка данных международного эксперимента (1998–1999) ACOUS.

Л.М. был одним из первых, кто осознал, что акустические методы важны для понимания и количественной оценки физических процессов в океане и в экологии – как средство изучения эффектов воздействия промышленного шума на морскую биоту. Часть исследований, инициированных Л.М. Бреховских, продолжается в Акустических лабораториях Института океанологии РАН и в настоящее время. А именно:

- исследования воздействия промышленных акустических шумов на морских млекопитающих у берегов о. Сахалин;
- пассивная томография океана с использованием окружающего шума океана и по шумам удаленного судоходства по данным международного эксперимента NPAL в Тихом океане, эксперимента 2012 г. во Флоридском проливе (О.А. Годин и др.);
- локальная акустическая томография мелкого моря (эксперименты в Голубой бухте, Геленджик, 2009 и последующие годы).

Ключевые слова: Л.М. Бреховских, пассивная акустическая томография, международные эксперименты NPAL, ACOUS, эффекты промышленного шума на морскую биоту

В этом 2017 г. исполнилось бы 100 лет со дня рождения Леонида Максимовича Бреховских, выдающегося ученого с мировым именем, создавшим новое направление в науке – акустика океана, воспитавшим несколько поколений ученых и оставившим после себя большой багаж знаний в области акустики и океанологии.

Эта статья не является биографическим очерком о ярком жизненном пути выдающегося ученого и человека Л.М. Бреховских, мы просто хотели бы вспомнить о периоде его работы в Институте океанологии РАН и связанных с экспериментами

в океане работах акустических лабораторий (Отдела акустики океана), которые Леонид Максимович считал нашими важными достижениями. Но вначале мы просто не можем не отметить его выдающийся вклад в мировую науку.

Л.М. Бреховских внес большой вклад в развитие теории в области акустики и океанологии и написал свыше 170-ти научных трудов и 20-ти монографий, среди которых особое место занимает монография «Волны в слоистых средах», 1957 и 1973 гг., изданная также в США и Китае и ставшая, по мнению многих ученых как в нашей стране, так и за рубежом, их настольной книгой. До настоящего времени пользуются большой популярностью его книги: «Теоретические основы акустики океана» (1982 г.) в соавторстве с Ю.П. Лысановым., «Введение в механику сплошных сред» (1982 г.) совместно с В.В. Гончаровым, а также фундаментальная монография «Акустика слоистых сред», 1993 г. (совместно с О.А. Годиным). Все эти монографии неоднократно переиздавались в расширенном варианте как в России, так и за рубежом.

Важнейшими в его наследии стали два открытия – подводного звукового канала и синоптических вихрей в океане.

В 1946 г. Леонид Максимович, анализируя результаты опытов Л.Д. Розенберга и Н.И. Сигачева, проведенных в Японском море совместно с другими специалистами из Военно-Морского флота, теоретически объяснил явление подводного звукового канала, которое было всесторонне изучено в его последующих теоретических и экспериментальных исследованиях. Именно это открытие имело далеко идущие последствия для акустических исследований во всем мире и ознаменовало возникновение новой дисциплины – акустики океана. Л.М. Бреховских был среди первых, кто понял, что акустические методы могут сыграть важную роль в понимании и количественном описании физических процессов в океане.

В 60-е годы Л.М. начинает активно работать на стыке двух наук – акустики и океанологии. Он обосновал перспективность и целесообразность широкой программы акустико-океанологических исследований, считая, что в изучении океана акустика должна играть первостепенную роль. В 1970 г., совместно с В.Г. Кортон, М.Н. Кошляковым и Л.М. Фоминым, им было открыто явление образования синоптических (мезомасштабных) вихрей в открытом океане. Это решительно изменило существовавшие в то время представления, будто в океане преобладает стационарная крупномасштабная циркуляция. Было выяснено, что мезомасштабные явления концентрируют более чем 90% кинетической энергии океана. Это открытие стало одним из самых крупных в истории науки об океане.

За большие заслуги в развитии советской науки и техники, вклад в мировую науку Л.М. Бреховских был удостоен множества правительственных наград и премий – в 1987 г. удостоен звания Героя Социалистического Труда, трижды награжден Орденом Ленина, был лауреатом Государственной, Сталинской, Ленинской и ряда международных премий.

Начать же хотелось бы с воспоминаний некоторых его учеников об отношении Л.М. к ним и другим сотрудникам. Л.М. стал научным руководителем (и фактически

оставался им все остальные годы), когда мы, студенты 3-го курса МФТИ (Куртепов В.М., Гончаров В.В., Воронович А.Г., Годин О.А. и др.), пришли в Акустический институт, а затем, уже в ИО РАН, пришли и другие молодые сотрудники (Веденев А.И., Моисеев А.А., Харькин С.А. и др.). Удивительно, как легко можно было встретиться с ним как его сотрудникам, так и совсем еще молодым студентам. При общении с Л.М. никогда не возникало ощущения дистанции, разделяющей его, большого учёного, академика, и его собеседников. Он мог терпеливо и с доброжелательным вниманием выслушивать и обсуждать наши (часто бредовые) идеи.

Для того чтобы помочь становлению молодых учёных, Л.М. устраивал общие встречи своих студентов и аспирантов, на которых любой из нас мог рассказать о своих работах и возникающих проблемах, обсудить их и т. п. В начале 70-х годов Л.М. организовал в АКИНе небольшую группу («бригаду», как он её называл) из 6–8 своих сотрудников и студентов (аспирантов), интересующихся нелинейной теорией распространения волн различной природы (прежде всего, конечно, волн в океане). На заседаниях этой группы ее участники докладывали свои работы, рассказывали о новых интересных статьях, появившихся в печати, слушали лекции приглашенных Л.М. известных ученых из разных городов. Такой метод работы, по нашему мнению, был достаточно результативным и очень помог нам (молодым участникам этой группы В.М. Куртепову, А.Г. Вороновичу, В.В. Гончарову) в дальнейшей научной работе.

Такие доброжелательные взаимоотношения между собой и со студентами, аспирантами и сотрудниками других руководителей, стремление помочь сохранялись и в неформальной обстановке. Мы часто в коридорах и других подобных местах обсуждали свои проблемы, методы возможного их решения и т. п. Были хорошо осведомлены о работах друг друга. Это, например, помогло тем из нас, кто в начале 1980-х годов пришел в ИО РАН, создать комплекс программ по распространению звука в океане как на институтских, так и на корабельных ЭВМ.

Л.М. хорошо понимал, что условием плодотворной научной работы является постоянное общение ученых, прежде всего, важного для молодых сотрудников из разных научных центров нашей обширной страны от Калининграда до Владивостока. Поэтому в конце 70-х годов прошлого века им была организована школа-семинар «Акустика океана», которая регулярно проводится и в настоящее время. Но хотелось бы отметить, что Л.М. называл это мероприятие именно «школой», на которой известными учеными должны быть прочитаны 20–30 лекций по различным проблемам акустики океана, прежде всего, предназначенных для молодых ученых. Обсудить эти проблемы и рассказать о своих работах они могли бы на дополнительных заседаниях. Именно таким и был формат первых 6-ти Школ (1980–1990 гг.), после чего они временно прекратились из-за малого финансирования науки в 90-е годы. Этому, по-видимому, также способствовали и объективные причины: дефицит молодых ученых и др. Возобновились Школы в 1998 г., но уже в виде обычных конференций (около сотни устных и стендовых докладов

и 4–6 пленарных, которые по традиции назывались лекциями). Прочитанные лекции на первых 6-ти школах публиковались в издательстве «Наука», а труды 7–15 школ – в издательстве «ГЕОС». Кроме того, имеется электронная версия трудов всех школ: с 1-й по 14-ю на CD-диске и 15-й на сайте ИО РАН, где, возможно, следует разместить и первые 14, чтобы напомнить о некоторых изложенных в них проблемах (в том числе и забытых), которые могут быть решены на современном этапе развития науки и техники.

Переходя к работам в Отделе акустики океана ИО РАН, отметим основные этапы его создания:

1977 – создан кабинет акустики, основная задача – разработка автономных систем обнаружения на основе совместных работ с СахКНИИ;

1978 – по совместному решению директора Института Мони́на А.С. и академика-секретаря Отделения Бреховских Л.М. на основе кабинета акустики создан Отдел акустики океана. По решению Президиума АН СССР, Институту целевым образом для создания Отдела акустики было передано 60 единиц (человек);

к 1980 г. Отдел акустики океана был укомплектован, в значительной степени специалистами из АКИН. Зав. отделом стал академик Бреховских Л.М. Для проведения научных исследований по различного рода вопросам акустики океана в отделе созданы три лаборатории: Лаб. шумов и флуктуаций звука в океане (ШИФ, Курьянов Б.Ф.), Лаб. рассеяния и отражения звука (РОЗ, Житковский Ю.Ю.) и Лаб. распространения акустических волн (РАВ, Бреховских Л.М.).

По инициативе Л.М. Бреховских Отдел акустики взял большую оборонную работу по научному обоснованию и построению основ новой автономной скрытой системы обнаружения в любом районе океана с передачей данных по гидроакустическому каналу (тема «Флора»). Были разработаны теоретические основы этой системы, разработаны и изготовлены автономные донные системы приема и обработки акустических данных (всего изготовлено 6 различных типов донных станций), проведены более 10 научных экспедиций в различных районах Мирового океана, в которых исследовались различные проблемы акустики океана, а также проведен ряд успешных испытаний системы обнаружения в открытом океане, в которых впервые для этой цели были использованы автономные вычислительные комплексы. К 1990 г. работы по прикладной тематике были практически прекращены, и Отдел акустики ИО РАН продолжил заниматься фундаментальными научными исследованиями по тематике лабораторий.

Хотелось бы еще раз отметить, что такое же доброжелательное и внимательное отношение Л.М. к своим сотрудникам и ученикам, как в Отделе акустики океана ИО РАН, сохранилось также и в рейсах на НИС, которые регулярно проводились с начала 1980-ых годов до 1994 г. Л.М. часто приглашал нас (на чашку чая и кофе, как он говорил), чтобы обсудить полученные результаты и методику постановки проводимых экспериментов в океане. Хотелось бы отметить также способность Л.М. быстро вникнуть в новую проблему в целом, выделить в ней основное, что, несомненно, помогало планированию и проведению сложных акустических экспериментов в океане и их интерпретации.

В экспедициях проводились, в том числе, и эксперименты по дальнему распространению звука с помощью разработанного и созданного в лаборатории РАВ (В.Г. Селиванов и др.) трехфункционального зонда «Триада» (акустический сигнал, глубина, скорость звука) и 29-элементной 560-метровой позиционируемой вертикальной антенны (Средиземное море, Индийский и Атлантический океаны). Остановимся сначала на некоторых результатах эксперимента по дальнему распространению звука в Канарской котловине Атлантического океана (1989 г.) на двух трассах: Т1 ~ 1125 км и Т2 ~ 3496 км. Поле скорости звука вдоль этих трасс показано на рис. 1.

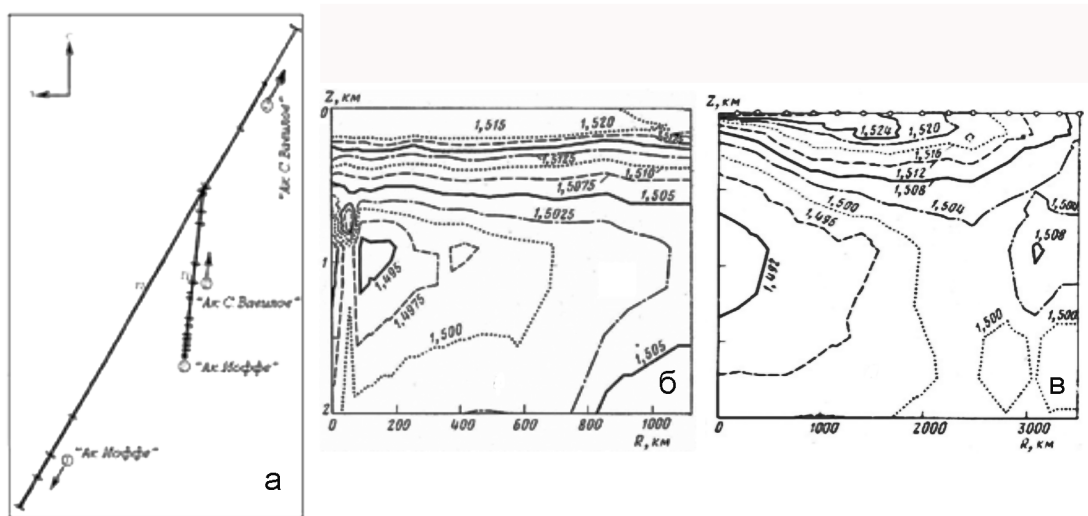


Рис. 1. Схема эксперимента: а – поле скорости звука вдоль трассы 1. Восстановленная линза в начале трассы; б – поле скорости звука вдоль трассы 2.

Звуковой сигнал частоты 137 Гц излучался НИС «Академик Иоффе» и принимался зондом «Триада», спускаемым с борта НИС «Академик Сергей Вавилов», при его последовательном все большем удалении от источника. Поскольку зондом «Триада» измерялись вертикальные профили как звукового сигнала, так и скорости звука, то за время перехода к следующей точке измерения проводился численный расчет акустического поля, который сравнивался с полученным в эксперименте. К нашему удивлению, уже на 1-м шаге (60 км от источника) было обнаружено их существенное различие, которое удалось устранить введением в численный расчет некоторой неоднородности типа линзы средиземноморской воды. К сожалению, из-за дефицита времени не удалось вернуть судно назад и прямыми измерениями описать эту неоднородность, но, тем не менее, Л.М. считал этот факт нашим первым томографическим восстановлением среды.

Л.М. также считал значимым обнаружение в этом эксперименте пучков лучей, названных нами слаборасходящимися (СПЛ), – явления, приводящего к появлению зон относительно высокой интенсивности звука на вертикальных разрезах и связанных с экстремумами зависимости длины цикла лучей от их угла выхода из источника. На верхнем рисунке красными линиями показаны границы (огibaющие)

СПЛ и синими – фонового пучка той же угловой ширины. На нижнем рисунке представлены зависимости от дистанции усредненной интенсивности звука в этих пучках (тем же цветом). Подобный эффект был обнаружен и в Норвежском море (экспедиция 1990 г.), в Арктике (СЛО) и в других районах океана (рис.2).

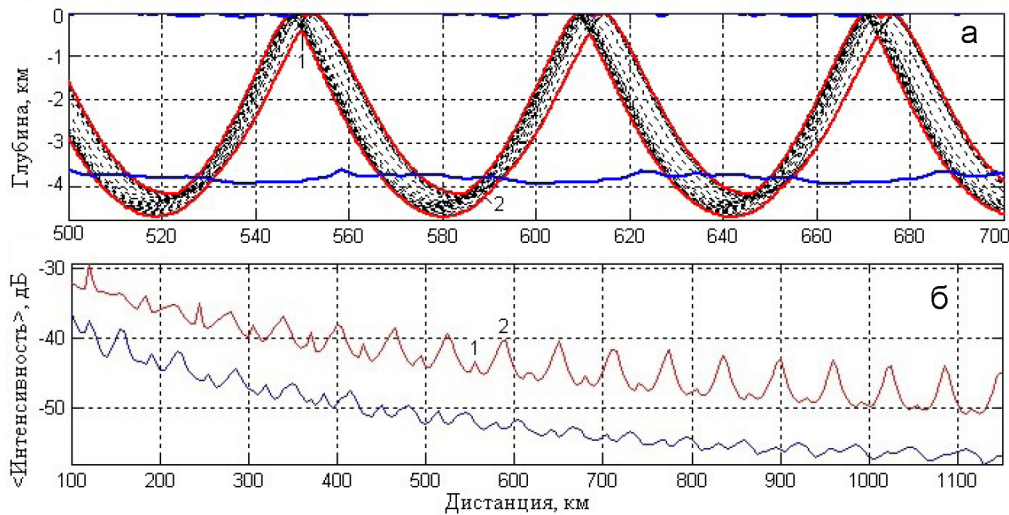


Рис. 2. Слаборасходящийся пучок лучей (-11° , -9°) – красные линии и фоновый (-8° , -6°) – синие: а – границы (огibaющие) лучевых пучков; б – средняя интенсивность звука в пучках.

Л.М. также высоко оценивал первую успешную попытку динамической акустической томографии неоднородностей водной толщи с движущихся судов при помощи протяженной вертикальной антенны на тональном сигнале (Норвежское море, 1990 г., суда «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе»). Проводилась модовая декомпозиция экспериментально измеренного поля, томографическая коррекция среды по методу согласованного поля (см. левый рисунок), а также восстановление местоположения источника звука по корреляции экспериментально измеренного и рассчитанного звуковых полей на вертикальной антенне (правый рисунок). При этом положение максимума функции корреляции, рассчитанной для восстановленной среды (красная линия), существенно ближе к измеренному расстоянию между источником звука и антенной (105 км) (рис. 3).

Экспедиция 1990 г. фактически оказалась последней для проведения нашими силами полноценных акустических экспериментов. Начиная с 90-х годов, стало невозможным организовать совместный рейс двух НИС. Поэтому Л.М. изыскивал возможности участия своих сотрудников в международных томографических экспериментах. Одним из таких проектов был эксперимент THETIS-II с 6-ю стационарными трансиверами (приемно-излучающими системами) в Алжиро-Прованском бассейне Средиземного моря. Сотрудники лаборатории РАВ в 1994 г. приняли участие в этом эксперименте во время рейса НИС «Академик Сергей Вавилов», на котором зондом «Триада» принимался звуковой сигнал с трансиверов во многих точках района эксперимента, что позволило существенно дополнить

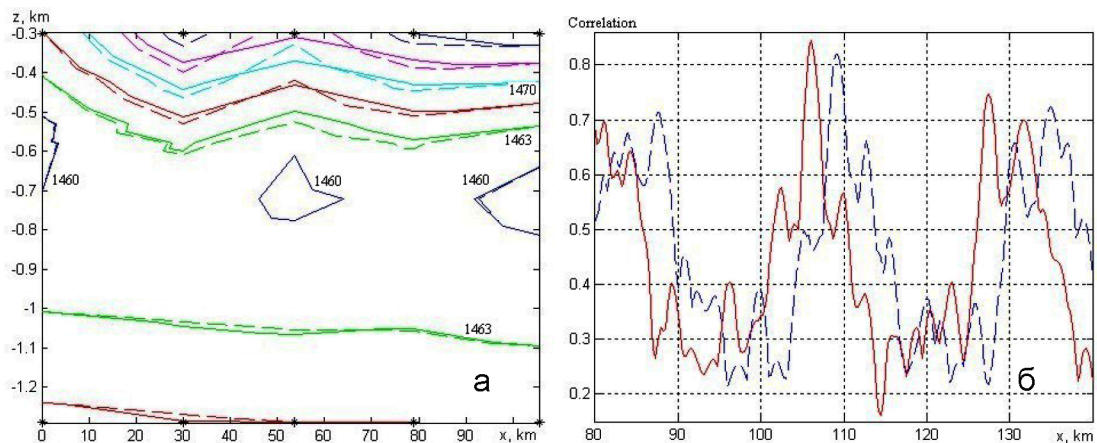


Рис. 3. Поле скорости звука, измеренное – штрихи (а). Восстановление положения источника звука (б).

результаты эксперимента (динамическая томография). Результатом измерений стало доказательство того факта, что перемещающееся внутри стационарного полигона приемное судно существенно увеличивает пространственное разрешение томографической схемы, что позволяет обнаружить и исследовать даже такие неоднородности, как внутритермоклинный вихрь (линза). Восстановление этой неоднородности проводилось по рожденной при обсуждении с Л.М. («за чашкой чая») теоретической идее поэтапной реконструкции трехмерных неоднородностей среды: получение усредненного по глубине возмущения в горизонтальной плоскости (1-й этап), затем восстановление структуры неоднородности в различных вертикальных плоскостях, используя полученные на 1-м этапе данные как априорные (2-й этап). Эта идея была высказана и, кажется, упомянута в одной из наших публикаций за несколько лет до этого, но экспериментальная возможность проверить ее работоспособность появилась только в этом эксперименте. Результаты восстановления представлены на следующем рисунке, где по вертикали отложена глубина в метрах, а по горизонтали – географические координаты (рис 4).

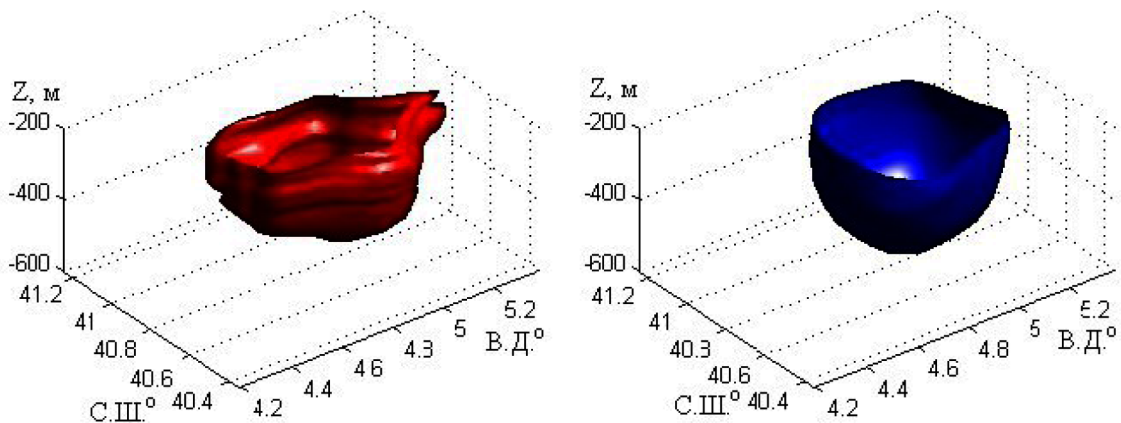


Рис. 4. Изоповерхности, соответствующие значению вариации скорости звука в линзе – 0.75 м/с. Слева – эксперимент, справа – восстановление.

Лаборатория РАВ при содействии Л.М. также принимала участие в международном эксперименте ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound): наблюдение климата Арктики с использованием подводного звука, 1998–1999 гг.) на 1250 км стационарной трассе в СЛО от Земли Франца-Иосифа до моря Линкольна. Сотрудник нашей Лаборатории А.Н. Гаврилов участвовал в установке излучателя звука и вместе с другими сотрудниками Лаборатории – в обработке данных эксперимента, предоставленных нам организаторами проекта. В результате обработки этих данных было зафиксировано дальнейшее потепление слоя Атлантических вод Арктического бассейна. Кроме того, было обнаружено значительное изменение в атлантических водных массах, которое произошло в бассейне Нансена к северу от пролива Франц-Виктория в августе–декабре 1999 г. (см. рисунок). Эти изменения проявились на принимаемом сигнале в виде появления 2-го отклика 1-й моды, который мог возникнуть из-за сильного взаимодействия звуковых мод, обусловленного сближением их дисперсионных зависимостей, вызванным перестройкой профиля скорости звука в двухволноводный. Заметим, что такой же эффект имеет место и при распространении волн любой другой природы. В наших численных экспериментах он наблюдался для внутренних волн. Его экспериментальное подтверждение мы впервые получили именно при обработке данных эксперимента ACOUS. Использование разности времен прихода между отдельными откликами 1-й звуковой моды и позволило определить область на звуковой трассе, где эта мода сильно взаимодействует со 2-й модой, а затем томографическими методами восстановить показанную на рисунке структуру поля скорости звука в этой области (рис. 5).

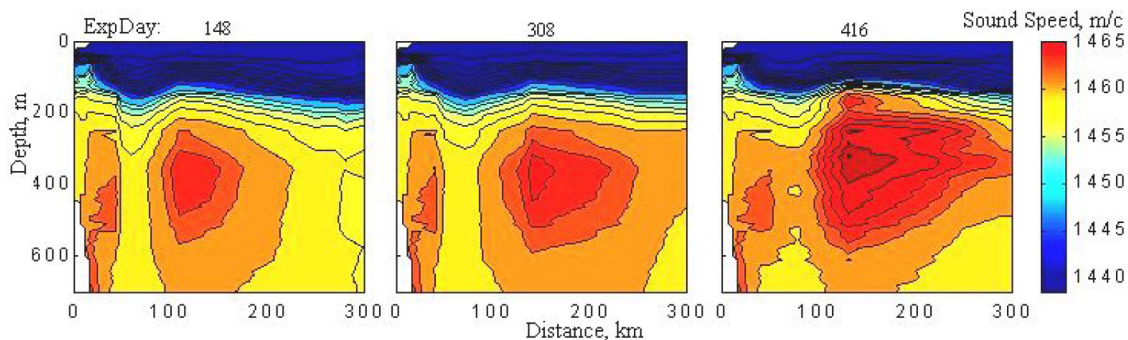


Рис. 5. Восстановленное изменение поля скорости звука на начальном участке трассы.

Было высказано предположение, что именно в виде таких дискретных пятнообразных объектов более теплые воды Северной Атлантики поступают в СЛО через пролив Фрама. Насколько нам известно, этот вывод был косвенно подтвержден проведенными учеными Германии расчетами динамики этих вод в СЛО.

Это была одна из последних работ, в которой Л.М. принимал активное участие. В дальнейшем в акустических лабораториях ИО РАН продолжались исследования по различным направлениям диагностики морской среды акустическими методами. Л.М. был одним из первых, кто понял, что эти методы также важны в понимании и

количественном описании физических процессов в океане. Он всегда поддерживал так называемый метод пассивной акустической томографии, когда не требуется специальной постановки зачастую весьма дорогих акустических экспериментов, а попутно получая необходимые данные при проведении других исследований.

Например, еще в 1980-ых годах в Лаборатории шумов и флуктуаций звука была разработана методика оценки профиля скорости звука в донных осадках, основанная на специальной обработке шумового сигнала уходящего судна, принятого установленной им автономной донной станцией (АДС, см. верхний правый рисунок). В спектре зарегистрированного на дне сигнала наблюдается характерная картина интерференционных линий (верхний левый рисунок), сформированная пришедшими по различным путям сигналами. На текущей функции автокорреляции принятого сигнала (нижний левый рисунок) хорошо виден так называемый разностный годограф зависимости разности времен прихода сигналов от времени эксперимента (дистанции от судна до АДС). Эти годографы и позволяют получить оценку профиля скорости звука в донных осадках, представленную линиями на правом нижнем рисунке (для двух районов установки АДС). Значки соответствуют данным сейсмического зондирования и глубоководного бурения в этих районах (рис.6).

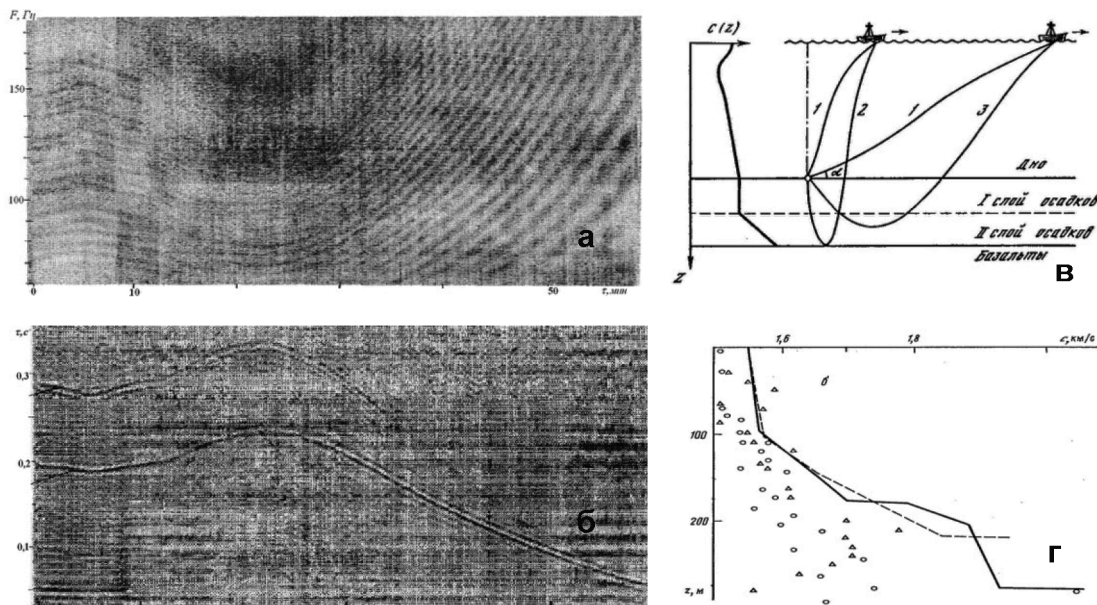


Рис. 6. а – текущий спектр сигнала; б – текущая функция автокорреляции сигнала; в – схема эксперимента; г – восстановление профиля скорости звука в донных осадках.

Если для восстановления профиля скорости звука в осадочных слоях достаточно разового эксперимента с уходящим от АДС судном, то для диагностики временных изменений параметров водной среды можно использовать естественные шумы океана и шумов удаленного судоходства. Теория, восходящая еще к работам С.М. Рытова 1967 г. (тепловые шумы), предсказывает, что взаимная корреляционная функция идеально диффузного, случайного шума, измеренного в двух точках в

неоднородной среде, соответствует функции Грина, описывающей распространение волн во встречных направлениях между этими точками. Т. е. содержит всю информацию о среде, которую можно получить при расположении трансиверов в рассматриваемых точках. В океане шум обладает направленностью, его уровень меняется с глубиной, а детальная информация о расположениях источников шумов, как правило, недоступна. В таких условиях восстановление точных функций Грина по шумам принципиально недостижимо, но в 2006–2010 гг. в ряде теоретических работ Б.Ф. Курьянова и О.А. Година было показано, что возможно определение времен распространения лучей или нормальных волн между рассматриваемыми точками.

В 1998–1999 гг. в северо-восточной части Тихого океана был проведен NPAI Billboard Array Experiment с целью изучения дальнего распространения звука. Попутно, естественно, было измерено и шумовое поле. Данные этого эксперимента P.F. Worcester любезно предоставил О.А. Годину, с которым мы работали по проекту CRDF-РФФИ 2011–2012 гг. В результате их взаимно-корреляционной обработки и были получены времена распространения звуковых сигналов от элементов одной антенны к другой (см. левый рисунок) с точностью, достаточной для реализации пассивной акустической томографии. На правом рисунке показаны некоторые результаты инверсии этих данных по линейной лучевой томографической схеме Манка (рис. 7).

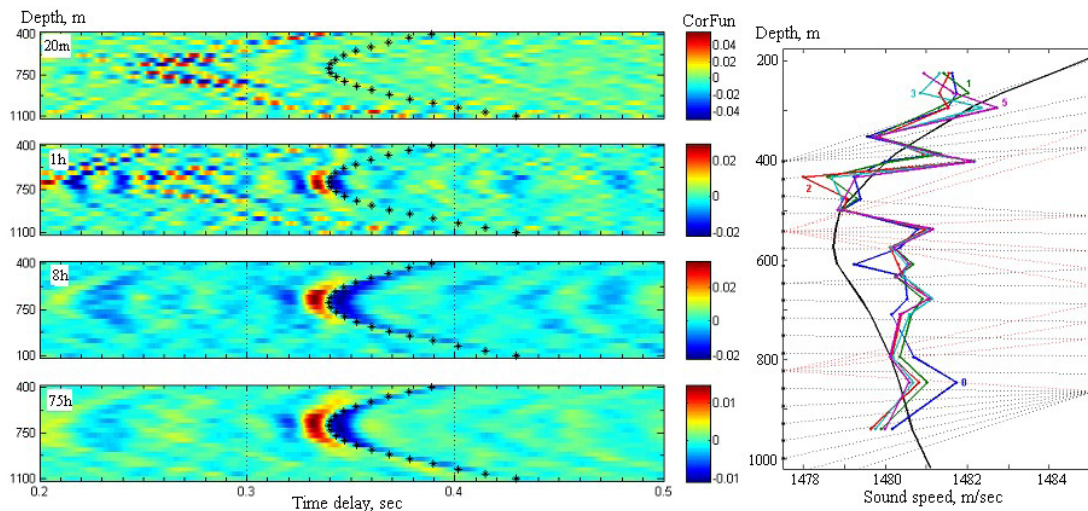


Рис. 7. Слева: оценки функции взаимной корреляции шумов океана для различных времен осреднения. Крестики – рассчитанные времена распространения звука между каждой парой гидрофонов. Справа: результаты инверсии с использованием различного числа лучей между гидрофонами антенн, черная линия – среднегодовой профиль скорости.

Задача пассивной томографии усложняется в мелководных районах, когда на шумовое поле существенно влияет структура морского дна. Исследование возможностей ее использования была проведена на основе экспериментальных данных, полученных в 2012 г. во Флоридском проливе (О.А. Годин и др.) от

двух разнесенных по горизонтали на 5.01 км автономных приемных систем, установленных вблизи дна. Функция взаимной корреляции шумового поля, рассчитанная в полосе 20–70 (с усреднением около шести дней), показана на левом верхнем рисунке (данные переданы нам О.А. Годиным в рамках совместного гранта ONRG, 2015–2016 гг.). Согласно теории, эта функция соответствует отклику при распространении звука в противоположных направлениях между гидрофонами. На нижнем левом рисунке эти отклики при распространении против и вдоль течения показаны синей сплошной и красной штриховой линиями соответственно (рис.8).

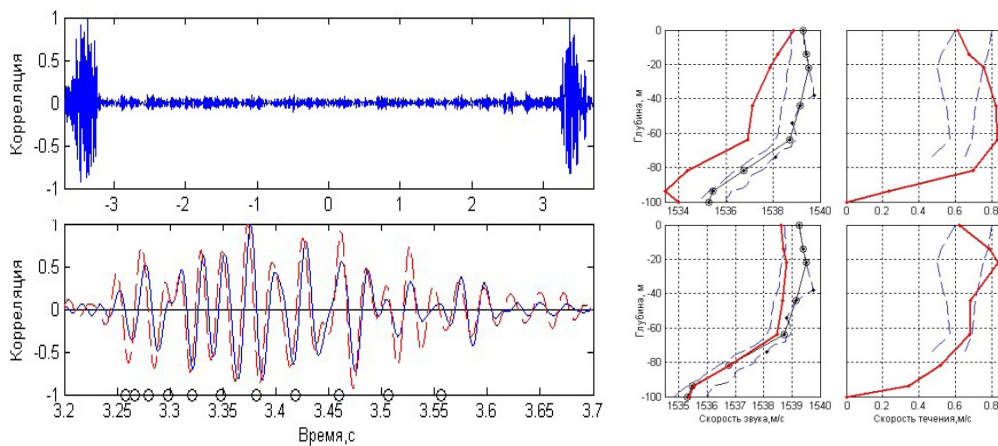


Рис. 8. Функция взаимной корреляции шума (вверху) и ее участки при распространении по (сплошная синяя линия) и против (красная штриховая) течения (внизу).

Инверсия (ЛЛТМ) экспериментальных данных. Восстановленные профили – красные линии, исходные – «о», штрихи – интервалы измеренных в эксперименте. Внизу – со слоем осадков, вверху – без.

Там же кружками «о» отмечены рассчитанные времена прихода собственных лучей в среде со среднеклиматическим профилем скорости звука без течения. Результаты инверсии этих данных методами линейной лучевой томографии Манка (ЛЛТМ) приведены на правом рисунке с учетом слоя донных осадков (нижний рисунок) и без него (верхний). Видно, что учет осадочного слоя в этом случае мелкого моря заметно улучшает результат инверсии, прежде всего, для вариаций профиля скорости звука. Для оценки согласованных с экспериментом значений параметров этого слоя (плотность и скорость звука) были рассчитаны показанные на следующем рисунке корреляционные функции экспериментального шумового поля в частотных интервалах 20 Гц. Линиями разного типа на этом рисунке показаны частотные зависимости времен распространения первых

4-х звуковых мод (дистанция, деленная на групповую скорость моды) для различных параметров слоя осадков. По наилучшему соответствию этих зависимостей и выбирались используемые для расчета параметры, которые оказались близкими к модели такого слоя, полученной учеными США (Zang X., Brown M.G., Godin O.A.). Более точное (чем в рамках ЛЛТМ) восстановление профилей скорости звука и течений в мелком море требует, по-видимому, развития волновых (модовых) подходов к решению обратной задачи. Работа в этом направлении и продолжается в настоящее время (рис. 9).

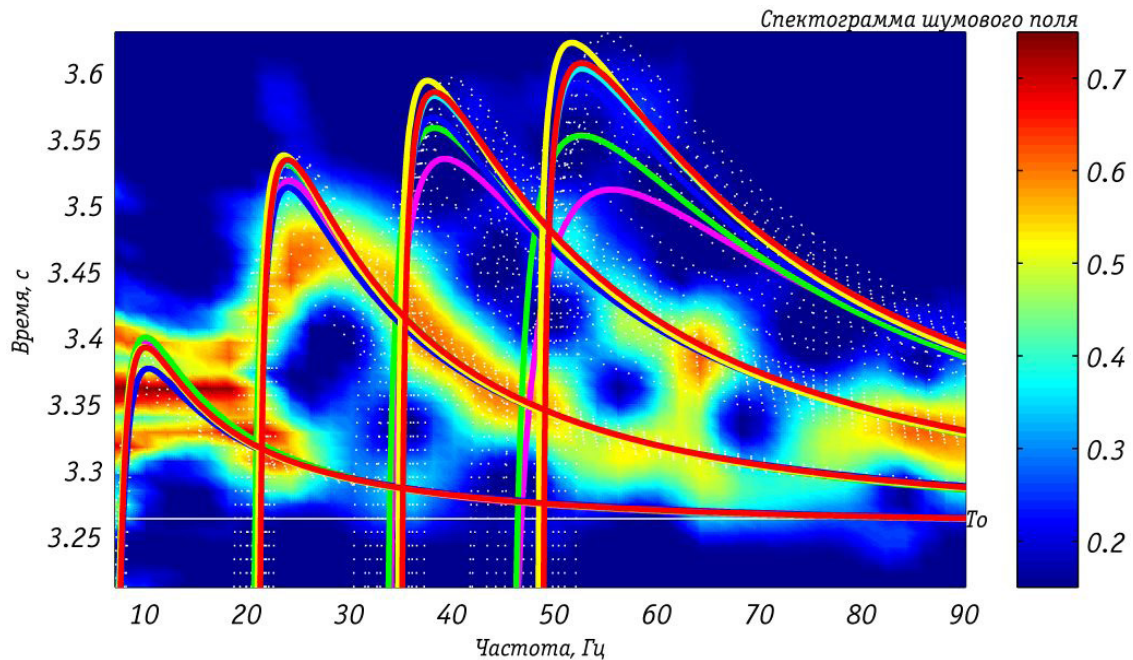


Рис. 9. Корреляция шумового поля на интервалах 20 Гц и расчетные частотные зависимости групповых скоростей первых четырех звуковых мод для различных моделей слоя осадков.

В конце 1990-ых годов в лаборатории ШИФ ИО РАН обратились к экологическим проблемам. В частности, проводились исследования воздействия акустического шума (буровые установки, транспортировка нефти, сейсморазведка и т. п.) на особо охраняемую (по классификации МСОП – исчезающую) популяцию Западных серых китов, имеющую постоянные места летнего нагула на северо-восточной части шельфа о. Сахалин в непосредственной близости от нефтегазовых платформ в море. Л.М. также считал эти работы важными и необходимыми. В качестве примера на левом рисунке показаны результаты волновых (параболическое приближение) расчетов потерь интенсивности низкочастотного шума, распространяющегося от источника (буровая платформа) к берегу, при уменьшении глубины водного слоя от 50 м до 10 м. Неопределенность (отсутствие данных) в выборе значений коэффициента затухания звука в осадочном слое дна привела к необходимости использования рекомендованных в литературе для верхнего слоя неконсолидированных осадков значений от 0.01 до 0.3 дб/(км×Гц) (рис. 10). На правом рисунке приведены зависимости ослабления звука с дистанцией для трех значений коэффициента затухания из этого диапазона. На основе разработанных в лаборатории ШИФ ИО РАН автономных акустических буев были продолжены эксперименты по классической акустической томографии в локальных областях мелкого моря (Геленджик, 2009 и последующие годы). Так, в октябре 2010 г. были записаны непрерывные суточные данные по приему и передаче акустических сигналов с использованием точной синхронизации с помощью спутниковых GPS-систем от трех буев, установленных в вершинах треугольной области на расстоянии порядка 1 км друг от друга. В результате корреляционной обработки

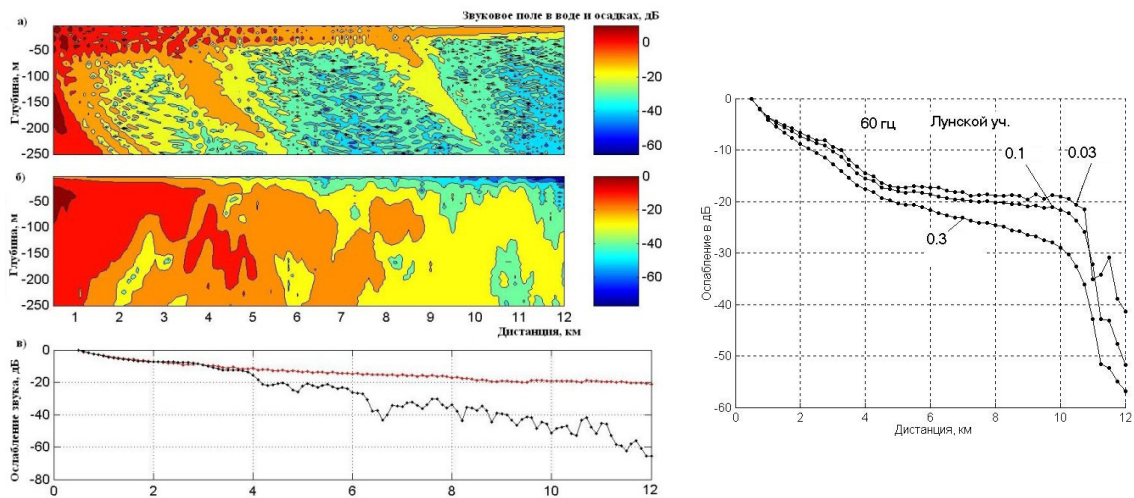


Рис. 10. Распределение интенсивности звукового поля по глубине водного (выше 50–10 м) и донных слоев на частотах 20 Гц (а) и 100 Гц (б). На рис. в) приведено ослабление уровня звука на частотах 20 Гц (черная кривая) и 100 Гц (красная кривая). Потери интенсивности низкочастотного звука частоты 60 Гц, рассчитанные при различных значениях коэффициента затухания звука в донных осадках: (0.03, 0.1, 0.3) дБ/(км×Гц). Отвечающие им линии отмечены на рисунке цифрами.

результатов экспериментов получены зависимости времен пробега сигналов между разнесенными станциями, являющихся основой для реконструкции свойств среды, что позволило, в частности, проследить изменение вектора средней скорости течения в этой области и сравнить с независимыми данными ADCP (см. левый рисунок). Разработанный метод акустической томографии является хорошим дополнением к широко используемому методу измерения течений с помощью доплеровского измерителя ADCP, который может давать ошибочные результаты в случае отсутствия объемных рассеивателей в толще воды (рис. 11).

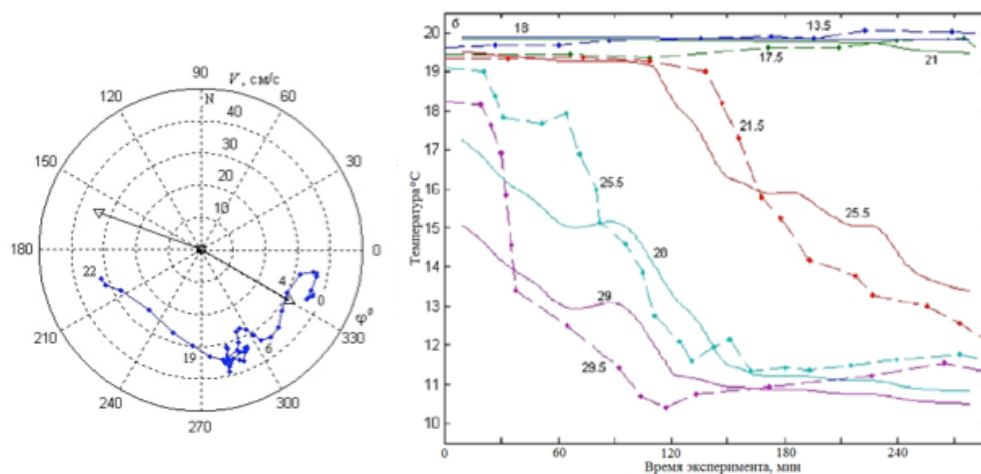


Рис. 11. Сравнение изменения векторов средних скоростей течения, восстановленных методом акустической томографии за 22 часа (точки, каждые полчаса) и двух измерений с помощью ADCP в 5-й (330°) и 25-й (160°) часы (стрелки). Изменение температуры в ходе эксперимента на различных глубинах (цифры в м). Сплошные линии - восстановленное, штриховые - измеренное заякоренной цепочкой термисторов.

Экспериментально полученные вариации времен прихода отдельных звуковых импульсов в этом эксперименте связаны с возможным прохождением внутренних волн (ВВ), смещающих водные слои (профили скорости звука, температуры и др.) в вертикальном направлении. На правом рисунке сплошными линиями показаны соответствующие регулярному восстановленному изменению амплитуды 1-й моды ВВ вариации температуры среды на разных глубинах, указанных цифрами в м. Штриховыми линиями с точками на тех же глубинах показан регулярный ход температуры, измеренный заякоренной цепочкой термисторов в более мелком районе на удалении около 1 км от места проведения акустического эксперимента.

В настоящей статье перечислены только те работы Отдела акустики океана ИО РАН, которые либо проводились под руководством Л.М. Бреховских, либо были им инициированы и которые он считал наиболее важными и перспективными в тематике акустических лабораторий. Часть из этих работ, например, по пассивной акустической томографии в мелком море, разработке перспективных технических средств акустического зондирования среды с целью реконструкции океанологических параметров, продолжается и в настоящее время. Идеи выдающегося ученого, основателя Акустического отдела ИО РАН Л.М. Бреховских продолжают жить и реализуются в современных работах акустических лабораторий Института океанологии.

**ACADEMICIAN L.M. BREKHOVSKIKH IN THE OCEAN ACOUSTICS
DEPARTMENT OF THE IO RAS**

V.V. Goncharov, A.I. Vedenev, T.I. Tsyplakova

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117218, Russia, e-mail: gvv@ocean.ru
Submitted 10.12.2017, accepted 25.12.2017*

The article is devoted to the memories of the life of L.M. Brekhovskikh, when he headed the Ocean Acoustics Department at the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences and to studies that were initiated by him or were carried out under his leadership.

The friendly and attentive attitude of L.M. to its employees and disciples, the organization of constant communication of scientists of different generations (in the format of the school-seminar “Acoustics of the Ocean”) is noted, which was the key to the fruitful scientific work of the team. Some significant results of acoustic experiments in the ocean on the scientific research vessels of the Academy of Sciences are presented: the discovery of slightly diverging beam beams (1989–1990); experiments on both acoustic tomography of the ocean bottom (passive tomography 1980) and the water column (1989–1994); data processing of the international experiment (1998–1999) ACOUS.

L.M. was one of the first who realized that acoustic methods are important in understanding and quantifying the physical processes in the ocean and ecology – as means for studies of the effects of industrial noise on marine biota. Part of the research initiated by L.M. Brekhovskikh continue in the Acoustic laboratories of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences and at the present time. Namely,

Гончаров и др.

- studies of the effects of industrial acoustic noise on marine mammals off the coast of Sakhalin island;
- passive tomography of the ocean based on the ocean ambient noise and noise from remote shipping by using data of the international NPAL experiment in the Pacific, and the 2012 experiment in the Florida Strait (O.A. Godin, etc.);
- local acoustic tomography in the shallow water (experiments in the Blue Bay, Gelendzhik, 2009 and subsequent years).

Keywords: L.M. Brekhovskikh, passive acoustic tomography, international experiments NPAL, ACOUS , effects of industrial noise on marine biota