

PACS numbers: 92.10.-с., 43.30.Qd

Теоретические и экспериментальные исследования возможности акустической термометрии климатической изменчивости Северного Ледовитого океана

А.Н. Гаврилов, М.М. Славинский, А.Ю. Шмелев

1. Введение

Изменения климата Земли вызывают растущий интерес независимо от того, связаны ли они с антропогенными факторами или являются естественным процессом. Наблюдения за состоянием климата в атмосфере существенно осложняются сильной синоптической, сезонной и межгодовой изменчивостью температуры воздуха, а также тепловыми выбросами крупных городов и промышленных объектов. Предполагается, что возможные тенденции в изменении климата, в том числе связанные с "парниковым" эффектом, должны отражаться в изменении распределения температуры воды в океане. Это предположение привело У. Манка и А. Форбеса [1] к идее наблюдения за изменениями средней температуры океана с помощью измерения времени распространения акустических сигналов на очень длинных трансокеанских трассах. Идея основана на существовании приблизительно линейной связи температуры и скорости звука в воде (приблизительно 5 м/с·град). В научном проекте, предложенном П. Михалевским и др. [2], предлагается исследовать возможность долговременного акустического мониторинга температуры воды Арктического бассейна и средней толщины ледового покрова, являющейся не менее важным индикатором состояния климата в Северном полушарии. Научные исследования по проекту, названному Arctic ATOC (Arctic Acoustic Thermometry of Ocean Climate), начались в 1993 г. с участием ученых из США, России, Канады, Норвегии.

Теоретическая часть исследований включает моделирование распространения низкочастотных акустических сигналов в арктическом волноводе и анализ реакции амплитудно-временных характеристик сигналов на крупномасштабные изменения температуры воды и параметров ледового покрова, включая возможные климатические тренды. Для этих целей были разработаны модель отражения и рассеяния звука упругим неровным ледовым покровом и алгоритм расчета звуковых полей низкочастотных источников в арктическом волноводе, наиболее полно описанные в работе [3]. В этой же работе показано, что оптимальные частоты для передачи сигналов на трансарктических трассах находятся в диапазоне 15–25 Гц. На частотах ниже 15 Гц становится существенным поглощение звука в морском дне. На высоких частотах рассеяние звука на неровном льду приводит к сильному затуханию акустических сигналов и значительным энергетическим потерям, неприемлемым для трансарктических передач сигналов. Для проверки результатов моделирования и подтверждения научной и технической состоятельности предлагаемого метода наблюдения за климатом Северного Ледовитого океана (СЛО) весной 1994 г. был впервые проведен эксперимент по трансарктической передаче низкочастотных акустических сигналов.

2. Моделирование реакции акустического сигнала на крупномасштабную изменчивость водной среды и льда СЛО

Для акустического мониторинга сред используются как тональные, так и импульсные сигналы. Измеряемыми параметрами тонального сигнала являются амплитуда и фаза, импульсного сигнала — амплитуда и время распространения. При ограниченной мощности источника для улучшения соотношения сигнал/шум вместо импульсных сигналов используются широкополосные частотно-модулированные или фазо-модулированные сигналы, имеющие переходную характеристику и, следовательно, временное разрешение соответствующего импульсного сигнала. В акустической томографии часто используются сигналы, модулированные по фазе псевдослучайными последовательностями "максимальной" длины, так называемыми М-последовательностями [4].

Изменения распределения температуры воды в океаническом волноводе оказывают влияние на время распространения и фазу сигналов, меняют интерференционную структуру поля, но не влияют на энергетические характеристики сигналов, такие, как амплитуды волноводных мод. Моделируя влияние изменчивости волновода на сигнал, мы рассматривали отклик отдельных акустических мод. Мониторинг среды волновода по отдельным модам (или лучам), при условии их пространственного или временного разделения на приемном конце трассы, позволяет получить дополнительную, очень важную информацию о вертикальном распределении изменений в волноводе. Мезомасштабная (приливы, вихри) и крупномасштабная (сезонная, межгодовая) изменчивость водной среды океана образуют естественный фон, мешающий выделению климатических трендов. В СЛО масштабы изменчивости, связанной с внутренними волнами, приливами и синоптическими вихрями, существенно меньше, чем в "среднеширотном" океане. Вследствие влияния ледового покрова, изолирующего океан от атмосферы, сезонные колебания температуры воды СЛО также малы и охватывают только тонкий, несколько десятков метров, приповерхностный слой [5]. Более медленные межгодовые флуктуации температуры воды СЛО, связанные, главным образом, с изменчивостью температуры и объема втекающих атлантических вод, являются наиболее значимыми. Данные о межгодовой изменчивости температуры воды СЛО вдоль предполагаемых трасс акустического мониторинга были получены из результатов семилетней гидрологической съемки экспедиции "Север", проводившейся Арктическим и Антарктическим НИИ каждой весной с 1973-го по 1979 гг. В экспедиции измерялись вертикальные распределения температуры и солёности воды почти по всей акватории СЛО. На рис. 1а показаны межгодовые изменения средней температуры воды на трассе Шпицберген–мыс Барроу относительно 1974 г. в слоях: 1 — верхний перемешанный холодный слой, 2 — слой положительного скачка солёности, 3 — слой сильного положительного градиента температуры, 4 — ядро атлантических вод, 5 — глубоководная часть атлантического слоя. Как видно из этого графика, межгодовые колебания средней температуры воды в некоторых слоях достигают 0,1 °С. Кроме того, изменения температуры могут иметь противоположные знаки в верхних и нижних водных слоях.

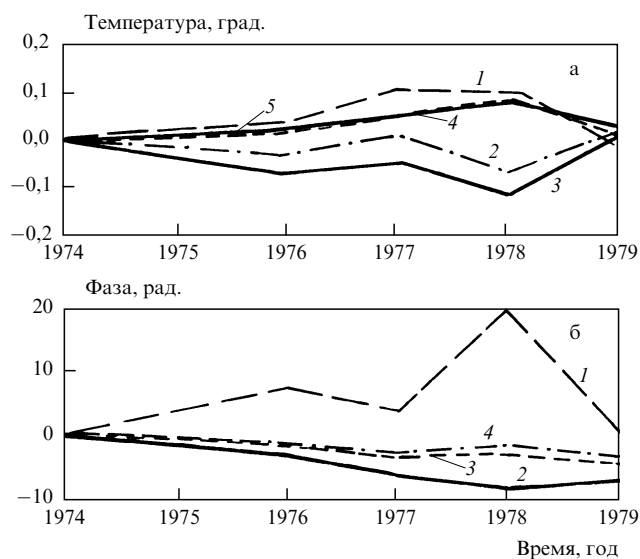


Рис. 1. (а) Относительная межгодовая изменчивость средней температуры воды СЛО вдоль трассы Шпицберген–Барроу в слоях: 1 — 0–50 м, 2 — 50–150 м, 3 — 150–300 м, 4 — 300–500 м, 5 — 500–1000 м; (б) относительные изменения фазы мод 1–4 сигнала 20 Гц на участке трассы 2200 км, вызванные межгодовыми колебаниями температуры и солёности воды и потеплением слоя атлантических вод $0,01^{\circ}\text{C}$ в год

Для моделирования акустического отклика на климатические изменения к полученным межгодовым колебаниям температуры был добавлен гипотетический положительный тренд $0,01^{\circ}\text{C}$ в год в стрессе слоя атлантических вод (300–500 м), взятый из оценки реакции температуры этого слоя на возможное "парниковое" потепление в атмосфере в Северной Атлантике [6]. Рис. 1б показывает рассчитанные относительные изменения фазы первых четырех акустических мод сигнала частоты 20 Гц на участке трассы Шпицберген–Барроу длиной 2200 км в присутствии гипотетического тренда температуры в слое атлантических вод. Сравнение рис. 1а и рис. 1б показывает, что изменчивость фазы отдельных мод сильно коррелирует (с противоположным знаком) с изменчивостью температуры в определенных водных слоях. Первая мода "чувствует" изменения температуры в верхних слоях, в то время как вторая мода реагирует в основном на изменчивость в слое атлантических вод и не подвержена влиянию сильных межгодовых колебаний температуры в верхних слоях. На фоне этих естественных межгодовых колебаний хорошо выделяется положительный тренд температуры атлантического слоя в изменении фазы второй моды. Моды высших номеров реагируют на изменчивость в атлантическом слое значительно слабее. Следует отметить, что чувствительность фазы и времени распространения мод к температуре отдельных слоев зависит от частоты сигнала. Так, на 30 Гц изменения в слое атлантических вод в наибольшей степени влияют на время распространения третьей моды.

Рассмотрим влияние изменчивости ледового покрова СЛО на характеристики акустических сигналов, распространяющихся в арктическом волноводе. В отличие от водного слоя ледовый покров Арктики подвержен сильной сезонной изменчивости. Кроме общей площади льдов, меняются средняя толщина и высота неровностей ледового покрова. Эти параметры в наибольшей

степени влияют на распространение звука подо льдом. Кроме того, акустические свойства морского льда определяются величинами скоростей продольной и сдвиговой волн, также имеющими заметную сезонную зависимость. Фаза отраженной от льда когерентной (не рассеянной) составляющей акустического сигнала зависит от средней толщины ледяной пластины. Однако на низких частотах изменения этой толщины слабо влияют на изменение фазовых и групповых скоростей акустических мод, так как, во-первых, на низких частотах лед толщиной 3–4 м становится акустически почти прозрачным, и, во-вторых, изменения толщины ледового покрова, погруженного в воду на 90%, незначительно меняют положение верхней отражающей границы волновода лед–воздух. На рис. 2 показана зависимость фазы трех первых мод от толщины льда на трассе длиной 2200 км. Как видно из сравнения масштабов изменения фазы на рис. 1б и рис. 2 предельно возможные изменения толщины льда влияют на время распространения сигнала на два порядка слабее, чем естественная изменчивость температуры воды.

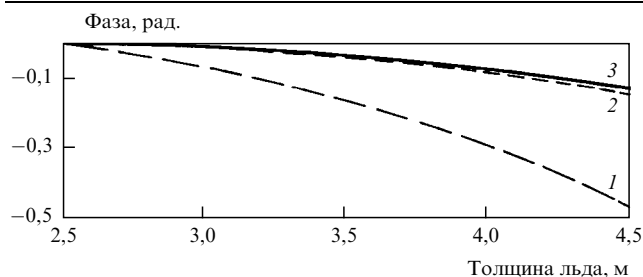


Рис. 2. Относительные изменения фазы мод 1–3 сигнала с частотой 20 Гц на трассе длиной 2200 км в зависимости от средней толщины ледового покрова

Толщина и высота неровностей ледового покрова существенно влияют на затухание акустических сигналов. Следовательно, измерение энергетических характеристик сигнала могут дать дополнительную информацию об изменчивости ледового покрова Арктики и о возможных климатических трендах, в том числе. Моделируя акустический мониторинг ледового покрова, мы использовали данные о сезонной изменчивости его средней толщины и высоты неровностей [7] и физических свойств (плотности, скорости звука и др.) [8]. К сезонной изменчивости было добавлено гипотетическое климатическое уменьшение толщины и высоты неровностей льда, обусловленное глобальным потеплением (-10 см/год и -6 см/год соответственно).

На рис. 3а показана модель изменчивости характеристик льда за 10 лет. Соответствующие этой модели расчетные изменения интегрального затухания трех первых мод на трассе длиной 2200 км показаны на рис. 3б. Как видно из полученных результатов, сезонная изменчивость ледового покрова приводит к сильным колебаниям уровня сигнала, особенно первой моды, наиболее сильно взаимодействующей со льдом. Однако на фоне этих колебаний в 10-летнем ряду акустических данных можно выделить климатический тренд толщины льда 10 см/год. Следует отметить, что в модели не учитывалась межгодовая изменчивость параметров льда, данных о которой в настоящее время недостаточно для моделирования. При наличии сильных межго-

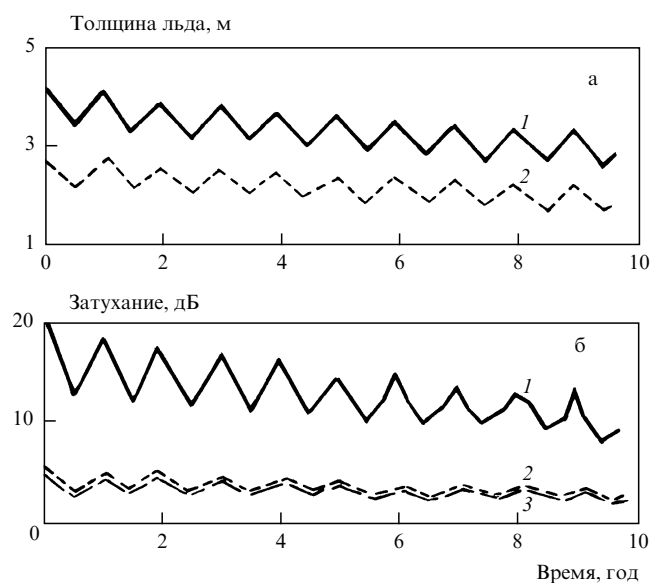


Рис. 3. (а) Модель временной изменчивости средней толщины (1) и среднеквадратичной высоты неровностей (2) льда СЛО с климатическим трендом толщины — 10 см/год; (б) изменения интегрального затухания мод 1–3 сигнала 20 Гц на трассе 2200 км

довых колебаний период времени, необходимый для выделения устойчивых климатических трендов, может быть существенно длиннее, чем 10 лет.

3. Эксперимент по трансарктической передаче акустических сигналов

Совместный российско-американский эксперимент по передаче акустических сигналов через весь Северный Ледовитый океан, проведенный весной 1994 г., имел следующие основные задачи: 1) измерение затухания низкочастотных акустических сигналов на трансарктических трассах; 2) определение стабильности амплитудных и временных характеристик сигналов в различные временные периоды; 3) исследование модовой структуры сигналов и ее временной устойчивости; 4) получение экспериментальных данных для проверки существующих теоретических моделей; 5) испытание технических средств излучения и приема сигналов и алгоритмов их обработки.

В течение 6 дней сигналы низкой частоты 19,6 Гц передавались с российской научной станции "Турпан", дрейфующей в 300 км севернее Шпицбергена, и принимались на американских дрейфующих станциях "SIMI" и "Narwhal" в море Бофорта и море Линкольна соответственно (рис. 4). Передавались два типа сигналов: тональные и модулированные по фазе на $\pm\pi/4$ периодическими М-последовательностями различной длины (М-127, 255, 511 и 1023). Сигналы длительностью 1 час излучались периодически каждые 3 часа. Длина каждого бита модулирующей М-последовательности — 12,5 периодов несущей 19,6 Гц. Несущая излучаемого сигнала синхронизировалась высокостабильным рубидиевым стандартом частоты с относительной точностью

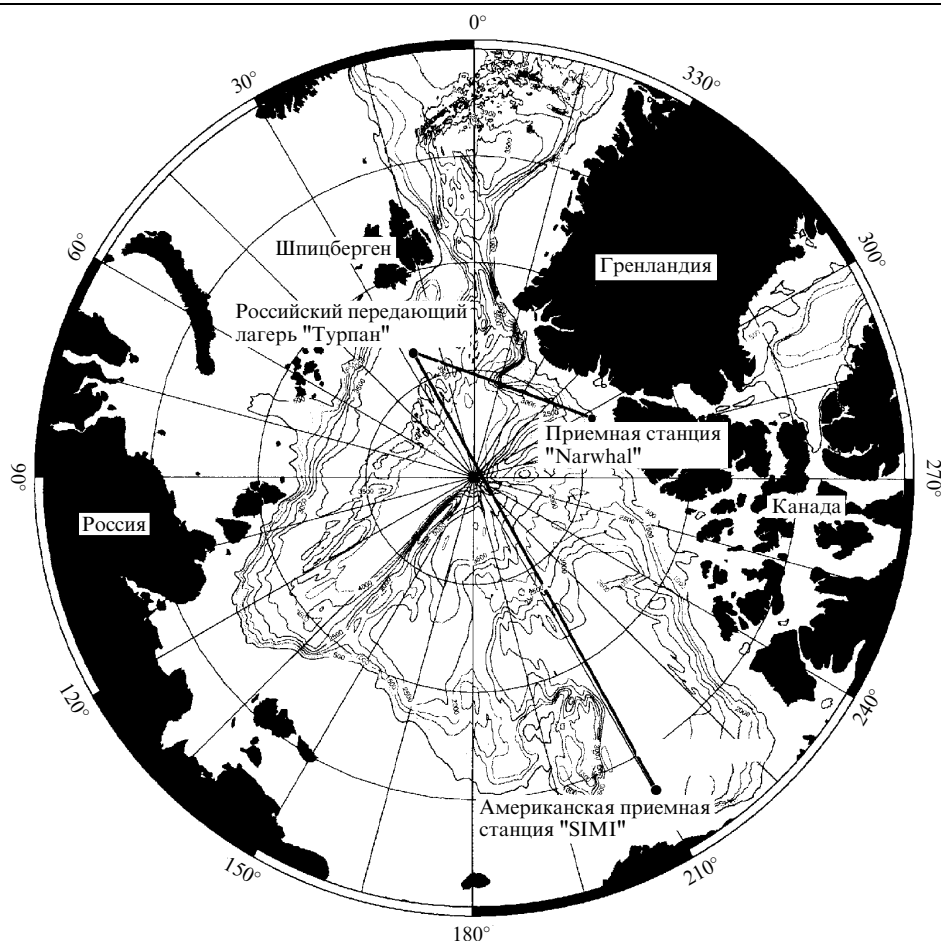


Рис. 4. Схема акустических трасс эксперимента

$1 \cdot 10^{-11}$. Излучатель находился на глубине 60 м. Акустическая мощность излучаемого сигнала (195 дБ относительно 1 мкПа на 1 м) контролировалась с помощью специального гидрофона, отнесенного на 100 м от источника. На станции "SIMI" сигналы принимались на вертикальную 32-элементную эквидистантную антенну длиной 217 м от 62 до 279 м глубины и на 32-элементную горизонтальную антенну сложной конфигурации с максимальной апертурой 480 м, расположенную на глубине 60 м. На передающей и приемных станциях во время эксперимента измерялись вертикальные профили температуры, солёности и скорости звука в воде. Точные координаты станций непрерывно измерялись и регистрировались с помощью спутниковой навигационной системы GPS.

Рассмотрим основные результаты обработки сигналов, принятых на станции "SIMI" на расстоянии более 2600 км от источника. Рисунок 5 демонстрирует устойчивость интерференционной структуры звукового поля тонального сигнала на вертикальной антенне в течение одного часа излучения. Усредненное за час распределение абсолютных уровней сигнала на гидрофонах вертикальной антенны показано на рис. 6. Здесь же построена расчетная зависимость для сигнала уровня 195 дБ и частоты 19,6 Гц на расстоянии 2635 км от источника, что соответствует положению дрейфующих станций на момент измерений. Расчетная кривая хорошо согласуется с экспериментальными результатами как по виду вертикального распределения звукового давления, так и по абсолютным уровням сигналов, что подтверждает состоятельность используемой модели распространения звука в арктическом волноводе, в том числе, алгоритма расчета затухания акустических мод.

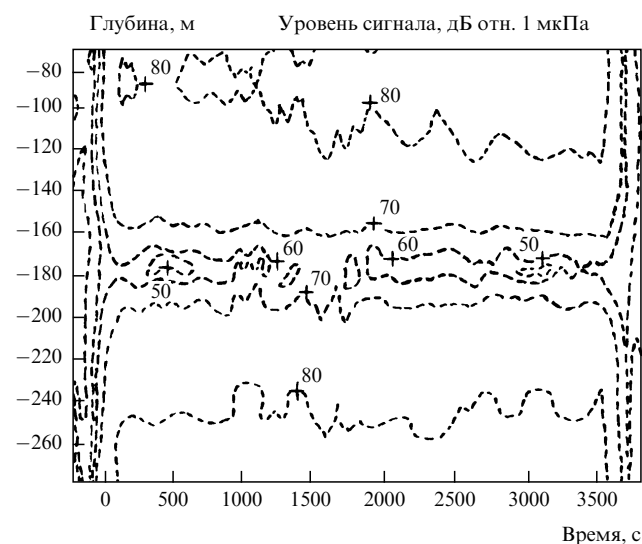


Рис. 5. Временная зависимость вертикального распределения уровня звукового поля тонального сигнала в течение одного часового сеанса излучения

Фаза принимаемых тональных сигналов менялась приблизительно линейно в течение сеанса излучения. Быстрая изменчивость фазы почти полностью компенсируется коррекцией доплеровского сдвига частот, обусловленного относительным дрейфом передающей и приемной станций (рис. 7). Длиннопериодная изменчи-

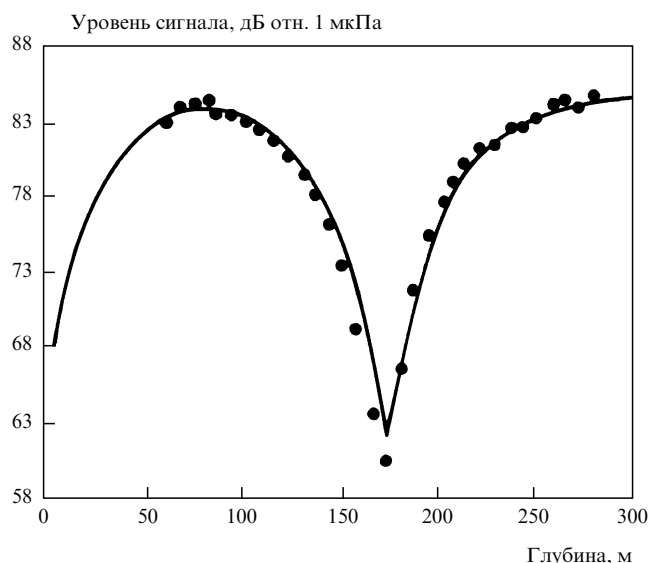


Рис. 6. Распределение усредненных за час уровней тонального сигнала на гидрофонах вертикальной антенны (•) на дистанции 2635 км и расчетное вертикальное распределение уровня звукового поля (—)

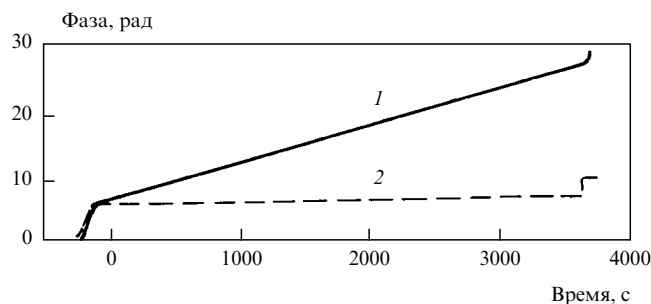


Рис. 7. Изменение фазы тонального сигнала в течение одного сеанса излучения до (1) и после (2) коррекции доплеровского сдвига частоты по данным GPS

вость параметров сигнала, связанная, например, с влиянием инерционных и приливных волн или других мезомасштабных явлений в океане, является предметом будущего анализа.

Обработка фазомодулированных сигналов состояла из их демодуляции, коррекции доплеровского сдвига и получения свертки с модулирующей М-последовательностью. В результате такой обработки определялась импульсная переходная функция волновода в полосе частот $1/T$, где $T = 0,64$ с — длительность одного бита М-последовательности. Для улучшения соотношения сигнал/помеха использовалась фазовая компенсация горизонтальной антенны, что позволило получить усиление на антенне около 10 дБ. Кроме того, в течение одного часа стабильность сигнала была достаточной для эффективного когерентного усреднения по временным интервалам, равным периоду соответствующих М-последовательностей. Таким образом, общее усиление сигнала после обработки достигало почти 40 дБ, что дало возможность поднять соотношение сигнал/помеха до 30 дБ и выше. В результате описанной обработки фазомодулированных сигналов в импульсном отклике волновода удалось выделить пики, соответствующие приходам отдельных мод, в том числе и очень слабой первой моды, определить их амплитуды и измерить

абсолютные времена распространения. На рис. 8а показана форма огибающей (амплитуда) сигнала М-127, принятого при удалении источника 2640,5 км, после обработки в абсолютных масштабах времени и звукового давления. В сигнале отчетливо видны импульсы мод 1–4, приходящих последними в обратном порядке. Моды высших номеров, глубоководные и слабо взаимодействующие с дном, имеют более высокие и близкие по значениям групповые скорости и приходят первыми одной размытой во времени группой.

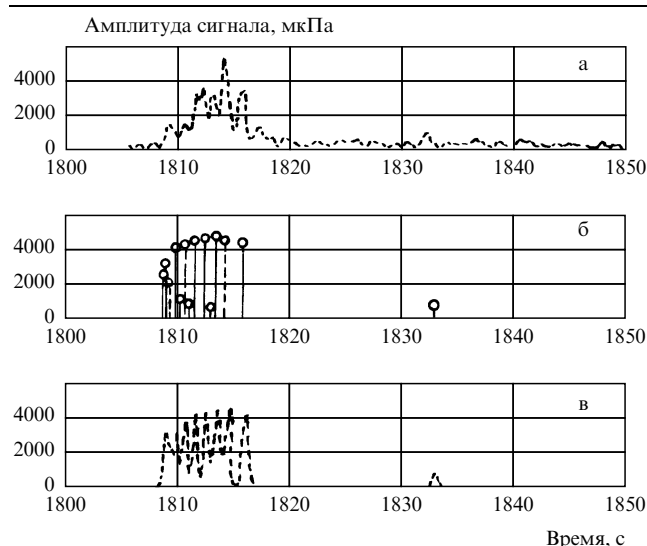


Рис. 8. (а) Огибающая сигнала М-127 на горизонтальной антенне после обработки, дистанция — 2640,5 км. (б) Расчетное распределение времени распространения и амплитуд мод сигнала 19,6 Гц, 195 дБ на расстоянии 2640,5 км от источника на глубине 60 м по данным скорости звука вдоль трассы 1977 г. (в) Расчетная огибающая импульсного сигнала длительностью 0,64 с

Особый интерес представляет сравнение экспериментальной формы импульсного сигнала и теоретической, рассчитанной численно по имеющейся модели распространения звука в арктическом волноводе. Для расчетов использовались гидрологические данные экспедиции "Север" вдоль трассы Шпицберген–Барроу, почти совпадающей с экспериментальной трассой "Турпан"–"SIMI", и данные о статистических характеристиках ледового покрова, взятые из работы [9]. Рисунок 8б показывает диаграмму расчетных амплитуд и времен прихода первых 15 мод на глубине 60 м и на расстоянии 2640,5 км от источника импульсного сигнала уровня 195 дБ. На рис. 8в показана соответствующая форма огибающей импульсного сигнала при длительности излученного импульса 0,64 с. Сравнение рис. 8а и рис. 8б показывает очень хорошее для такого расстояния совпадение теоретических и экспериментальных величин амплитуды и времени распространения акустических мод. Наиболее заметное различие теоретической и экспериментальной форм сигнала проявилось в группе глубоководных мод. Однако здесь и не следовало ожидать хорошего совпадения по ряду причин. Во-первых, в этой группе моды сигнала в полосе 1,5 Гц сильно интерферируют друг с другом и форма импульса очень чувствительна к фазам отдельных мод, которые, в свою очередь, сильно зависят от распределения скорости звука вдоль трассы. Очевидно, реальные и используемые в модели распределе-

ния не могут не отличаться. Во-вторых, в эту группу замешиваются моды, слабо взаимодействующие с дном. Ввиду отсутствия достаточно достоверных данных о рельефе и акустических свойствах дна вдоль трассы, особенно в районах подводных хребтов Ломоносова и Альфа, к результатам моделирования для этой группы мод следует относиться с осторожностью. В-третьих, использованная модель не учитывала эффекты преобразования мод на участках волновода в районе относительно крутых склонов хр. Ломоносова, что также может являться причиной полученных расхождений.

С точки зрения акустического мониторинга климата СЛО характеристики первых трех-четырех мод гораздо более информативны, чем параметры глубоководных мод. В этой связи следует обратить внимание на небольшое отличие времен распространения мод 1–3, измеренных экспериментально весной 1994 г. и рассчитанных теоретически по океанографическим данным того же сезона года 70-х годов. Рассчитанные по данным различных лет с 1973-го по 1979 гг., времена прихода этих мод, особенно первой, заметно больше (на 0,5–2 с) полученных экспериментальных оценок. Выяснение причин этого систематического расхождения, одной из которых может быть потепление верхнего и атлантического водных слоев СЛО относительно 70-х гг., является одной из задач предстоящих исследований.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что существенные с точки зрения глобального климата тенденции в изменении температуры водных слоев СЛО могут быть обнаружены методом акустического мониторинга на трансарктических трассах в течение десятилетия. Акустический мониторинг ледового покрова Арктики также может помочь в выявлении устойчивых тенденций изменчивости климата, но для этого, по всей видимости, потребуется больший промежуток времени.

Авторы благодарят сотрудников научной компании "Акустинформ" за организацию дрейфующей станции "Турпан" и за выполнение научной программы экспедиции; группу сотрудников Института Прикладной физики РАН за разработку низкочастотного излучателя для эксперимента и за работу с ним в экспедиции; американских коллег, участвующих в проекте Arctic ATOC, в особенности, П.М. Михалева из компании SAIC за организацию совместного эксперимента и других работ по проекту и А. Баггерора из Массачусетского технологического института за предоставление записей сигналов и данных, полученных на дрейфующей станции "SIMI".

Список литературы

1. Munk W H, Forbes A M J. *Phys. Oceanogr.* **19** 1765 (1989)
2. Mikhalevsky P N, Muench R D, DiNapoli F R, in *European conference on underwater acoustics* (Luxembourg, 1992)
3. Gavrilov A N, Kudryashov V N *AcoustInform Tech. Rep.* **94/1** (M.: AcoustInform Co. Ltd., 1994)
4. Birdsall T G, Metzger K J. *Acoust. Soc. Am.* **79** 91 (1986)
5. *Атлас океанов: Северный Ледовитый океан* (Под ред. С.Г. Горшкова) (изд-во МО СССР, 1980)
6. Sabinin K D, Pisarev S V *AcoustInform Tech. Rep.* **94/4** (M.: AcoustInform Co. Ltd., 1994)
7. Bourk R H, McLaren A S J. *Geoph. Res.* **97** C11, 17, 715 (1992)
8. Hunkins K J. *Geoph. Res.* **65** 3459 (1960)
9. Brestkin S V, Zakharov V F, Aksionov E O *AcoustInform Tech. Rep.* **94/3** (M.: AcoustInform Co. Ltd., 1994)