

# Структура гидроакустического поля от подводного землетрясения в океане

Галкин О.П., Абакумова Н.К.

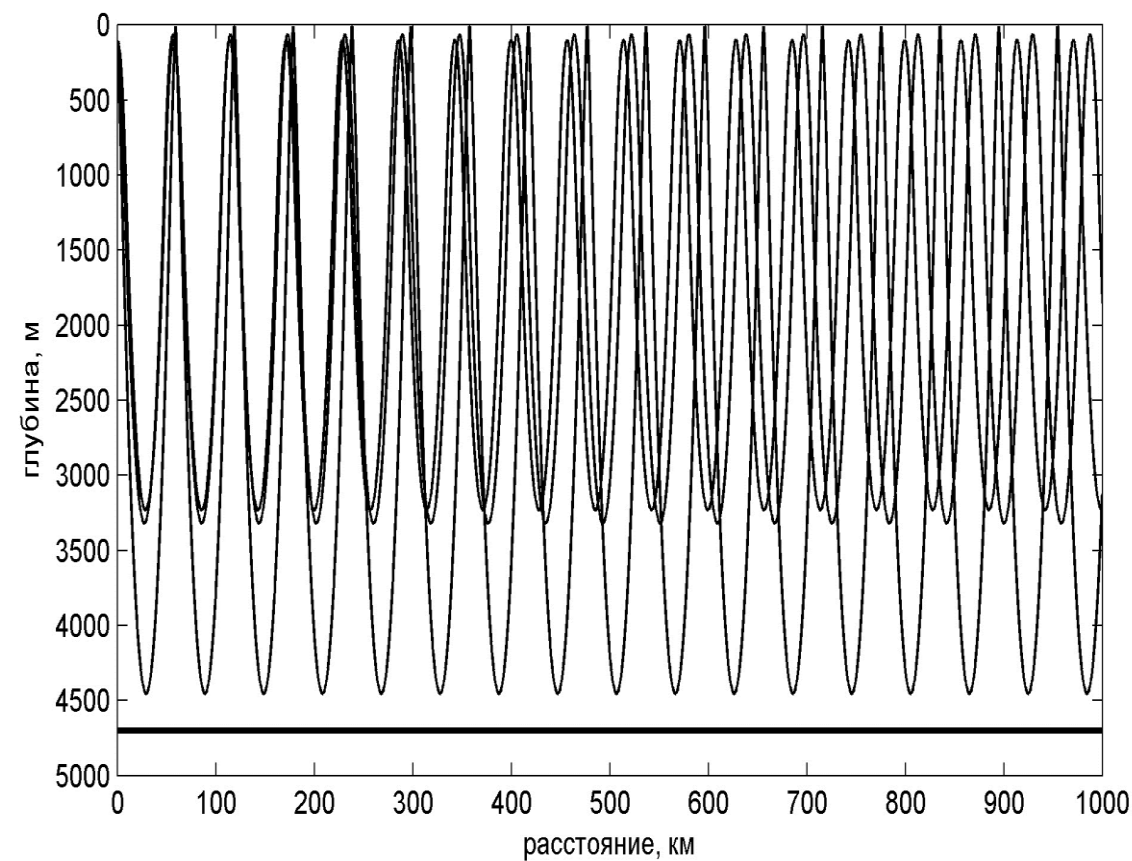


РИС. 1 Лучевая картина для билинейного подводного звукового канала, на верхней границе которого – 1500м/с, на нижней – 1520м/с.  $C(z)$  на оси канала – 1461м/с.

Гидроакустическим методом можно оценить цунамигенность удаленных подводных землетрясений. Вследствие рассеяния на взволнованной поверхности, часть гидроакустических волн захватывается ПЗК. Такие волны регистрируются на удалении  $\sim 1000$ км от очага землетрясения.

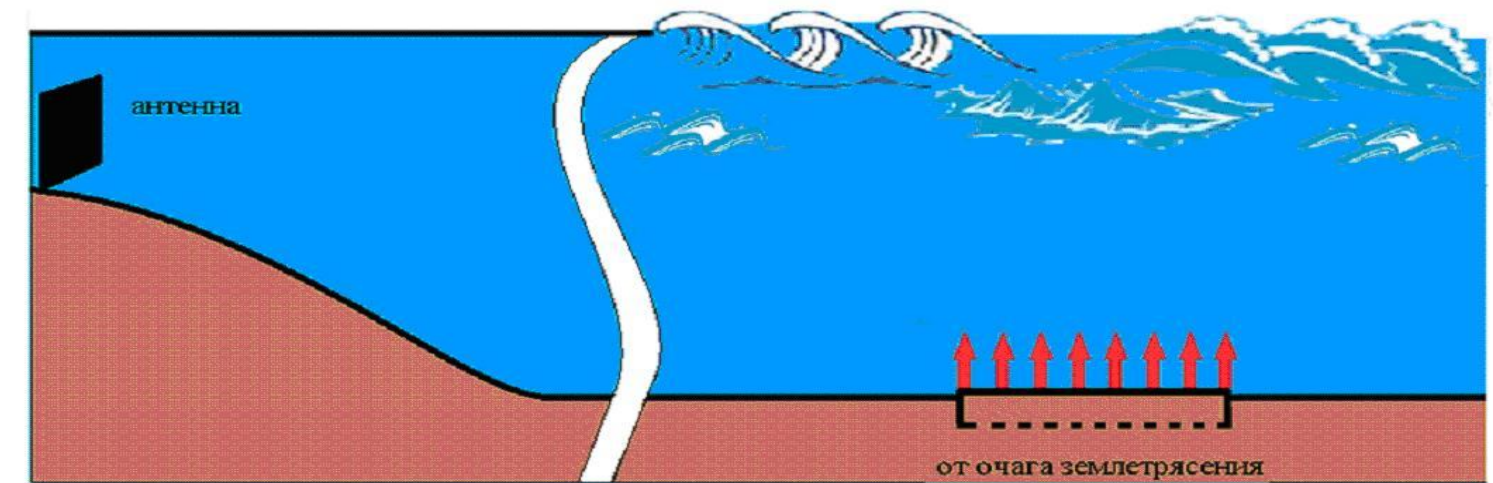


РИС. 2 Расположение источника излучения поверхностной и звуковой волн (справа внизу), приемной антенны (слева), удаленной от места излучения на 1000-1500км.

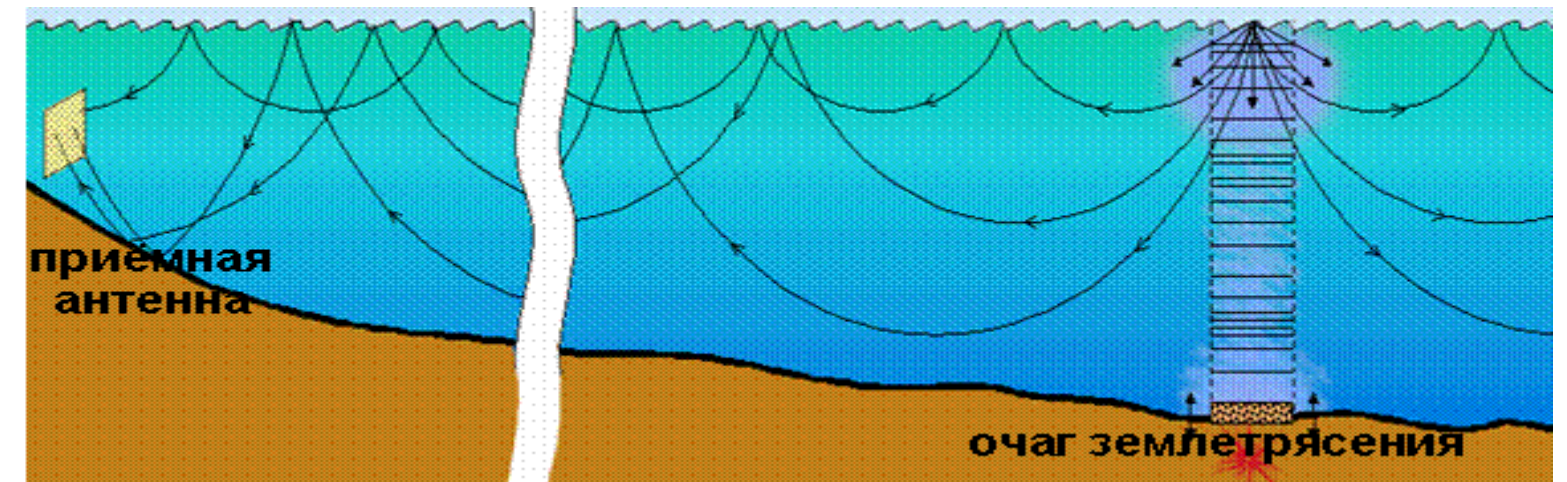


Рис. 3 Лучевая картина распространения звука от землетрясения в условиях приповерхностного звукового канала



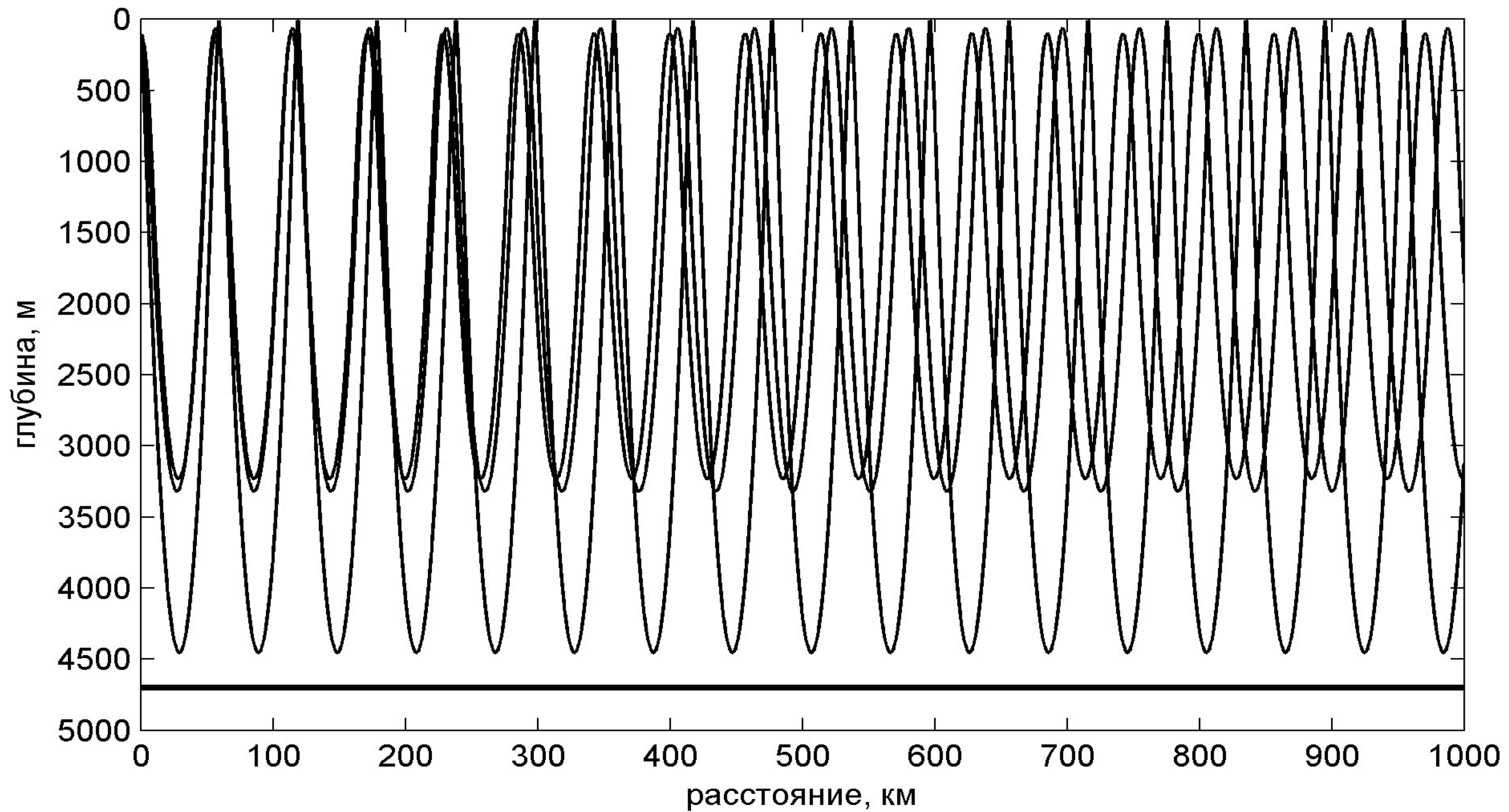
# Структура гидроакустического поля от подводного землетрясения в океане

Для повышения вероятности правильного прогноза цунамигенности обстановки, обусловленной подводными землетрясениями, рассматривалась пространственная структура гидроакустического поля, генерируемого при землетрясениях, на больших расстояниях от его очага.

Акустические волны наблюдаются и надежно регистрируются на весьма больших расстояниях (сотни и тысячи километров) от очага землетрясения.

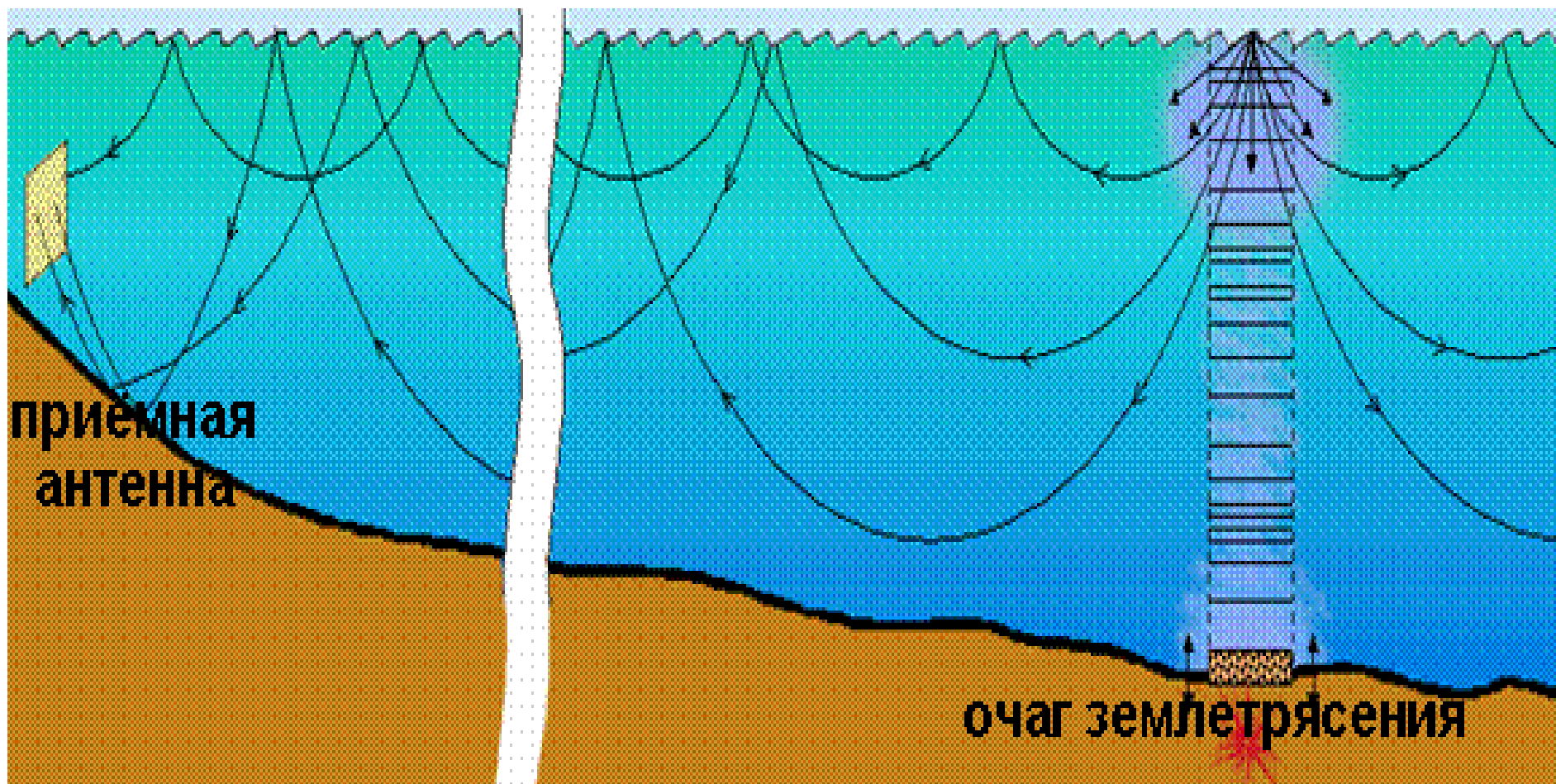
**Цунами**- морские гравитационные волны очень большой длины, возникающие в результате сдвига вверх или вниз протяжённых участков дна при сильных подводных и прибрежных землетрясениях и, изредка, вследствие вулканических извержений и других тектонических процессов.





Типичная лучевая картина для билинейного подводного звукового канала, профиля скорости звука на верхней границе – 1500м/с, на нижней – 1520м/с, глубина оси канала – 1км. Скорость звука на оси канала – 1461м/с.

Лучевая картина распространения звука от подводного землетрясения в глубоководной части океана в условиях приповерхностного звукового канала до приемной антенны, расположенной в мелководной части трассы





УДК 534.26

**А. А. Клещёв**

### **ПЛОСКИЙ ВОЛНОВОД С АНИЗОТРОПНЫМ УПРУГИМ ДНОМ**

Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет,  
Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3  
Тел.: (812) 783-1546; E-mail: alexalex-2@yandex.ru

*На основе метода мнимых источников и мнимых рассеивателей найдено решение задачи дифракции импульсных звуковых сигналов на идеальном (мягком) вытянутом сфероиде, находящемся в плоском волноводе с анизотропным упругим дном. В работе доказывается, что при такой постановке задачи исключается возможность использования метода нормальных волн поскольку импульсы представляют сгустки энергии и могут поэтому распространяться только с групповой (а не фазовой) скоростью, которая присуща как раз методу мнимых источников и мнимых рассеивателей. Вычислены последовательности отражённых импульсов для трансверсально-изотропного упругого дна при двух различных значениях его физических параметров.*

Обратимся к задаче дифракции звука на сфероидальных телах [1 – 7], сохранив: на верхней границе условие Дирихле, размеры волновода и расположение точечного источника и рассеивателя относительно границ, заменив только идеально твёрдую нижнюю границу на трансверсально-изотропное упругое дно. Физические параметры подстилающей нижней среды будут соответствовать параметрам трансверсально – изотропной осадочной породы – алевролита [8 – 12]. Сориентируем плоскость изотропии алевролита таким образом, чтобы она совпадала с плоскостью падения волны на изотропное дно, это позволяет нам перейти к изотропной среде в плоскости падения волны, т. е. решать задачу уже для изотропной среды и иметь дело с продольной и поперечной волнами. При использовании и в этом случае метода мнимых источников нужно ввести коэффициент отражения  $V$  для каждого из источников [13], при отображении источников относительно верхней границы источники, как и раньше [1 – 7], будут менять знак на противоположный, что соответствует изменению их фазы на  $\pi$ . Известно [13], что в методе мнимых источников граничные условия строго не выполняются ни на одной из границ волновода даже в случае идеальных граничных условий Дирихле и Неймана. Для лучшего выполнения этих условий в

дифракционных задачах [1 – 7, 14] были введены мнимые рассеиватели путём зеркального отображения относительно границ. Точно также введём мнимые рассеиватели и в нашей задаче и сравним последовательность отражённых импульсов [2, 3, 14] в случае идеальных границ и при наличии в волноводе такого анизотропного дна при двух значениях их физических параметров. Вторая трансверсально-изотропная среда имеет скорость квазипродольной волны 4472,1 м/с и скорость квазипоперечной волны 2449,5 м/с, плотность второй анизотропной среды составляет 5000 килограмм на метр кубический. В [13] показано, что метод мнимых источников применим и в том случае, когда коэффициент отражения  $V$  будет являться функцией угла падения волны от источника относительно нормали к границе. В нашем случае этот угол будет определяться взаимным положением источника (действительного или мнимого) и рассеивателя (действительного или мнимого), на который падает волна от данного источника. Так как приёмник совмещён с действительным источником  $Q$ , то последовательность отражённых импульсов будет определяться количеством и амплитудами отражённых сигналов (от различных рассеивателей), имеющих одинаковое время распространения от источников до рассеивателя и от рассеивателя до точки  $Q$ . Параметры волновода, положение действительного источника  $Q$  (совмещённого с приёмником) и действительного рассеивателя сохраним неизменными по сравнению с [2, 3, 14]:  $L = 1000$  м.,  $H = 400$  м., действительный источник  $Q$  и действительный рассеиватель находятся на глубине 200 м., рассеиватель в виде идеально мягкого вытянутого сфероида имеет соотношение полуосей  $a/b = 10$  ( $a = 0,279$  м.), а его ось вращения направлена перпендикулярно плоскости рисунка (см. рис. 1). Формула для коэффициента отражения  $V_{0N}$ , где  $N$  – номер источника, дана в [13].

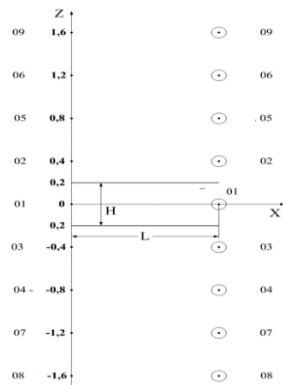


Рис. 1. Вытянутый сфероид в плоском волноводе с анизотропным упругим дном.

Для вычисления первых четырёх отражённых импульсов нам нужны следующие коэффициенты отражения:  $V_{03}$  в направлении на первый (действительный) рассеиватель 01 рас.,  $V_{05}$  в направлении на второй (мнимый) рассеиватель 02 рас. В результате несложных расчётов с помощью [10] получаем:  $V_{03} = 0,8423 + i 0,5390$ ;  $V_{05} = 0,8423 + i 0,5390$ .

Коэффициенты получились комплексными, что означает полное внутреннее отражение на границе жидкость – упругое твёрдое дно, вследствие этого модули коэффициентов отражения равны 1,0, а вещественные части первых двух коэффициентов близки к +1,0, что характерно для границы жидкость – абсолютно твёрдое дно. Полученные в результате расчётов последовательности из первых четырёх отражённых импульсов для первой и второй анизотропных сред представлены на рисунках 2 и 3. Сравним их с последовательностью импульсов на рис. 4 для идеальных границ: 1-ый и 4-ый импульсы рис. 2 и 3 полностью совпадают с 1-ым и 2-ым импульсами рис. 4, что же касается 2-го и 3-его импульсов рис. 4, то в случае идеальных границ и симметричного расположения действительных источника и рассеивателя относительно границ волновода, они компенсируются другими отражёнными импульсами, т. е. 2-ой и 3-ий импульсы рисунков 2 и 3 показывают различие в последовательности отражённых импульсов при замене абсолютно твёрдого дна на трансверсально-изотропное, а с другой стороны позволяют оценить влияние физических параметров (скоростей упругих волн и плотности анизотропной среды) на картину отражённых импульсов.

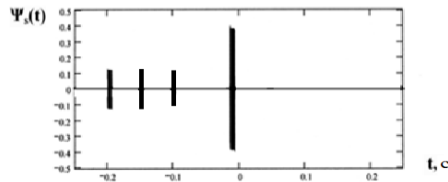


Рис. 2. Нормированная последовательность первых четырёх отражённых импульсов в волноводе с 1-ым вариантом анизотропного упругого дна.

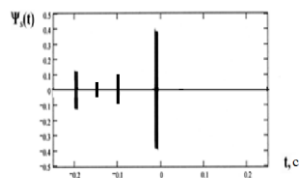


Рис. 3. Нормированная последовательность первых четырёх отражённых импульсов в волноводе со 2-ым вариантом анизотропного упругого дна.

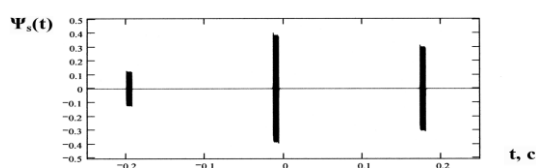


Рис. 4. Нормированная последовательность первых трёх отражённых импульсов в волноводе с идеальными границами.

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) при изучении задач распространения и дифракции импульсных сигналов в плоском волноводе нужно использовать метод мнимых источников, поскольку импульсы, как сгустки энергии, распространяются по любому направлению (в том числе и вдоль оси волновода) с групповой скоростью, не превышающей скорость звука, а именно на групповую скорость опирается метод мнимых источников;
- 2) замена анизотропного упругого дна на абсолютно твёрдое дно вполне допустима для тех источников (действительного и мнимых), волны от которых при падении на упругое твёрдое дно испытывают полное внутреннее отражение;
- 3) принятая нами модель мнимых источников и мнимых рассеивателей вполне допустима (из – за полного внутреннего отражения), по крайней мере, для первых четырёх отражённых импульсов;
- 4) изменения физических параметров трансверсально-изотропного



дна проявляется не на всех отражённых импульсах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клещёв А. А., Кузнецова Е. И. Рассеяние импульсных звуковых сигналов сфероидальным телом, находящимся в плоском волноводе. / Сб. тр. XXIV сессии РАО. М.: ГЕОС. 2011. С. 198 – 201.
2. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Diffraction of Impulse Signals on Spheroidal Body, Put in Plane Waveguide // International Journal of Theoretical and Mathematical Physics. 2012. V. 2. № 6. P. 211 – 214.
3. Kleshchev A. A. Diffraction of Pulse Sound Signals on Elastic Spheroidal Shell, Put in Plane Waveguide. / Advanced Studies in Theoretical Physics. 2013. V. 7. № 13 – 16/ P. 697 – 705.
4. Kleshchev A. A. Diffraction of Sound Signals at Elastic Shell of Non-analytical Form Put in Plane Waveguide. / Advances in Signal Processing. 2014. V. 2. № 2. P. 46 – 49.
5. Kleshchev A. A. Pulse Sound Signals Diffraction on Elastic Bodies of Analytical and Nonanalytical Forms, Put in Plane Waveguide. / Zeitschrift fur Naturforschung A. 2015. V. 70. № 6. P. 419 – 427.
6. Клещёв А. А. Дифракция импульсных звуковых сигналов на упругих телах сфероидальной формы, находящихся в плоском волноводе. / Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 2. № 28. С. 77 – 81.
7. Клещёв А. А., Клюкин И. И. Спектральные характеристики рассеяния звука телом, помещённым в звуковой канал. / Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 3. С. 470 – 473.
8. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
9. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твёрдых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
10. Клещёв А. А. Дифракция и распространение волн в упругих средах и телах. С.-Пб.: Влас, 2002. 156 с.
11. Kleshchev A. A. Diffraction, radiation and propagation of elastic waves in isotropic and anisotropic bodies. Newcastle: Cambr. Schol. Publ., 2019. 114 p.
12. Фёдоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 388 с.
13. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 502 с.
14. Клещёв А. А. Гидроакустические рассеиватели. С.-Пб.: Прима, 2012. 268 с.

*«Пузырек так же неисчерпаем, как и электрон»*

Из застольных бесед с академиком В.И. Ильичевым

**Мельников Н.П., Мельникова А.Н.**

**МЕЛКОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МОРСКОЙ  
ВОДЫ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского  
государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а

Тел.: 920-0774352; Факс: 831 4325707, E-mail: melnikov50@mail.ru

*В работе приводятся результаты измерений величины кавитационных порогов и щелочности морской воды на разрезе по 150° в.д. через экватор от 4° ю.ш. до 4° с.ш. Обнаружена значительная периодическая пространственная изменчивость с периодом около 1°. Ярко выраженная связь величины кавитационных порогов морской воды с временем суток отсутствует.*

Понижение давления в жидкости приводит к возникновению явления, называемого кавитацией. Если понижение давления в потоке жидкости приводит к появлению кавитации, то кавитация называется гидродинамической.

Акустическая волна достаточной амплитуды порождает акустическую кавитацию. При возникновении кавитации в жидкости появляются каверны и пузырьки, т.е. возникают разрывы сплошности среды. Движение этих каверн и пузырьков в переменных полях давления порождает все физические процессы, присущие кавитации. Эти разрывы возникают при растягивающих напряжениях намного меньших, чем при растягивающих напряжениях, обеспечивающих молекулярный разрыв жидкости. Такой физический процесс возможен только при наличии в жидкости некоторых «слабых мест», обычно называемых зародышами кавитации. Таким образом, невозмущенная жидкость имеет некую прочность на разрыв, называемую кавитационной прочностью жидкости. Но любое воздействие на жидкость приводит к изменению её физических, химических и других свойств. Поэтому говорят о кавитационном пороге жидкости, который зависит не только от свойств невозмущенной жидкости, но и от способа её возмущения, а также, как от методики измерения, так и от характера акустического воздействия.



Очевидно, что величина кавитационной прочности жидкости является предельной для кавитационных порогов, и они могут оказаться приблизительно равными лишь при условии, что жидкость разрывается таким образом, что не происходит существенного изменения как размеров, так и распределения по размерам зародышей кавитации, и перечисленные выше процессы возникают в неизменной внешними воздействиями среде.

Многочисленные экспериментальные и теоретические работы показывают, что величина кавитационных порогов зависит от концентрации и распределения по размерам зародышей кавитации. В морской воде присутствуют различные включения: твердые смачиваемые и несмачиваемые взвеси, пузырьки, включения биологического происхождения – зоопланктон и фитопланктон, рыбы и другие биологические виды, продукты распада биологических систем и прочее. На величину кавитационной прочности влияет не только наличие в жидкости зародышей кавитации, но и свойства жидкости, которые влияют на динамику кавитационных зародышей (мельчайших пузырьков) в переменных полях давления. В первую очередь это вязкость жидкости и коэффициент поверхностного натяжения. Наличие в воде ионизирующих излучений приводит к уменьшению величины кавитационной прочности. Одним из таких излучений является космическое излучение и естественная радиоактивность морской воды..

Концентрация зародышей кавитации, их распределение по размерам должны определять величину прочности невозмущенной жидкости. Следовательно, различные процессы в морской воде, которые влияют на этот параметр, так же влияют на величину кавитационной прочности морской воды.

Все измерения кавитационных порогов морской воды в натуральных условиях проводились по единой методике.

Согласно программе экспедиции, научно-исследовательское судно двигалось по заданному маршруту. На станции в дрейфе с борта судна опускается измерительная установка, состоящая из акустического концентратора цилиндрической формы и контрольного гидрофона. Измерения кавитационных порогов морской воды проводились на различных частотах (5, 10 и 15 кГц) и глубинах (от 2 м до 100 м). Кавитационная прочность жидкости является статистической величиной, что обусловлено случайным характером распределения зародышей в жидкости по размерам и по пространству и распределена по нормальному закону, поэтому в каждой точке измерений (на каждой станции), на каждой глубине проводилось не менее 10 измерений кавитационных порогов для проведения статистической обработки. При этом установлено, что коэффициент вариации величины порога акустической кавитации, как правило, не превышает 5%. Из-за вертикальной качки судна объем воды внутри акустического концентратора полностью обновлялся, поэтому результаты измерений можно считать полностью независимыми.

При измерении величины кавитационных порогов морской воды в натуральных условиях за критерий возникновения кавитации взят динамический порог устойчивости пузырька и за порог кавитации в этом случае принята амплитуда возбуждающего акустического поля.

В силу естественной неоднородности и нестационарности параметров состояния и различия физико-химических и биологических характеристик морской воды в различных районах Мирового океана, существенных для свойств, содержащихся в ней зародышей, прочность морской воды характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью.

Пространственные изменения величины кавитационных порогов можно разделить на глобальную, мезомасштабную и мелкомасштабную изменчивость. Глобальная изменчивость величины кавитационных порогов обусловлена широтной изменчивостью основных параметров морской воды и обнаружена в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах. Исследования мезомасштабной и мелкомасштабной изменчивости величины кавитационных порогов морской воды проводилась в динамически активных зонах Мирового океана. Эта изменчивость имеет сложный характер и обусловлена сложным пространственным распределением гидрологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров морской воды.



Временная изменчивость величины кавитационных порогов морской воды в различных районах Мирового океана имеет сложный характер и связана с сезонными и суточными изменениями концентрации и распределения по размерам зародышей кавитации. Суточная изменчивость величины кавитационных порогов связана с наличием общего суточного ритма гидрологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик морской воды.

Одним из важнейших факторов, влияющих на многие процессы в приповерхностном слое океана, является карбонатная система морской воды. Карбонатная система морской воды включает в себя следующие параметры: кислотность, общую щелочность, общую концентрацию карбонатных ионов, концентрацию свободной углекислоты. К ней непосредственно примыкает концентрация  $\text{Ca}$ . Карбонатная система связана с процессом фотосинтеза, то есть выделение кислорода и поглощение углекислого газа, окисление органического вещества, то есть поглощение кислорода и выделение углекислого газа, растворение карбонатов и осаждение карбонатов.

Состояние карбонатной системы влияет как на процессы неживой части океана (газообмен на границе морская вода/атмосфера, образование и растворение карбонатов и т.д.), так и на процессах, связанных с живой материей. В первую очередь это процессы фотосинтеза, то есть выделение кислорода и поглощение углекислого газа, окисление органического вещества, то есть поглощение кислорода и выделение углекислого газа, растворение карбонатов и осаждение карбонатов. Таким образом, наличие некоторых элементов карбонатной системы являются индикаторами присутствия в воде планктона и углекислого газа.

Настоящая работа посвящена изучению изменчивости кавитационных порогов морской воды в «спокойном» в гидрологическом смысле районе Мирового океана. В 11 рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» был сделан разрез по 150° в.д. от 4° ю.ш. до 4° с.ш.

На рис.1.а приведены изолинии величины кавитационных порогов в относительных единицах и на рис.1.б изолинии щелочности Alk, мг-экв/л.

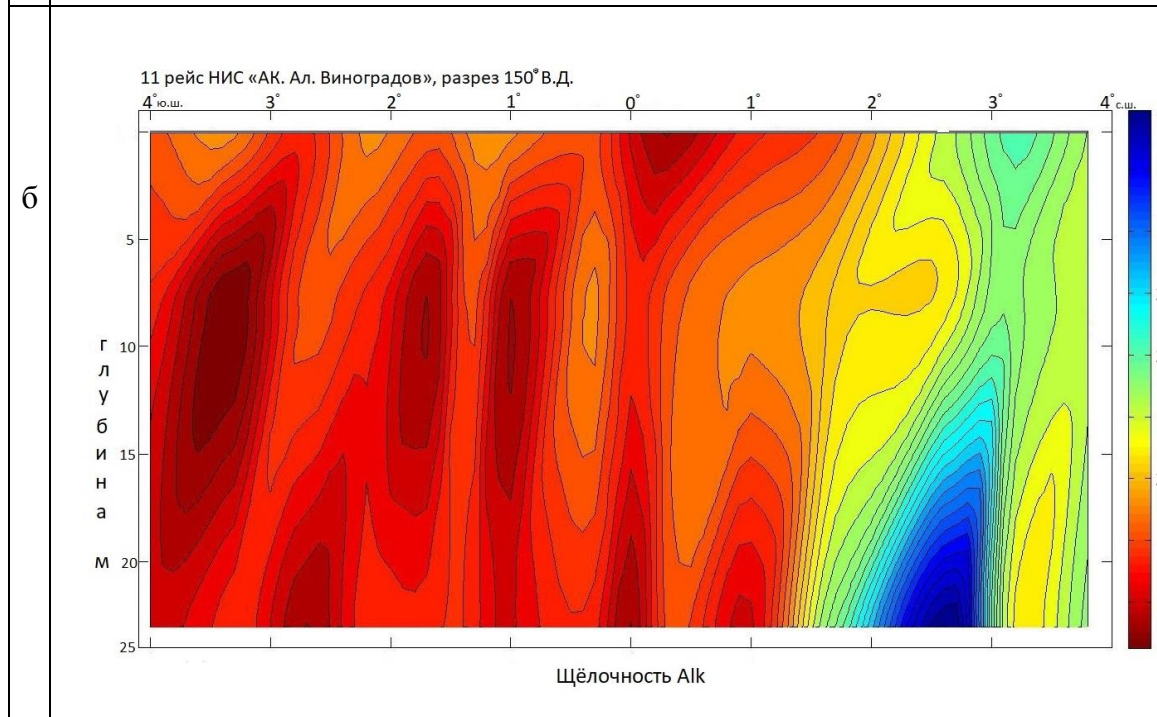
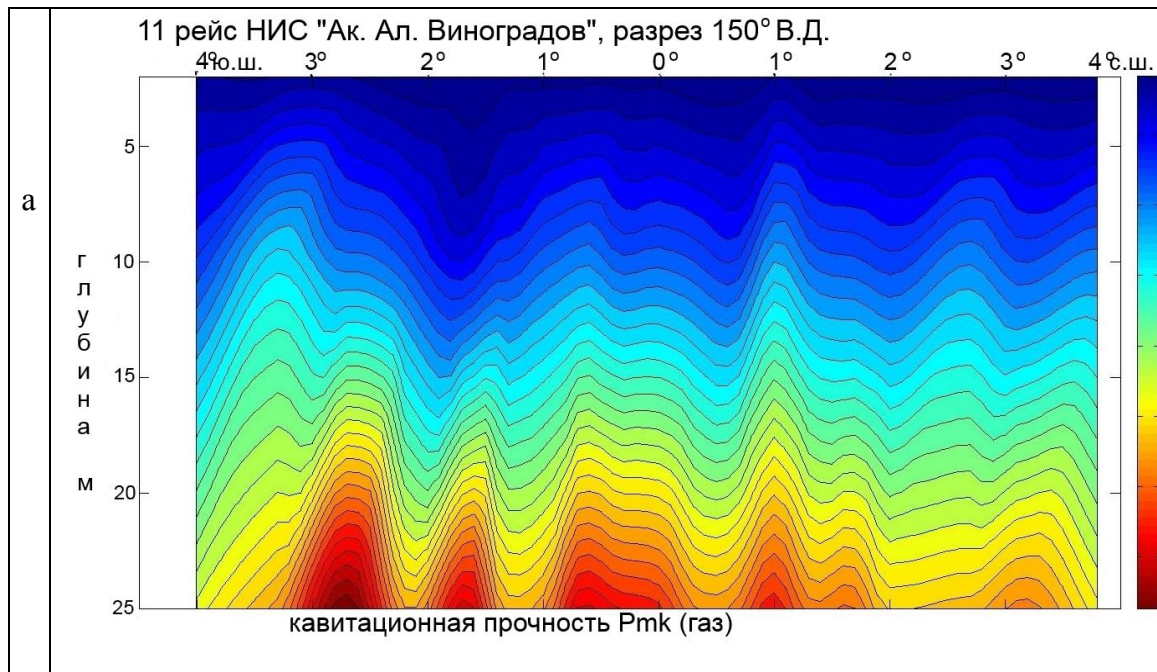
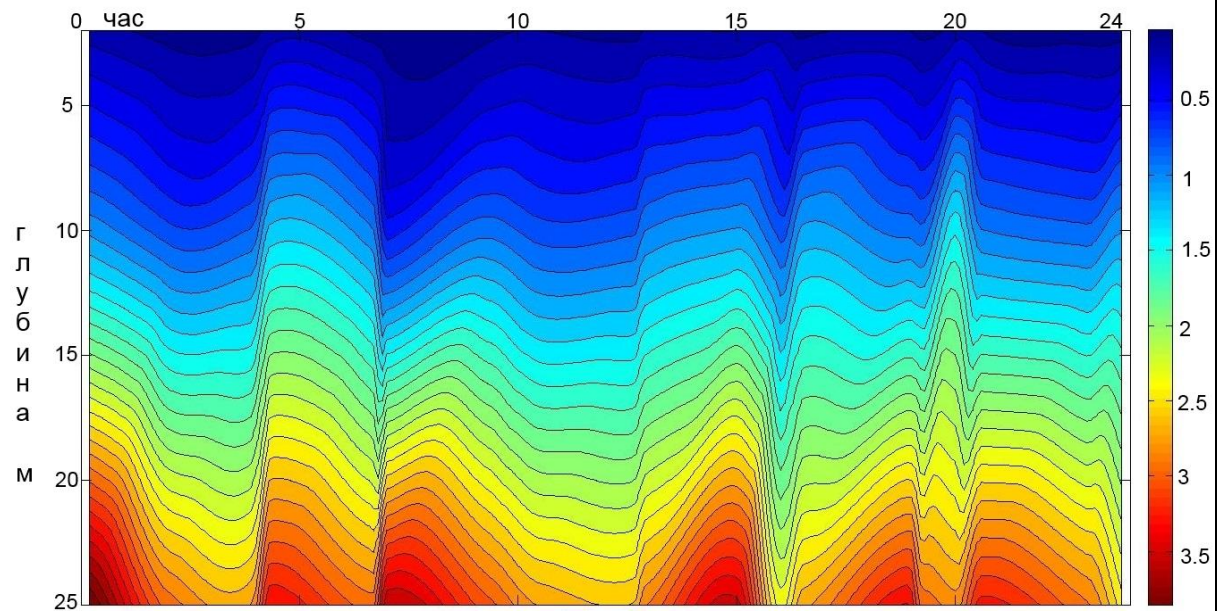


Рис.1



Изменчивость кавитационной прочности существенна и составляет на глубине 25 м. около 100%. Кроме того, эта изменчивость носит явный периодический по пространству характер. Изменчивость щелочности также имеет периодический характер в районе от 4° ю.ш. до 2° с.ш., севернее величина щелочности уменьшается и имеет «изрезанный» характер по широте и глубине. Следует отметить, что инверсий величины кавитационных порогов по глубине, когда кавитационные пороги уменьшаются с глубиной, нет. Такое распределение величин кавитационных порогов и щелочности наводит на мысль о существенном влиянии на их величину временного фактора (времени суток). Чтобы выяснить существование такой зависимости, были построены временные ряды величины кавитационных порогов и щелочности в пределах от 0,0 часов до 24,0 часов. Эти зависимости приведены на рис.2.

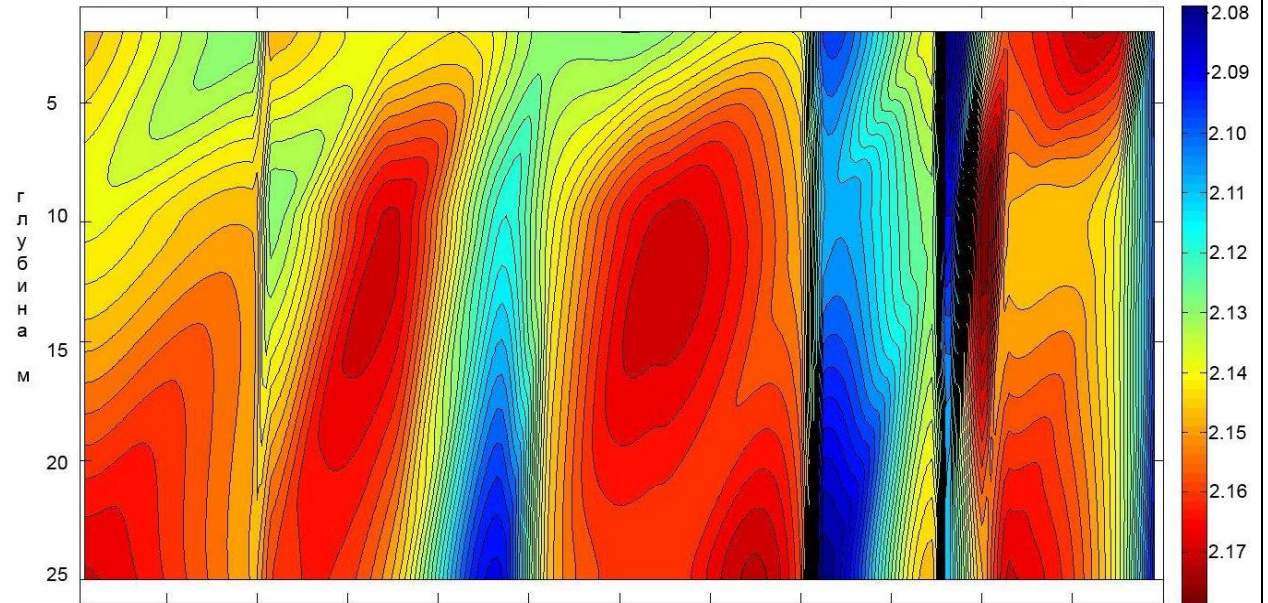
11 рейс НИС "Ак. Виноградов", разрез, 150 град В.Д. от 4 град Ю.Ш. до 4 град С.Ш.



а

11 рейс НИС "Ак. Ал. Виноградов. Разрез 150° В.Д.

0 час 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24



б

Рис.2

Для сравнения ниже приведена изменчивость кавитационных порогов в динамически активном районе Мирового океана, в межфронтальной зоне течений Куроисио и Оясио, полученная в 14 рейсе Научно-исследовательского судна «Академик Александр Виноградов» весной 1989 года. Первый район расположен в Субарктической фронтальной зоне Тихого океана. Эта зона расположена примерно между  $38^{\circ}$  и  $45^{\circ}$  N и пересекает весь Тихий океан в зональном направлении. Западная часть Субарктической фронтальной зоны характеризуется сложной структурой при наличии трех фронтов – Полярного, Субарктического и Фронта Продолжения Куроисио. Столь сложное термохалинное и динамическое строение западной части Субарктической фронтальной зоны обуславливает сильную пространственную изменчивость гидрологических и других параметров морской воды. Границами межфронтальной зоны субарктического фронта Тихого океана считается северный и южный субарктические фронты, вытянутые в широтном направлении, границы которых динамически подвижны. Внутри самой зоны находятся трансформированные воды субарктической и субтропической структур, которые смешиваются в разных пропорциях и могут разделяться вторичными фронтами. Второй район расположен южнее и представляет собой меридианальный разрез от  $126^{\circ}$  в.д. до  $140^{\circ}$  в.д. между  $15,5^{\circ}$  с.ш. и  $18^{\circ}$  с.ш. В этом районе нет такой бурной динамической активности как в первом районе.



На рис.3 приведены изолинии величины кавитационной прочности морской воды в относительных единицах (слева А, В, С;<sup>CO<sub>2</sub></sup>справа С) и изолинии суммы  $\Sigma CO_2$ , ммоль/л. (справа А, В, D и слева D). На рисунке слева и справа А и В вертикальная ось – это глубина в метрах; на рисунке А слева и справа горизонтальная ось - это широта, а на рисунке В справа и слева горизонтальная ось – это долгота. На рисунке С и D справа и слева вертикальная ось – это широта, а горизонтальная ось – это долгота. На рисунке С и D справа приведены измерения на глубине 5 м., а слева на глубине 70 м.

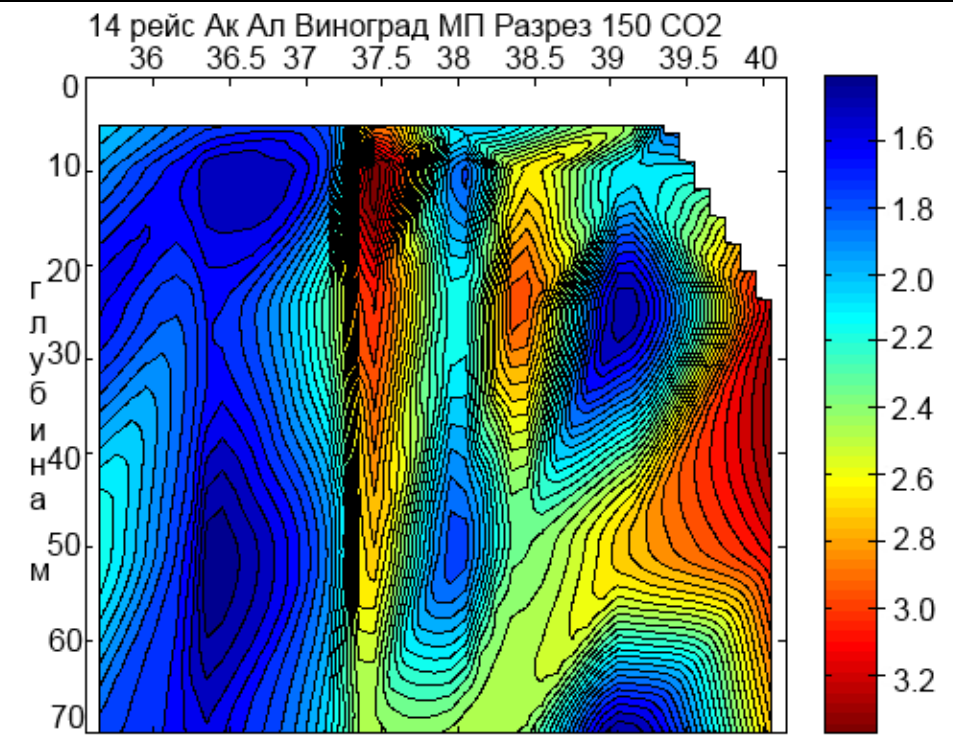
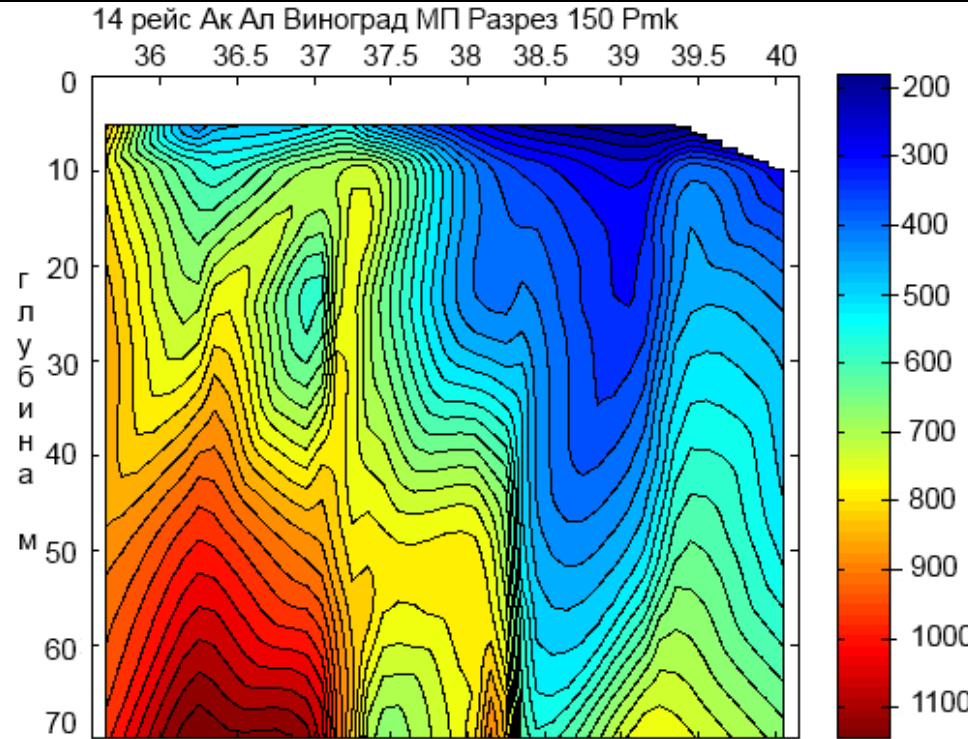
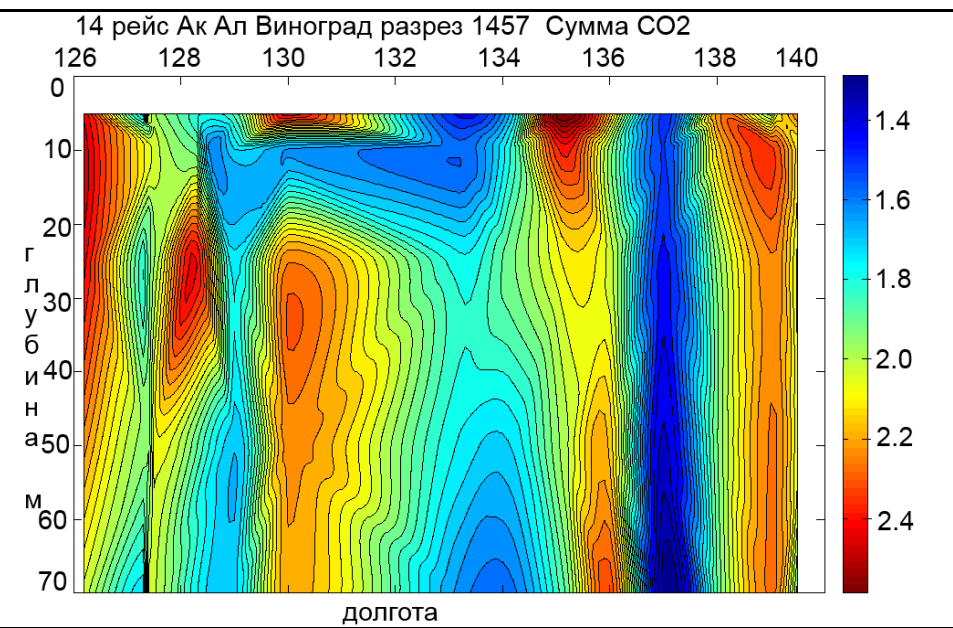
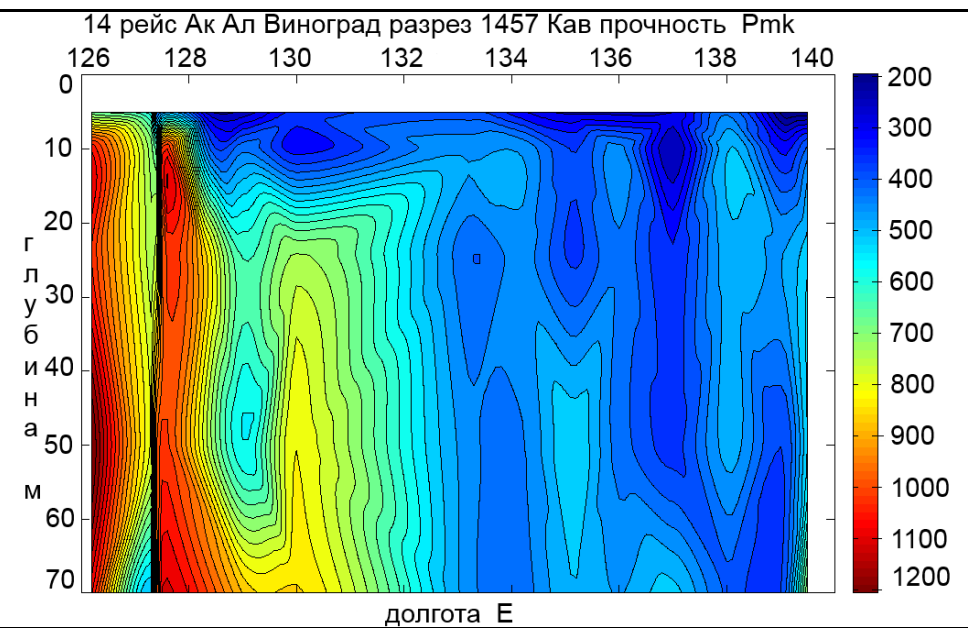
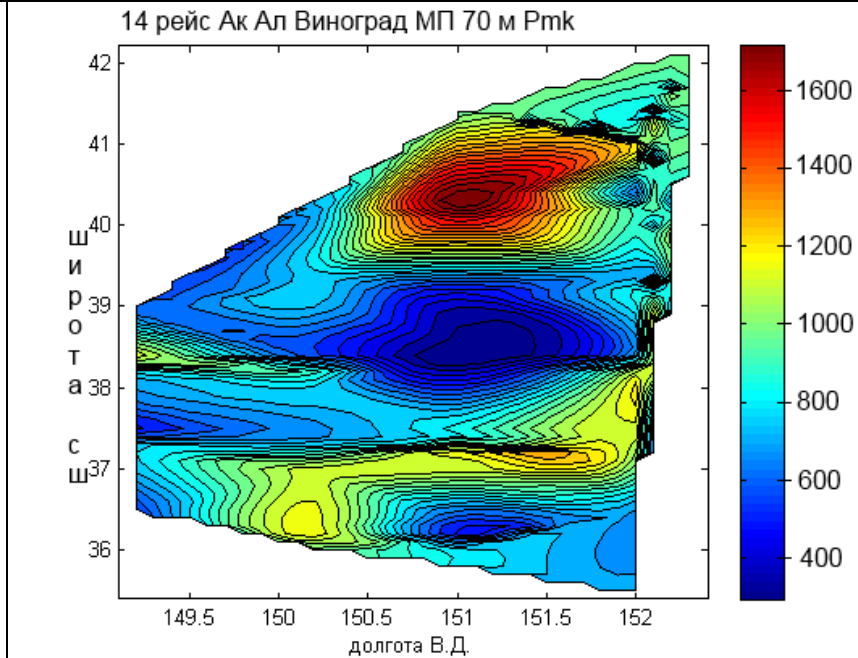
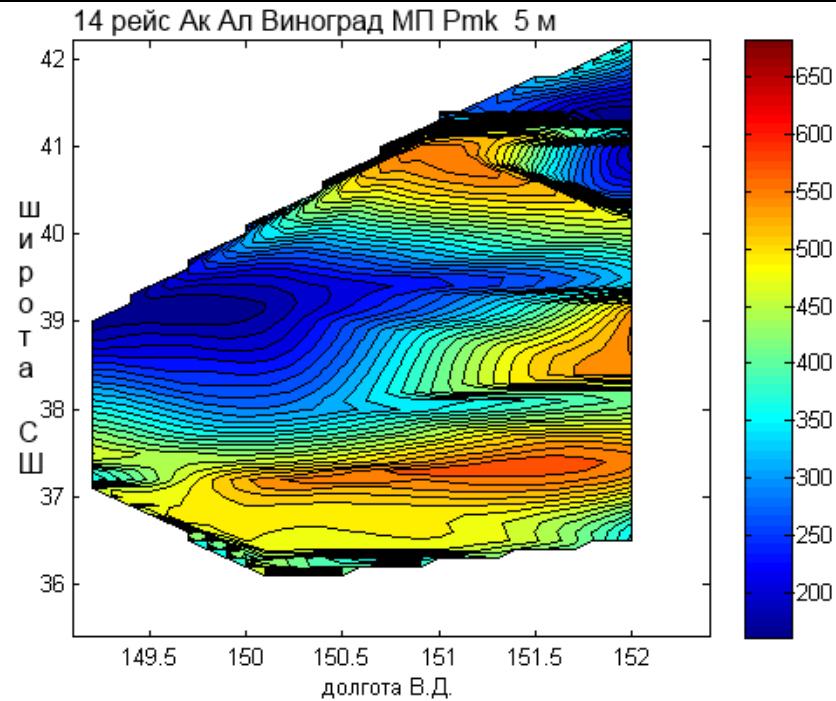
**A****B**

Рис.3

C



D

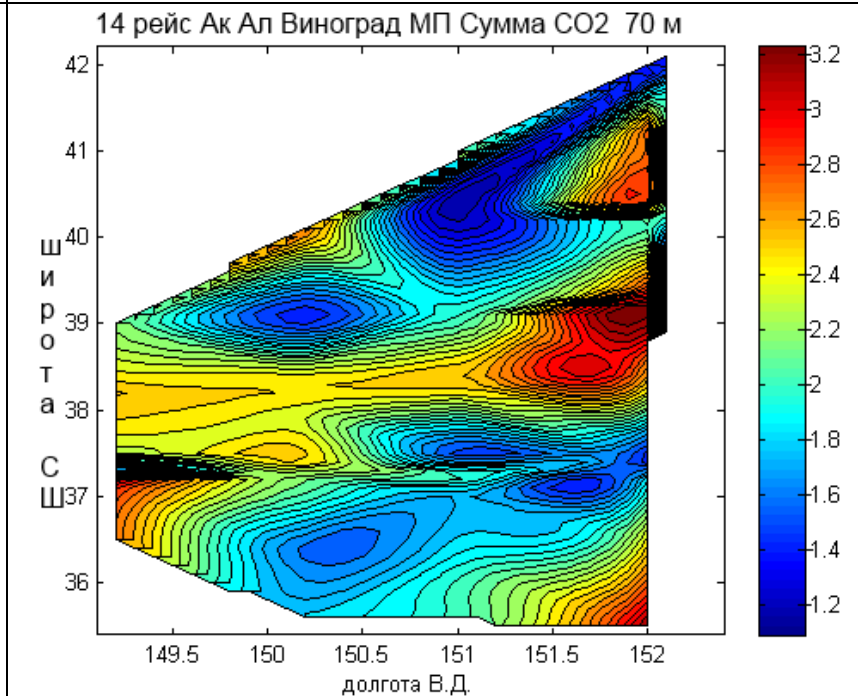
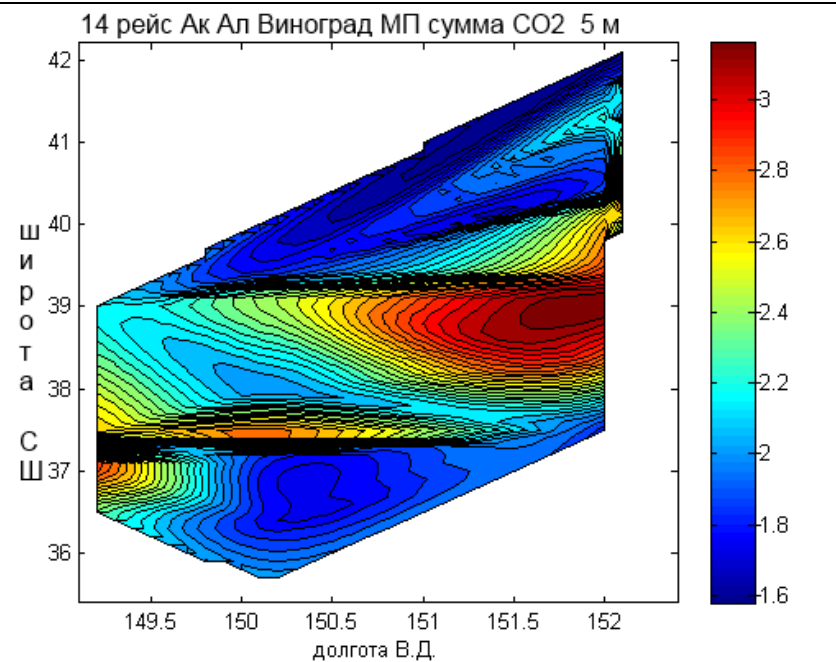


Рис.3

На широтном разрезе А и на меридианальном разрезе В распределения величин кавитационной прочности и суммы  $CO_2$  морской воды носят существенно различный характер.

В динамическом активном районе А происходят значительные изменения величин, как кавитационных порогов, так и суммы  $CO_2$  на очень малом расстоянии порядка 0.5 градуса. Во втором районе распределение этих величин по пространству не так велики и происходят на значительно больших расстояниях порядка 7 градусов. И только в интервале около  $126^\circ - 128^\circ$  в.д. происходят существенные изменения этих величин на коротких расстояниях.

На рисунках С и D представлены пространственные распределения величин кавитационных порогов и суммы в межфронтальной зоне. Это распределение носит сложный ячеистый характер. Распределения величин на горизонтах 5 м и 70 м существенно отличаются друг от друга. Некоторые инверсии значительно смещаются в пространстве, а некоторые просто исчезают.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом изменчивость величины кавитационных порогов даже в «спокойных» водах Мирового океана имеет значительную величину.



# Новая жизнь распределенных датчиков – измерителей внутренних волн в морской среде



**Серебряный А.Н.<sup>1,2</sup>, Денисов Д.М.<sup>2</sup>, Химченко Е.Е.<sup>1</sup>, Попов О. Е.<sup>3</sup>**

1 – Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

2 – Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева, Москва

3 – Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва

Email: serebryany@hotmail.com

## Введение

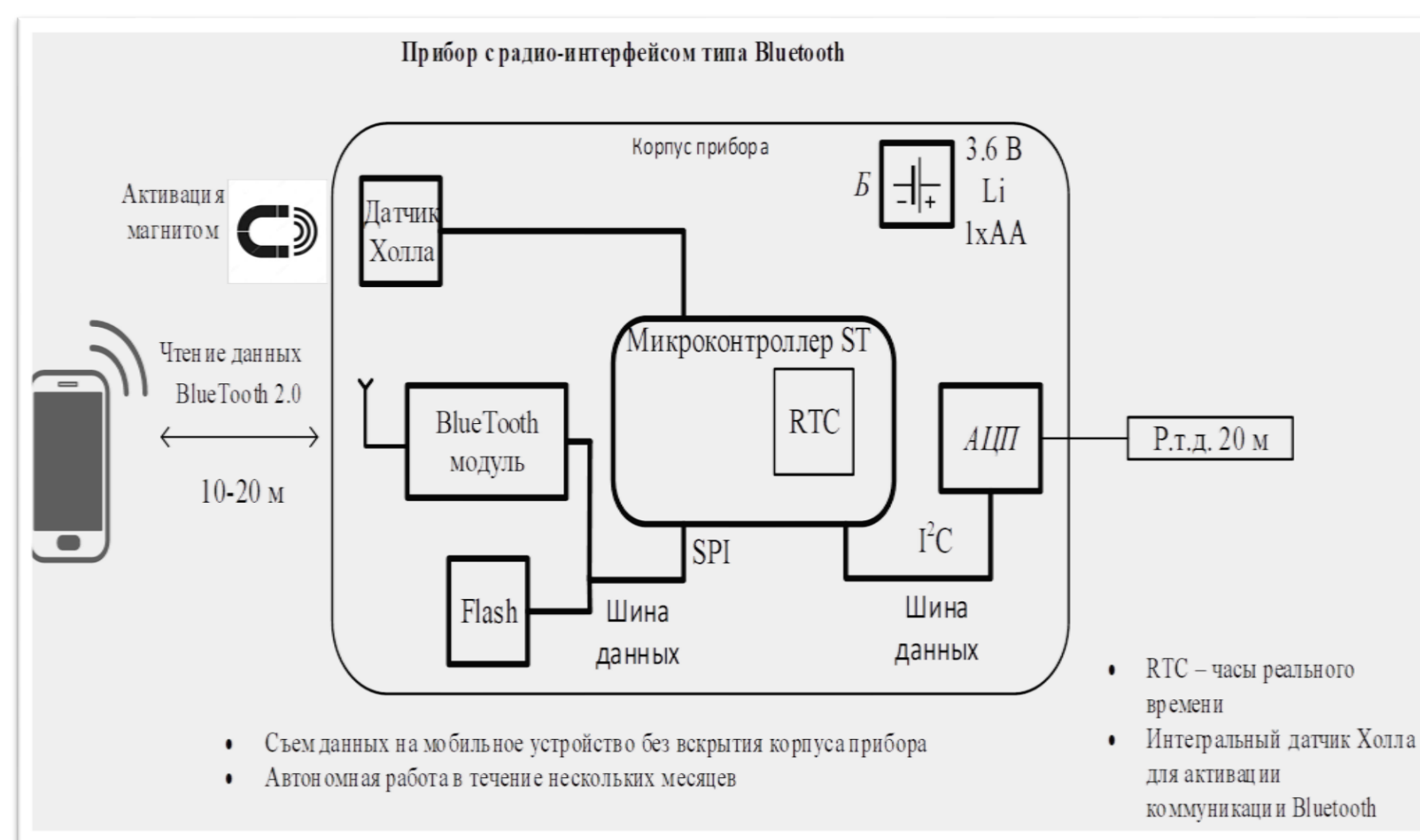
Для измерений внутренних волн в океанической и морской среде применяются как контактные, так и дистанционные методы. Наиболее распространены контактные методы измерений на основе регистрации изменений температуры водного столба вертикальными гирляндами точечных датчиков температуры. Альтернативой гирляндам температурных датчиков служит распределенный датчик температуры (РДТ), предложенный К.Д. Сабининым и К.В. Коняевым. РДТ измеряет среднюю температуру охватываемого им слоя, адекватно отслеживая, вызванные внутренними волнами, колебания температуры. Его главное

преимущество перед точечным датчиком в том, что его запись лишена искажений, которую привносит тонкоструктурная изрезанность вертикального профиля температуры, обычно присутствующая в реальных океанских или морских условиях. В работе дается описание нового измерителя внутренних волн на основе распределенного датчика температуры, основным преимуществом которого является его автономность, компактность и возможность накопления большого количества информации.

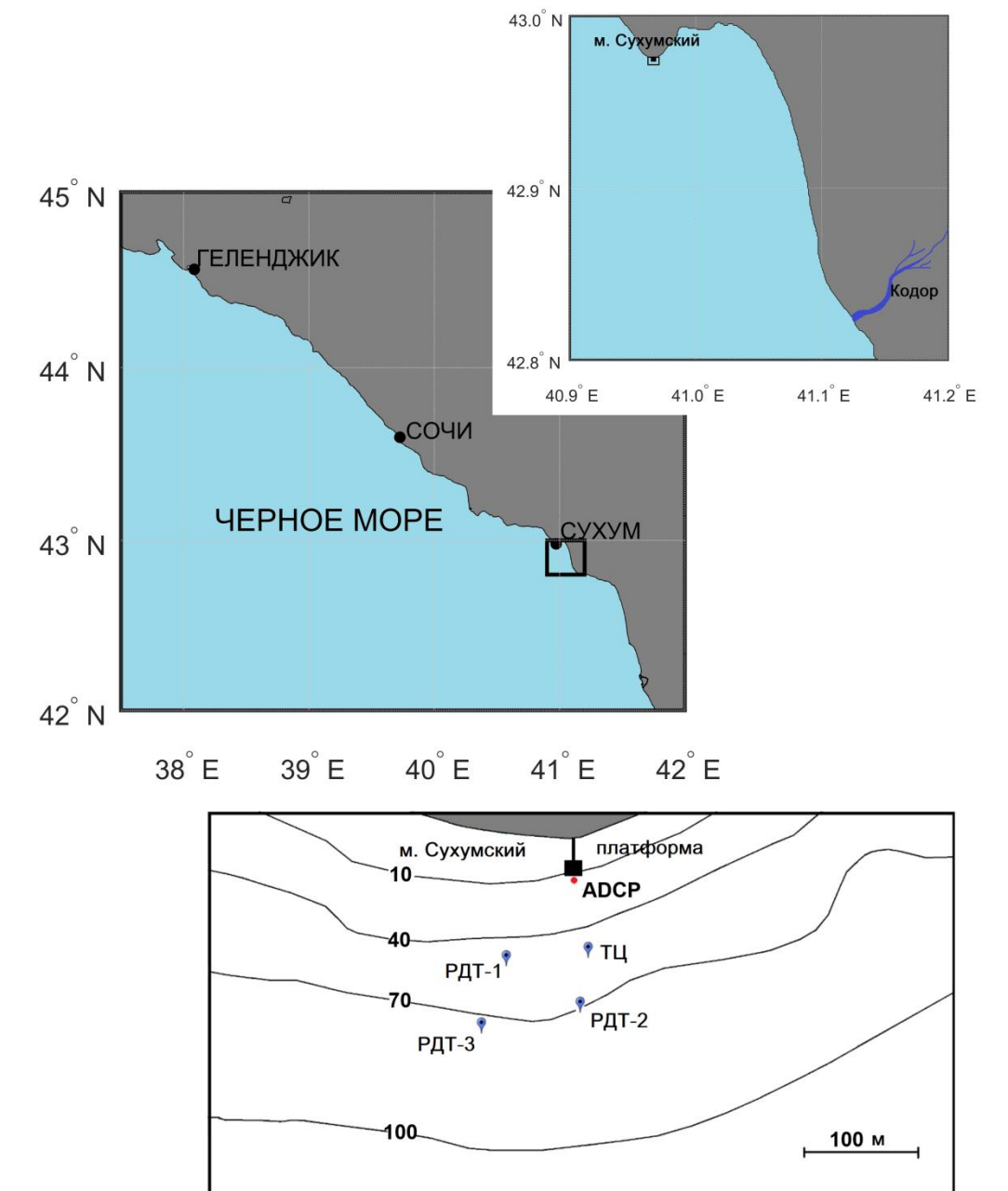
## Автономный измеритель внутренних волн



Структурная схема измерителя внутренних волн



Район измерений

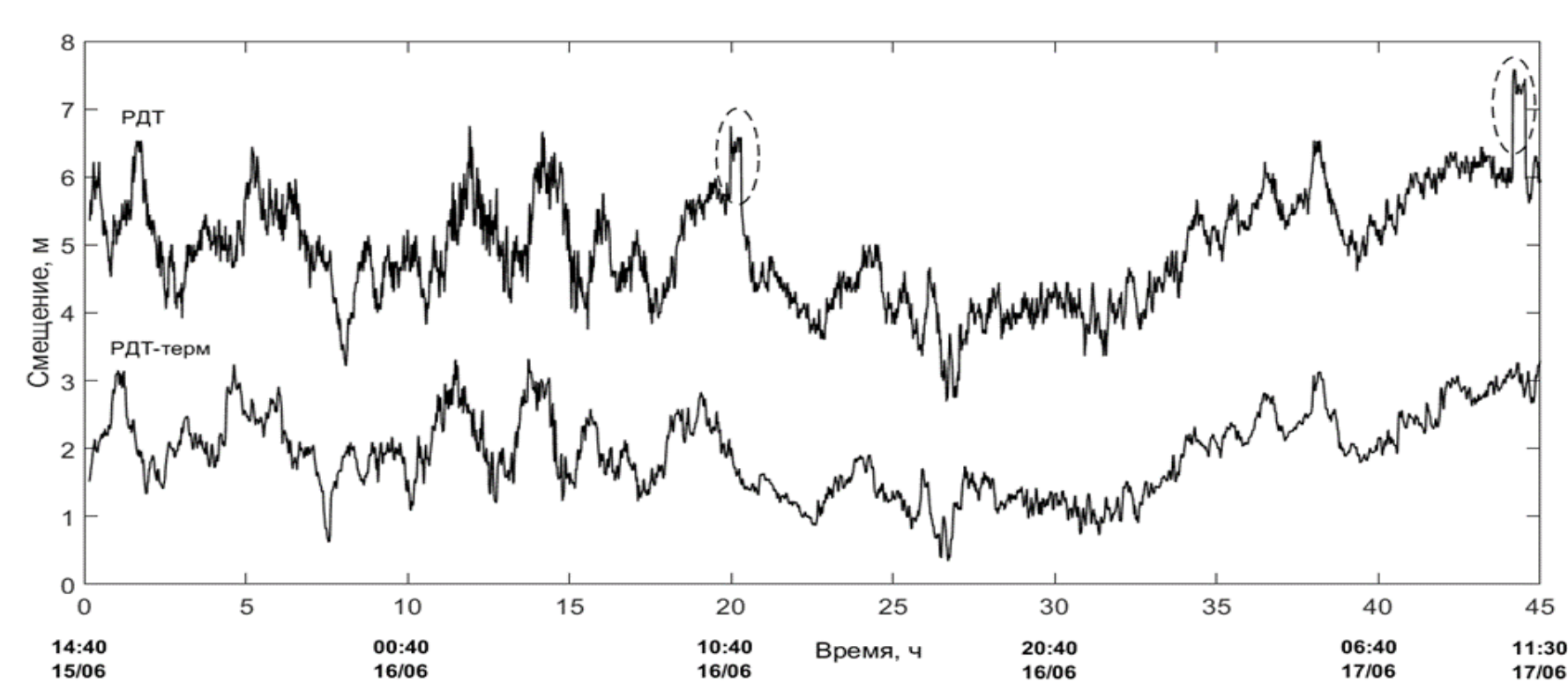


Автономный измеритель внутренних волн конструктивно состоит из РДТ длиной 20 м (2) и записывающего устройства (1). РДТ выполнен из сталемедного провода, защищенного от воды изоляционным покрытием. Погонное сопротивление провода 5 Ом/м, температурный коэффициент сопротивления 0.36 Ом/К, постоянная времени 20 с. Записывающее устройство предназначено для периодической записи значений температуры, получаемых от РДТ. Дискретность измерений можно

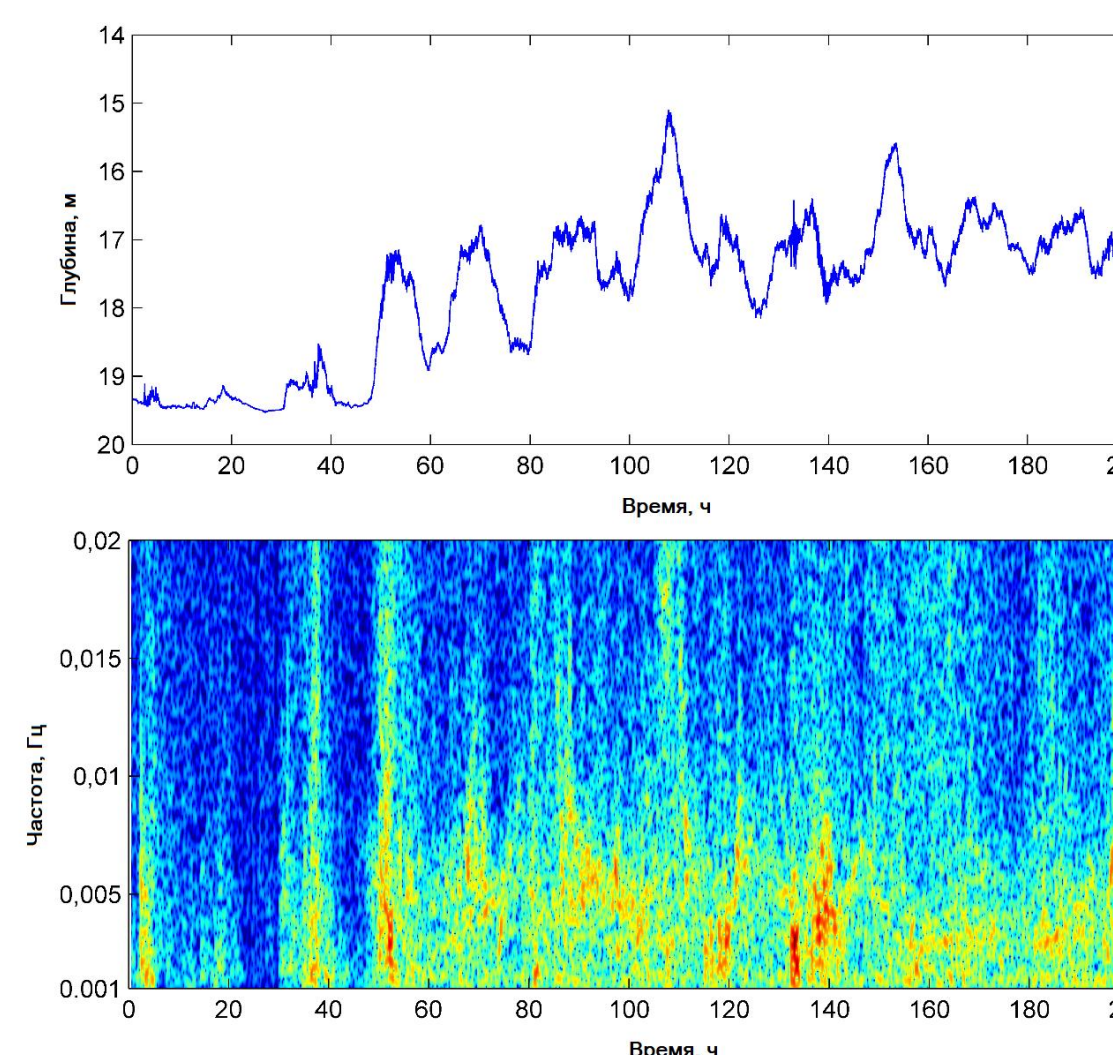
устанавливать в пределах от 2 до 60 с. Время автономной работы при дискретности 20 сек не менее 6 месяцев. Абсолютная погрешность измерения температуры 0.1 °С, разрешающая способность - 0.03 °С.

Корпус устройства цилиндрический герметичный выполнен из диэлектрического материала (полиацеталь) и может устанавливаться в воде на глубинах до 200 м.

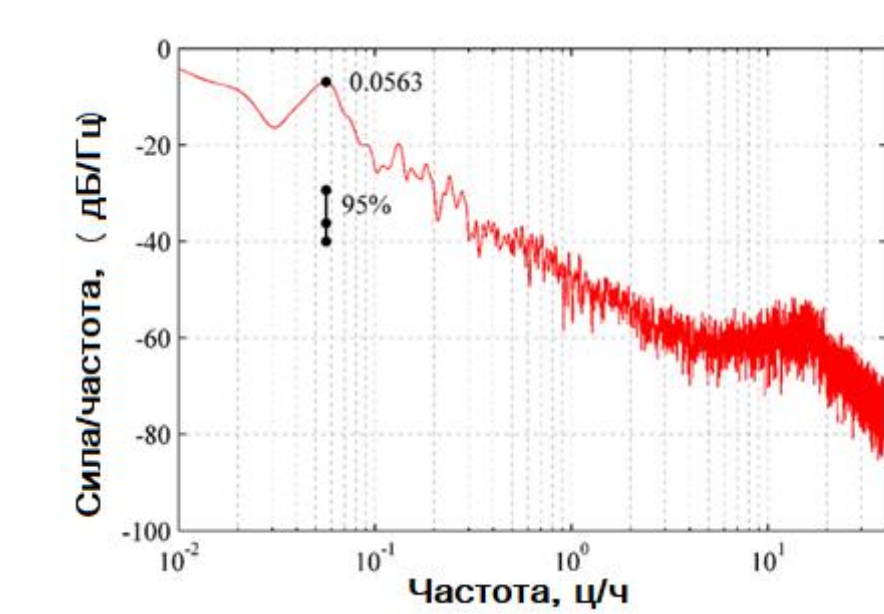
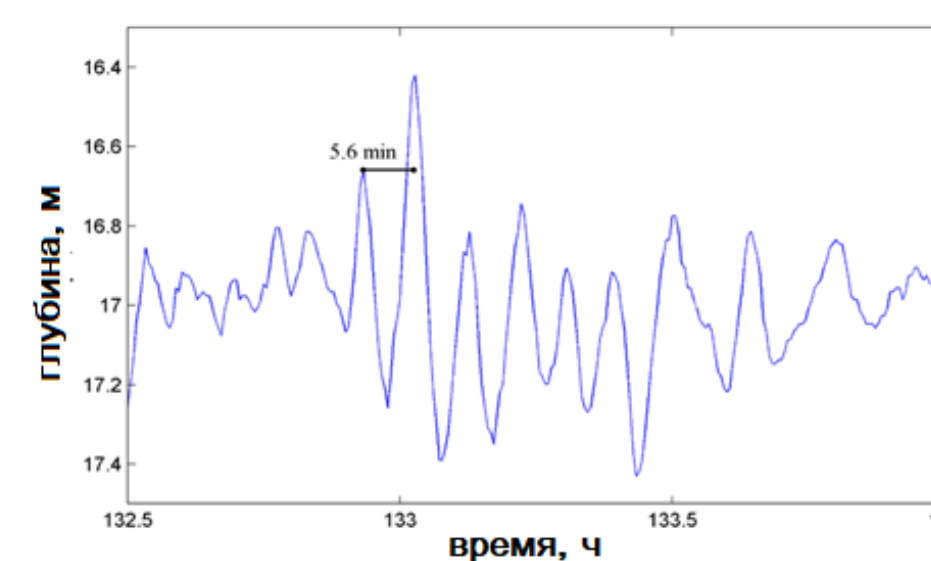
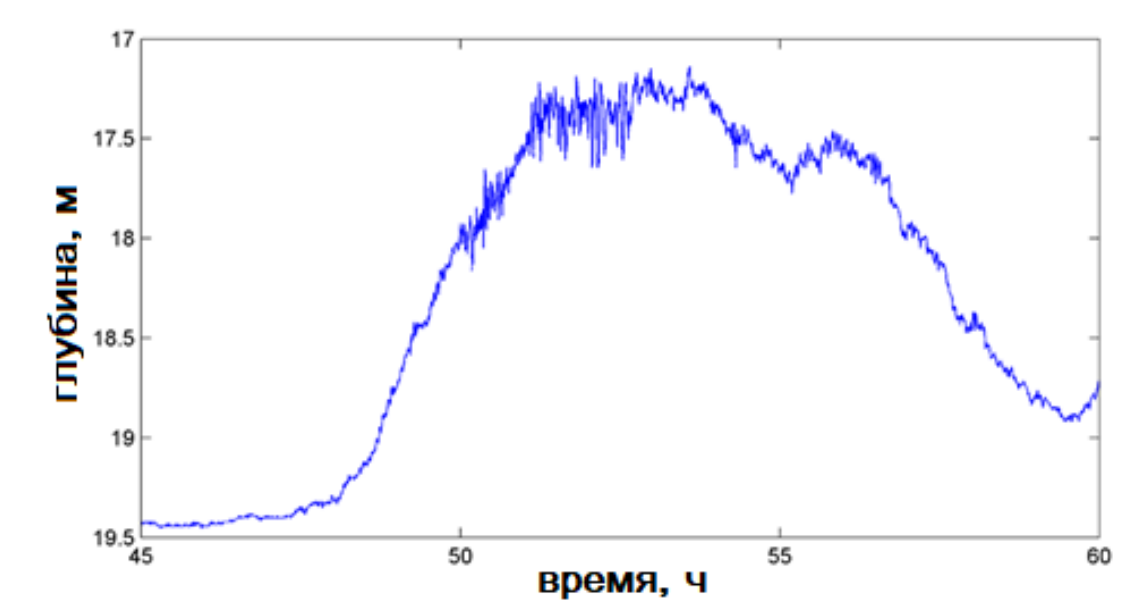
## Результаты и выводы



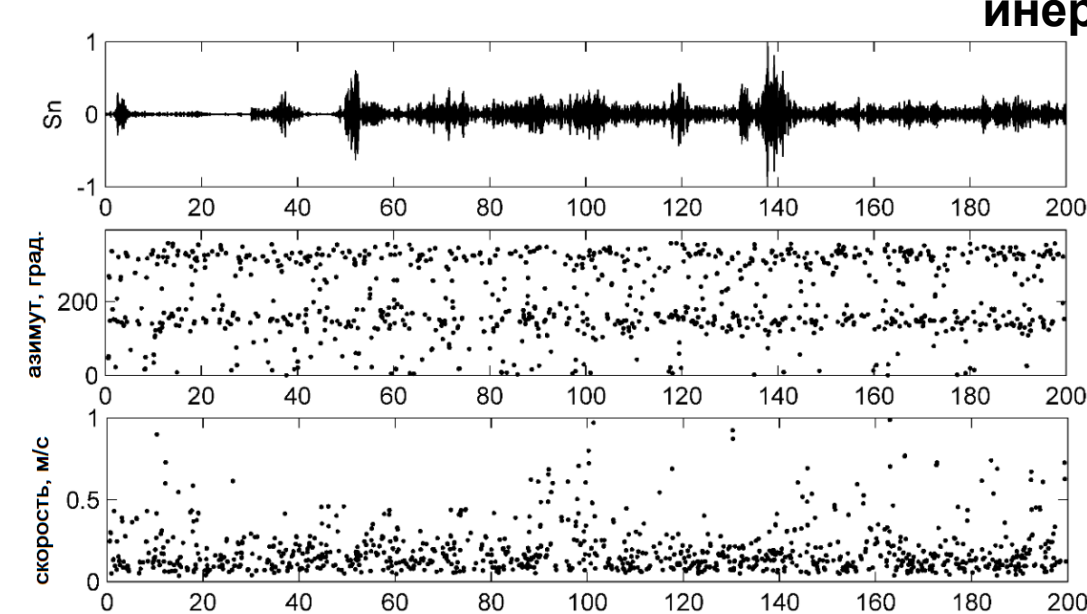
Сопоставление синхронных измерений автономным РДТ (вверху) и термогирляндой из пяти точечных датчиков температуры (внизу).



Запись РДТ (вверху) и спектрограмма, показывающая привязку цугов коротких волн к гребням длинных инерционных внутренних волн.



Частотный спектр внутренних волн, рассчитанный по данным РДТ



Вверху отфильтрованный нормированный сигнал в полосе 0.002-0.00333 с. В середине азимуты прихода ВВ, внизу фазовые скорости ВВ.

Показана способность нового автономного РДТ измерять важные характеристики внутренних волн. Использование пространственных антенн на его основе, вместе с дистанционными методами мониторинга, открывает обнадеживающие перспективы дальнейшего изучения внутренних волн морской среды.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-52-40007.