

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕРМОМЕТРИИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**В.В. Разживин, А.А. Тагильцев, В.В. Безответных, М.С. Лебедев,
Е.А. Войтенко, А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов**

Работа посвящена вопросам практического применения гидроакустических методов дистанционного измерения температурных параметров морской среды на трассах значительной протяженности (от сотен до тысяч километров), охватывающих участки шельфа, материкового склона и область глубинного подводного звукового канала. Разработанный для реализации этих методов низкочастотный гидроакустический комплекс основан на синхронизированном излучении и приеме фазоманипулированных сигналов с определением дистанции и времени пробега звука по ней для последующего расчета скорости звука и связанного с ней искомого параметра – средней температуры на акустической трассе. В статье даются сведения о физических и методических предпосылках технической реализации натурного эксперимента, осуществленного в Японском море в 2022 году. Приведены технические решения элементов комплекса, выполнена оценка чувствительности и погрешности используемого метода акустической термометрии. Результаты выполненной работы направлены на увеличение дальности действия и повышение разрешающей способности гидроакустического комплекса, что определяет его применимость для мониторинга мезомасштабных процессов в морском или океаническом бассейне, а также как инструмента для оценки климатических изменений.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, пьезоэлектрические источники звука, акустическая томография, мониторинг температуры, температура морской среды

Введение

Современные методы исследований, связанные с изучением взаимодействия атмосферы и океана в контексте оценки климатических изменений и состояния морских экосистем, развиваются на основе спутниковых наблюдений, в том числе в сочетании с получением ограниченных по площади оперативных океанологических данных. В то же время задача верификации данных дистанционного зондирования и разработка новых подходов к изучению динамических процессов в морской среде предполагает проведение длительных непрерывных измерений ее параметров, чему способствует создание постоянно действующих измерительных комплексов или подводных обсерваторий [1]. Наиболее приемлемым среди методов, позволяющих осуществить масштабный и долговременный мониторинг подповерхностной температуры как ключевого параметра для оценки влияния характеристик морской среды на климатические изменения является метод аку-

стической томографии, а именно восстановление по результатам акустического зондирования среды величины и динамики ее средней температуры, определяющей, как известно, скорость звука на акустической трассе. У. Манком и К. Вуншем в работе [2] было высказано и экспериментально подтверждено предположение, что время прохождения акустических сигналов, распространяющихся между относительно небольшим числом источников и приемников, может быть использовано для составления карты меняющегося температурного поля в акваториях большого масштаба. Используемое для этого низкочастотное акустическое зондирование по своей сути является пространственно интегрирующим, подавляя мелкомасштабную изменчивость гидрофизических параметров, влияющую на точечные измерения, и обеспечивая прямые измерения средних значений этих параметров по горизонтали и вертикали на больших дистанциях между источником и приемником сигналов. В 1990-х годах японской группой океанской акустической томографии при томографиче-

ских экспериментах в северной части Тихого океана с использованием акустического излучателя 200 Гц была достигнута дальность наблюдения до 1000 км, при этом были успешно реконструированы вихревые тепловые структуры в Северном экваториальном течении Куроисио [3]. В дальнейшем идея использования акустических колебаний для термометрии океанской среды в глобальных масштабах осуществлена в многочисленных экспериментах. Один из вариантов технической реализации акустической термометрии представлен в работе зарубежных авторов [4] в проекте АТОС. Для реализации проекта были применены низкочастотные широкополосные излучатели 75 Гц и вертикальные приемные антенны и показано, что изменение температуры во времени может быть оценено с погрешностью около $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{сутки}$ на оси и ниже звукового канала, что составляет примерно половину априорной изменчивости $0,002\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{сутки}$ [5]. В процессе выполнения исследовательских работ в ТОИ ДВО РАН также длительное время изучаются особенности формирования полей скорости звука, включая ПЗК, преимущественно на акватории северо-западной части экономической зоны Японского моря. Ежегодно проводились исследования на нескольких, протяженностью до 200 миль акустических трассах, с подробными гидроакустическими и гидрологическими измерениями [6, 7]. Особое внимание при этом было уделено изучению и использованию свойств ПЗК, обеспечивающих концентрацию и распространение в них энергии низкочастотных гидроакустических сигналов источников на большие расстояния с минимальным ее затуханием [8]. Прием этих сигналов, пришедших в точку наблюдения с углами скольжения, близкими к нулевым, т. е. вблизи оси ПЗК, позволял считать лучевые траектории прямолинейными и рассчитывать, при известных расстояниях между источниками и приемниками, эффективные скорости звука на соответствующих трассах. Пропорциональная зависимость между скоростью звука и температурой в морской среде позволяла использовать результаты исследований как для задач позиционирования автономных подводных аппаратов, так и для контроля температурных режимов среды.

В практической реализации метода мезомасштабной акустической термометрии определяющую роль играют характеристики применяемого в эксперименте инструментария, в частности, мощных и широкополосных гидроакустических источников, обеспечивающих неискаженную передачу спектра подготовленных для экспериментов сложных сигналов, а также средств их приема и согласованной об-

работки. В статье представлены результаты создания комплекса технических средств, обеспечивших уникальный натурный акустико-гидрологический эксперимент в рамках изучения проблемы акустической термометрии морской среды на дистанции 1073 км от побережья о-ва Сахалин до банки Кита-Ямато (подводная возвышенность в Японском море) в августе 2022 года.

■ Методы и технические средства

Важным отличием комплекса является использование на акустической трассе двух сопряженных звуковых каналов – придонного на шельфе и глубинного за материковым склоном, что значительно улучшает условия постановки излучающего оборудования вследствие возможности его размещения у побережья и формирует дистанции, на которых проявляются океанологические явления мезомасштабного характера.

Разработанный гидроакустический комплекс включает синхронизированные тракт излучения сложных сигналов, дрейфующую приемную систему и блок приема и представления данных. В его функции входит возбуждение в среде мощного акустического сигнала, прием сигнала на большом удалении, согласованная обработка и представление данных в формате средней температуры среды при исследовании процессов мезомасштабного характера в океане. Ввиду сложности организации стационарных акустических трасс для дистанций в сотни–тысячи километров при экспериментальных исследованиях состав комплекса ориентирован на кратковременное и периодическое функционирование. По этой причине состав гидроакустического комплекса отвечает требованиям мобильности и возможности его развертывания судами небольшого водоизмещения. При создании комплекса использованы промышленные приборы, готовые функциональные модули радиоэлектронной аппаратуры и присутствующие на рынке изделия радиоэлементной базы. Часть модулей изготовлена по разработанным принципиальным схемам. Излучатель и блок согласования изготовлены по специальному заказу. Элементы комплекса взаимодействуют посредством стандартных периферийных интерфейсов и протоколов (SPI- Serial Peripheral Interface, SD- Secure Digital Memory Card, UART- Universal asynchronous receiver/transmitter, RS-485, RS-232).

Тракт излучения комплекса содержит модуль формирования зондирующих сигналов, усилитель мощности, блок согласования усилителя мощности с нагрузкой и гидроакустический излучатель.

Модуль формирования акустических сигналов выполнен в лабораторном варианте для использования в экспериментальных работах. Формирование акустических сигналов производится с помощью отладочной платы на базе ARM (системы команд) контроллера STM32F103ZE с записью их на SD-карту. Схема модуля формирования сигнала (рис. 1) состоит из двух основных узлов: программного блока системы единого времени (СЕВ) и платы воспроизведения сигналов с SD-карты. СЕВ выполнена на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) семейства Cyclone IV. В ее основные функции входят: первоначальная конфигурация GPS приемника, счет времени, синхронизация от GPS, формирование меток времени. Дополнительно СЕВ оснащена преобразователем интерфейса RS-232 для дублирования NMEA (National Marine Electronics Association) протокола от GPS-приемника и аудио кодеком для генерации меток времени различной формы при работе СЕВ в блоке приема и представления данных. Функциональное назначение СЕВ состоит в определении момента старта (метки времени) воспроизведения акустических сигналов, синхронизированного с атомными часами GPS спутников с точностью 10^{-6} с. При поступлении метки времени на плату воспроизведения находящийся на SD карте файл воспроизводится полностью и повторяется при обнаружении следующей метки.

Характеристики модуля формирования акустических сигналов:

- точность синхронизации с атомными часами GPS спутников – 10^{-6} с;
- точность определения местоположения по GPS – 5 м;

- время с момента излучения до детектирования корреляционных максимумов определяется с точностью 0,001 с;
- период синхронизации (при условии видимости GPS спутников) – 1 мин;
- относительная температурная нестабильность задающего генератора – 10^{-7} ;
- точность формирования частоты дискретизации – 0,01 Гц;
- частота дискретизации воспроизведения файлов – 24 кГц;
- полоса частот воспроизведения – от 5 до 12000 Гц;
- максимальный уровень выходного сигнала – $U_{p-p} = 3$ В;
- разрядность выходного ЦАП – 12 бит;
- воспроизведение файлов в формате – 16-bit Motorola PCM;
- поддержка SDHC-карт памяти с файловой системой FAT32.

Сигнал с модуля формирования подается на усилитель мощности K20 компании Powersoft, а усиленный сигнал – через блок согласования с нагрузкой на гидроакустический излучатель.

Блок согласования, который необходим для передачи максимальной мощности в нагрузку посредством повышения напряжения и компенсации реактивной составляющей комплексного сопротивления излучателя, состоит из трансформатора, создающего возможность выбора коэффициентов передачи секционированной выходной обмоткой от 2,5 до 3,5, и дросселя.

Низкочастотный широкополосный излучатель Бикон™ (рис. 2) относится к типу «нагруженных»

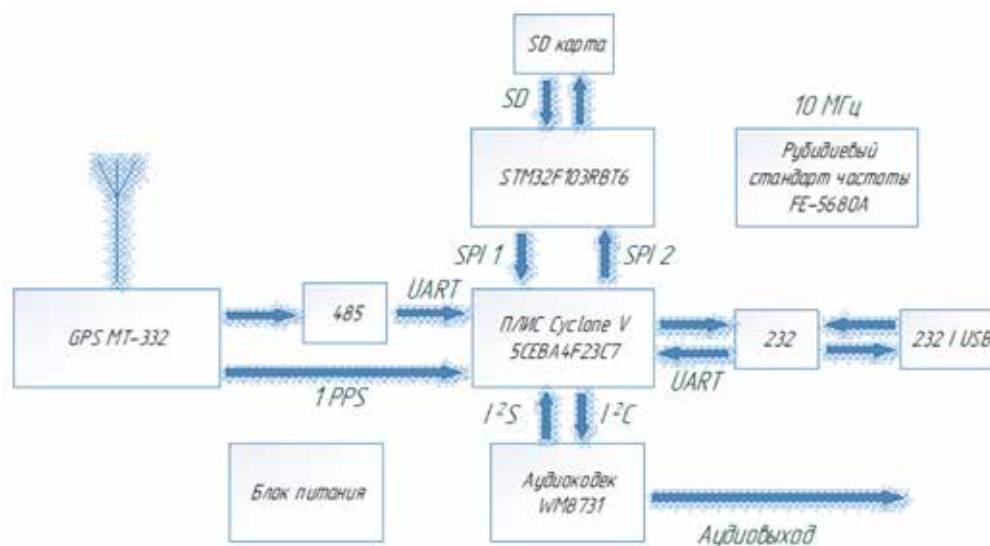


Рис. 1. Блок-схема модуля формирования сигналов

поршневых биконусных конструкций. Благодаря наличию мощного стержневого пьезокерамического преобразователя и особенностям конструкции колебательной системы развивает высокие уровни звукового давления (свыше 10 кПа на расстоянии 1 м) в области низких звуковых частот 300–500 Гц, требуемых для акустических трасс большой протяженности. Излучатель и блок согласования изготовлены ООО НТЦ “Мониторинг”, г. Нижний Новгород. Размеры излучателя (1150*1150*1460 мм) и масса 760 кг позволяют выполнять его постановку как на грунт, так и свешивать с борта судна или катера небольшого водоизмещения.



Рис. 2. Широкополосный излучатель “Бикон™”

Приемная система в виде радиогидроакустического буя (РГБ) находится в рабочем положении в свободном дрейфе и состоит из надводной и погружаемой частей, соединенных цифровой кабельной линией (RS-485). Погружаемая часть представляет собой подвешенные на силовом кабеле гермокорпус с усилительным трактом, гидрофон в ограждении, имеющем гидродинамическую защиту и утяжелитель-отвес для обеспечения вертикального положения кабеля. Электронная схема погружаемой части РГБ приведена на рис. 3.

Усилитель, аналого-цифровой преобразователь ADS-8332 акустических сигналов гидрофона, контроллер STM32F103ZE, ТСХО (термокомпенсированный кварцевый генератор) и электронная плата датчика глубины расположены в герметичном контейнере, на крышках контейнера размещены гидрофон и датчик статического давления (глубины). В качестве гидрофона использован сферический пьезопреобразователь ø50 мм, конструктивное оформление которого обеспечивает ненаправленный прием сигналов, а рабочая глубина составляет не менее 300 м. Усиленные и преобразованные в цифровой формат сигналы гидрофона и датчика глубины через кабельную линию по интерфейсу RS 485 передаются в надводную

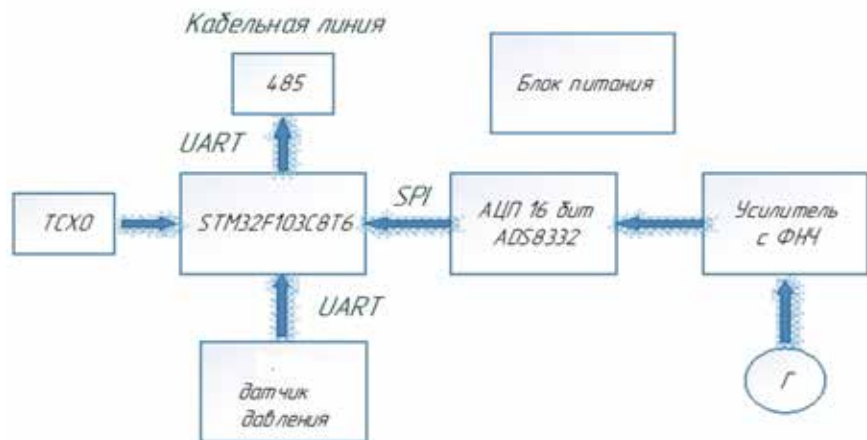


Рис. 3. Блок-схема подводной части РГБ

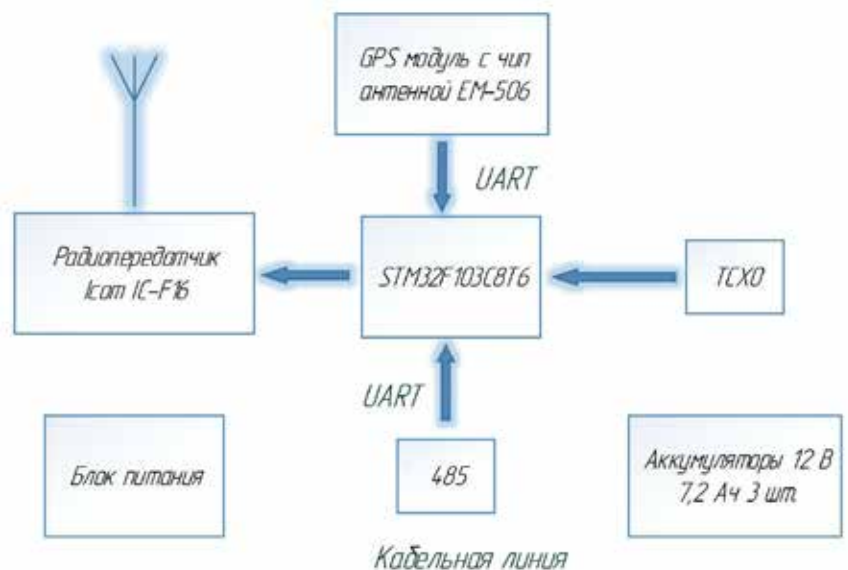


Рис. 4. Блок-схема надводной части РГБ

часть, представляющую собой герметичный контейнер с УКВ антенной. В контейнере расположены модуль GPS, электронная плата с передатчиком IC-F16 и контроллером управления STM 32 (рис. 4).

Блок приема и представления данных (рис. 5, 6) располагается на обеспечивающем судне или на береговом посту и предназначен для приема радиосигналов РГБ, содержащих акустическую информацию гидрофона, текущую глубину его погружения и координаты. Прием радиосигнала осуществляет широкополосный приемник Icom IC-R6. Принятый сигнал поступает на 14-битный высокоскоростной АЦП. Оцифрованный сигнал подвергается обработке в ПЛИС Cyclone-IV. Численные значения координат и глубины сохраняются на обрабатывающем компьютере в текстовом файле. После ЦАП WM8731 аналоговый акустический сигнал поступает через линейный выход в модуль корреляционной

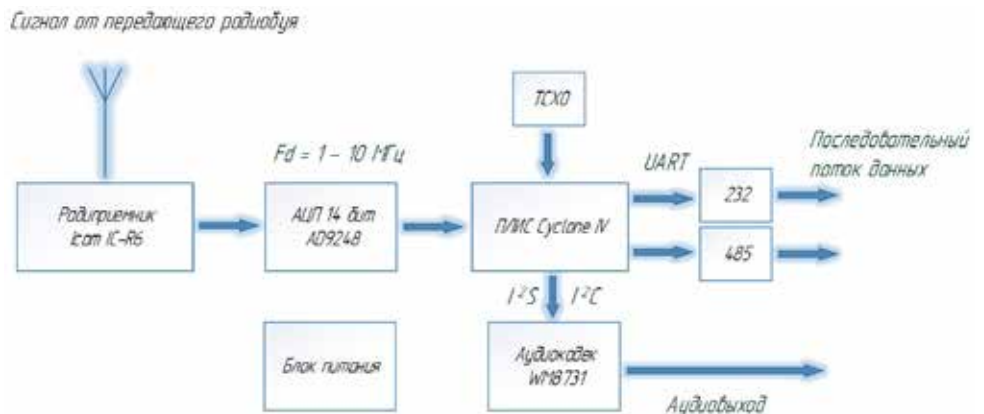


Рис. 5. Блок-схема приемного тракта.

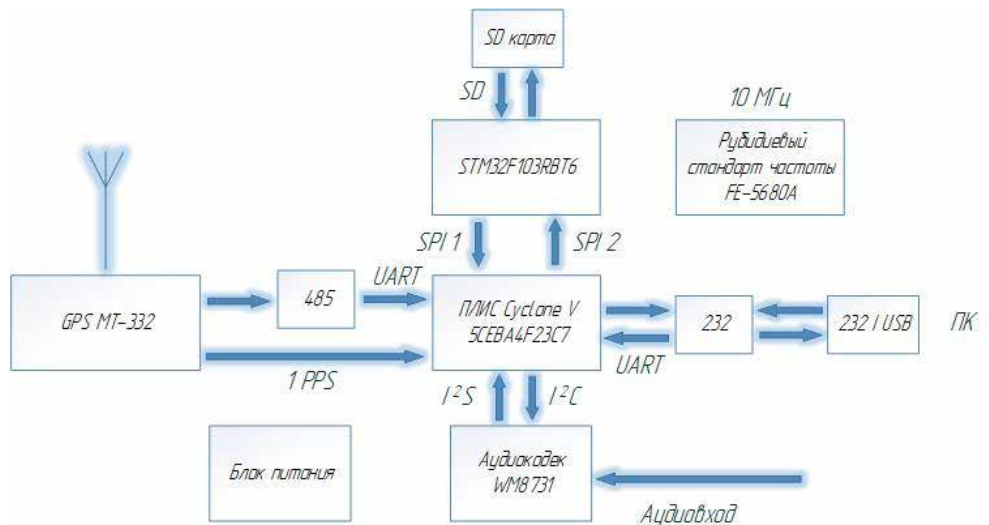


Рис. 6. Блок-схема модуля корреляционной обработки сигналов

обработки сигналов, который осуществляет корреляционное детектирование сложных сигналов с учетом влияния эффекта Доплера и определение времени их пробега между точками излучения и приема. На рис. 6 представлена блок-схема модуля корреляционной обработки сигналов. Синхронизация модуля от GPS осуществляется таким же образом, как и в модуле формирования сигналов. Рубидиевый стандарт вырабатывает эталонную частоту 10 МГц (относительная нестабильность частоты 10^{-10}) для счета времени СЕВ. Микроконтроллер STM32 с помощью SPI интерфейса осуществляет передачу информационных сообщений, которые содержат данные об амплитудах корреляционных пиков, временах их детектирования, номерах каналов корреляции, на SD-карту. Информационные сообщения генерируются при детектировании корреляционного пика в каком-либо канале. Далее по информационному каналу RS-232 сообщения передаются в ноутбук. Блок приема и представления данных обеспечивает выделение, сортировку детер-

минированной последовательности параметров (номера корреляционного канала, амплитуды и момента прихода акустической энергии) сигнала по мере поступления от излучателя по отдельным лучевым траекториям с идентификацией временных задержек в режиме реального времени и дальнейшую визуализацию полученной информации.

Учет систематической инструментальной погрешности определения времени детектирования корреляционного максимума производится посредством подключения модуля формирования сигнала непосредственно к приемному тракту, что выявляет суммарную временную задержку, присущую сквозному тракту комплекса. Выявленная задержка вычитается из полученной во время измерений задержки пробега сигнала через среду между точками излучения и приема.

Расчеты дистанции между GPS координатами излучателя и приемной системы проводятся программно на общеземном эллипсоиде WGS84 (геодезический датум WGS84 – математическая модель фигуры

Земли) с учетом заглубления оси ПЗК. Поправка в расчете обуславливается уменьшением радиуса Земли при заглублении ниже уровня моря и, как следствие, уменьшением длины дуги, соединяющей корреспондирующие точки. Величина поправки $\Delta L_{\Delta L}$ определяется как:

$$\Delta L = 2\pi d \frac{L}{4 \times 10^7},$$

где L – дистанция между точками излучения и приема на уровне моря, м;

4×10^7 – средняя длина окружности Земли на уровне моря, м;

d – глубина оси ПЗК, м.

■ Постановка и схема эксперимента. Выбор морского района

Целью эксперимента было применение метода акустической термометрии на протяженной акустической трассе, включающей участки шельфа, материкового склона и область глубинного подводного звукового канала. Наблюдение средней температуры среды на глубинах сопряженных ПЗК, где она не подвержена воздействию метеорологических явлений, может стать индикатором региональных и глобальных климатических изменений, приводящих, в свою очередь, к перестройке структуры и гидрофизических характеристик среды.

Эксперимент, который был основан на использовании представленного комплекса, проводился в августе 2022 года. Акустическая трасса (№ 3 на рис. 7), проложенная на северо-востоке Японского моря в направлении шельфа о-ва Сахалин, является продолжением ранее изученных акустических трасс “мыс Шульца – банка Кито-Ямато” (трасса № 1) и “мыс Островной – банка Кито-Ямато” (трасса № 2). Выбор трасс обусловлен наличием холодного течения Шренка (Приморское течение), которое начинается от Татарского пролива и тянется вдоль восточных берегов Приморского и Хабаровского краев. На всем своем протяжении течение Шренка оказывает прямое воздействие на климат региона и приводит к тому, что в этих краях лето более прохладное, чем в континентальных регионах, а зима более теплая.

Излучатель был расположен у поселка Чехов (остров Сахалин) на глубине 41 м и на удалении 5 км от свала глубин. Размещение излучателя в данной точке продиктовано наличием придонного звукового канала на шельфе, что позволило использовать эффект акустического «оползня» [10], т. е. явления перехода



Рис. 7. Схема натуральных испытаний в Японском море

акустической энергии из придонной области шельфа на ось ПЗК в глубоком море, в целях получения сквозного канала распространения сигналов и достижения необходимой структуры дистанции. Посредством тракта излучения комплекса каждые 6 минут в течение 8 часов выполнялось зондирование среды фазоманипулированным псевдослучайной М-последовательностью длиной 127 символов с 40 периодами на символ (M127) сигналом. Сигналы имели несущую частоту 400 Гц и полосу 390–410 Гц (длина символа 0.1с). Звуковое давление, приведенное к 1 метру от излучателя, составляло около 8000 Па.

Постановка приемной системы в районе банки Кито-Ямато производилась малошумным плавсредством – парусно-моторной яхтой, с борта которой STD-зондом предварительно выполнялись гидрологические измерения с целью определения глубины залегания оси ПЗК. В соответствии с этой глубиной посредством выбора длины кабельной линии определялось положение гидрофона, далее контролируемое по датчику давления. Приемная система во время эксперимента сопровождалась яхтой и дрейфовала в пределах дальности действия радиоканала, принимая сигналы РГБ. Координаты дрейфа ежеминутно фиксировались приемником GPS и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и РГБ. Поправка в расчете дистанции за счет уменьшения радиуса Земли при данном заглублении оси ПЗК (240 м), с учетом дрейфа в диапазоне 1072.95–1073.00 км (рис. 8), составила -42м. По уточненным величинам дистанции и измеренному времени прихода сигналов к гидрофону рассчитывалась средняя скорость зву-

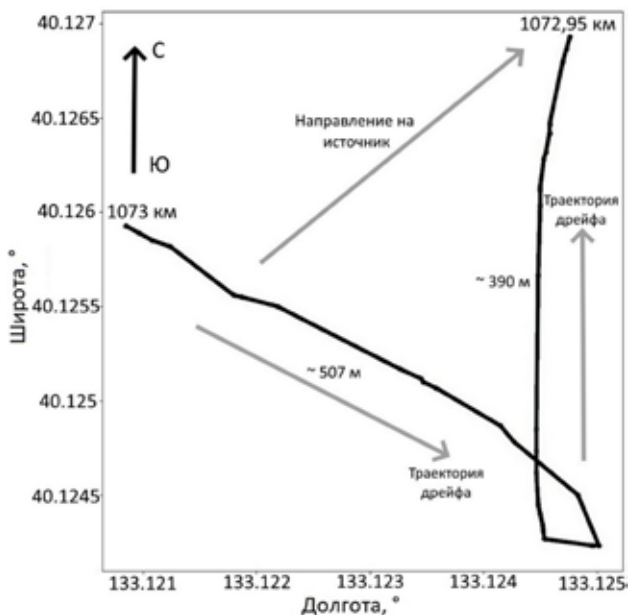


Рис. 8. Траектория дрейфа приемной системы

ка на акустической трассе. Из величин полученной средней скорости звука, а также известных величин глубины залегания оси ПЗК и солёности (34.1 ‰) по алгоритму Чена–Миллера [9] рассчитывалась температура в среде на глубинах ПЗК (рис. 9).

Инструментальная погрешность полученного результата определяется точностью измерения времени и дистанции. Аппаратура комплекса обеспечивает измерение времени прихода зондирующих сигналов (точность определения максимума корреляционного пика) с погрешностью $\Delta t = \pm 0.001$ с. Применяемые в составе приборов GPS приемники обеспечивают определение местоположения с погрешностью $\Delta d = \pm 5$ м. Для акустической трассы протяженностью $D = 1073$ км и времени пробега сигнала по ней $\tau = 736.2$ с погрешность определения средней скорости звука $\Delta C = (D \pm \Delta d) / (\tau \pm \Delta \tau) - D / \tau$ составила ± 0.01 м/с. Итоговая погрешность измерения температуры на оси ПЗК составила $\Delta t = \pm 0.002$ °C.

Таким образом, расчёты величины средней температуры на оси ПЗК на тысячекилометровой акустической трассе показали значение 1.216 °C с по-

грешностью 0.002 °C. Необходимо отметить, что на данной акустической трассе длина участка шельфа составляет лишь 1,3% общей дистанции, что говорит о незначительном его влиянии на динамику значений средней температуры.

Вывод результатов позиционирования приемной системы генерируется специально разработанной программой расчета в виде строк стандартного протокола связи NMEA 0183, применяемого в морском навигационном оборудовании (посредством ГЛОНАСС/GPS). Программа написана на языке программирования Python с использованием библиотек rurgoj (для геодезических расчетов – вычисления расстояния между излучающей и приемной системами на поверхности референц-эллипсоида WGS84) и rumpsea (для кодирования навигационных сообщений РГБ в формате, подобном корабельным автоматизированным идентификационным системам). В свою очередь, за счет текстового протокола связи NMEA обеспечивается простота обмена данными о местоположении и параметрах движения РГБ с программой Open CPN, представляющей надежный и высокоточный навигатор/картплоттер (для визуализации объектов на морской карте).

Вблизи излучателя и приемной системы, а также в точках на удаленностях 271, 404 и 652 км от излучателя производились контрольные измерения вертикального распределения скорости звука и температуры (рис. 10) STD-зондом SBE-19plus V2 с разрешающей способностью по температуре ± 0.005 °C, электропроводности ± 0.0005 s/m и давлению $\pm 0.1\%$ от полной шкалы измерений. Анализ этих зависимостей показывает, что ось ПЗК (минимум скорости звука) во всех точках глубокого моря находилась на глубине около 240 метров, а в слоях выше оси скорость звука и температура повышались с приближением к приемной системе. По мере приближения к точке приема фиксировалось постепенное увеличение отрицательного градиента скорости звука с глубиной. Эти данные также могут быть использованы для дальнейшего контроля профиля ПЗК как индикатора состояния среды.

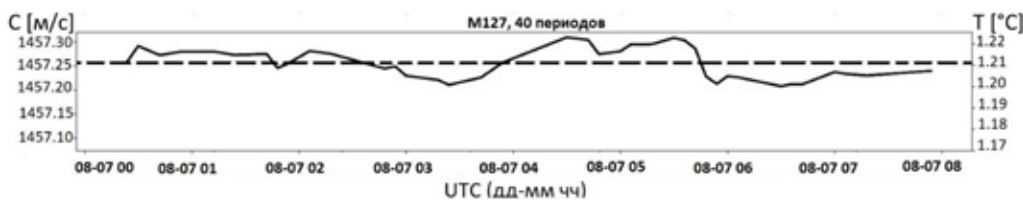
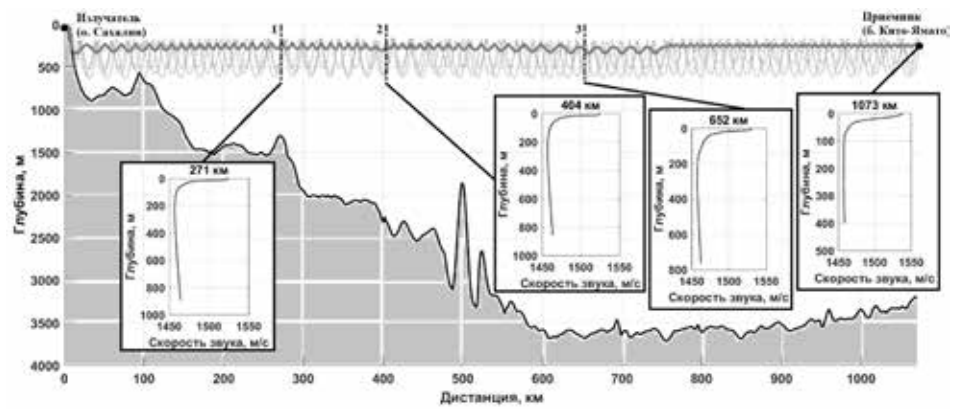


Рис. 9. Скорость звука и температура на оси ПЗК, рассчитанные по последнему приходу акустических сигналов (усреднение скользящим окном с размером 60 мин.), их среднее значение по всем измерениям (прерывистая линия)

Рис. 10. Контрольные измерения STD зондом вертикальных профилей скорости звука вдоль трассы 1073 км в точках на удалении 271, 404 и 652 км



Полученные значения средней скорости звука 1457,25 м/с и соответственно средней температуры на оси ПЗК совпадают с контрольными измерениями STD-зондом вертикальных профилей, проведенными во время эксперимента вдоль акустической трассы (см. таблицу).

Минимальные скорости звука на соответствующих профилях

№	Дистанция (км)	Мин. скорость звука (м/с)	Глубина (м)
1	271,3	1456,678	228,5
2	404,3	1457,067	272,4
3	652,5	1457,567	317,5
4	1073 (приемник)	1457,075	242,9

С учетом результатов данного эксперимента и ранее проведенных исследований на трассах № 1 и № 2 представляется целесообразным развитие комплекса с объединением трасс в общую сеть наблюдений, что потребует дополнения его состава стационарными передающими трактами и созданием долговременной позиционной приемной системы на базе Кито-Ямато, оснащенной спутниковым каналом связи. Это обеспечило бы длительное наблюдение за температурным режимом большей части экономической зоны РФ в акватории Японского моря и получение оперативных обобщенных данных для климатических моделей, что недоступно в таких масштабах при использовании типовых океанологических методов.

Выводы

Разработанный для реализации методов акустической термометрии низкочастотный гидроакустический комплекс обеспечивает синхронизацию излучения и приема сложных сигналов с определением величины средней температуры среды на глубинах сопряженных звуковых каналов, что позволяет осу-

ществлять ее кратковременное и периодическое, например сезонное, наблюдение.

Полученные с использованием комплекса результаты масштабного натурального эксперимента на акватории Японского моря показали, что разработанная аппаратура обеспечивает надежную передачу и прием акустических сигналов в морской среде на дистанциях свыше 1000 км в условиях размещения излучателя передающего тракта на шельфе.

Гидроакустический комплекс и его элементы могут стать основой создания системы долговременного мониторинга мезомасштабных гидрофизических процессов в Японском море как источника данных для моделей изменения климата региона.

В последующем реализация мезомасштабной акустической термометрии позволит выявить и классифицировать долговременные, а также устойчивые океанологические вихревые системы, оказывающие влияние на характеристики климата и биологическую продуктивность среды.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН: “Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем” (шифр 0211-2021-0002), регистрационный номер: ААА-А-А20-12031890011–8. Анализ и интерпретация данных проводилась в рамках темы “Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования”, (шифр FWMM-2023-0003) № гос. регистрации 123072000039-5. Исследования направлены на обеспечение выполнения мероприятий Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dushaw B.D., Worcester P.F., Munk W.H., Spindel R.C., Mercer J.M., Howe A.B., Metzger Jr.K., Birdsall T.G., Andrew R.K., Dzieciuch M.A., Cornuelle B.D., Menemenlis D. A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean // *J. Geophys. Res.* Vol. 114. C07021. DOI:10.1029/2008JC005124/.
2. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale. *Deep-Sea Research.* 1979. Vol. 26A. P. 123–161.
3. Yuan G., Nakano I., Fujimori H., Nakamura T., Kamoshida T., Kaya A. Tomographic measurements of the Kuroshio Extension meander and its associated eddies // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26 (1). P. 79–82.
4. Howe B.M. et al., "Instrumentation for the Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) prototype Pacific Ocean network", 'Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference Proceedings. OCEANS '95 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 1995, pp. 1483-1500 vol. 3, doi: 10.1109/OCEANS.1995.528710.
5. Worcester P.F., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Colosi J.A., Metzger K., Birdsall T.G., Baggeroer A.B. A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern North Pacific Ocean // *Acoustical Society of America Journal.* 1999. Vol. 105, No. 6. P. 3185–3201. DOI: 10.1121/1.424649.
6. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргун Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирования импульсной характеристики в глубоком море // *Акуст. журн* 2010. Т. 56, № 1. С. 51–52.
7. Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А., Моргун Ю.Н., Разживин В.В. Исследование зависимости импульсных характеристик волноводов от параметров излучаемых фазоманипулированных сигналов при Дальнем распространении в Японском море // *Подводные исследования и робототехника.* 2020. № 3(33). С. 58–62. DOI 10.37102/24094609.2020.33.3.007. EDN WKPLVD.
8. Голов А.А., Моргун Ю.Н., Петров П.С. Исследование особенностей глубоководного приёма импульсных широкополосных сигналов при излучении с шельфовой зоны // *Технические проблемы освоения Мирового океана.* 2019. Т. 8. С. 281–285. EDN BSPUNC.
9. Chen C.-T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures // *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1977. Vol. 62, Iss. 5. P. 1129–1135.
10. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // *Journal of the Acoustical Society of America.* 2002. V. 111. № 2. P. 757.

Об авторах

РАЗЖИВИН Василий Валентинович, научный сотрудник лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь,
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** rvs@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1192-6322>

ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатолиевич, с.н.с., зав. лаб. 6/1 – Океанотехники

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, пьезоэлектрические преобразователи, измерители скорости звука, подводная навигация
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** atagiltsev@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9207-4418>

БЕЗОТВЕТНЫХ Владимир Викторович, с.н.с., лаб. 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь. FPGA, STM32.
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** vovan20@yandex.ru

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич, н.с. лаборатории 6/1 – Океанотехники

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь, цифровая обработка сигналов.

Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** lebedevms@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6859-2001>

ВОЙТЕНКО Евгений Анатольевич, н.с. лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь, цифровая обработка сигналов.
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** evgeni@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2476-7241>

ГОЛОВ Александр Александрович, с.н.с. лаборатории 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь, цифровая обработка сигналов.
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** golov_alexander@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7160-0076>

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, с.н.с., зав.лаб. 6/2 – Акустической томографии

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Область научных интересов: гидроакустика, акустическая томография, подводная навигация, подводная связь.
Тел.: +7(4232)311-400. **E-mail:** morgunov@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1961-1915>

HYDROACOUSTIC COMPLEX FOR THERMOMETRY OF MESOSCALE OCEANOLOGICAL PROCESSES

**V.V. Razzhivin, A.A. Tagiltsev, V.V. Bezrevetnykh, M.S. Lebedev,
E.A. Voitenko, A.A. Golov, Y.N. Morgunov**

The work is devoted to the practical application of hydroacoustic methods for remote measurement of temperature parameters of the marine environment on routes of considerable length (from hundreds to thousands of kilometers), covering sections of the shelf, continental slope and the area of the deep underwater sound channel. The low-frequency hydroacoustic complex developed for the implementation of these methods is based on synchronized radiation and reception of phase-shifted signals with the determination of distance and time of sound travel along it for the subsequent calculation of the speed of sound and the associated desired parameter - the average temperature on the acoustic path. The article provides information on the physical and methodological prerequisites for the technical implementation of a full-scale experiment carried out in the Sea of Japan in 2022. The technical solutions of the elements of the complex are given, the sensitivity and error of the used method of acoustic thermometry are assessed. The developed technical solutions are aimed at increasing the range and resolution of the hydroacoustic complex, which determines its applicability for monitoring mesoscale processes in the marine or ocean basin, as well as a tool for assessing climate change.

Keywords: hydroacoustic, pseudorandom signals, piezoelectric sound source, acoustic tomography, temperature monitoring, sea media temperature

References

1. Dushaw B.D., Worcester P.F., Munk W.H., Spindel R.C., Mercer J.M., Howe A.B., Metzger Jr.K., Birdsall T.G., Andrew R.K., Dzieciuch M.A., Cornuelle B.D. & Menemenlis D. (2009). A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 114, C07021, doi:10.1029/2008JC005124/.
2. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale. *Deep-Sea Research*. 1979. Vol. 26A. P. 123-161.
3. Yuan G., Nakano I., Fujimori H., Nakamura T., Kamoshida T., Kaya A., 1999. Tomographic measurements of the Kuroshio Extension meander and its associated eddies. *Geophys. Res. Lett.* 26 (1), 79-82.
4. Howe B.M. et al., "Instrumentation for the Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) prototype Pacific Ocean network", 'Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference Proceedings. OCEANS '95 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 1995, pp. 1483-1500 vol. 3, doi: 10.1109/OCEANS.1995.528710.
5. Worcester Peter F., Cornuelle Bruce D., Dzieciuch Matthew A., Munk Walter H., Howe Bruce M., Mercer James A., Spindel Robert C., Colosi John A., Metzger Kurt, Birdsall Theodore G., Baggeroer Arthur B. "A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern North Pacific Ocean". *Acoustical Society of America Journal*, 1999, VI 105, num 6, pag. 3185-3201, doi 10.1121/1.424649
6. Experimental evaluation of the influence of the vertical sound velocity profile at the source site in shallow water on the formation of the pulse response characteristics in the deep sea. V. A. Akulichev, V. V. Bezotvetnykh, A. V. Burenin [et al.]. *Acoustical Physics*. 2010. Vol. 56, No. 1. P. 47-48. DOI 10.1134/S1063771010010070. EDN MXJVDV.
7. Burenin A.V., Voitenko E.A., Golov A.A., Morgunov Yu.N., Razzhivin V.V. Study of the variation in waveguides impulse responses with respect to parameters of emitted phase-shift keyed signals during propagation in the Sea of Japan. *Underwater investigations and robotics*. 2020. No. 3(33). Pp. 58-62. DOI 10.37102/24094609.2020.33.3.007. EDN WK-PLVD.
8. Golov A.A., Morgunov Yu.N., Petrov P.S. Issledovanie osobennostej glubokovodnogo priyoma impul'snyh shirokopolosnyh signalov pri izlucheni s shel'fovoj zony. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana*. 2019. Vol. 8. Pp. 281-285. EDN BSPUNC.
9. Chen C.-T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1977. Vol. 62, Iss. 5. P. 1129-1135.
10. Tappert, F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111. No 2. P. 757.

Recommended citation:

Razzhivin V.V., Tagiltsev A.A., Bezrevetnykh V.V., Lebedev M.S., Golov A.A., Voitenko E.A., Morgunov Y.N. HYDROACOUSTIC COMPLEX FOR THERMOMETRY OF MESOSCALE OCEANOLOGICAL PROCESSES. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 4 (46). P. 52-62. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_05. EDN: FHXNJD.

About the authors

RAZZHIVIN Vasilii Valentinovich, Researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: rvs@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1192-6322>

TAGILTSEV Aleksandr Anatol'evich, Senior researcher, head of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, piezoelectric sources, sound speed register, underwater navigation.

Phone: +7(4232)311-400. **E-mail:** atagiltsev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9207-4418>

BEZOTVETNYKH Vladimir Victorovich, Senior researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography, FPGA, STM32

Phone: +7(4232)311-400. **E-mail:** vovan20@yandex.ru

LEBEDEV Mikhail Sergeevich, Researcher of the laboratory 6/1 – Ocean Research Equipment Development

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6859-2001>

VOITENKO Evgenii Anatol'evich, Researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: evgeni@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2476-7241>

GOLOV Aleksandr Aleksandrovich, Senior researcher of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, digital signal processing, underwater navigation, underwater communications, acoustic tomography

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7160-0076>

MORGUNOV Yury Nikolaevich, Senior researcher, head of the laboratory 6/2 – Acoustic tomography

Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Scientific interests: hydroacoustic, acoustic tomography, underwater navigation, underwater communications.

Phone: +7(4232)311-400

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1961-1915>

