

УДК 534.6

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В МЕЛКОВОДНОМ РАЙОНЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

**Д. Д. Минаев,  
В. В. Негода,  
Р. В. Леоненков, А. С. Корытко**

Инженерная школа ДВФУ<sup>1</sup>  
ИПМТ ДВО РАН<sup>2</sup>  
СКБ САМИ ДВО РАН<sup>3</sup>

Анализируются результаты экспериментальных исследований характеристик гидроакустического канала передачи информации на специально оборудованном полигоне (оз. Тунайча на о-ве Сахалин), в пределах которого в зимнее время осуществлялись прямые измерения вертикального профиля скорости звука. В ходе исследований оценивались возможности и характеристики канала передачи информации с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы «EvoLogics» (Германия). Для тестирования канала осуществлялись многократная передача пакетных сообщений различного объема (включая файлы изображений), передача NMEA сообщений в реальном масштабе времени, видеоконференция с передачей видеоряда через водную среду.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание автономных технических средств геоэкологического мониторинга прибрежных морских акваторий, испытывающих на себе значительное антропогенное воздействие, для доставки информации о состоянии среды конечному потребителю предполагает использование совокупности различных каналов передачи информации [1]. Одним из основных каналов передачи информации в подводном пространстве является гидроакустический канал. Однако его эффективность в значительной степени определяется характеристиками среды [2–5]. Поскольку прибрежные морские акватории характеризуются незначительными глубинами, наличием ледового покрова в течение длительного (до 5 месяцев в году) периода, пространственно-временной изменчивостью поля скорости звука [3], изменчивостью акустических шумов [5] и др., то оценка эффективности ги-

дроакустических средств передачи информации должна производиться с использованием гидролого-акустических параметров среды, полученных в ходе натурных экспериментов.

В настоящей работе анализируются результаты экспериментальных исследований характеристик гидроакустического канала передачи информации в условиях мелководья, при наличии ледового покрова, проведенных на оз. Тунайча (о-в Сахалин) в феврале 2013 года. В ходе исследований оценивались возможности и характеристики канала передачи информации, организованного с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы «EvoLogics» (Германия) [6]. Работы проводились на специально оборудованном полигоне, в пределах которого осуществлялись прямые измерения вертикального профиля скорости звука, характеристик акустических помех и сигналов программно-

аппаратными средствами модемов. Для тестирования канала осуществлялась многократная передача пакетных сообщений различного объема (включая файлы изображений), передача NMEA сообщений в реальном масштабе времени, а также была организована видеоконференция с передачей видеоряда через водную среду.

### ■ Экспериментальные исследования

Программа исследований включала проведение натуральных и вычислительных экспериментов. Вычислительные эксперименты проводились с использованием результатов прямых измерений гидролого-акустических параметров среды. Схема проведения исследова-

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Пушкинская, 10. E-mail: minaev\_dd@inbox.ru

<sup>2</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: (423) 2431624.

E-mail: imtp@marine.febras.ru

<sup>3</sup> 693013, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25. E-mail: skb@skbsami.ru

дований на акватории озера Тунайча представлена на рис. 1, а схема размещения оборудования стационарного и мобильного пунктов информационного обмена – на рис. 2.

Проектирование опорных точек полигона и станций измерения ВРСЗ производилось при помощи электронной картографической навигационно-информационной системы «Д'Карт». Вынос в натуру координат проектных точек полигона и станций измерения ВРСЗ осуществлялся спутниковым навигационным GPS-приемником типа Magellan ColorTRAK. Для увеличения точности определения расстояния между пунктами информационного обмена производилось осреднение координат, определяемых GPS-приемником по 100 измерениям. В расчет принимались значения обсерваций не менее чем по 5 спутникам со значениями фактора HDOP (горизонтальная точность определения плановых координат) не выше 2.0.

Антенны цифровых гидроакустических модемов были расположены на горизонте 5.5 м, глубина расположения антенн оставалась неизменной в ходе проведения эксперимента. Для постановки гермоконтейнеров с оборудованием модемов во льду были сделаны майны размером 1.0×1.0 м. В ходе оборудования майн определялись структура и толщина ледового и снежного покровов. Толщина однородного слоя льда составила не менее 0.5 м, далее располагался слой рыхлого водонасыщенного льда толщиной до 0.25 м, а над ним – не менее 0.5 м снега. Для удобства размещения персонала и оборудования в ходе проведения исследований на льду над оборудованными майнами были установлены палатки. По мере выполнения программы работ палатка мобильного пункта ин-



Рис. 1. Схема проведения исследований на акватории оз. Тунайча

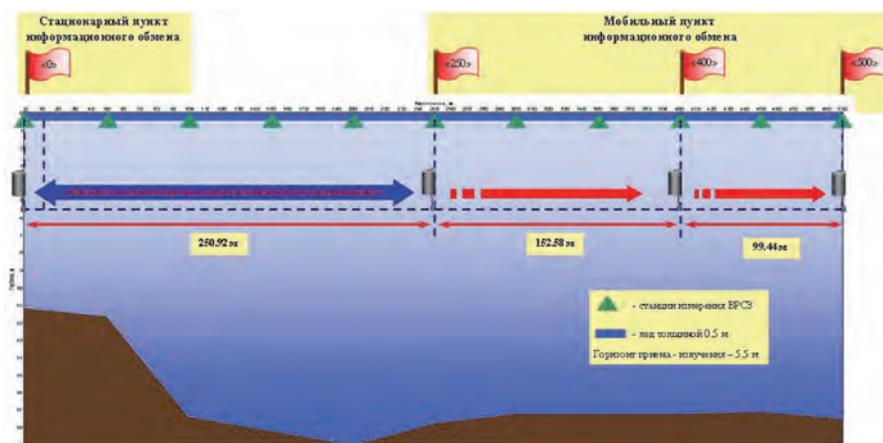


Рис. 2. Схема размещения оборудования стационарного и мобильного пунктов информационного обмена

формационного обмена с находящимся в нем оборудованием перемещалась по трассе полигона (см. рис. 1, 2).

Измерения профиля скорости звука от поверхности до дна производились измерительным зондом RESON SVP-15 (диапазон измерения скорости звука 1375...1900 м/с, точность измерения скорости звука  $\pm 0.02$  м/с) с регистрацией результатов измерений на ПЭВМ. Процесс измерения представлял собой получение 6 последовательных реализаций профиля ВРСЗ с усреднением измеренных значений. Значения скорости звука интерполировались с шагом 0,5 м по глубине. Измерения производились со льда через заранее оборудованные лунки, расположенные через каждые 50 м по трассе исследуемого по-

лигона (см. рис. 2). По данным датчика давления измерительного зонда дополнительно осуществлялось измерение глубин на каждой из станций. В дальнейшем результаты измерений были использованы в качестве исходных данных для оценки характеристик канала распространения методами лучевой акустики.

Основными характеристиками, подлежащими оценке, являлись:

- время и скорость передачи тестовых пакетных информационных сообщений на различных дистанциях;

- достоверность передачи тестового сообщения (контрольная сумма принятого файла данных); точность оценки расстояния и временных задержек между корреспондентами;

– оценка параметров, характеризующих многолучевость канала.

Характеристики определялись в прямом и обратном направлениях при передаче тестовых сообщений двух видов. В качестве основного тестового сообщения был использован сформированный текстовый файл, содержащий символ «0» объемом 1024 байта. В качестве дополнительного тестового сообщения был использован сформированный файл с расширением \*.PNG, содержащий изображение телевизионной испытательной таблицы с разрешением 769×577 и объемом 50659 байт. При тестировании канала передачи осуществлялся взаимный информационный обмен сформированными тестовыми сообщениями между стационарным и мобильными пунктами. При этом передача текстового файла осуществлялась не менее 20 раз, а файла, содержащего изображение, не менее 10 раз. В качестве основных параметров документируются:

- время передачи информационного сообщения в секундах;
- объем переданного и принятого сообщения в байтах;
- эффективная скорость передачи информации (Net bitrate), бит/с;
- номинальная скорость передачи информации (Raw bitrate), бит/с;
- время распространения сигнала от точки излучения до точки приема;
- показатели многолучевости канала распространения (количество основных энергонесущих групп лучей, время задержки каждой группы лучей).

Документирование результатов осуществлялось при помощи программно-аппаратных средств гидроакустических модемов. Качество (целостность) принятого тестового сообщения

оценивалось по совпадению с контрольной суммой образа.

Оценка возможности передачи сообщений формата NMEA 0183 в режиме реального времени выполнялась с применением спутникового навигационного GPS-приемника типа Magellan ColorTRAK. Сообщения GGA, RMC, GSA, GSV, GLL с цифрового выхода GPS-приемника поступали на входной RS-232 порт гидроакустического модема. Для оценки целостности структуры принимаемые и передаваемые сообщения документируются на ПЭВМ в виде текстовых файлов. Скорость межприборного обмена составляла 19200 бит/с.

В ходе исследований также была организована видеоконференция с передачей видеоряда через водную среду. Для этого приборные части гидроакустических модемов были подключены к ПЭВМ через интерфейс RS-232, а к USB порту одной из ПЭВМ дополнительно была подключена стандартная Web-камера. На обеих ПЭВМ было актуализировано программное обеспечение, входящее в состав гидроакустических модемов, – «S2C modem demonstration software» Version 1.2. Оптимизация соотношения качество/размер передаваемого по гидроакустическому каналу кадра видеоконференции осуществлялась регулятором качества изображения Web-камеры в ручном режиме. Количественная оценка предполагала определение времени передачи сформированного кадра видеоизображения.

Вычислительные эксперименты были выполнены для ненаправленного приема–излучения, диапазона выхода лучей  $\pm 15^\circ$  и частоты акустического сигнала 34 кГц. По результатам измерений глубины места и ВРСЗ на трассе исследуемого полигона была сформирована

модель волновода с переменными параметрами для проведения расчетов по программам [7,8]. Расчеты выполнялись в прямом и обратном направлениях для расстояния 502.94 м. Для оценки точности определения дистанции между пунктами информационного обмена были произведены расчеты параметров групп водных и переотраженных от границ волновода лучей. По результатам вычислительных экспериментов оценивались диапазоны расчетных и экспериментальных значений временных задержек, диапазоны углов выхода и длина пути различных видов лучей.

## ■ Результаты и обсуждение

Результаты измерений профиля скорости звука представлены на рис. 3. На рис. 3, а представлены профиль глубин исследуемой трассы и схематичное изображение результатов измерений ВРСЗ на 11 станциях. Глубины на исследуемой акватории изменяются от 11.0 м до 19.5 м, при этом наименьшая глубина наблюдается в точке установки стационарного пункта информационного обмена. На рис. 3, б показана обобщенная пространственная (в пределах исследуемой трассы) изменчивость профиля скорости звука. Анализ рис. 3, б позволяет говорить о наличии явно выраженного придонного слоя, обладающего более высокими значениями скорости звука, а также подтверждает проявление конвекции (апвеллинга). Наиболее характерны проявления конвекции на дистанциях 100 м, 300 м, 450 м. По всей видимости, наличие ледового покрова затрудняет процесс вертикального перемешивания водных масс, протекающего более активно при наличии поверхностного волнения. Можно

предположить, что более высокие значения скорости звука в придонном слое обусловлены более высокими значениями температуры. Это предположение хорошо согласуется с данными [9], где отмечаются аналогичные результаты. Там же показано, что повышенная температура придонного слоя обусловлена наличием значительных концентраций сероводородных соединений, образованных в результате процессов разложения морской воды, поступающей в озеро из морской протоки под воздействием приливных явлений. На рис. 3, в показано семейство кривых ВРСЗ, полученное в ходе исследований. Анализ зависимостей показывает, что значения скорости звука в поверхностном слое составляют 1401...1409 м/с, в среднем (8...12 м) – слое 1409...1413 м/с, а в придонном (17...19.5 м) – 1415...1418 м/с. Наблюдается также положительный градиент скорости звука, характерный для мелководных районов в зимние периоды.

Также можно выделить наличие микроканала с глубиной залегания оси 5...6 м. Качественный и количественный анализ структуры поля скорости звука в пределах исследуемой трассы показывает, что начиная с дистанции 150...200 м она становится более однородной. Адекватность результатов измерений может быть подтверждена расчетными значениями скорости звука, выполненными по формуле Вильсона [10] с использованием результатов ранее проведенных исследований температуры и солености [9]. Так, температура поверхностного слоя в зимний период близка к точке замерзания и составляет  $0^{\circ}$ , значения температуры в придонном (более 15 м) слое составляют от  $2.5^{\circ}$ ... $2.9^{\circ}$ , в среднем слое (8...12 м) – порядка  $1.5^{\circ}$ . Величина солености для озера Тунайча

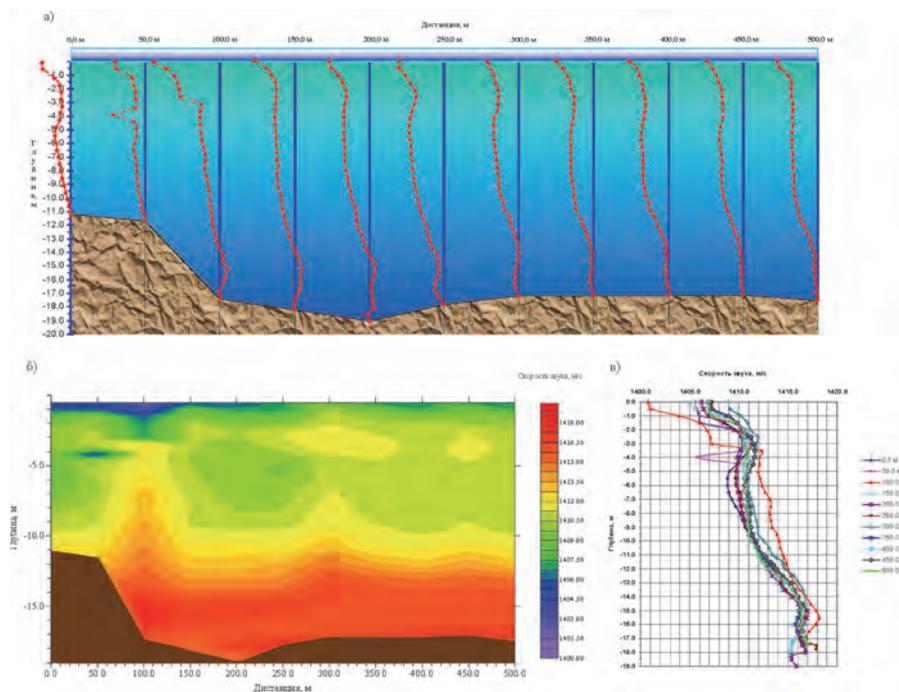


Рис. 3. Результаты измерений профиля скорости звука на исследуемой трассе

по данным многолетних исследований составляет 2.4...2.6‰. При этом расчетные значения скорости звука на указанных горизонтах будут составлять: в поверхностном слое 1405.5 м/с; в среднем слое 1412.81 м/с; в придонном слое 1418.53 м/с. Сравнительный анализ результатов показывает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений скорости звука на характерных горизонтах. Таким образом, полученные в ходе измерений результаты могут быть использованы для формирования модели волновода с переменным по трассе рельефом и профилем ВРСЗ при проведении вычислительных экспериментов.

На рис. 4 представлены характеристики цифрового гидроакустического канала, полученные при передаче тестового текстового сообщения объемом 1024 байта. Анализ зависимостей показывает, что номинальная и эффективная скорости передачи с увеличением расстояния между корреспондентами уменьшаются, а время передачи

тестового сообщения (рис. 4, в) увеличивается. Оценка качества (целостности) принятого тестового сообщения показала полное совпадение значений контрольных сумм переданных и принятых тестовых сообщений. Стоит отметить, что отношение максимальных значений номинальной скорости передачи (рис. 4, а) к максимальным значениям эффективной скорости передачи (рис. 4, б) с ростом расстояния между корреспондентами увеличивается с 3.5 до 5.6 раз. Кроме того, с увеличением расстояния разность максимальных и минимальных значений скорости передачи также возрастает. Это может быть обусловлено эффектами рассеяния акустической энергии излучаемых сигналов на случайных неоднородностях среды и границах волновода.

Время передачи тестового сообщения (рис. 4, б) объемом 1024 байт составило от 5 до 10 с на минимальной дистанции и от 16 до 600 с на максимальной дистанции. Как и в случае со скоростью передачи, наблюдается увеличение разности максималь-

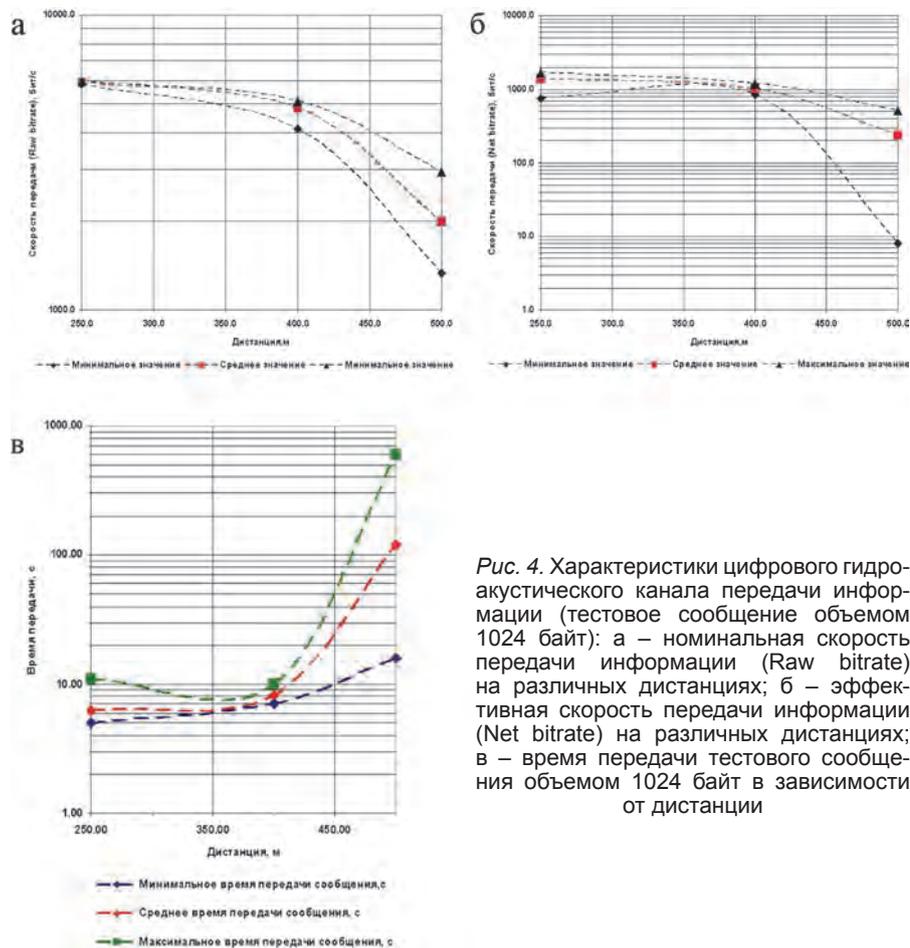


Рис. 4. Характеристики цифрового гидроакустического канала передачи информации (тестовое сообщение объемом 1024 байт): а – номинальная скорость передачи информации (Raw bitrate) на различных дистанциях; б – эффективная скорость передачи информации (Net bitrate) на различных дистанциях; в – время передачи тестового сообщения объемом 1024 байт в зависимости от дистанции

ных и минимальных значений с ростом расстояния, что, в свою очередь, доказывает идентичность факторов, оказывающих влияние на исследуемые характеристики канала.

Время передачи тестового файла, содержащего изображение телевизионной испытательной таблицы, на минимальной дистанции между корреспондентами составило 210...240 с, на средней дистанции – 250...280 с, на максимальной дистанции – не менее 620 с. Показатели скорости передачи файла с изображением представлены в табл. 1.

Сравнительный анализ времени передачи показывает, что на минимальной дистанции отношение среднего значения времени передачи файла с большим объемом к времени передачи файла с меньшим объемом составляет  $\approx 30$  раз, при этом отношение размеров передаваемых файлов составляет  $\approx 50$  раз. С увеличением расстояния коэффициент отношения снижается до  $\approx 5...6$  раз. Это говорит о более высоких значениях скорости передачи тестовых сообщений большего объема по сравнению с результатами, представленными на рис. 4, а, б. Однако не имея

возможности оценить специфические особенности алгоритмов, заложенных в программно-аппаратные средства цифровых гидроакустических модемов, невозможно сделать однозначный вывод. Сравнение значений контрольных сумм переданных и принятых файлов, как и в предыдущем случае, показало полное совпадение значений контрольных сумм. Качественный анализ также не выявил визуальных различий между тестовым (переданным) и принятым изображениями (рис. 5).

Столь высокие показатели качества, по всей видимости, достигаются за счет дублирования передачи информационных пакетов, структура которых не была адекватно идентифицирована в точке приема. При этом с увеличением объема передаваемого сообщения происходит уплотнение потока в канале передачи с одновременным снижением количества дублирующих пакетов. Так, избыточность при передаче тестового сообщения объемом 1024 байт составила в численном выражении до 28 байт, или 2.7% от первоначального объема передаваемого файла, а для тестового сообщения объемом 50659 байт – 253 байта и 0.5% соответственно.

Время распространения сигнала от точки излучения до точки приема, эквивалентное точности определения расстояния между корреспондентами связи, оценивалось на пункте информационного обмена «500». Всего в ходе исследований было выполнено по 20 измерений дистанции в прямом и обратном направлениях (совместно с выполнением тестирования канала передачи) и по 10 измерений времени распространения сигнала между точками излучения и приема. Результаты измерения дистанции между корреспондентами

Таблица 1. Показатели скорости передачи тестового сообщения, содержащего изображение телевизионной испытательной таблицы

Скорость передачи информации, бит/с	Наименование пункта информационного обмена		
	«250»	«400»	«500»
Номинальная (Raw bitrate)	5319...5952	4629...4716	не более 2551
Эффективная (Net bitrate)	1664...1888	1464...1480	не более 640

связи представлены на рис. 6. Анализ зависимостей, представленных на рис. 6, а, показывает на наличие разности  $\approx 0,7$  м в результатах измерений расстояния в прямом и обратном направлениях. Среднее значение измеренного расстояния в направлении «0» – «500» составило 513,4 м, а в направлении «500» – «0» 514,65 м. Отличие в результатах обусловлено применением различных значений интегральной скорости звука для мобильного и стационарного пункта информационного обмена. На рис. 6, б представлены значения относительного изменения расстояния в прямом и обратном направлениях как разность текущего и среднего по реализации значения расстояния с учетом приведения к скорости звука 1410 м/с. Анализ зависимости, представленной на рис. 6, б показывает на достаточно высокую идентичность характеристик канала в прямом и обратном направлениях. Наличие резких изменений в измеренных значениях расстояния (в частности, с 10-го по 13-е измерение) может быть обусловлено динамикой водной среды, так как в процессе исследований взаимное пространственное положение корреспондентов связи оставалось без изменений.

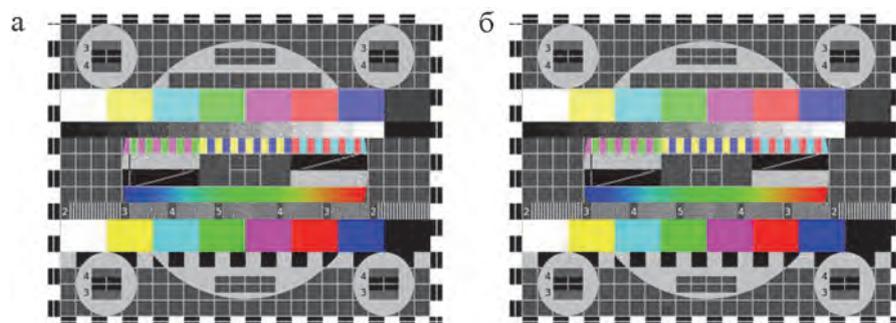


Рис. 5. Изображения тестового (переданного) (а) и принятого (б) по гидроакустическому каналу сообщения, содержащего изображение телевизионной испытательной таблицы на дистанции между пунктами информационного обмена 500 м

Сопоставление результатов измерения расстояний между корреспондентами связи, выполненных гидроакустическим методом, и результатов измерения расстояний по осредненным данным GPS-приемника показал существенные (до 11,7 м) расхождения. В результате статистической обработки координат GPS приемника точность определения расстояния между пунктами «0» и «500» составила  $502,94 \pm 6,23$  м с доверительной вероятностью 0,67. Таким образом, среднее значение расстояния 514,65 м, определенное гидроакустическим методом, находится за верхним пределом границы доверительного интервала, равного 509,17 м.

По всей видимости, завышенные значения расстояний, определяемые гидроакустическим методом, могут быть обу-

словлены сложными гидроакустическими условиями. Это нашло подтверждение в результатах вычислительных экспериментов. На рис. 7 представлены траектории звуковых лучей на исследуемой трассе в прямом (см. рис. 7, а) и обратном (см. рис. 7, б) направлениях. Синим цветом на рис. 7 показаны траектории водных лучей, зеленым – траектории лучей, преломленных от поверхности, коричневым – от дна, серым – траектории лучей, преломленных донно-поверхностные отражения. Красный пунктир обозначает горизонт расположения источника и приемника, синий – положение пунктов информационного обмена. Расчетный диапазон времени задержек составил  $356737,0 \dots 369192,0$  мкс, что при средней скорости звука 1410,0 м/с эквивалент-

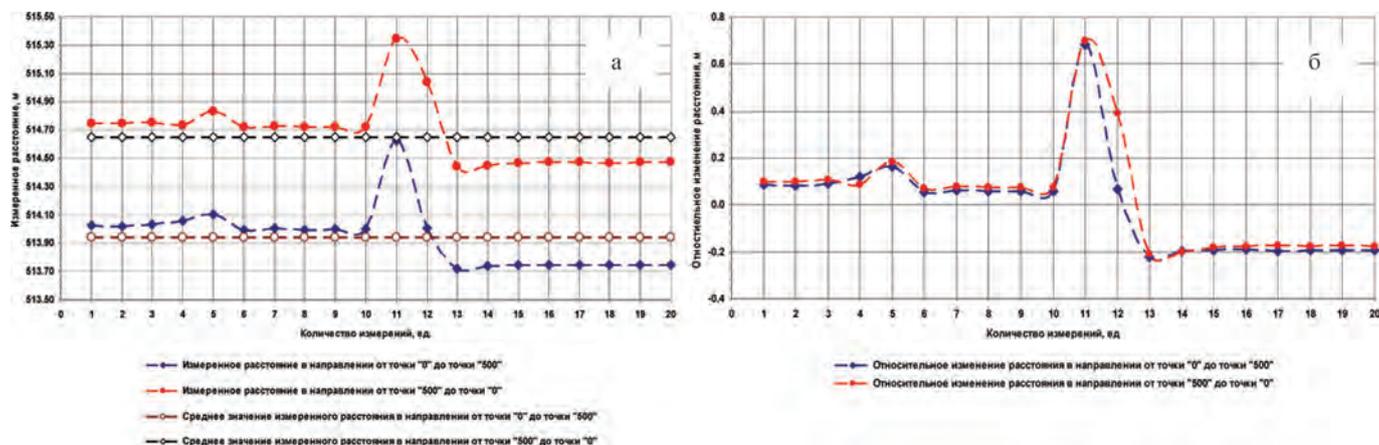


Рис. 6. Результаты измерения расстояния между корреспондентами гидроакустической связи в прямом и обратном направлениях

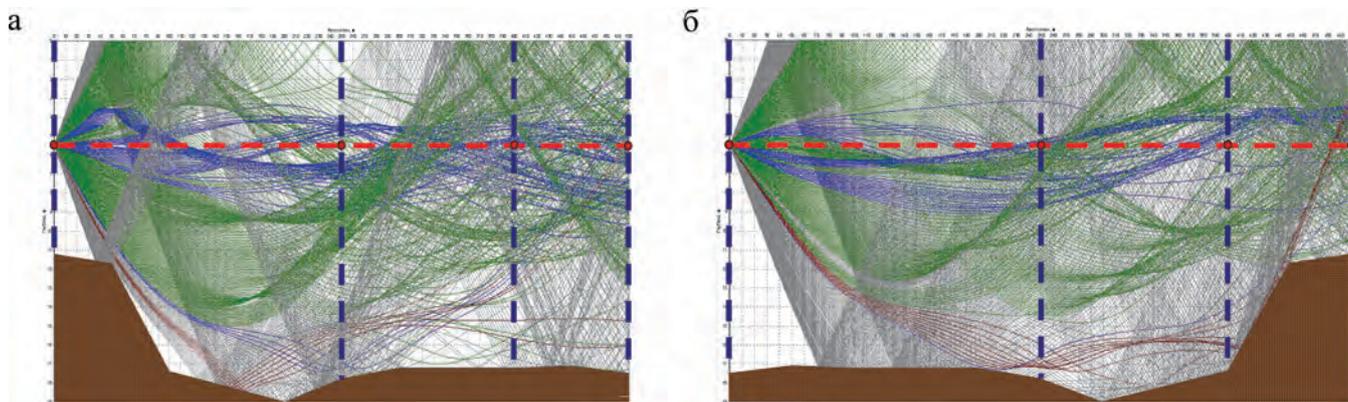


Рис. 7. Траектории звуковых лучей на исследуемой трассе в прямом (а) и обратном (б) направлениях

по расстоянию 503,0...520,56 м (средне расчетное значение расстояния – 511,78 м). Дальнейший анализ показал, что наименьшим временем распространения обладают водные и переотраженные от поверхности лучи в секторе углов выхода +2,5°...0°...-2,5°. Данным группам лучей соответствуют значения расстояний менее среднерасчетного.

Расчетные значения дистанций более 511,78 м соответствуют группам лучей, претерпевших неоднократные донно-поверхностные отражения, и обладают углами выхода более ±12°. Таким образом,

можно утверждать, что увеличение значений расстояния, измеренного гидроакустическим методом, обусловлено наличием эффекта многолучевости. В табл. 2 представлены характеристики лучевых компонент для серии из 10 измерений, выполненных в направлении «500»-«0».

Анализ данных табл. 2 показывает, что измеренные значения общего времени задержки слабо флуктуируют, при этом среднее значение показателя находится в диапазоне расчетных значений, а многолучевая структура включает в себя от трех до восьми групп лучей.

Суммарное время задержек по группам лучей флуктуирует в диапазоне 450,0...706,5 мкс (0,63...1,0 м) при среднем значении 4549,3 мкс (6,41 м). Таким образом, результирующее значение измеренного расстояния можно рассматривать как совокупность систематической и флуктуационной составляющих. При этом, определив характеристики лучевых компонент, возможно скорректировать измеренные значения расстояния. Так, если среднее значение измеренного расстояния равно 515,03 м, то с учетом коррекции внесенных средой погрешностей итоговое зна-

Таблица 2. Характеристика лучевых компонент

№ измерения	Общее время задержки, мкс	Время задержек по группам лучей, мкс								Суммарное время задержек по группам лучей, мкс	Расстояние для суммарного времени задержек по группам лучей, м	Расстояние для общего времени задержки, м	Разность расстояний, м
		1-я гр.	2-я гр.	3-я гр.	4-я гр.	5-я гр.	6-я гр.	7-я гр.	8-я гр.				
1	365276,0	992,0	1496,0	1624,0						4112,0	5,79792	515,0392	509,2412
2	365274,0	992,0	1492,0	1628,0						4112,0	5,79792	515,0363	509,2384
3	365275,0	108,0	268,0	420,0	596,0	696,0	748,0	924,0	392,0	4152,0	5,85432	515,0378	509,1834
4	365274,0	1000,0	1104,0	1496,0	1648,0					5248,0	7,39968	515,0363	507,6367
5	365274,0	192,0	264,0	448,0	732,0	836,0	1012,0	1240,0	385,0	5109,0	7,20369	515,0363	507,8327
6	365274,0	988,0	1476,0	1636,0						4100,0	5,781	515,0363	509,2553
7	365273,0	992,0	1480,0	1636,0						4108,0	5,79228	515,0349	509,2427
8	365271,0	1004,0	1108,0	1492,0	1652,0					5256,0	7,41096	515,0321	507,6212
9	365267,0	984,0	1084,0	1476,0	1636,0					5180,0	7,3038	515,0265	507,7227
10	365267,0	996,0	1480,0	1640,0						4116,0	5,80356	515,0265	509,2229
Средние значения показателей	365272.50									4549.3	6.41	515.03	508.62



3. Достигнутые в натуральных условиях количественные показатели пропускной способности гидроакустического канала передачи информации позволяют существенно расширить технические возможности разрабатываемых образцов автономных средств геоэкологического мониторинга и являются достаточными для технической реализации создаваемых на их основе подводных пространственно распределенных информационно-измерительных сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минаев Д. Д. Принципы построения региональной автоматизированной информационной системы экологического мониторинга морских акваторий с применением автономных технических средств и робототехнических комплексов // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2 (12). С. 64–68.
2. Матвиенко Ю. В., Рылов Р. Н., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Моргунов Ю. Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 44–49.
3. Минаев Д. Д., Петухов В. И. Моделирование акустических характеристик мелководных морских акваторий по данным натуральных экспериментальных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 45–51.
4. Мальцев Ю. В., Минаев Д. Д. Экспериментальные исследования статистических характеристик параметров акустических сигналов в мелководных районах с применением волноводных антенн бегущей волны // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32. Владивосток: ТОВМИ, 2001. С.91–100.
5. Минаев Д. Д., Негода В. В., Пахомов С. А. Результаты экспериментальных исследований суточной динамики акустических шумов в условиях мелководья // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32. Владивосток: ТОВМИ, 2001. С.101–104.
6. S2C-AMA User Guide (version 1.2). EvoLogics GmbH, Germany. November 2010. 34 p.
7. Rodriguez O. General description of the BELLHOP ray tracing program. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL). University of Algarve, Portugal. 2008. 37 p.
8. Rodriguez O. General description of the TRACE & TRACEO ray tracing programs. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL). University of Algarve, Portugal, 2012. 69 p.
9. Лабай В. С., Роготнев М. Г. Состав, структура и сезонная динамика макробентоса озера Тунайча (Южный Сахалин) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 62–94.
10. Wilson W. D. Equation for the speed of sound in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1960. Vol. 32, N 10. 1357 p.

