

УДК 534.232

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННЫХ ШУМОВ НА ШЕЛЬФЕ о. САХАЛИН ВО ВРЕМЯ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2016 г. А. Н. Рутенко, А. В. Гаврилевский, В. Ф. Путов, А. А. Соловьев, Д. С. Манульчев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева

690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 24.04.2015 г.

Приведены описание методики и результаты измерений акустических шумов и параметров сейсмоакустических сигналов на северо-восточном шельфе о. Сахалин, генерируемых во время проведения сейсмоакустических исследований на Чайвинском лицензионном участке. Целью измерений являлся акустический контроль водной территории вокруг излучающего судна. Представлены результаты натурных измерений и 3-D моделирования распространения сейсмоакустических сигналов в море и на суше.

Ключевые слова: сейсмоакустические измерения, антропогенные шумы, акустический мониторинг на шельфе, моделирование распространения сейсмоакустических импульсов.

DOI: 10.7868/S0320791916030151

ВВЕДЕНИЕ

Освоение углеводородных месторождений на северо-восточном шельфе о. Сахалин сопряжено с акустическим антропогенным воздействием на районы обитания серых китов, которые занесены в категорию “находящихся под угрозой исчезновения” Красной книги России и “находящихся под критической угрозой исчезновения” Международным союзом охраны природы (IUCN).

Специальные наблюдения показали, что важным районом летне-осеннего нагула серых китов [1, 2] является мелководная (6–20 м) область северо-восточного шельфа о. Сахалин, простирающаяся вдоль берега. Чайвинский лицензионный участок включает часть акватории этого кормового района.

В 2010 году во время проведения сейсморазведочных исследований на близлежащем Лебединском лицензионном участке с помощью трех донных цифровых акустических станций, связанных с береговым постом 2.5-километровыми кабельными линиями, осуществлялся мониторинг уровней антропогенных акустических шумов и параметров низкочастотных акустических импульсов в режиме реального времени [3].

В 2014 году при организации акустического мониторинга во время проведения подобных сейсморазведочных исследований на Чайвинском лицензионном участке акустические измерения проводились в двух точках с помощью этих же цифровых акустических станций, но работающих в автономном режиме.

Особенностью данных сейсморазведочных проектов является то, что профили сейсморазведки расположены в прибрежной зоне моря с выходом на берег, при этом они пересекают прибрежный нагульный район кормления серых китов. В связи с этим было принято решение проводить

сейсморазведочные исследования с помощью стационарно укладываемых на дне и на берегу приемных линий, оснащенных гидрофонами и геофонами, что позволило применить в море пневматические источники меньшей мощности, чем при исследованиях, проводимых с помощью буксируемых приемных систем [4, 5].

Для организации мониторинга акустических шумов и параметров низкочастотных акустических импульсов в море на изобатах 10 и 20 м устанавливались два автономных подводных акустических регистратора AP2014 [6], которые поднимались через 10–15 дней. Считывались записанные ими акустические данные, и на следующий день они снова устанавливались в море.

Основные задачи, которые решались при организации и проведении акустических измерений, состояли в следующем:

1. Контролировать уровни антропогенных шумов и параметры импульсных сигналов, наблюдаемых в заданном районе сейсморазведочных исследований в двух характерных точках, расположенных на изобатах 10 и 20 м.

2. С периодичностью до двух недель поднимать акустические станции из моря и после считывания данных переустанавливать их снова. Полученные акустические данные оперативно обрабатывать, анализировать, и результаты представлять наблюдателям за морскими млекопитающими.

3. Экспериментально и теоретически исследовать потери при распространении в данной акватории энергии типовых акустических импульсов, генерируемых сейсморазведочными судами и подрывами на берегу. Сообщать наблюдателям о характерных дистанциях, соответствующих разным

критериям возможного воздействия акустических сигналов на морских млекопитающих.

4. Оценить кумулятивное воздействие морской сейсморазведки на акустическую обстановку в данном районе северо-восточного шельфа о. Сахалин.

В работе [3] без аналитического обобщения были представлены результаты анализа натуральных измерений, проведенных в 2010 г. на Лебединском лицензионном участке. В данной работе представлены результаты анализа акустических измерений, проведенных в 2014 г. на Чайвинском лицензионном участке, с акцентом на возможностях построения теоретических оценок параметров акустических импульсов, формируемых в неоднородных 3-D геоакустических волноводах, включающих береговой участок. Численное моделирование проведено с помощью модового параболического уравнения – МПУ [7–9], опирающегося на результаты натуральных измерений, проведенных в опорной точке.

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Стационарные акустические измерения проводились с помощью двух автономных подводных акустических регистраторов AP2014 [6], предназначенных для измерений у дна вариаций акустического давления $p(t)$ в частотном диапазоне 2–15000 Гц.

Основной задачей акустического мониторинга является контроль значений следующих величин [3–6]

$$SPL_{peak}^{imp}(\Delta t; t') = 20 \lg \left(\frac{\max_{\Delta t} |p(\tau)|}{p_0} \right),$$

$$SPL_{rms}(\Delta f; t') = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G(f; t') df}}{p_0} \right),$$

$$SEL(\Delta f; t') = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f; t') df}{p_0^2 \Delta t_0} \right).$$

Здесь $p(\tau)$ – зависимость акустического давления в точке приема от времени τ , Δt – временной интервал, на котором определяется пиковое значение амплитуды вариаций $p(t)$ и рассчитывается с помощью БПФ периодограмма, p_0 – акустическое давление, равное 1 мкПа, $\Delta t_0 = 1$ с, $G(f, t')$ – периодограмма вариаций $p(\tau)$ на интервале времени $t'..t' + \Delta t$, где время t' выступает в качестве параметра и изменяется с шагом Δt . $SPL_{rms}(\Delta f)$ – уровень среднеквадратичного значения акустических шумов в частотном диапазоне $\Delta f = f_2 - f_1$ в дБ отн. 1 мкПа, $SEL(\Delta f)$ – уровень акустического воздействия или уровень энергии акустических шумов в частотном диапазоне Δf на временном интервале Δt в дБ отн. 1 мкПа²с. Данные формулы записаны для квазистационарных акустиче-

ских шумов, но они применяются и для импульсных акустических сигналов, только в этом случае $\Delta t = T_{90\%}$, где $T_{90\%}$ – временной интервал, на котором сосредоточено 90% энергии измеренного акустического импульса.

Таким образом, при оценивании параметров акустических импульсов, генерируемых во время сейсморазведки [6], нужно в сигнале $p(t)$ обнаружить квазипериодическую серию импульсов, соответствующих работе буксируемого сейсмоизлучающего комплекса из пневмопушек. Далее нужно определить положение каждого анализируемого импульса на временной оси, оценить временной интервал, соответствующий 100% энергии импульса – $T_{100\%}$, а затем определить время начала $t_{5\%}$ и конца $t_{95\%}$ временного интервала, на котором сосредоточено 90% энергии этого импульса.

В ТОИ ДВО РАН разработана программа, в которой реализован метод автоматического поиска в акустическом сигнале импульсов, применяемых в морской сейсморазведке. Этот метод основан на применении порога, определяемого автоматически с помощью оценивания процентильного распределения взятых по модулю и усредненных за 10 миллисекунд значений акустических сигналов, измеренных на 3–5-минутном временном интервале [10].

Многолетняя практика оценки параметров низкочастотных акустических импульсов, измеренных на шельфе Охотского моря во время сейсморазведочных работ, показала относительную стабильность значений $SPL_{peak}^{imp}(t')$, $SEL^{imp}(\Delta f, t')$ и значительный разброс в значениях $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, t')$, обусловленный определением временного интервала $T_{90\%}$, на котором оценивается мощность импульсного акустического сигнала. В работе [6] показано, что при определении $T_{90\%}$ значение $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, t')$ может измениться при переходе от одного импульса к другому на 10 дБ, при этом значения $SPL_{peak}^{imp}(t')$ и $SEL^{imp}(\Delta f, t')$ изменяются только на 0.5 и 1.5 дБ соответственно. Поэтому мы полагаем более рациональным при мониторинге в реальном времени следить именно за этими двумя параметрами импульсов. Тем не менее, в отдельных случаях в данной работе приводятся и оценки значений $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, t')$, поскольку для этого параметра акустического импульса известны значения порога, при достижении которого морские животные изменяют поведение, например, серые киты прекращают питаться или отклоняются от своего типового маршрута движения во время миграции.

В работе [6] также было показано, что при отношениях сигнал/шум больше 6 дБ значения параметров измеренных акустических импульсов $SPL_{peak}^{imp}(t')$ и $SEL^{imp}(\Delta f, t')$, полученных с помощью стандартной методики, основанной на оценивании этих параметров на временном интервале $T_{90\%}$, и при вре-

менном и спектральном анализе измеренных вариаций акустического давления на временных интервалах $\Delta t = 0.5$ с с перекрытием на 0.25 с, практически совпадают. В данной работе при анализе акустических измерений используется временной интервал $\Delta t = 1$ с с перекрытием на 0.5 с. Будем называть соответствующие оценки как SPL_{peak}^{ls} и SEL_{ls} , причем они рассчитываются по всем акустическим данным независимо от проведения сейсморазведки. В этом случае не надо искать акустические импульсы, определять 100% временной интервал, а затем $T_{90\%}$, и поскольку $\Delta t = 1$ с, то значение в децибелах уровня $SEL_{ls} = SPL_{rms}^{ls}$. Покажем возможность применения данного алгоритма на примере анализа акустических импульсов, записанных в точках мониторинга Г.1 и Г.2 во время рабочего прохода излучающего судна “Искатель-4” вдоль акустического профиля, показанного на рис. 1а. Для расчета этих оценок использовались программы ControlImpulsDetector и DrawData, разработанные в ТОИ ДВО РАН. Первая программа позволяет анализировать акустические импульсы, формируемые на шельфе во время забивки фундаментных свай и проведения сейсморазведочных исследований как в автоматическом, так и в ручном режиме. Она позволяет настраивать многочисленные параметры для специального анализа записанных акустических импульсов, находить $T_{90\%}$ и оценивать параметры импульса на этом интервале. Данная программа требует специального обучения и определенного опыта работы с ней. Программа DrawData сканирует акустические данные порциями с шагом по времени $\Delta t' = 0.5$ с и на каждом интервале $\Delta t = 1$ с рассчитывает величины SPL_{peak}^{ls} и SEL_{ls} . При этом, чтобы в случае сканирования импульса с коротким временным интервалом $T_{90\%}$ не разделить его оценки между двумя интервалами анализа, эти интервалы следуют с перекрытием $\Delta t' = 0.5$ с, и в качестве значения оценки на всем интервале запоминается максимальная из двух на перекрывающихся интервалах.

Такой алгоритм очень эффективен по времени и не требует участия оператора, а результаты расчетов, получаемых двумя этими программами, оказываются очень близкими (см. на рис. 1 графики $SPL_{peak, T_{90\%}}^{imp}$, $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ и SPL_{peak}^{ls} , SEL_{ls} , соответственно). Значения $SPL_{rms, T_{90\%}}^{imp}$, как правило, превышают значения $SPL_{rms}^{ls} = SEL_{ls}$ (см. рис. 1), но поскольку, как это видно на рис. 1д, значение $T_{90\%}$ эпизодически резко изменяется, то в данной работе предлагается контролировать два параметра сейсмоакустических импульсов — уровень пикового значения SPL_{peak}^{ls} и уровень воздействия или уровень акустической энергии в импульсе на временном интервале 1 с — SEL_{ls} .

Важным аспектом акустического мониторинга является моделирование зависимости параметра

сейсморазведочного импульса $SEL^{imp}(\Delta f, z, r)$ от горизонта z и расстояния до излучателя r . При построении таких оценок излучающий комплекс, состоящий из нескольких пневмопушек, буксируемых судном на заданном горизонте, представляется эквивалентным точечному источнику S , а спектр формируемого им акустического сигнала может быть построен по результатам натурных измерений, проведенных на удалении $r_0 = 0.5 \dots 2$ км. Для построения такого импульсного источника и расчета значений $SEL^{imp}(\Delta f, z, r)$ в 3-D модельном геоакустическом волноводе в ТОИ ДВО РАН разработан комплекс программ, основанных на приближении МПУ [7–9]. Расчеты проводятся в неоднородном 3-D геоакустическом волноводе, в котором, как правило, известен пространственный профиль дна и распределение скорости звука в водном слое. Распределение акустических параметров пород, слагающих дно, подбирается по априорным данным и согласованию результатов моделирования потерь при распространении с результатами их натурных измерений. Акустическое поле рассчитывается в вертикальной плоскости с помощью распространяющихся взаимодействующих вертикальных нормальных мод, а в горизонтальной плоскости — в секторе, определяемом узкоугольным параболическим уравнением.

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Излучение сейсморазведочных импульсов на горизонте 4 м в море глубиной 8–30 м обеспечило судно-катамаран “Искатель-4”.

На рис. 2б показаны акустические импульсы, которые формируются в контролируемой акватории типовым сейсморазведочным сигналом, излученным и распространившимся в море с глубиной 20 м на расстояние 0.65 км до точки Г.1 и на 6.2 км до точки Г.2, в которой глубина моря уменьшилась до 10 м. На рис. 2б, 2в видно, что в точке Г.1 амплитуда вариаций акустического давления в импульсе, измеренном у дна, достигает 3000 Па и в его спектре хорошо выражен пик мощности на частоте ≈ 120 Гц. Значение уровня акустического воздействия $SEL_{90\%}^{imp}$ или энергии на временном интервале $T_{90\%}$ равно 168 дБ, соответственно, $SPL_{rms}^{imp} = 183$ дБ. Но уже на расстоянии 6.2 км в точке Г.2 с глубиной моря 10 м амплитуда $p(t)$ в измеренном импульсе не превышает 130 Па, а значения параметров импульса $SEL_{90\%}^{imp} = 140$ дБ, $SPL_{rms}^{imp} = 148$ дБ.

Таким образом, в радиусе 700–800 м от судна “Искатель-4” уровень SPL_{rms}^{imp} превышает 180 дБ, а такие акустические импульсы могут вызвать травму слуховых органов у некоторых особей серых китов [11].

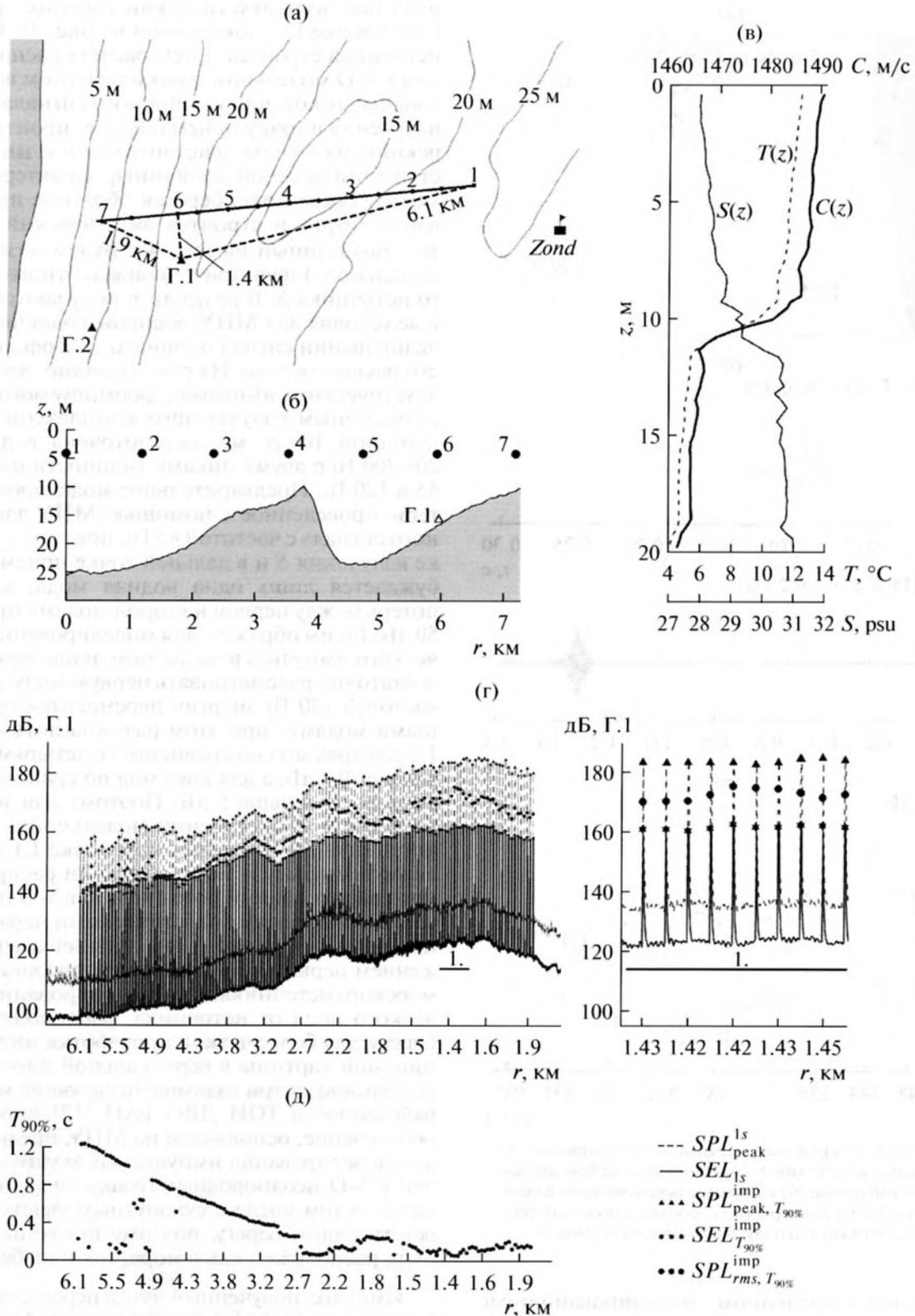


Рис. 1. (а) Карта района акустических исследований; (б) профиль дна на маршруте движения сейсмозазведочного судна "Искатель-4" с указанием характерных точек излучения; (в) результаты гидрологических измерений, проведенных в точке Zond, показанной на рис. 1а; (г) значения параметров акустических импульсов: $SPL_{peak, T_{90\%}}^{imp}$, $SPL_{rms, T_{90\%}}^{imp}$, $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$, рассчитанные на временных интервалах $T_{90\%}$, и значения SPL_{peak}^{ls} , SEL_{ls} , рассчитанные по результатам измерений в точке мониторинга Г.1; (д) оценки значений $T_{90\%}$ для измеренных в Г.1 акустических импульсов.

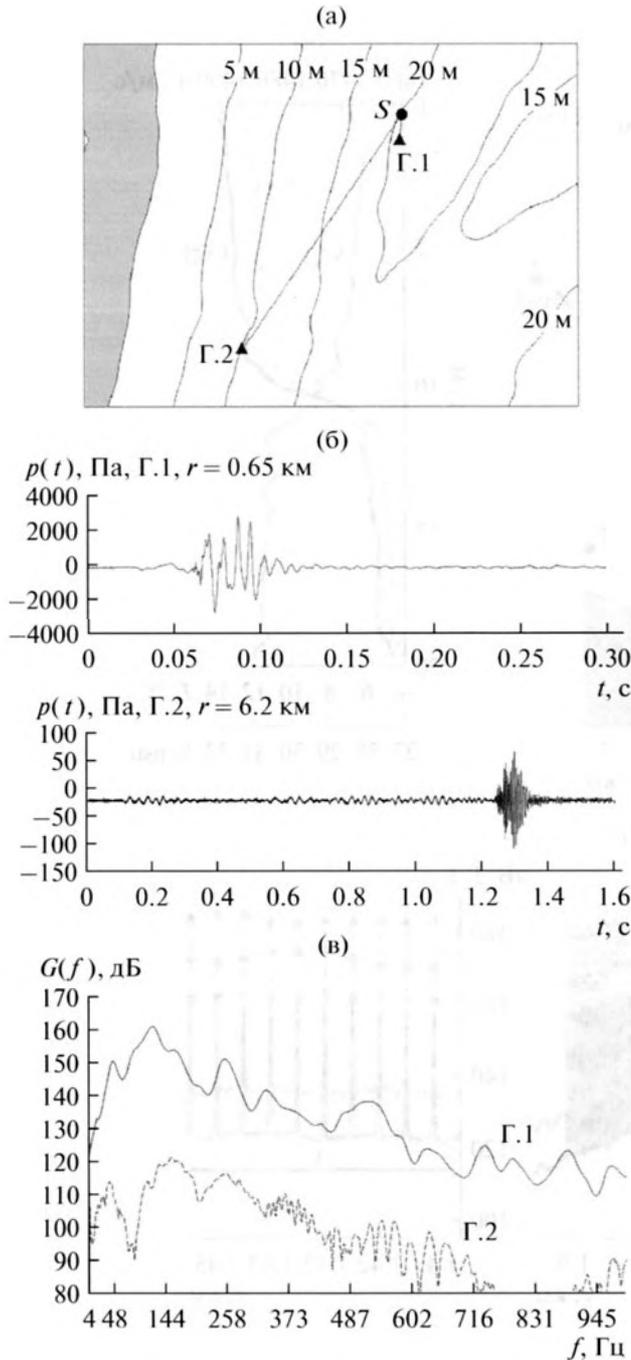


Рис. 2. (а) Карта района с указанием точек приема $\Gamma.1$, $\Gamma.2$ и точки излучения S акустического сейсморазведочного импульса; (б) вариации акустического давления $p(t)$ и (в) их спектры $G(f)$, соответствующие сейсморазведочному сигналу, излученному в точке S .

Перейдем к численному моделированию распространения сейсморазведочного сигнала в данной акватории, опирающемуся на результаты натурных измерений. На рис. 3 показаны параметры модельного геоакустического волновода.

При построении эквивалентного точечного импульсного источника в качестве опорного сиг-

нала был взят акустический импульс, измеренный в точке $\Gamma.1$, показанной на рис. 2а. Функция источника строится путем расчета распространения в 3-D модельном геоакустическом волноводе тональных компонент опорного сигнала из точки излучения в точку приема. Далее, произведя коррекцию на потери действительной и мнимой частей комплексной величины, характеризующей акустическое поле, берется обратное преобразование Фурье и строится акустический импульс $p(t)$, показанный на рис. 4б. Будем называть его модельной-1 функцией эквивалентного точечного источника S . В результате получаются начальные условия для МПУ, воспроизводящие при моделировании сигнал опорного гидрофона в точке его расположения. На рис. 2в видно, что энергия акустического импульса, формируемого сейсморазведочным излучающим комплексом в море с глубиной 10–20 м, сосредоточена в диапазоне 20–200 Гц с двумя пиками мощности на частотах 45 и 120 Гц. Предварительное моделирование потерь, проведенное с помощью МПУ для тонального сигнала с частотой 45 Гц, показало, что в точке излучения S и в дальней точке приема $\Gamma.2$ возбуждается лишь одна водная мода, а разница потерь между первой и второй модами превышает 50 дБ. Таким образом, для моделирования акустического импульса в частотном диапазоне до 45 Гц достаточно рассматривать первую моду. Для звука частотой 120 Гц энергия переносится тремя водными модами, при этом разница потерь в точке $\Gamma.2$ для трех мод по сравнению с четырьмя не превышает 0.1 дБ, а для двух мод по сравнению с четырьмя – меньше 5 дБ. Поэтому для ускорения расчетов при построении модельной-1 функции источника по измеренному в точке $\Gamma.1$ акустическому импульсу и моделированию распространения сейсморазведочного сигнала в 3-D геоакустическом волноводе с акустическими параметрами, показанными на рис. 3, мы ограничились приближением первых двух взаимодействующих мод для морского источника. При моделировании акустического поля от источника, расположенного на берегу, для более четкой проработки интерференционной картины в вертикальной плоскости мы использовали три взаимодействующие моды. Разработанное в ТОИ ДВО РАН [12] программное обеспечение, основанное на МПУ, предназначено для моделирования импульсных акустических полей в 3-D неоднородных геоакустических волноводах, в том числе с сухопутным участком, соответствующим берегу, поэтому источник S может быть расположен как в море, так и на берегу.

Импульс, полученный путем пересчета функции источника в точку $\Gamma.2$, показан на рис. 4г и оказывается подобным акустическому импульсу, измеренному в этой точке (рис. 4в). Результаты сравнительного анализа параметров экспериментальных и модельных импульсов представлены в табл. 1 (модельный импульс 1), из которой видно, что в точке мониторинга $\Gamma.2$, удаленной от источника на 6.2 км

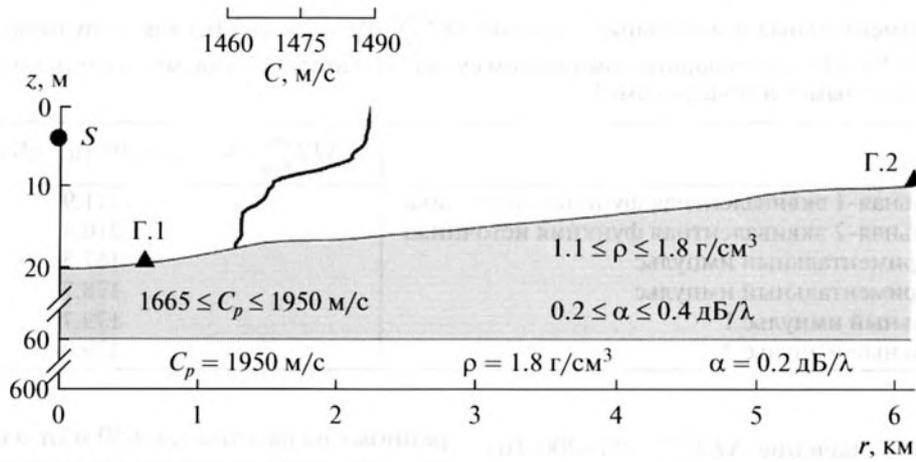


Рис. 3. Модельный геоакустический волновод с указанием распределения акустических параметров в воде и в дне. S – точечный источник сейсморазведочного импульса, эквивалентный излучающему комплексу судна “Искатель-4”.

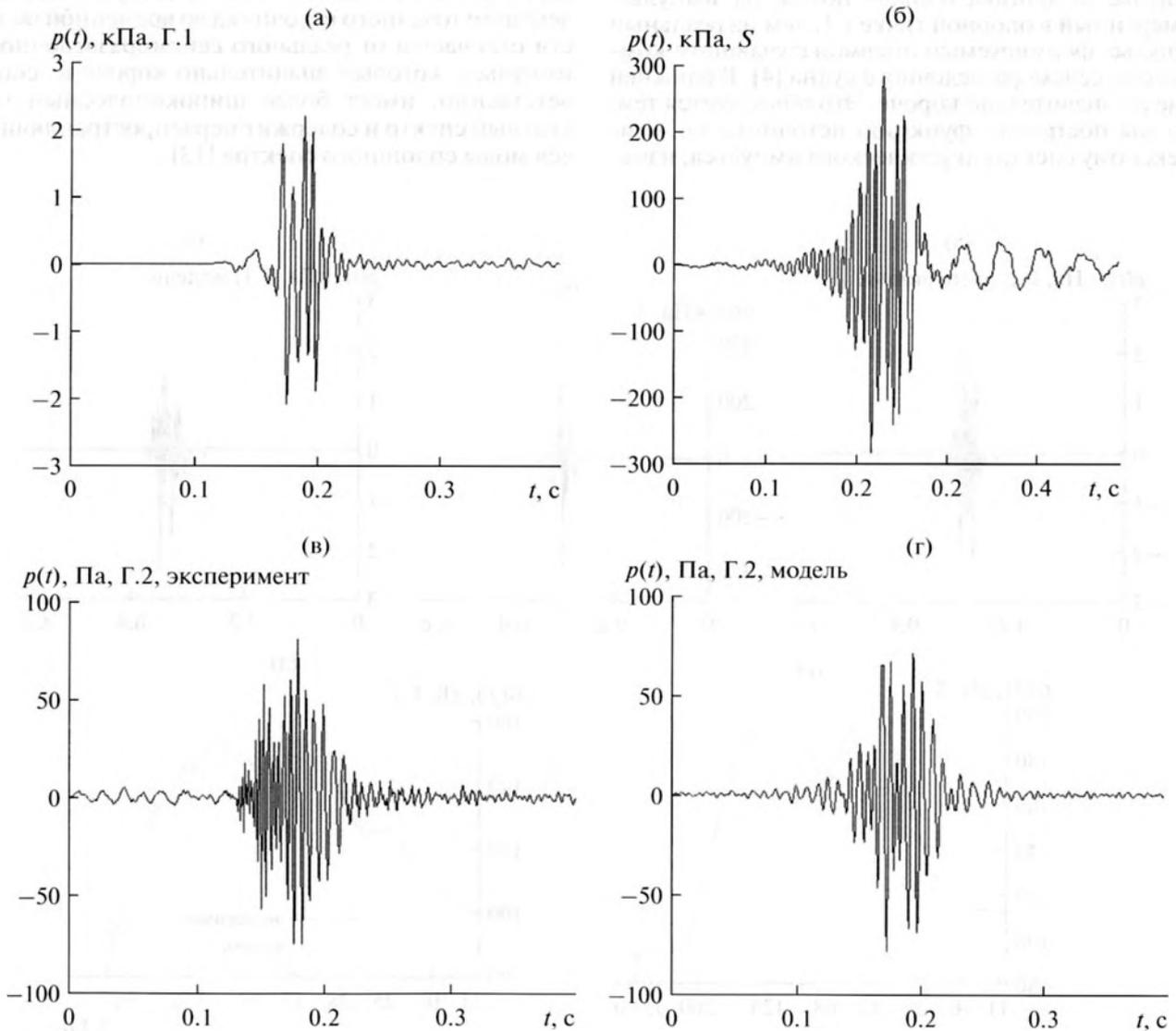


Рис. 4. (а) Форма опорного импульса, измеренного в точке $\Gamma.1$; (б) рассчитанная по нему модельная-1 функция источника; (в) импульс, измеренный в точке $\Gamma.2$; (г) модельный импульс в точке $\Gamma.2$, полученный для эквивалентного модельного-1 точечного источника S с помощью МПУ.

Таблица 1. Экспериментальные и модельные значения $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-200$ Гц) для импульсов, формируемых в точках мониторинга Г.1 и Г.2 излучающим комплексом судна “Искатель-4” и двумя точечными эквивалентными источниками S : модельным-1 и модельным-2

		$SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-200$ Гц), дБ отн. 1 мкПа ² с
S	Модельная-1 эквивалентная функция источника	211.9
S	Модельная-2 эквивалентная функция источника	210.4
Г.1	Экспериментальный импульс	167.5
Г.2	Экспериментальный импульс	138.7
	Модельный импульс 1	139.7
	Модельный импульс 2	139.0

(рис. 2), модельное значение $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ (20–200 Гц) всего на 1 дБ больше экспериментального.

Согласно графику $p(t)$ на рис. 4б акустический импульс источника больше похож на импульс, измеренный в опорной точке Г.1, чем на реальный импульс, формируемый пневмоизлучающим комплексом сейсморазведочного судна [4]. В ближней зоне он значительно короче. Это объясняется тем, что мы построили функцию источника по комплексному спектру акустического импульса, изме-

ренному на расстоянии 650 м от излучающего судна, и применили численное моделирование, ограничившись частотным диапазоном 20–200 Гц и только двумя низшими распространяющимися акустическими модами, поэтому импульс эквивалентного точечного источника во временной области отличается от реального сейсморазведочного импульса, который значительно короче и, соответственно, имеет более широкополосный частотный спектр и содержит нераспространяющиеся моды сплошного спектра [13].

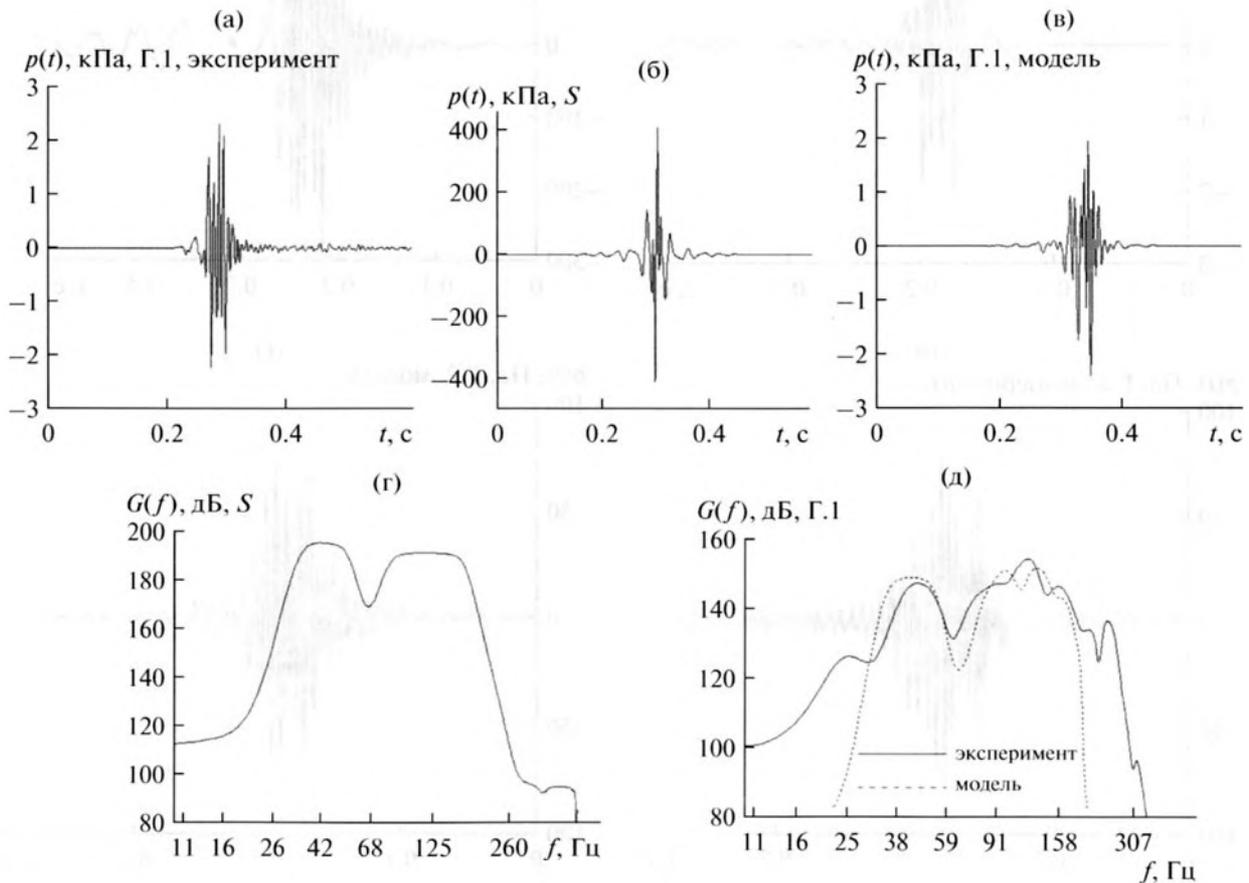


Рис. 5. (а) Экспериментальный импульс, измеренный в точке Г.1; (б) аналитическая функция эквивалентного точечного источника S ; (в) соответствующий данному источнику модельный импульс в точке Г.1; (г) спектр эквивалентной аналитической функции источника; (д) экспериментальный и модельный спектры акустических импульсов в точке Г.2.

Таблица 2. Параметры аналитических импульсов $p_1(t)$ и $p_2(t)$, примененных в формуле (1) для построения функции источника $S \equiv p(t)$

	$A, \text{Па}$	$\tau, \text{с}$	$t_0, \text{с}$	$f_n - f_m, \text{Гц}$
$p_1(t)$	12350000	0.010004	0.5	35–60
$p_2(t)$	72350000	0.003215	0.5	80–200

В работе [5] для моделирования распространения сейсмоимпульсов во временной области нами была использована модель, в основе которой лежит численное решение двумерного нестационарного волнового уравнения в цилиндрических координатах. В этой работе в качестве функции источника была применена аналитическая функция $p(t) = A(t - t_0)\exp(-4 \ln 2 \cdot (t - t_0)^2 / \tau^2)$. Это производная от гауссовой функции с полушириной τ , A – постоянная, характеризующая энергию источника. Данная аналитическая функция позволила нам получить импульсы, подобные экспериментально измеренным по форме и спектру [5].

На графиках спектральной плотности мощности, показанных на рис. 2, видно, что в спектрах экспериментально измеренных в точках Г.1 и Г.2 акустических импульсов хорошо выражены два пика мощно-

сти. На графиках спектральной плотности мощности, показанных на рис. 2, видно, что в спектрах экспериментально измеренных в точках Г.1 и Г.2 акустических импульсов хорошо выражены два пика мощно-

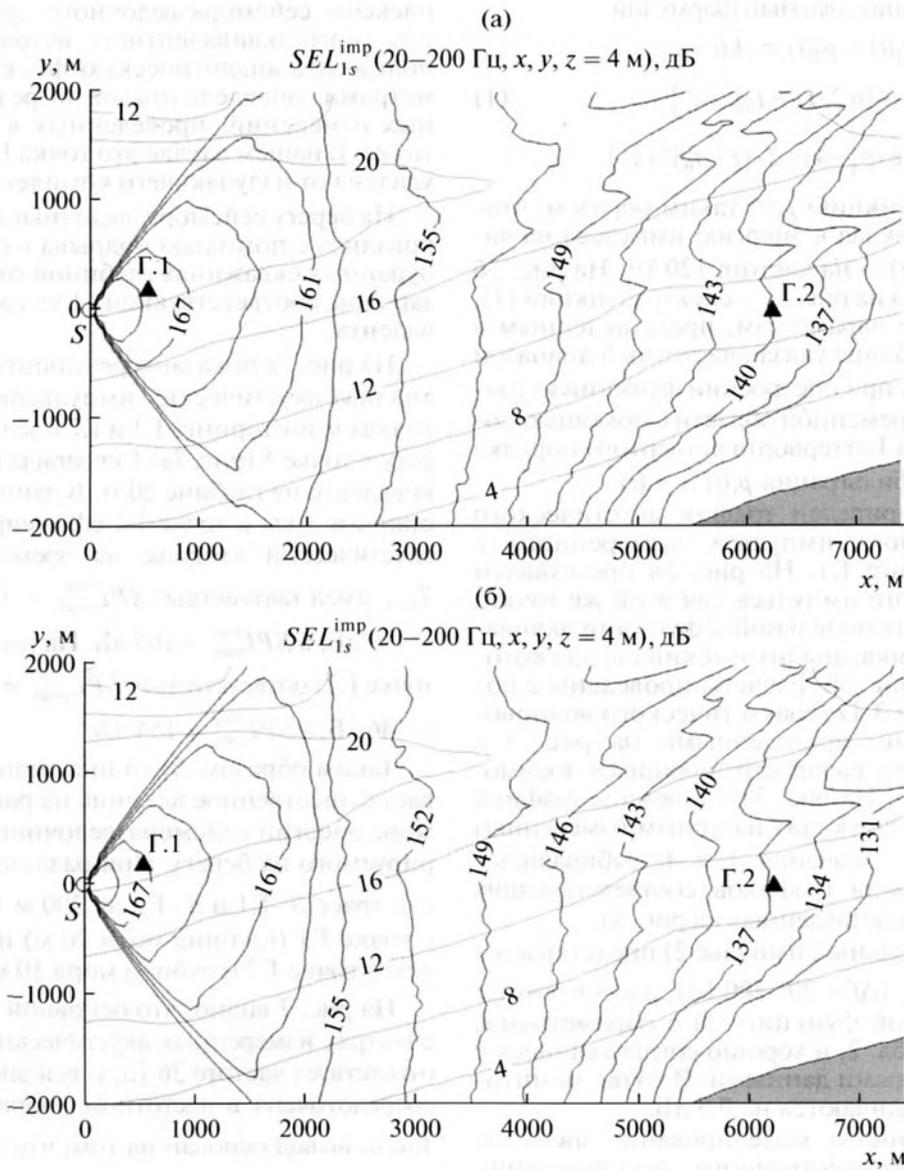


Рис. 6. (а) Распределение значений SEL_{1s}^{imp} [$\Delta f = 20-200 \text{ Гц}$], $x, y, z = 4 \text{ м}$], рассчитанных с помощью МПУ в модельном 3-D геоакустическом волноводе в приближении распространения двух взаимодействующих нормальных мод, генерируемых модельным-1 эквивалентным источником $S(x=0, y=0, z=4 \text{ м})$, показанным на рис. 4б, и (б) модельным-2 эквивалентным источником $S(x=0, y=0, z=4 \text{ м})$, соответствующим аналитической функции (1), показанной на рис. 5б.

Таблица 3. Значения $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-140$ Гц) для экспериментальных и модельных импульсов

		$SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-140$ Гц), дБ отн. 1 мкПа ² с
<i>S</i>	Функция источника	237.4
Г.1	Экспериментальный импульс	159.3
Г.2	Экспериментальный импульс	146.7
	Модельный импульс	147.3

сти на частотах 45 и 140 Гц, поэтому в данной работе в качестве модельной-2 функции источника применяется импульс, описываемый формулой

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = A_1(t - t_0) \times \exp(-4 \ln 2 \cdot (t - t_0)^2 / \tau_1^2) + A_2(t - t_0) \exp(-4 \ln 2 \cdot (t - t_0)^2 / \tau_2^2). \quad (1)$$

Определим функцию $p_1(t)$ таким образом, чтобы она вносила вклад в энергию импульса на частоте 45 Гц, а $p_2(t)$ – на частоте 120 Гц. На рис. 5б показана форма, а на рис. 5г – спектр функции (1), соответствующие параметрам, представленным в табл. 2. В этой таблице указан частотный диапазон $f_n - f_m$, в котором при построении функции источника $S \equiv p(t)$ во временной области с помощью полосового фильтра Баттерворта четвертого порядка была проведена фильтрация $p_1(t)$ и $p_2(t)$.

На рис. 5а приведен график акустического сейсморазведочного импульса, измеренного в точке мониторинга Г.1. На рис. 5в представлен график модельного импульса для этой же точки, рассчитанного для модельной-2 функции эквивалентного источника, аналитический сигнал которой показан на рис. 5б. Расчеты проведены с помощью МПУ для 3-D геоакустического волновода с параметрами, приведенными на рис. 3 в приближении двух распространяющихся взаимодействующих мод. На рис. 5д приведены графики спектров, соответствующих натурным измерениям и моделированию. Значения A_1 и A_2 выбирались с учетом согласования графиков соответствующих спектров $G(f)$, представленных на рис. 5д.

В табл. 1 (модельный импульс 2) представлены значения $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-200$ Гц), рассчитанные для аналитической функции (1) с параметрами, указанными в табл. 2, и хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. В точке мониторинга Г.2 они различаются на 0.3 дБ.

Целью численного моделирования является построение пространственного распределения значений параметра $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f, z, x, y$) в водном слое 3-D модельного геоакустического волновода, которое необходимо для корректного оценивания вокруг сейсморазведочного судна зон

определенного уровня возможного антропогенного воздействия на морских млекопитающих. На рис. 6 показано такое распределение на горизонте $z = 4$ м, соответствующем положению пневмоизлучающего комплекса сейсморазведочного судна “Искатель-4” при излучении акустического импульса, примененного в качестве опорного при построении эквивалентной модельной-1 функции источника S , показанной на рис. 4б, и эквивалентной модельной-2 функции источника, основанной на формуле (1). Последняя показана на рис. 5б.

На рис. 6 видно, что пространственные распределения значений $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ ($\Delta f = 20-200$ Гц), $x, y, z = 4$ м] в обоих случаях практически эквивалентны, поэтому при моделировании акустических полей, формируемых на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна, в качестве точечного эквивалентного источника лучше использовать аналитическую функцию (1) с параметрами, определенными по результатам натурных измерений, проведенных в одной опорной точке. В нашем случае это точка Г.1, которая была удалена от излучающего комплекса на 650 м.

На берегу сейсморазведочные сигналы генерировались с помощью подрыва в специально пробуренных скважинах глубиной от 10 до 30 метров зарядов, соответствующих 1 кг тротилового эквивалента.

На рис. 7в показаны результаты спектрального анализа акустических импульсов, измеренных в точках мониторинга Г.1 и Г.2 после подрыва на берегу в точке S (рис. 7а) 1 кг заряда в тротиловом эквиваленте на глубине 20 м. В данном случае на дистанции 3 км в точке Г.1 сформированный в воде акустический импульс на временном интервале $T_{90\%}$ имел параметры: $SPL_{peak}^{imp} = 174$ дБ, $SEL_{T_{90\%}}^{imp} = 159$ дБ, а $SPL_{rms}^{imp} = 165$ дБ. На расстоянии 3.3 км в точке Г.2 соответственно $SPL_{peak}^{imp} = 160$ дБ, $SEL_{T_{90\%}}^{imp} = 146$ дБ, а $SPL_{rms}^{imp} = 154$ дБ.

Таким образом, толщина водного слоя оказывает существенное влияние на распространение в море энергии сейсморазведочного сигнала, генерируемого на берегу. При различии протяженности трасс $S-Г.1$ и $S-Г.2$ на 300 м значение $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ в точке Г.1 (глубина моря 20 м) на 13 дБ больше, чем в точке Г.2 (глубина моря 10 м).

На рис. 7 видно, что основной пик мощности в спектрах измеренных акустических импульсов соответствует частоте 36 Гц, и вся энергия импульсов сосредоточена в частотном диапазоне 20–140 Гц. Такой вывод основан на том, что значение $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ (20–500 Гц)– $SEL_{T_{90\%}}^{imp}$ (20–140 Гц) ≈ 1 дБ.

При построении 3-D модельного геоакустического волновода были использованы реальные батиметрические данные. Распределение скоро-

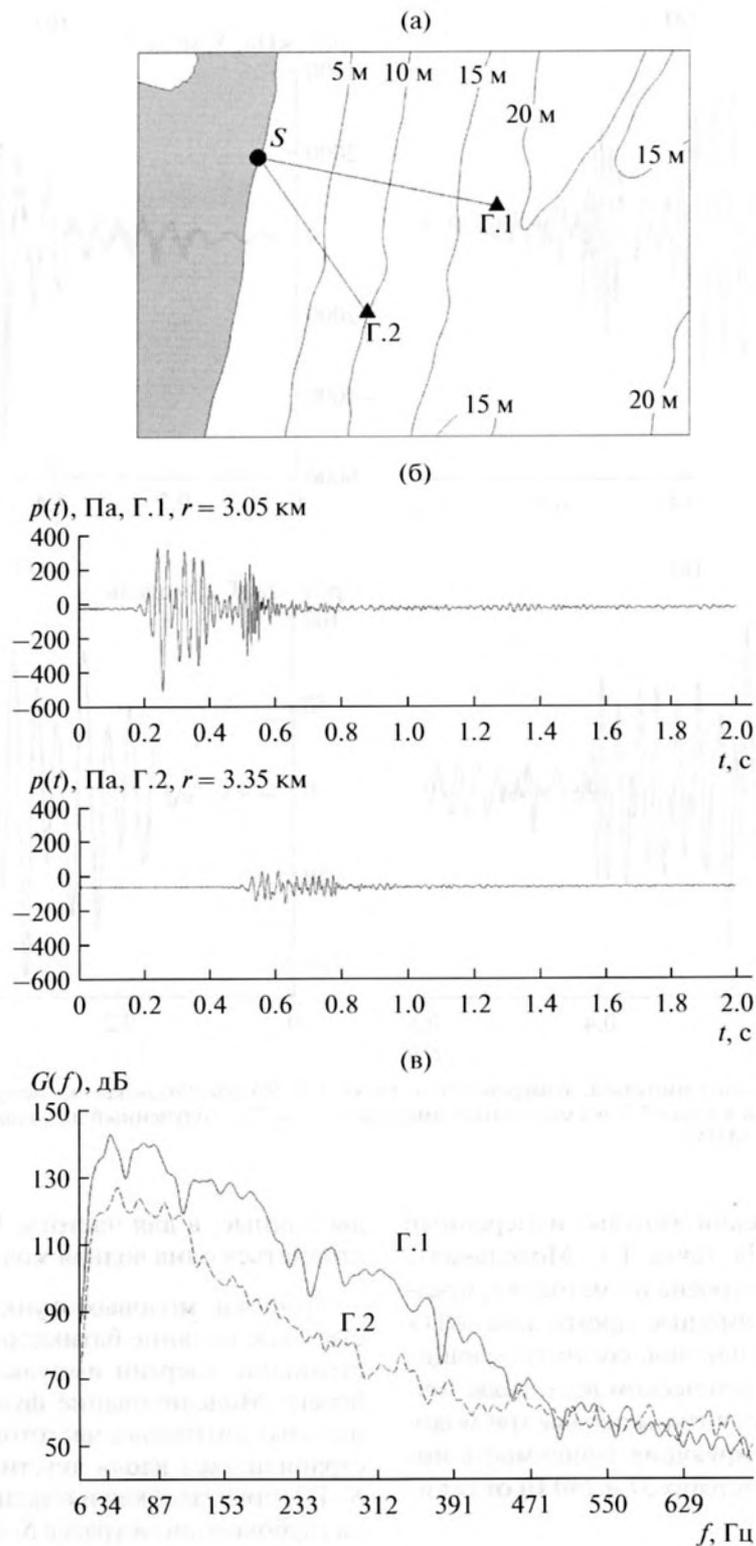


Рис. 7. (а) Карта района с указанием точки подрыва 1 кг заряда в скважине глубиной 20 м; (б) соответствующие подрыву акустические импульсы, измеренные на изобатах 10 и 20 м и (в) их спектры.

сти звука в водном слое построено на основе одного зондирования, проведенного в указанной на рис. 1 точке. Модельное распределение акустиче-

ских параметров в дне показано на рис. 3. При построении эквивалентного модельного-1 точечного импульсного источника в качестве опорного сиг-

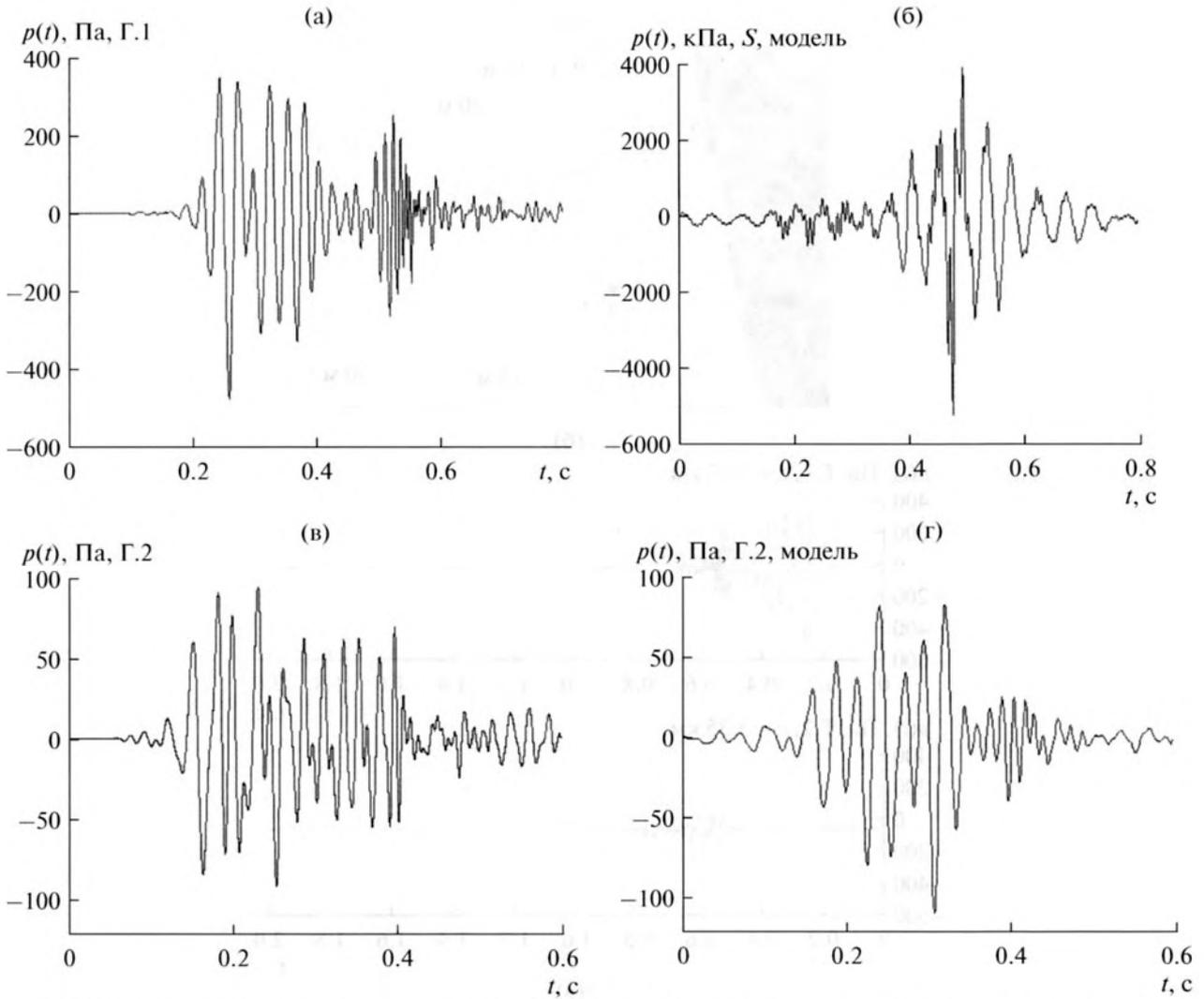


Рис. 8. (а) Форма опорного импульса, измеренного в точке Г.1; (б) рассчитанная по нему функция источника; (в) импульс, измеренный в точке Г.2; (г) модельный импульс в точке Г.2, полученный для эквивалентного точечного источника S с помощью МПУ.

нала был взят акустический импульс, измеренный в указанной на рис. 7а точке Г.1. Модельная-1 функция источника построена по методике, представленной выше. С помощью программы МПУ для трех волноводов сравнения, соответствующих в модельном 3-D геоакустическом волноводе точкам S , Г.1 и Г.2, были рассчитаны первые три модовые функции, иллюстрирующие зависимость интенсивности звука на частотах 37 и 140 Гц от горизонта z .

Расчеты показали, что в точке Г.1 для звука с частотой 37 Гц распространяется одна водно-донная мода и две донные моды, а на частоте 140 Гц в водном слое распространяются две водные моды и одна водно-донная. В точке приема Г.2 глубина моря в два раза меньше и равна 9 м, соответственно, в этой точке для звука с частотой 37 Гц все мо-

ды донные, а для частоты 140 Гц может распространяться одна водная мода.

Графики модовых функций показали существенное влияние батиметрии трассы на распространение энергии импульсов, генерируемых на берегу. Моделирование функции потерь для тональных сигналов с частотой 37 и 140 Гц, распространявшихся вдоль акустических трасс S -Г.1 и S -Г.2, показало, как и в эксперименте, что потери на глубоководной трассе S -Г.1 на 10–15 дБ меньше, чем на мелководной.

На рис. 8а показан акустический импульс, измеренный в точке Г.1, который был применен в качестве опорного сигнала при построении (с помощью программы МПУ для трех распространяющихся и взаимодействующих нормальных мод) импульса эквивалентного точечного источника,

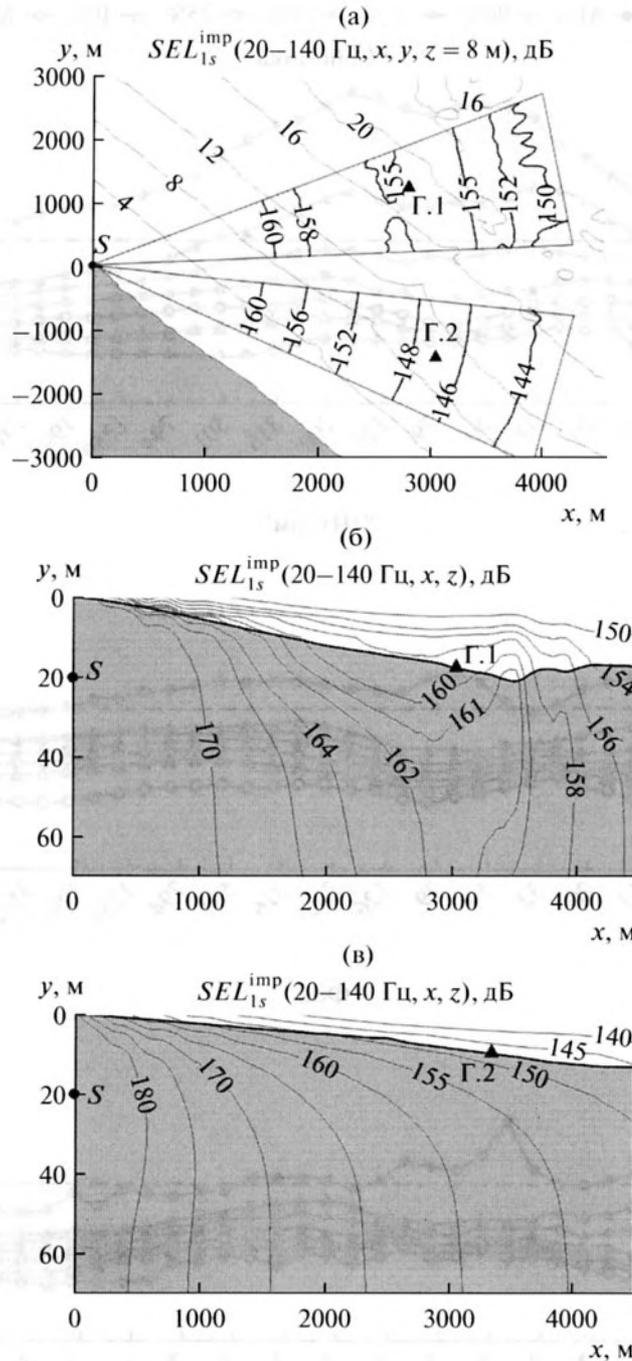


Рис. 9. (а) Распределение значений функции $SEL_{1s}^{imp} [(\Delta f = 20-140 \text{ Гц}), x, y, z = 8 \text{ м}]$ и (б, в) функции $SEL_{1s}^{imp} [(\Delta f = 20-140 \text{ Гц}), x, y = 0 \text{ м}, z]$. В горизонтальной плоскости результаты вычислений представлены в пределах двух треугольников, соответствующих раскрытию узкоугольного параболического уравнения.

расположенного в точке S . Этот сигнал показан на рис. 8б.

Импульс, полученный путем пересчета функции источника в точку Г.2, показан на рис. 8г, и он оказался подобным акустическому импульсу, измеренному в этой точке (рис. 8в). Результаты сравнительного анализа параметров эксперимен-

тальных и модельных импульсов представлены в табл. 3.

На рис. 9 показано распределение значений функции $SEL_{1s}^{imp} [(\Delta f = 20-140 \text{ Гц}), x, y, z = 8 \text{ м}]$ на горизонте $z = 8 \text{ м}$ в горизонтальной плоскости и функции $SEL_{1s}^{imp} [(\Delta f = 20-140 \text{ Гц}), x, y = 0 \text{ м}, z]$ в вертикальной плоскости. Расчеты проведены с

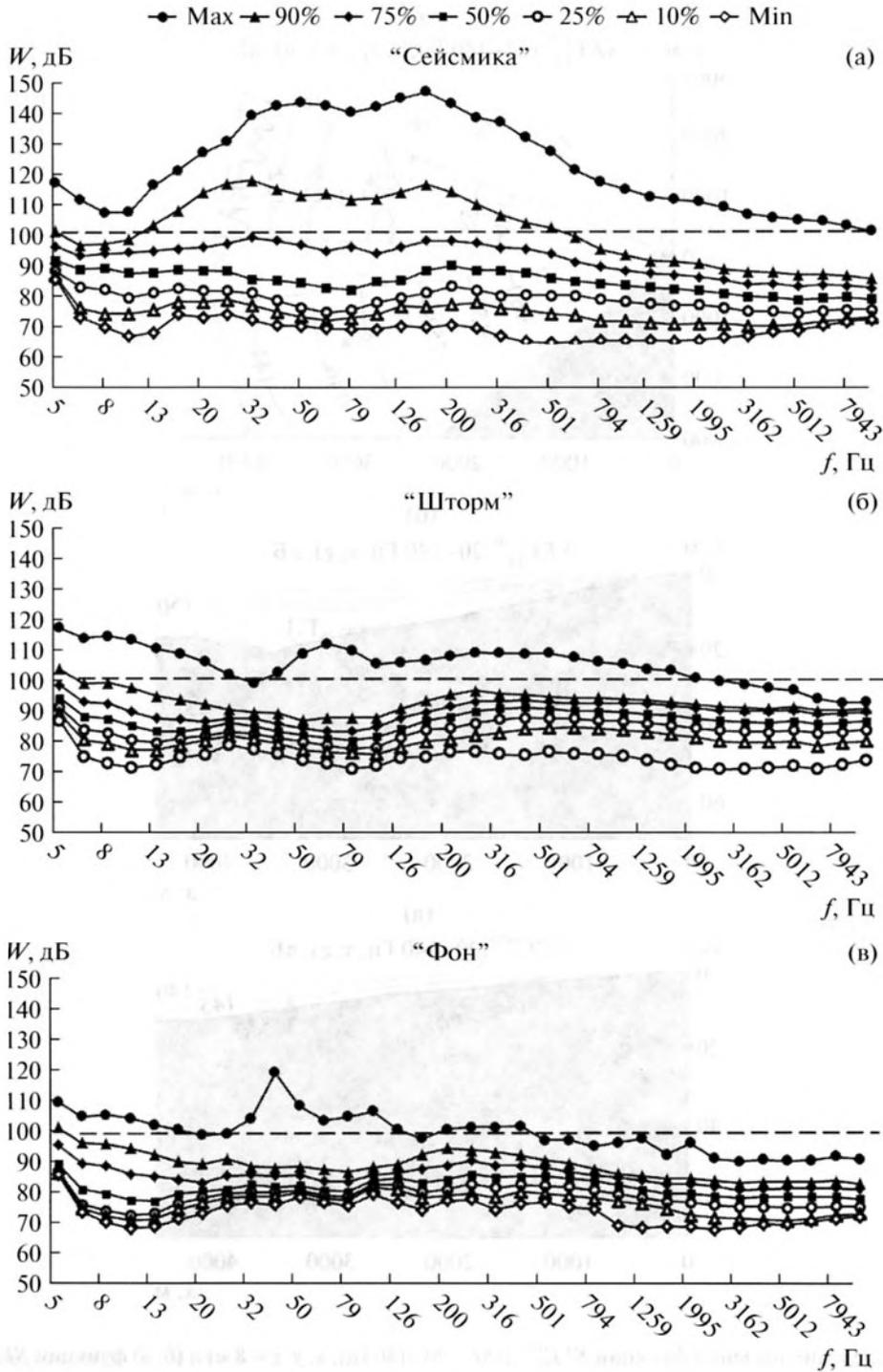


Рис. 10. Результаты статистического анализа значений W в 1/3-октавных диапазонах, соответствующих измерениям, проведенным (а) в точке мониторинга Г.1 во время активных сейсморазведочных исследований (по 400 значениям W , 8.3 сут), (б) во время прохождения циклона (по 283 значениям W , 5.9 сут) и (в) в штительных условиях (по 158 значениям W , 3.3 сут).

помощью МПУ в 3-D модельных геоакустических волноводах с параметрами, показанными на рис. 3, в приближении трех распространяющихся взаимодействующих акустических мод.

На рис. 9б, 9в видно, как влияет толщина водного слоя на распределение значений функции SEL_{15}^{imp}

в вертикальной плоскости. Согласно рис. 9б, возле точки мониторинга Г.1 расположена зона конвергенции в формируемом на шельфе импульсном акустическом поле. На более мелководной трассе распространения S-Г.2, согласно рис. 9в, эта зона не выражена, поэтому экспериментальные и модель-

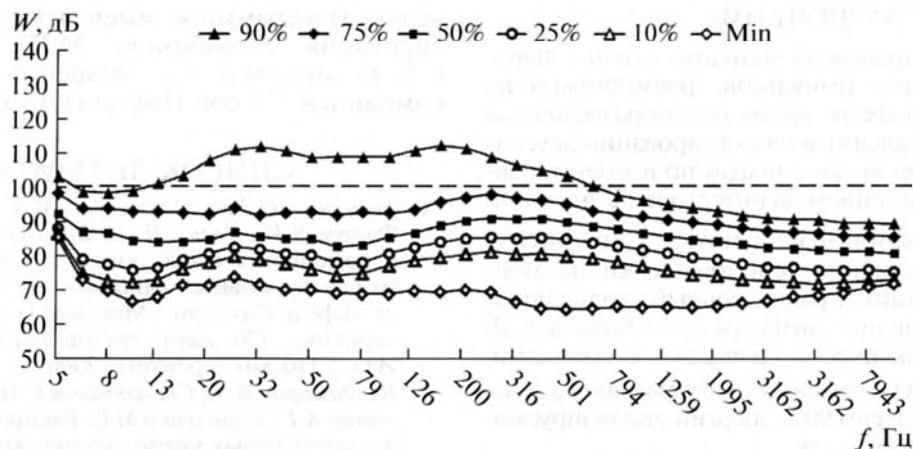


Рис. 11. Результаты статистического анализа по 2944 значениям W в 1/3-октавных диапазонах, соответствующим измерениям в течение 61 суток, проведенным в точке мониторинга Г.1 в июле–сентябре 2014 г.

ные значения SEL_{1s}^{imp} в этих точках и различаются более чем на 12 дБ.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ, ИЗМЕРЕННЫХ ВО ВРЕМЯ МОНИТОРИНГА

Для оценки акустических кумулятивных эффектов, связанных с проведением в данном районе моря сейсмоакустических исследований, мы применим процентильное распределение за данный анализируемый период значений спектральной плотности мощности акустических шумов в 1/3-октавных диапазонах с центральными частотами, указываемыми на графиках. При построении таких оценок мы используем следующую методику. Синхронные ряды значений мощности W в дБ отн. 1 мкПа^2 , соответствующие усреднению за 30 минут в 1/3-октавном диапазоне с центральной частотой f_i , анализируются независимо от других диапазонов. На заданном интервале времени с помощью перебора определялись наименьшее и наибольшее значения, а затем с шагом 0.1 дБ определялись значения, соответствующие 10, 25, 50, 75 и 90%. Например, если в результате сравнительного перебора для частоты f_i получилось, что величина 95 дБ соответствует 50%, то это означает, что у половины всех измеренных значений $W \leq 95$ дБ.

Для сравнительного анализа определим три временных интервала:

- с 00:00 27.08 до 06:00 04.09 — согласно визуальному анализу текущего спектра измеренных в точке Г.1 акустических шумов, этот интервал времени соответствует малым приливным течениям (практически нет низкочастотных псевдошумов обтекания), хорошим погодным условиям (на частотах больше 500 Гц практически нет шумов от пульсаций ветра и поверхностного волнения), и поэтому в этот период ежедневно проводились сейсмозведочные исследования. Назовем его “сейсмика”;

- с 03:00 17.09 до 24:00 22.09 — в это время проходил атмосферный циклон, сопровождаемый дождем, ветром и ветровым волнением. На этом интервале не проводилась сейсмозведка и не заметны судовые шумы, поэтому назовем его “шторм”;

- с 12:30 27.07 до 19:00 30.07 — в это время не было сейсмозведки и не выражены шумы от движущихся судов, соответственно, назовем его “фон”.

На рис. 10 видно, что во время “шторма” по сравнению с “фоном” на частотах больше 500 Гц, примерно на 5 дБ, поднялись графики 75 и 90%, а во время “сейсмики” график 90% поднялся на 28 дБ на частоте 32 Гц и на 25 дБ на частоте 158 Гц. На частотах больше 500 Гц изменения незначительные.

Следовательно, сейсмозведочные работы вызвали изменения акустического фона в данной акватории, заметные в графиках 90 и 75%, а кривые 50% в точках измерений практически совпадают с графиком 90% для измерений, проведенных в штительных условиях в точке Г.1.

На рис. 11 представлены результаты статистического анализа акустических измерений, проведенных в точке Г.1 в период июль–сентябрь 2014 г. На этом рисунке видно, что антропогенные шумы, генерируемые сейсмозведкой, хорошо выражены в графиках, соответствующих 90 и 75%, причем в этом случае график 75% на частотах 200–300 Гц поднялся до 95 дБ, а в графике 90% заметен второй максимум на частоте 32 Гц, и уровень антропогенных шумов на частотах 25–40 и 126–200 Гц превысил 110 дБ. Следует отметить, что и в данном анализе подъем графика 50% практически незаметен. На основании этого мы можем констатировать, что антропогенные шумы, связанные с проведением сейсмозведки в летне–осенний период 2014 г. при практически непрерывных акустических измерениях на изобате 20 м, вызвали заметное повышение уровней акустических шумов, измеренных в частотном диапазоне 2–15000 Гц в 50% данных, т.е. в течение 31 суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практике проверена методика оценки параметров акустических импульсов, формируемых на мелководном шельфе во время сейсморазведочных исследований, основанная на сканировании акустических данных порциями с шагом по времени, равным 0.5 с, и определением на интервале 1 с значений SPL_{peak}^{1s} и SEL_{1s} , которые используются при оценке антропогенного влияния сейсморазведки на морских млекопитающих. Сравнительный анализ показал, что при отношении сигнала к шуму больше 6 дБ эти значения практически совпадают с оценками, рассчитанными на временных интервалах $T_{90\%}$, на которых сосредоточено 90% энергии анализируемого акустического импульса.

Показаны возможности численного моделирования сейсмоакустических импульсных полей, формируемых сейсморазведочными сигналами, генерируемыми в море и на берегу. Моделирование, опирающееся на результаты натуральных акустических измерений в опорной точке, проводилось с помощью модового параболического уравнения в неоднородных 3-D геоакустических волноводах в приближении распространения взаимодействующих нормальных акустических мод. В первой методике эквивалентная модельная-1 точечная функция источника строится с помощью МПУ по акустическому импульсу, измеренному в опорной точке. Данный метод может применяться при нестационарных параметрах источника сейсмоакустического сигнала, например, забивка свай и одиночные взрывные источники на берегу. Во второй методике модельная-2 функция импульсного источника соответствует аналитической функции, параметры которой определяются из сравнения модельного спектра акустического импульса со спектром реального акустического сигнала, измеренного в опорной точке. Данный метод может быть успешно применен при относительно стационарном источнике акустических импульсов, которым является излучающий комплекс сейсморазведочного судна. В этом случае значительно упрощается моделирование параметров акустического поля, формируемого на шельфе во время движения сейсморазведочного судна по заданному акустическому профилю.

На основании статистического анализа акустических измерений, проведенных в летне-осенний период 2014 г. на изобате 20 м, можно констатировать, что сейсморазведочные исследования на Чайвинском лицензионном участке вызвали повышение уровней акустических шумов, измеренных в частотном диапазоне 2–15000 Гц в 50% данных, т.е. в течение 31 суток. Отметим, что при проведении сейсморазведочных исследований в 2010 г. на Лебединском лицензионном участке [3] статистический анализ акустических данных, полученных во время мониторинга, показал такой же результат.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО "РЭА-консалтинг". Особую признательность и благодарность авторы выражают сотрудникам ТОИ ДВО РАН Д.Г. Ковзелью и Р.А. Корот-

ченко. Программное обеспечение для 3-D моделирования разработано М.Ю. Трофимовым, С.Б. Козицким и А.Д. Захаренко при поддержке компанией "Эксон Нефтегаз Лимитед".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрнева О.Ю., Машинов М.К., Швецов Е.П., Фадеев В.И., Селин Н.И., Яковлев Ю.М. Сезонные перемещения серых китов (*Eschrichtius robustus*) между кормовыми районами на северо-восточном шельфе о. Сахалин / Морские млекопитающие Голарктики: Сб. науч. трудов 4-й междунар. конф. Изд. СПб Университета, 2006. С. 530–535.
2. Владимиров В.А., Стародымов С.П., Афанасьев-Григорьев А.Г., Корниенко М.С. Распространение и численность серых китов охотско-корейской популяции в водах северо-восточного Сахалина // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2010. № 19. С. 50–64.
3. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А., Путов В.Ф., Соловьев А.А. Мониторинг параметров сейсмоакустических импульсов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 248–257.
4. Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 134. P. 21–44.
5. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Воекголт М. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
6. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. (принята в печать).
7. Трофимов М.Ю. Узкоугольные параболические уравнения адиабатического распространения звука одной моды в горизонтально-неоднородном мелком море // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 5. С. 647–652.
8. Трофимов М.Ю. Широкоугольные модовые параболические уравнения // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 6. С. 274–278.
9. Petrov P.S., Trofimov M.Yu., Zakharenko A.D. Mode parabolic equations for the modeling of three-dimensional sound propagation effects in shallow water / Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics. 2–6 th July 2012, GB Edinburgh. P. 53–60.
10. Гриценко В.А. Метод автоматического обнаружения сейсмоакустических импульсов / Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 287–290.
11. Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H. Marine mammals and noise. Academic Press, 1995. 576 p.
12. Рутенко А.Н., Козицкий С.Б., Манульчев Д.С. Влияние наклонного дна на распространение звука // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 76–89.
13. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 580 с.