

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРЕННЫХ НА САХАЛИНСКОМ ШЕЛЬФЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ИХ ВЛИЯНИЯ НА СЕРЫХ КИТОВ

© 2019 г. А. Н. Рутенко^{а, *}, В. А. Гриценко^а, Д. Г. Ковзель^а, Д. С. Манульчев^а, М. Ю. Фершалов^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 30.01.2019 г.

После доработки 20.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

В 2015 г. во время проведения сейсморазведок на северо-восточном шельфе о. Сахалин у дна в точках, расположенных на границах и внутри районов летне-осеннего нагула серых китов, проводились стационарные измерения вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ. В акустическом мониторинге были задействованы 40 автономных подводных регистраторов. Суммарная продолжительность акустических измерений составила 4312 суток. Целью представленного в статье мониторинга было получение оценок параметров акустических импульсов, сформированных на шельфе сейсморазведочными сигналами и забивкой фундаментных свай на берегу, для многофакторного корреляционного анализа влияния данных работ и исследований на поведение серых китов.

Ключевые слова: сейсмоакустические измерения, распространение импульсных акустических сигналов на шельфе, сейсморазведка, забивка свай на берегу

DOI: 10.1134/S0320791919040166

ВВЕДЕНИЕ

Освоение углеводородных месторождений на северо-восточном шельфе о. Сахалин сопряжено с потенциальным акустическим антропогенным воздействием на районы летне-осеннего нагула Западной популяции серых китов, занесеной в “Красную книгу” РФ. Многочисленные наблюдения показали, что важными районами летне-осеннего нагула серых китов [1, 2] являются мелководная (6–20 м) область северо-восточного шельфа о. Сахалин, простирающаяся вдоль берега и относительно глубоководный (30–50 м) Морской район питания. Чайвинский, Аркутун-Дагинский и Одоптинский лицензионные участки углеводородных месторождений включают часть акватории этих районов, и поэтому компания Эксон Нефтегаз Лимитед при освоении данных месторождений проводит биолого-акустический мониторинг состояния данной популяции серых китов, их кормовой базы и уровней антропогенных акустических шумов на границах и внутри районов их летне-осеннего нагула.

Рациональное освоение углеводородных месторождений требует эпизодических проведенных 3-D и 4-D сейсморазведок, во время которых особый акцент делается на мониторинг параметров

акустических импульсов, формируемых в водном слое сейсморазведочными сигналами, излучаемыми комплексом из сфазированных пневмопушек, буксируемых за специализированным судном, идущим по заданному геоакустическому профилю [3]. Кроме того, забивка фундаментных свай на берегу формирует на шельфе низкочастотное импульсное поле [4], параметры которого надо также учитывать при построении в заданной акватории шельфа экспериментальных и теоретических оценок уровней акустической экспозиции от данных антропогенных источников. Как правило, во время таких исследований пространственные пассивные акустические измерения сочетаются с акустическим мониторингом, проводимым в реальном времени [3] с помощью автономных подводных акустических регистраторов (АПАР), оснащенных поверхностными буями с ультракоротковолновым – УКВ радиотелеметрическим каналом [5], а также спутниковым каналом Иридиум [6].

В летне-осенний период 2015 г. года компаниями Эксон Нефтегаз Лимитед и Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд. с помощью четырех специализированных судов проводились сейсморазведочные исследования в трех районах, пока-

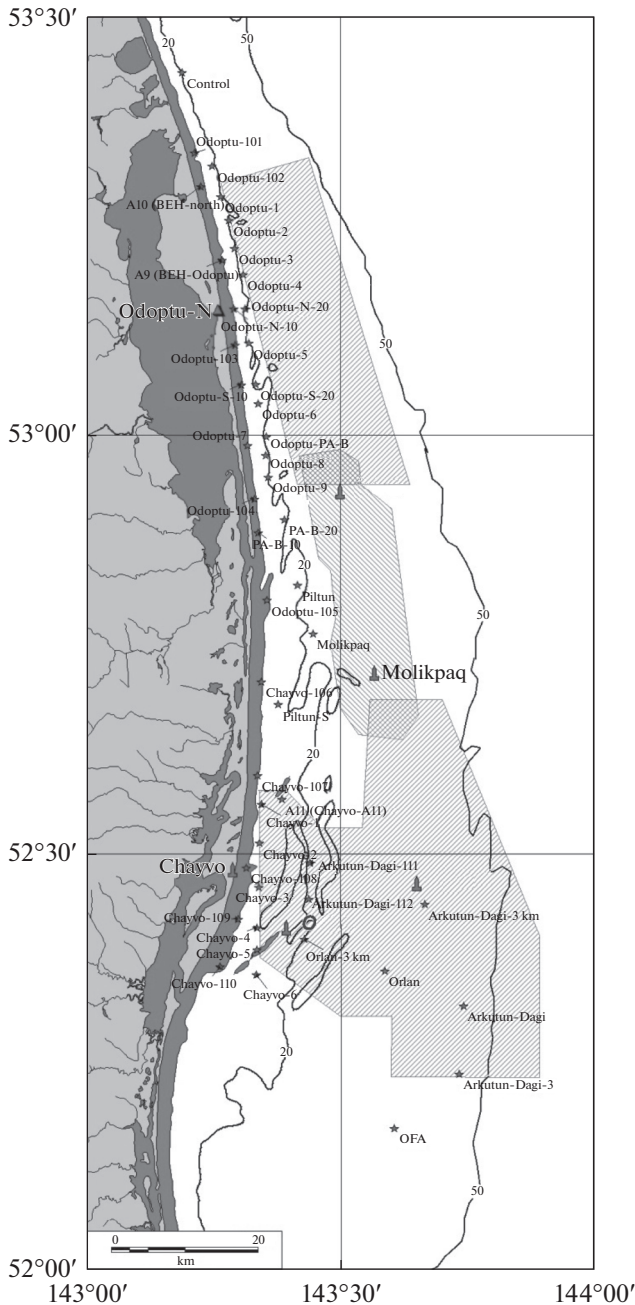


Рис. 1. Карта с указанием трех районов, в которых проводились сейсморазведочные исследования. Звездочками обозначены точки расположения *Шельф-2014*, значками в виде башенок – точки расположения нефтедобывающих платформ, большой треугольник – береговой производственный комплекс *Odoptu-N*. Для каждой точки приведено ее название.

занных на рис. 1. На этом рисунке также показаны точки, в которых с помощью гидрофонов новых АПАР [6], названных *Шельф-2014*, практически непрерывно проводились измерения у дна вариаций акустического давления $p(t)$ в частотном диапазоне

2–15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ. После экспедиции записанные *Шельф-2014* вариации акустического давления $p(t)$ были проанализированы с помощью специального комплекса программ, разработанного в ТОИ ДВО РАН.

Целью анализа является определение параметров акустического импульса, сформированного сейсморазведочным сигналом или ударом “молота” по свае, забиваемой на берегу, в данной точке мониторинга. Такими параметрами являются:

$$SPL_{peak}^{imp} = 20 \lg \left(\frac{\max_{T_{90\%}} |p(t)|}{p_0} \right), \quad (1)$$

$$SPL_{rms}^{imp} = 20 \lg \left(\frac{1}{p_0} \sqrt{\int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} p^2(t) dt / T_{90\%}} \right) \approx \approx SPL_{rms}^{imp}(\Delta f) = 20 \lg \left(\frac{1}{p_0} \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G(f) df} \right), \quad (2)$$

$$SEL^{imp} = 10 \lg \left(\frac{1}{p_0^2 t_0} \int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} p^2(t) dt \right) \approx SEL^{imp}(\Delta f) = = 10 \lg \left(\frac{T_{90\%}}{p_0^2 t_0} \int_{f_1}^{f_2} G(f) df \right). \quad (3)$$

Здесь $p(t)$ – вариации акустического давления, измеренные гидрофоном *Шельф-2014* в 20 см над дном в точке мониторинга, $T_{90\%}$ – интервал времени, на котором сосредоточено 90% энергии акустического импульса, $p_0 = 1$ мкПа, $t_0 = 1$ с, $G(f)$ – периодограмма вариаций $p(t)$ на временном интервале $T_{90\%}$. $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f)$ – уровень среднеквадратичного значения акустических шумов в частотном диапазоне $\Delta f = f_2 - f_1$ в дБ отн. 1 мкПа. $SEL^{imp}(\Delta f)$ – уровень акустического воздействия или акустическая экспозиция в частотном диапазоне Δf на временном интервале $T_{90\%}$ в дБ отн. 1 мкПа² с.

Эта задача осложняется, когда в море работают параллельно несколько сейсморазведочных судов в относительно близко расположенных районах. Кроме того, во время проведения сейсморазведочных исследований вблизи районов кормления китов, помимо стандартного излучения при движении судна по геоакустическому профилю, эпизодически применяются отпугивающие сигналы меньшей мощности, поэтому при обнаружении в записи $p(t)$ низкочастотного акустического импульса надо оценить не только его параметры, но и определить его источник.

Результаты определения параметров всех акустических импульсов, измеренных у дна в точках мониторинга во время проведения на шельфе

сейсморазведочных исследований, в согласованных форматах переданы биологам для использования в многофакторном корреляционном анализе, основанном на нескольких многопараметрических моделях, которые на основании как акустических, так и не акустических параметров (перемещения и поведение китов, батиметрические параметры, погодные условия и др.) позволяют выявить возможное влияние сейсморазведочных исследований на серых китов, питающихся в данных районах. В работе [7] представлена методика и некоторые результаты такого анализа, проведенного по результатам акустических измерений [8] и наблюдений за серыми китами во время 4-D сейсморазведки на *Пильтун-Астохском* месторождении.

В 2010 году во время проведения сейсморазведочных исследований на *Лебединском* (расположен северней *Одоптинского*) 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 [9]. В 2014 году при организации акустического мониторинга, по заданию компании *Роснефть*, во время проведения подобных сейсморазведочных исследований на *Чайвинском* лицензионном участке акустические измерения проводились в двух точках с помощью цифровых акустических станций, работающих в автономном режиме [10]. 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 [3]. Для организации мониторинга акустических шумов и параметров низкочастотных акустических импульсов в море на изобатах 10 и 20 м устанавливались два автономных подводных акустических регистратора [11], которые поднимались через 10–15 дней. Записанные ими акустические данные считывались и на следующий день они снова устанавливались в море. Основные задачи, которые решались при организации и проведении акустических измерений, состояли в следующем:

- контролировать уровни антропогенных шумов и параметры импульсных сигналов, наблюдаемых в заданном районе сейсморазведочных исследований в двух характерных точках, располо-

женных на изобатах 10 и 20 м, и результаты представлять наблюдателям за морскими млекопитающими;

- исследовать потери при распространении в данной акватории энергии типовых акустических импульсов, генерируемых сейсморазведочным судном и подрывами на берегу. Сообщать наблюдателям о характерных дистанциях, соответствующих разным критериям возможного воздействия акустических сигналов на морских млекопитающих;

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

В работе [9] без аналитического обобщения были представлены результаты анализа натуральных измерений, проведенных в 2010 г. на *Лебединском* лицензионном участке. В работе [10] 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 было выполнено с помощью модового параболического уравнения – МПУ [12], опирающегося на результаты натуральных измерений, проведенных в опорных точках.

На основании статистического анализа акустических измерений, проведенных в летне-осенний период 2014 г. на изобате 20 м, в работе [10] сделан вывод, что сейсморазведочные исследования на *Чайвинском* лицензионном участке вызвали повышение уровней акустических шумов в 50% данных, т.е. в течение 31 суток. Такой же результат был получен и в 2010 г. на *Лебединском* лицензионном участке [9].

На рис. 1 видно, что в 2015 г. акватория, на которой проводились сейсморазведочные исследования, охватывает примерно 150 км северо-восточного шельфа о. Сахалин. Акустические измерения проводились с помощью 39 акустических станций типа *Шельф-2014* и одного старого АПАР с ЭВМ “Prometheus”.

От наших предшествующих работ акустический мониторинг 2015 г. отличается комплексностью и тем, что анализируются параметры всех акустических импульсов, генерируемых сейсморазведочными судами и забивкой свай на берегу. Нам известна одна работа [13], в которой для контроля осенней миграции гренладских китов в районе Аляски в море были установлены 35 автономных акустических регистраторов. В результате были записаны звуки китов и импульсные сигналы от четырех сейсморазведок. Для каждого импульса на временном интервале, содержащем 90% его энергии, рассчитывались значения уровня акустической

экспозиции или энергии акустического сигнала — SEL и уровня значения среднеквадратического давления — SPL_{rms} . Эти данные позволили провести анализ характера распространения импульсных сигналов в арктической акватории.

В данной работе приводится описание частотно-временных характеристик и параметров импульсных акустических сигналов, формируемых на мелководном шельфе типовым сейсморазведочным сигналом и ударом “молота” по свае, забиваемой на берегу. Приводится оригинальная методика, позволявшая практически в автоматическом режиме находить эти импульсы и адекватно оценивать их параметры, часто разделяя импульс во времени на низкочастотный *предвестник*, распространившийся в дне, и значительно опережающий *водный* импульс, энергию которого приносят водные и донно-водные моды.

Кроме того, приведены результаты численного моделирования акустического поля, формируемого в прилегающей акватории северо-восточного шельфа о. Сахалин, сейсмоакустическими импульсами, генерируемыми на берегу при забивке фундаментных свай. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами натурных измерений.

АКУСТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР *ШЕЛЬФ-2014*

Быстрые приливные течения (до 1.5 м/с) и малая глубина моря в точках акустического мониторинга (10–20 м) потребовали разработки специальных автономных акустических измерительных средств. Это модифицированный гидрофон типа ГИ-50 с активным высокочастотным фильтром на входе предварительного линейного усилителя гидрофона (см. рис. 2а), обеспечивающего частотную зависимость его чувствительности — $M(f)$, показанную на рис. 2б. На этом рисунке видно, что в полосе пропускания 10–15000 Гц $M(f)$ примерно равна 63 дБ отн. 1 мкВ/Па, а на 2 Гц она снижается более чем на 40 дБ. Такая $M(f)$ при собственной чувствительности керамики гидрофона, приблизительно равной 1 мВ/Па, обеспечивает необходимый динамический диапазон измерения вариаций $p(t)$, вызываемых акустическими волнами и псевдошумами обтекания гидрофона приливными течениями. Орбитальное движение частиц воды у дна в штормовых поверхностных волнах и в длинных волнах зыби часто вызывают дребезг резиновых амортизаторов, обеспечивающих установку гидрофона внутри металлической пирамидки (см. рис. 2в).

Кроме того, на 10 м изобате мигрирующий под действием поверхностных волн зыби песок может замыть стационарный гидрофон или донный контейнер, расположенные на дне, т.е. помимо

обеспечения корректных акустических измерений необходимо было решить и гидродинамические задачи, найти оптимальные соотношения между геометрическими размерами и весом устройств, устанавливаемых на дне.

К 2015 г. ТОИ ДВО РАН уже имел многолетний опыт применения АПАР, изготовленных на основе промышленного компьютера формата РС-104 “Prometheus” производства Diamond Systems Corporation с интегрированным 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [5]. Данный тип компьютеров предназначен для применения в качестве бортовых и встроженных систем управления в системах сбора информации с широким диапазоном допустимых условий эксплуатации. Однако динамический диапазон измерительного тракта АПАР составлял всего 96 дБ, что вынуждало при решении задач акустического мониторинга использовать гидрофоны разной чувствительности и устанавливать разные коэффициенты усиления в аналоговом тракте. Потребляемая регистратором мощность равнялась 5 Вт, и при времени непрерывной записи 2 мес. [5] вес регистратора с батареями электропитания достигал 155 кг.

Необходимость измерения как мощных импульсных сигналов, формируемых при сейсморазведке, так и фоновых шумов потребовала разработки акустических регистраторов с более широким динамическим диапазоном. Эти требования удалось совместить в АПАР нового поколения — *Шельф-2014* [6]. Применение высокопроизводительных малопотребляющих микроконтроллеров и твердотельных накопителей данных (SD карт) снизило энергопотребление более чем в 15 раз. Комплектация донной станции *Шельф-2014* двумя блоками по 40 батареек типоразмера D обеспечивает время непрерывной записи (с частотой дискретизации 30.2 кГц и 24-разрядным представлением данных) более 6 мес. 24-разрядный сигма-дельта АЦП обеспечивает измерения вариаций $p(t)$ в диапазоне 2–15000 Гц с динамическим диапазоном 145 дБ. Представленные на рис. 3 графики иллюстрируют технические характеристики акустической станции *Шельф-2014* на примере измерений, проведенных в 2015 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин в точке акустического мониторинга Odoptu-5 (см. рис. 1).

На рис. 3 показаны вариации $p(t)$, измеренные у дна в море глубиной 20 м во время сейсморазведки — графики *Сейсморазведочный импульс* и в штилевых условиях при отсутствии вблизи АПАР судов — графики *Фон*. На этом рисунке видно, что согласующий усилитель-корректор гидрофона ГИ-50 и 24-разрядный сигма-дельта АЦП, применяемые в *Шельф-2014*, на практике реализуют динамический диапазон акустических измерений в 1 Гц окне БПФ больше 120 дБ.

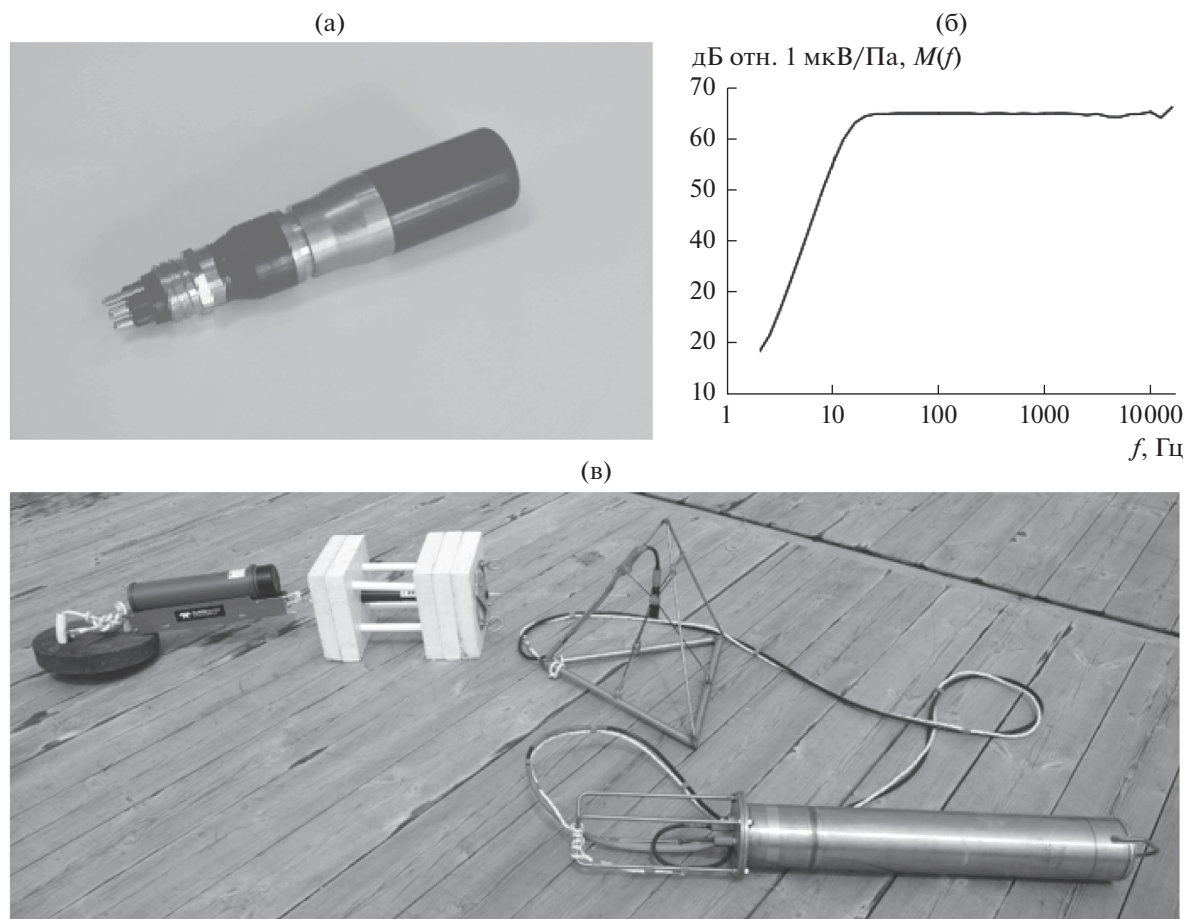


Рис. 2. (а) – Модернизированный гидрофон типа ГИ-50, (б) – график частотной зависимости его чувствительности $M(f)$ и (в) – автономный донный акустический регистратор – *Шельф-14* [6] перед постановкой в море.

В 2015 г. во всех точках акустического мониторинга, показанных на рис. 1, измерения проводились с помощью *Шельф-2014* и только в точке ОФА из-за опасности зацепления АПАР рыболовным тралом измерения проводились с помощью АПАР, основанного на базе ЭВМ “Prometheus”.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОЦЕНОК ИХ ПАРАМЕТРОВ

Согласно рис. 1 у нас есть возможность по результатам синхронных измерений, проведенных, например, в точках акустического мониторинга *Odoptu-N-10* и *Odoptu-N-20* во время сейсморазведочных исследований и забивки фундаментной сваи на берегу, рассмотреть акустические импульсы, формируемые этими антропогенными источниками на 10- и 20-метровой изобатах. В данном случае акустическая энергия от этих источников будет распространяться вдоль геоакустической трассы, ориентированной перпенди-

кулярно береговой линии, и сравнение результатов измерений, проведенных в этих двух точках, позволяет оценить относительные потери для низкочастотного звука при распространении в прибрежную зону и с берега в море. Результаты таких измерений и их спектрального анализа приведены на рис. 4.

На рис. 4а видно, что при распространении энергии сейсморазведочного сигнала в прибрежную зону значения спектральной плотности мощности в формируемом у дна акустическом импульсе, измеренном на 20 м изобате, на всех частотах 10–10000 Гц превышают значения $G(f)$ в сигнале, измеренном на 10 м изобате. Относительные потери при распространении над поднимающимся дном на частотах 30–60 Гц достигают 20 дБ, а пиковое значение вариаций акустического давления в точке *Odoptu-N-20* примерно в 4 раза больше, чем в *Odoptu-N-10*. Спектр импульса, измеренного на 20 м изобате, имеет хорошо выраженный пик мощности в диапазоне 10–100 Гц и два пика с максимальными значениями на частотах 150 и 300 Гц. При распространении до

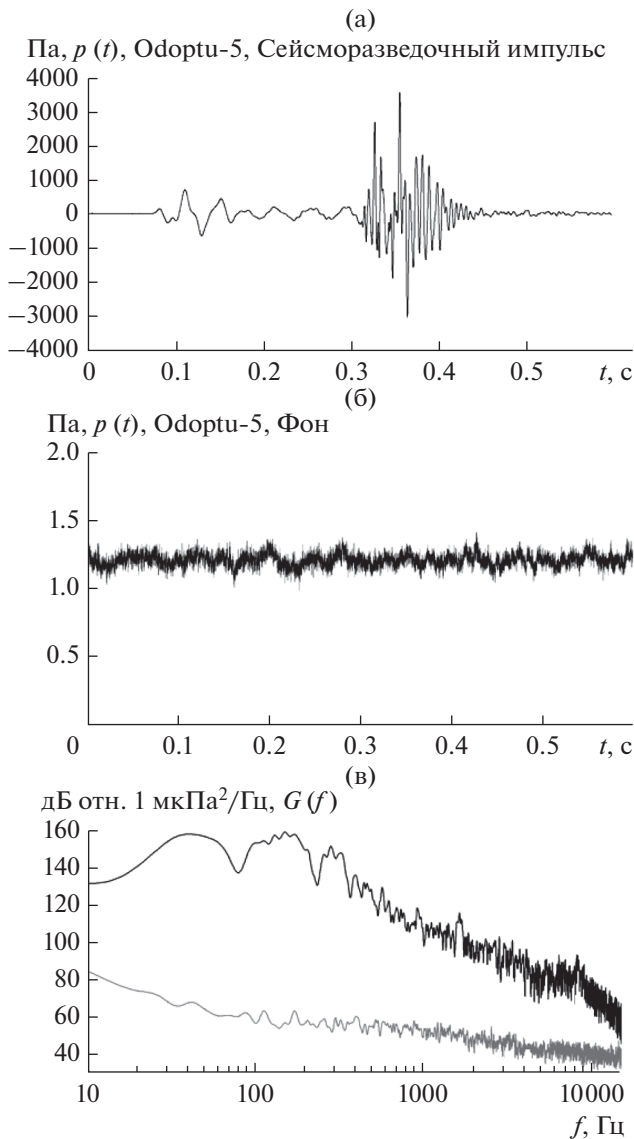


Рис. 3. Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные гидрофоном *Шельф-2014* у дна в море глубиной 20 м (а) – во время сейсмозаписки (график *Сейсмозаписочный импульс*) и (б) – в штительных условиях (график *Фон*). (в) – Оценки их спектров (график $G(f)$).

точки *Odoptu-N-10* акустические волны с частотами меньше 70 Гц поглотились дном. В графике $G(f)$ акустического сигнала, измеренного на 10 м изобате, не выражен пик мощности на частоте 300 Гц. По-видимому, это вызвано особенностями пространственной интерференционной структуры формируемого на этой частоте акустического поля.

На рис. 4б показаны акустические импульсы, измеренные во время забивки фундаментной сваи на берегу. Период следования акустических импульсов от забивки сваи примерно равен 1.7 с, а период следования сейсмозаписочных сигнала

лов зависит от скорости буксировки излучающего комплекса. В нашем случае этот период примерно равен 9.5 с. Удар “молота” по поверхностному концу сваи передается ее нижнему концу и в грунте возбуждаются волны разного типа, которые разносят энергию “удара” в разные стороны. В работе [10] было показано, что на распространение на шельфе энергии от взрывного источника, заложенного в скважину, пробуренную на берегу, оказывает существенное влияние водный слой. В этом случае в море формируется пространственная интерференционная картина с хорошо выраженными максимальными и минимальными значениями интенсивности колебаний, пространственные масштабы которых зависят от частоты звука.

На рис. 4б видно, что расстояние от точки забивки сваи на берегу до точек акустических измерений равно 2 и 3.9 км, т.е. на дистанции в 1.9 км дно опустилось с глубины 10 до 20 м. При распространении на этом участке акустической трассы относительные трансформации формируемых у дна акустических импульсов во временной и спектральной областях следующие: значение максимальной амплитуды в импульсах уменьшилось в 2 раза и примерно в 2 раза удлинился импульс, на частотах 50–300 Гц значения спектральной плотности мощности в импульсе, измеренном на 10 м изобате, в среднем на 10 дБ выше, чем в импульсах, измеренных в *Odoptu-N-20*, но на частотах 20–40 Гц они практически равные. По-видимому, это связано с особенностями распространения энергии, переносимой продольными волнами с берега в море. Проверим это с помощью численного моделирования.

На берегу геоакустический импульс генерировался нижним концом 20-метровой сваи, забиваемой в точке S, показанной на рис. 5а. На рис. 5б показан модельный геоакустический волновод с известными вертикальными распределениями значений скорости звука в воде $C_w(z)$ и подобранными пространственными значениями основных акустических параметров в дне. Расчеты проведены с помощью 3D модового параболического уравнения [12] в адиабатическом приближении первых трех нормальных вертикальных мод и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости [15–17].

На рис. 5в, г показаны распределения в вертикальной плоскости значений функции потерь $TL(y = 0, x, z, f)$ в данном модельном волноводе, рассчитанные для тональных акустических сигналов с частотами 27 и 70 Гц, излученных в точке S на глубине 20 м (см. рис. 5б). Как мы и предполагали, точка мониторинга *Odoptu-N-10*, согласно рис. 5в, расположена в интерференционном минимуме в поле, формируемом тональным сигналом с частотой 27 Гц, а точка *Odoptu-N-20* ближе к интерференционному максимуму. В поле, фор-

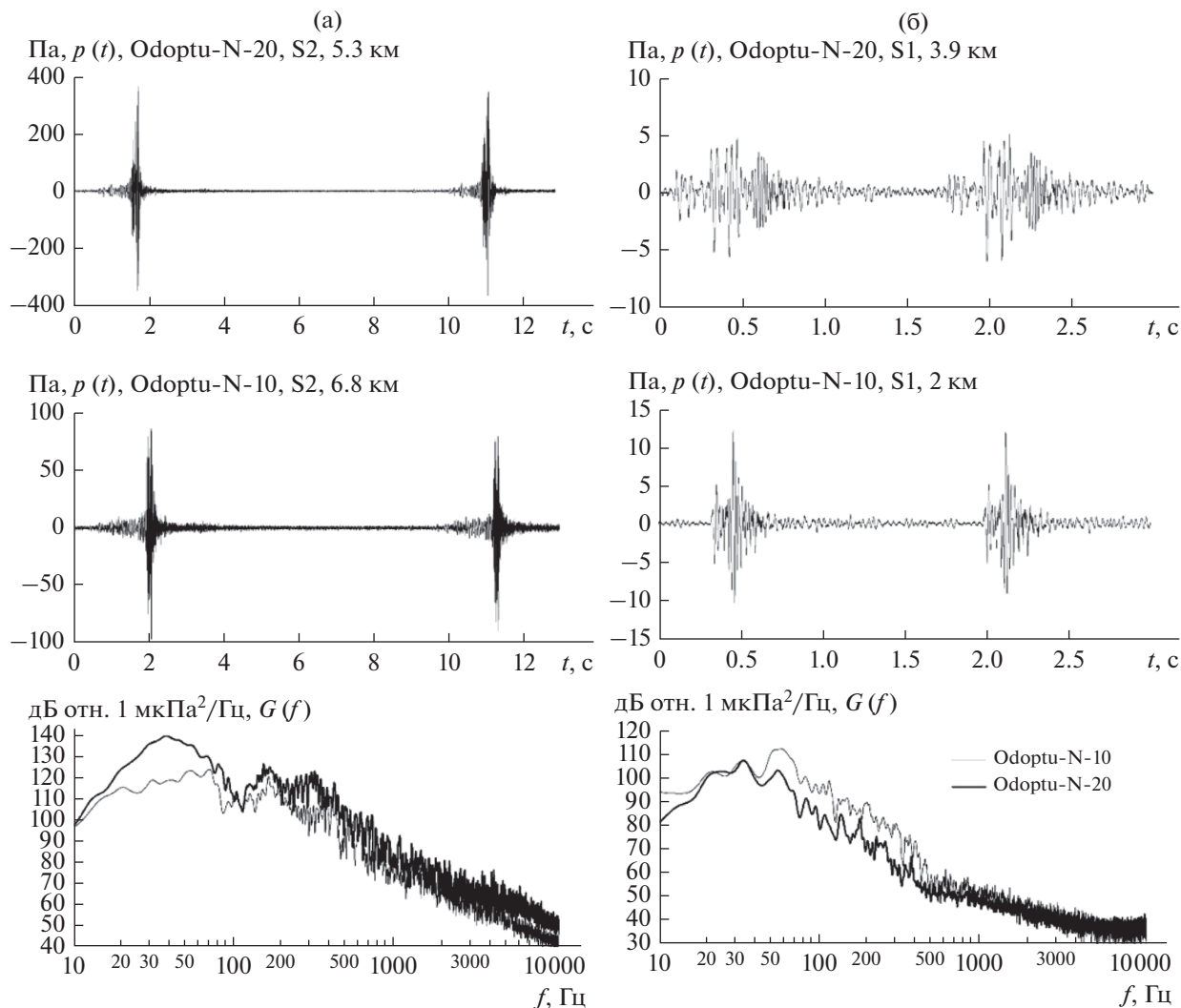


Рис. 4. Вариации акустического давления $p(t)$ в импульсах, формируемых у дна в точках акустического мониторинга Odoptu-N-20 и Odoptu-N-10 сейсморазведочным сигналом S2, генерируемым (а) – в море и (б) – ударом “молота” по забиваемой на берегу свае S1, а также их спектры $G(f)$.

мируемом тональным сигналом с частотой 70 Гц, интерференционная структура в водном слое имеет гораздо меньший пространственный масштаб. Кроме того, для продольных волн с частотой 70 Гц потери при распространении в дне больше, чем для волн с частотой 27 Гц. На рис. 5г видно, что на дистанциях больше 2 км донные моды уже практически не влияют на водный слой, чего нельзя сказать о поле, формируемом в водном слое сигналом с частотой 27 Гц.

На рис. 6 показан акустический импульс, измеренный на 10-метровой изобате в точке акустического мониторинга Odoptu-N-10. На его основе, ограничившись частотным диапазоном 10–180 Гц, с помощью МПУ для модельного геоакустического волновода, показанного на рис. 5б, построена эквивалентная точечная функция источника S1,

соответствующая нижнему концу забиваемой сваи, указанному на рис. 5б как S.

Для проверки корректности численного моделирования, проведенного с помощью МПУ, для построенного эквивалентного точечного источника на рис. 6 приведены измеренный и модельный импульсы для точки мониторинга Odoptu-N-20, а также показаны их спектры. В данном случае графики измеренных и модельных вариаций акустического давления $p(t)$ и их спектров $G(f)$ подобны, причем на частоте 27 Гц значения спектральной плотности мощности в точке Odoptu-N-20 примерно на 5 дБ больше, чем в точке Odoptu-N-10, а на частоте 60 Гц значение $G(f)$ на 6 дБ больше в Odoptu-N-10, чем в акустическом модельном и измеренном в точке Odoptu-N-20 импульсе.

В табл. 1 для сравнения приведены экспериментальные и модельные значения акустической

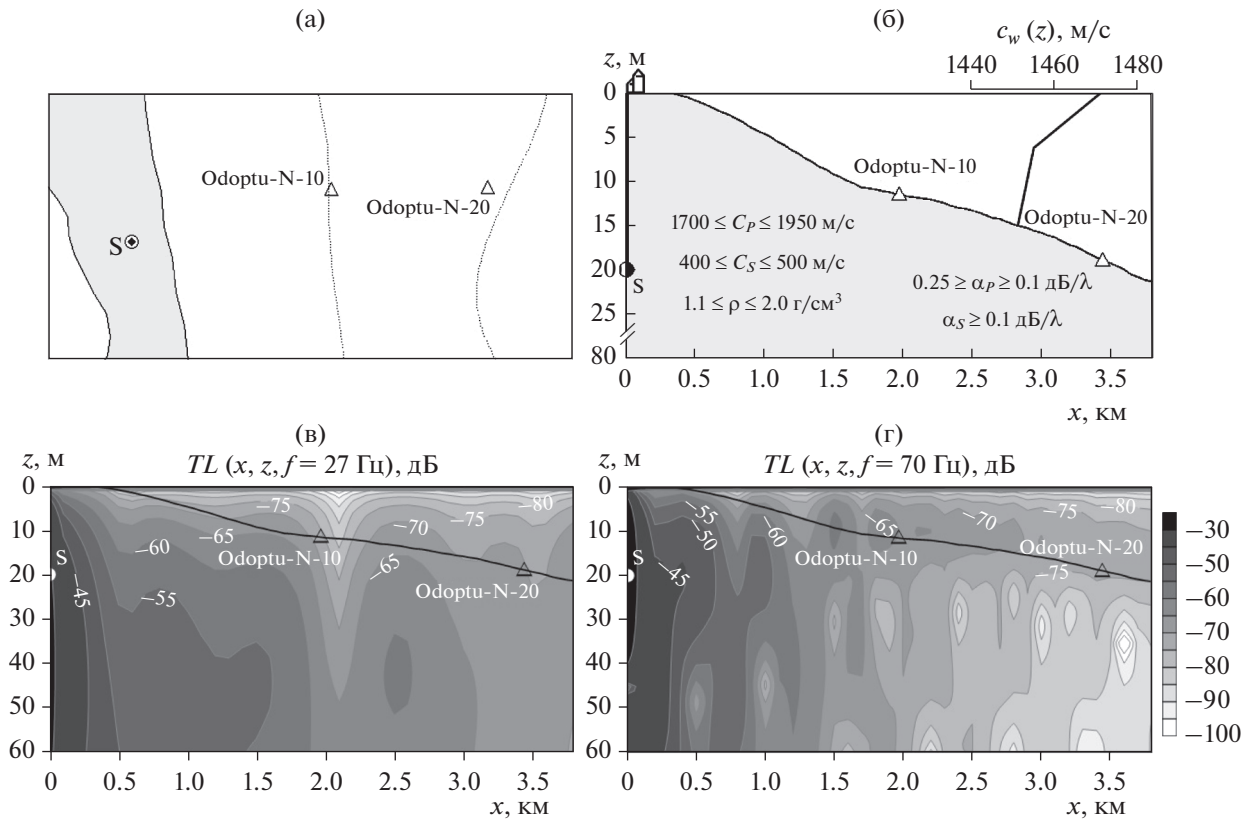


Рис. 5. (а) – Карта района с указанием в море точек акустических измерений Odoptu-N-10, Odoptu-N-20 и на берегу точки S, в которой забивалась свая. (б) – Модельный геоакустический волновод с указанием нижней точки сваи S и акустических свойств пород, слагающих дно. Распределение модельных значений функции потерь в акустическом поле, формируемом тональными источниками с частотой (в) – 27 и (г) – 70 Гц.

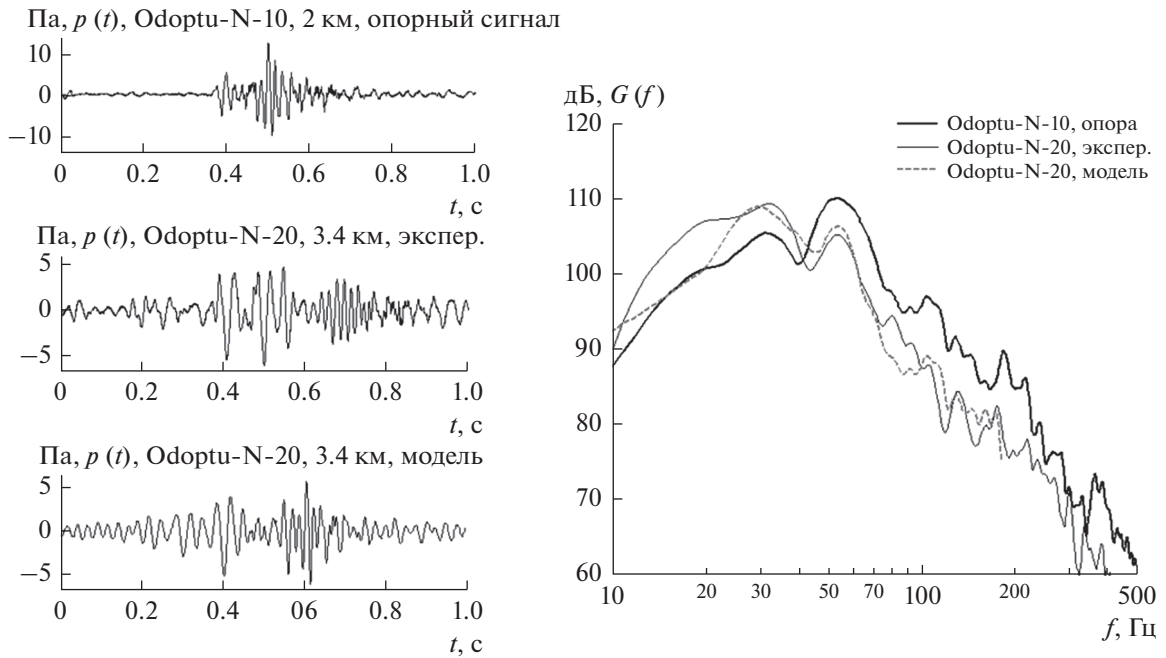


Рис. 6. Акустические импульсы, измеренные в точках мониторинга Odoptu-N-10 и Odoptu-N-20 и их спектры. Импульс, измеренный в Odoptu-N-10, использовался как опорный для построения с помощью МПУ точечной эквивалентной функции источника – S1, соответствующей частотному диапазону 10–180 Гц [18]. Для сравнения с измеренным акустическим импульсом в точке Odoptu-N-20 на рисунке показан модельный импульс и его спектр.

Таблица 1. Сравнение значений SEL акустических импульсов в частотных диапазонах 10–40 и 10–180 Гц

Δf , Гц	$SEL(\Delta f)$, дБ, Odoptu-N-20		
	$SEL(\Delta f)$, дБ, Odoptu-N-10 экспер. (опорный сигнал)	экспер.	модель
10–40	117.6	122.1	121.0
10–180	124.6	123.5	123.0

экспозиции или уровня воздействия – SEL в двух частотных диапазонах 10–40 и 10–180 Гц. Для первого диапазона экспериментальное значение $SEL(10–40, \text{ Гц})$ в точке Odoptu-N-10 на 4.5 дБ меньше, чем экспериментальное значение в точке Odoptu-N-20 и на 3.4 дБ меньше модельного. В диапазоне частот 10–180 Гц значения $SEL(10–180, \text{ Гц})$ максимально в точке Odoptu-N-10 и равно 124.6 дБ отн. 1 мкПа² с, а в точке Odoptu-N-20 экспериментальное значение меньше на 1.1 дБ, модельное меньше на 1.6 дБ.

Таким образом, можно констатировать, что с помощью МПУ, опирающегося на опорное измерение, мы можем с достаточной для практики точностью построить на прилегающем шельфе импульсное акустическое поле, формируемое ударом “молота” по забиваемой на берегу свае.

На рис. 3 показан низкочастотный акустический импульс, измеренный в точке акустического мониторинга Odoptu-5 (см. карту на рис. 1) во время прохода сейсморазведочного судна на расстоянии 1.3 км. На этом рисунке видно, что вариации $p(t)$ в этом импульсе достигли амплитуды

3500 Па. В его спектре можно выделить три пика мощности на частотах 20–70, 90–200 и 250–350 Гц. Во временной области хорошо выражены вариации $p(t)$, обусловленные энергией, переносимой донными (*предвестник*) и водными (*водный импульс*) модами.

При увеличении протяженности трассы распространения до 10 км и особенно при ее ориентации параллельно берегу формируемый в точке мониторинга акустический импульс принимает сложную временную и спектральную структуры. Примеры таких импульсов показаны на рис. 7. Рассмотрим их более подробно.

На рис. 7 видно, что *предвестник* имеет сложную временную структуру, обусловленную особенностями распространения энергии сейсморазведочного сигнала в дне, характеризуемом пространственными акустическими неоднородностями, оказывающими сильное влияние на распространение низкочастотных (меньше 40 Гц) продольных волн. Например, можно предположить захват пространственным резонансным волноводом акустических волн с частотой 31 Гц,

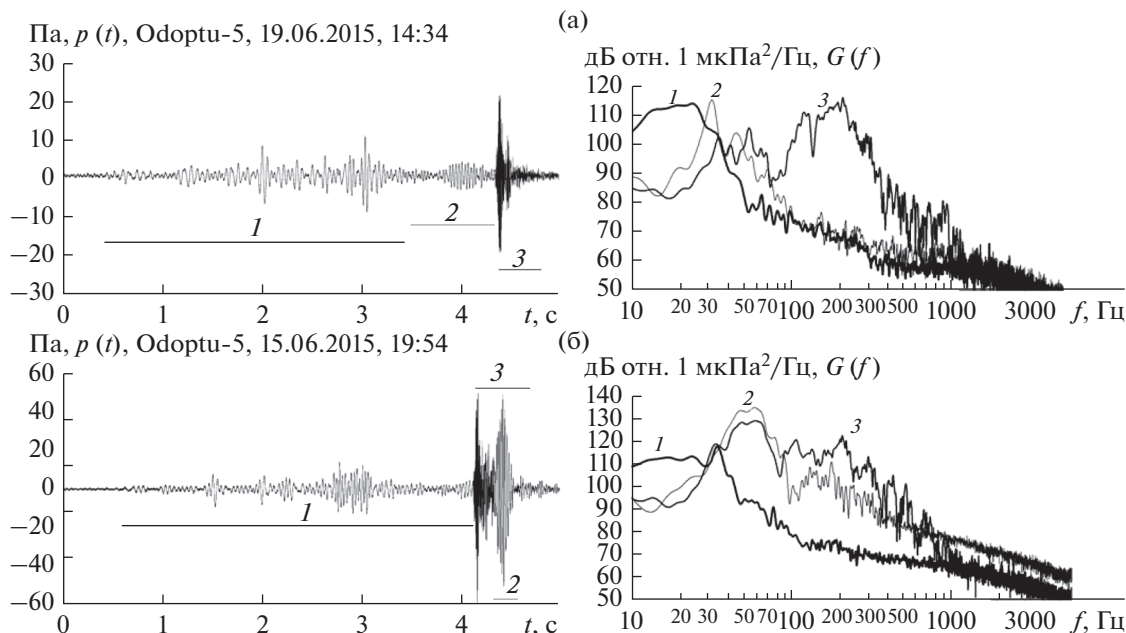


Рис. 7. Вариации акустического давления $p(t)$ и оценки их спектров $G(f)$, измеренные гидрофоном *Шельф-2014* у дна в море глубиной 20 м в точке акустического мониторинга Odoptu-5, соответствующие сейсморазведочному импульсу, излученному на глубине 6 м в точке, удаленной на (а) – 18 и (б) – 14 км.

поскольку вариации $p(t)$, показанные на рис. 7а на интервале 2, практически синусоидальные, о чем свидетельствует и их спектр $G(f)$ – правый график. Волны с частотами 10–26 Гц проникают глубже в дно и распространяются со скоростями 1900 м/с, рефрагируют и озвучивают водный слой, опережая водные моды. В данном случае первый *предвестник* их опередил на 3.8 с. В связи с ярко выраженным разделением во временной и частотной областях энергии, принесенной в точку мониторинга донными и водными модами, было принято решение оценивать параметры акустического импульса, формируемого в точке мониторинга сейсморазведочным сигналом, на 6-секундном временном интервале, охватывающем как *предвестник*, так и *водный* импульс. Затем по специальной методике, которая будет представлена ниже, оценивались параметры *водного* импульса на 1- и 2-секундных интервалах.

На рис. 7б видно, что на *водный* импульс может наложиться энергия вариаций $p(t)$, принесенная водно-донными модами, захваченными каналами, образованными осадочными породами, в которых скорость распространения продольных волн немного меньше, чем в воде (см. на рис. 7б график $p(t)$ на временном интервале 2 и соответствующий ему график $G(f)$). Относительно узкополосный импульс, отмеченный на рис. 7б интервалом 2, имеет один пик мощности на частотах 40–70 Гц (правый график $G(f)$).

Согласно рис. 3 акустические импульсы с амплитудами вариаций $p(t)$ больше 1000 Па имеют длительность временного интервала, на котором сосредоточено 100% их энергии, меньше 0.5 с, причем длительность *водного* импульса меньше 0.2 с. Расчет оценок их параметров не представляет проблемы, но при оценке акустической экспозиции надо оценить параметры всех импульсов, формируемых в заданных акваториях сейсморазведочными сигналами и сейсмическими импульсами, генерируемыми забивкой свай на берегу. Поэтому анализу подлежат все импульсы, амплитуда которых на 6 дБ превышает фон или квазистационарные шумы от судов и других антропогенных источников. Для проведения такого анализа в ТОИ ДВО РАН была разработана и успешно применена методика, представленная ниже.

За летне-осенний период 2015 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин с помощью *Шельф-2014*, установленных в точках акустического мониторинга, показанных на рис. 1, одновременно записаны сейсмоакустические сигналы суммарной длительности 4300 суток. После экспедиции для многофакторного корреляционного анализа сотрудники ТОИ ДВО РАН провели обработку и анализ всех акустических данных, записанных на твердотельных флеш-дисках *Шельф-2014*, с целью обнаружения акустических импульсов, сформиро-

ванных в данной точке акустического мониторинга сейсморазведочными сигналами и импульсами от забивки свай на берегу. Кроме того, для каждого импульса был определен его источник (в море работало 4 сейсморазведочных судна). Для выполнения такого анализа было модернизировано программное обеспечение для автоматического поиска импульсов и оценивания их параметров, разработанное в ТОИ ДВО РАН [14].

Алгоритм работы программы автоматического поиска основан на анализе измеренных в частотном диапазоне 2–15000 Гц вариаций $p(t)$ на последовательных 1-минутных временных интервалах. Анализ начинается с центрирования исходных данных, затем значения акустического давления берутся по модулю и сглаживаются на интервале 20 мс, получается набор данных $|\hat{p}_{20ms}(t)|$. В результате получаем график огибающей, показанный на рис. 8.

На 1-минутном интервале рассчитывается процентильное распределение величины $|\hat{p}_{20ms}(t)|$ и определяется линия *уровня* L , соответствующая $|\hat{p}_{20ms}(t)| < 97\%$. Точка пересечения линии *уровня* и огибающей является признаком акустического импульса. От этой точки отступаем вперед и назад на 3 секунды и найденный 6-секундный интервал мы называем $T_{6s}^{100\%}$. Если следующее пересечение огибающей с линией *уровня*, например, на заднем фронте акустического импульса произойдет на интервале $T_{6s}^{100\%}$, то оно пропускается (см. рис. 8а). При поиске импульсов было введено условие – если пиковое значение вариаций акустического давления $p(t)$ в обнаруженном импульсе меньше 110 дБ отн. 1 мкПа, то данный импульс не обрабатывается. Для определения уровня шума использовалось значение $N = P_{60\%}(|\hat{p}_{20ms}(t)|) + 6$ дБ. В случаях, когда линия *уровня* L ниже линии шума N , в качестве линии *уровня* используется линия шума N .

Результатом работы этой программы являются набор одномоментных картинок и текстовый файл с параметрами обнаруженных импульсов. Каждый одномоментный интервал просматривается оператором, который с помощью программы ручного анализа может вносить корректировки в результаты автоматического анализа и удалять импульсы, источник которых не известен.

После этого программа при выполнении определенных критериев производит разделение обнаруженного импульса на *предвестник* и *водный* импульс. Для этого две программы независимо анализируют измеренные вариации акустического давления $p(t)$ на 6-секундных временных интервалах, определенных первой программой, но в этих программах поиск акустического импульса начинается с конца $T_{6s}^{100\%}$, как это показано на рис. 8б. В этом случае мы определяем по пересечению ли-

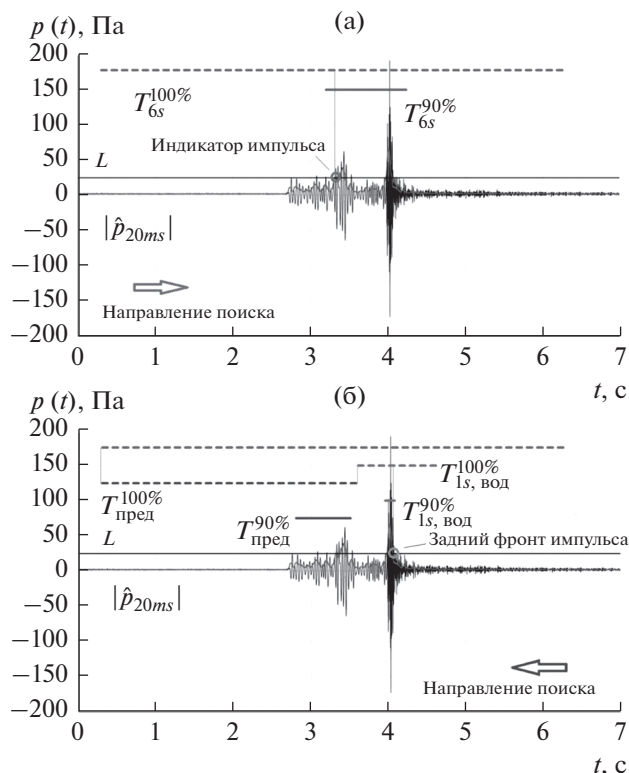


Рис. 8. (а) – Вариации акустического давления $p(t)$ и сглаженной огибающей его модуля $|\hat{p}_{20ms}(t)|$, используемой при обнаружении акустических импульсов и определении 6-секундного временного интервала. (б) – При движении от конца 6-секундного интервала в начало импульса определяется точка пересечения линии уровня L с задним фронтом водного импульса и оцениваются параметры *предвестника* и *водного* импульсов.

нии уровня с огибающей (см. рис. 8б) задний фронт *водного* импульса. Интервал от начала водного импульса до начала $T_{6s}^{100\%}$ принимается за *предвестник*.

На достаточно близком расстоянии от источника *водный* импульс занимает не больше 1 секунды (см. рис. 8б). Однако на дальних дистанциях *водный* импульс может растянуться на 1.5–2 с. Следовательно, если мы при анализе импульсов, близких к источнику, воспользуемся программой с $T_{2s}^{100\%}$, то захватим *предвестник*, а для дальних импульсов алгоритм с $T_{1s}^{100\%}$ не захватит всю энергию водного импульса, поэтому оценки параметров импульсов рассчитываются двумя программами для $T_{2s}^{100\%}$ и $T_{1s}^{100\%}$.

Для того чтобы исключить ошибки, допущенные при анализе измеренных импульсов, были разработаны специальные алгоритмы. Сначала проводилась проверка на правильность определения источника (судна сейсмической разведки).

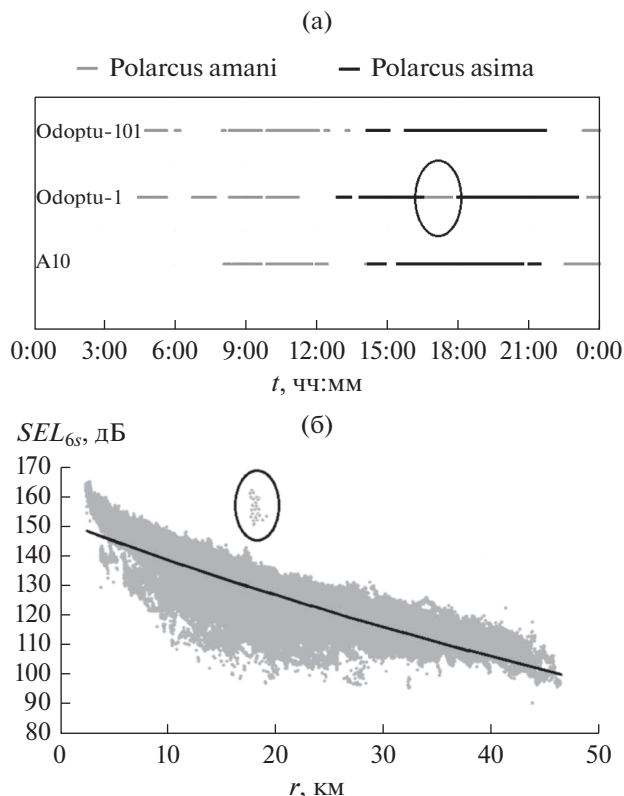


Рис. 9. Проверка определения источника импульса. *Polarcus Amani* и *Polarcus Asima* – названия сейсморазведочных судов, а *Odoptu-101*, *Odoptu-1* и *A10* – названия точек акустического мониторинга, показанные на рис. 1.

Присвоение импульсу источника основывалось на расписании работы сейсморазведочных судов; к сожалению, не все импульсы, излученные судами, вошли в расписание. В случае отсутствия импульсов в расписании оператор присваивал источник, основываясь на данных автоматической идентификационной системы – AIS. Для проверки расположенные рядом точки мониторинга объединялись в группы и для каждой из таких групп строились графики, на которых цветом обозначались суда (см. рис. 9а).

Соответственно, в случае верного определения источника операторами судно должно быть одно и то же, а если на станциях суда различались, то это являлось сигналом для проверки. В данном случае такой фрагмент на рис. 9а отмечен эллипсом черного цвета. После этого производилась проверка с помощью данных AIS. Для каждой станции были построены графики зависимости уровня SEL от судна до точки мониторинга (см. рис. 9б). Чем дальше находится судно, тем меньше должен быть уровень SEL . Как только мы видим резко отличающиеся значения, большие значения SEL на дальнем расстоянии, то это является сигналом оператору для проверки этих

импульсов. Подобный случай отмечен на рис. 9б эллипсом черного цвета.

Если найденный импульс не относился к сейсморазведке, то такой импульс удалялся из результатов анализа. Параметры импульсов в случаях наложения сейсморазведки и импульсов неизвестной природы рассчитывались как среднее от параметров ближайших сейсморазведочных импульсов. Ошибочное представление измеренного низкочастотного импульса сейсморазведочным контролировалось с помощью значений его параметров: коэффициента эксцесса — этот параметр характеризует остроту огибающей импульсного сигнала; величины 90% интервала и значения SPL_{peak} .

Общее количество импульсов от сейсморазведки, найденных в 2015 г., составило 11876463. В результате проверки было заменено 2722 импульса, им присвоены средние значения параметров, рассчитанных на основе ближайших импульсов сейсморазведки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря большому динамическому диапазону измерительно-регистрационного тракта акустической станции *Шельф-2014*, который равен 145 дБ, в 2015 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин во время проведения компаниями *Эксон Нефтегаз Лимитед* и *Сахалин Энерджи Инвестмент Лтд.* сейсморазведочных исследований получены уникальные данные о распространении энергии сейсморазведочных сигналов в мелководных неоднородных геоакустических волноводах. Поскольку нам известно время и координаты излучения сейсморазведочного сигнала, то стационарные пространственные акустические измерения (см. рис. 1) позволяют решать с их помощью как практические, так и фундаментальные задачи геоакустики мелкого моря.

Впервые при расчете параметров низкочастотных акустических импульсов, формируемых в водном слое сейсморазведочным сигналом, предложено импульс разделить на *предвестник* и *водный* импульс. Поскольку амплитуда вариаций акустического давления $p(t)$ в *предвестнике* может быть даже больше, чем в *водном* импульсе, то разработанный комплекс программ для оценки параметров таких импульсов позволяет применить для многофакторного корреляционного анализа как интегральные параметры, определенные на 6-секундном временном интервале, охватывающем оба импульса, так и для каждого импульса по отдельности. В последнем случае можно отдельно оценивать влияние на морских животных продолжительного *предвестника* с частотами 10–40 Гц и короткого *водного* импульса с частотами 50–300 Гц.

При оценивании параметров импульса на 6-секундном интервале, на наш взгляд, наиболее ин-

формативными и относительно стабильными являются значения SPL_{peak} , $SEL_{T100\%}$ и $SEL_{T90\%}$. Значение SPL_{rms} при оценивании на временном интервале $T_{90\%}$ сильно варьирует в соответствии с изменениями значения $T_{90\%}$. В работе [6] показано, что значение SPL_{rms} может измениться при переходе от одного импульса к другому на 10 дБ, при этом значения SPL_{peak} и $SEL_{T90\%}$ изменяются только на 0.5 и 1.5 дБ, соответственно.

Экспериментально и теоретически показано (см. рис. 6), что в акустических импульсах, генерируемых на берегу ударом “молота” по забиваемой в грунт фундаментной свае и измеренных у дна на 20-метровой изобате, значение спектральной плотности мощности вариаций $p(t)$ на частоте 30 Гц почти на 5 дБ больше, чем в импульсе, измеренном на 10-метровой изобате. Этот эффект объясняется особенностями вертикальной интерференционной структуры формируемого на шельфе акустического поля на разных частотах (см. рис. 5в, 5г).

Авторы выражают благодарность компании *Эксон Нефтегаз Лимитед* за поддержку данной работы и сотрудникам ТОИ ДВО РАН, принявшим активное участие в полевых работах и анализе параметров измеренных акустических импульсов: Т.Я. Антипенковой, С.В. Борисову, И.В. Медведеву, В.Г. Ущиповскому и В.В. Лихачеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson S.R., Richardson W.J., Yazvenko S.B., Blokhin S.A., Gaily G., Jenkerson M.R., Meier S.K., Melton H.R., Newcomer M.W., Perlov A.S., Rutenko A.N., Würsig B., Martin C.R., Egging D.E. A western gray whale mitigation and monitoring program for a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 134. P. 107–136.
2. Meier S.K., Yazvenko S.B., Blokhin S.A., Wainwright P., Maminov M.K., Yakovlev Y.M., Newcomer M.W. Distribution and abundance of western gray whales off north-eastern Sakhalin Island, Russia, 2001–2003 // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 134. P. 45–73.
3. 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.
4. Blackwell S.B., Lawson J.W., Williams M.T. Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island // J. Acoust. Soc. Am. May 2004. V. 115(5). Pt. 1. P. 2346–2357.
5. Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная гидроакустическая станция с радиоканалом для акустических измерений на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 132–137.

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. С. 500–511.
7. Gailey G., Sychenko O., McDonald T., Racca R., Rutenko A., Bröker K. Behavioral responses of western gray whales to a 4-D seismic survey off northeastern Sakhalin Island, Russia // *Endang Species Res.* 2016. V. 30. P. 53–71.
8. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Voekholt M. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
9. 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.
10. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Путов В.Ф., Соловьев А.А., Манульчев Д.С. Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 348–362.
11. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н. Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 102–106.
12. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // *Wave Motion.* 2015. V. 58. P. 42–52.
13. Thode A., Katherine H., Kim K.H., Greene C.R., Roth E. Long range transmission loss of broadband seismic pulses in the Arctic under ice-free conditions // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128 (4). EL181. <https://doi.org/10.1121/1.3479686>
14. Гриценко В.А. Метод автоматического обнаружения сейсмоакустических импульсов // Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2013. С. 287–290.
15. Манульчев Д.С., Нечаюк В.Е., Рутенко А.Н., Jenkerson M.R. Пространственная оценка уровня воздействия импульсного акустического поля, формируемого на шельфе забивкой фундаментных свай на берегу // Труды XIV Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”: СПб: ЛЕМА, 2018. С. 400–403.
16. Манульчев Д.С., Рутенко А.Н., Нечаюк В.Е., Дженкерсон М. Измерение и моделирование импульсного акустического поля, формируемого на шельфе забивкой свай на берегу, для оценки уровня акустического облучения наблюдаемого с берега серого кита // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2018. С. 81–84.
17. Рутенко А.Н., Фершалов М.Ю., Jenkerson M.R. 3-D моделирование акустического поля, формируемого на шельфе во время забивки фундаментных свай на берегу // Докл. XV школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 240–243.
18. Манульчев Д.С. Построение функции источника для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна // Докл. XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 72–75.