

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ «ГИДРОСФЕРА–ЛИТОСФЕРА» В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ

А.Н. Самченко, А.А. Пивоваров, А.Н. Швырев, И.О. Ярошук

В статье обсуждаются результаты прибрежных сейсмоакустических экспериментов, где изучались процессы трансформации гидроакустических сигналов в сейсмические при прохождении через границу гидросфера–литосфера. Эксперимент был проведен в августе 2020 г. и повторно в августе 2021 г. в заливе Петра Великого Японского моря. Работы проводились с использованием низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой 33 Гц. Прием акустических сигналов велся установленными на суше трехкомпонентными виброметрами и гидрофонами. На основе данных построенной геоакустической модели залива Петра Великого было проведено моделирование распространения различного типа сейсмоакустических сигналов (поверхностные, продольные и поперечные волны) от точки излучения до точек приема. Вычисление проводилось с помощью метода преломленных волн (МПВ), широко используемого в сейсморазведке. Отмечено, что поперечные волны позволяют получить более достоверную информацию о структурно-тектонических особенностях по отношению к данным традиционных сейсморазведочных работ, а данные о распространении поверхностных волн позволяют дополнить общую картину геологического строения акустической трассы.

Ключевые слова: сейсмоакустика, метод преломленных волн, гидроакустический излучатель, залив Петра Великого.

Введение

В сейсмоакустике выделены несколько типов волн, распространяющихся в горных породах. В твердой однородной изотропной среде распространяется два типа волн, которые называются: продольные, разряжения, сжатия, или Р-волны и поперечные, сдвиговые, или S-волны. В классической сейсморазведке широко используют данные о распространении продольных волн в горных породах при решении задач поиска и разведки мест полезных ископаемых. Поперечные волны позволяют получить более достоверную информацию о структурно-тектонических особенностях по отношению к данным традиционных сейсморазведочных работ [7, 11]. Количественная интерпретация отношения скоростей продольных к таковым поперечных волн позволяет прогнозировать фильтрационно-емкостные свойства и литологический состав пород. В природных условиях, где имеется поверхность, разделяющая среды

с различными упругими свойствами, наблюдаются волны, которые называются поверхностными или рэлеевского типа [8]. Рэлеевские волны в зависимости от условий распространения (граница раздела сред вода – горные породы, воздух – горные породы) имеют значительные различия. Каждый тип распространения волн имеет свой характер движения в среде и скоростные характеристики. С помощью данных изучения распространения поверхностных волн можно дополнить общую картину геологического строения, выявить различные неоднородности на профиле, например, разломы в консолидированных породах [4].

В заливе Петра Великого Японского моря существует действующий акустический полигон, где активно ведутся разнообразные акустические и сейсмоакустические исследования [3]. Акустический полигон исследуется различными методами: геолого-геофизическими, гидрологическими, дистанционным зондированием из космоса [3, 10]. Разработаны и испытаны на акустическом полигоне в заливе

пространственно-распределенный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на шельфе, гидроакустические излучатели и приемники [5, 6]. Результаты акустических исследований на шельфе показывают, что с уменьшением частоты используемого сигнала все большую роль играют в распространении звука донные осадки и коренные породы, слагающие дно. Кроме того, в заливе Петра Великого построена геоакустическая модель дна [9]. Поскольку в наших экспериментальных работах использовался в качестве источника звука гидроакустический излучатель, необходимо отметить, что в воде распространяются лишь продольные волны. Таким образом, поперечные и поверхностные типы волн в экспериментах возбуждаются на дне, что учитывалось при расчете времени распространения сигналов на шельфе.

В экспериментальных исследованиях решались следующие задачи:

- определение эффективности гидроакустических низкочастотных излучателей в сейсмоакустических исследованиях геологической среды;
- проверка возможности возбуждать гидроакустическим излучателем различного типа волны на дне;
- исследование трансформации различного типа сейсмоакустических волн при прохождении через границу гидросфера–литосфера и в процессе движения в геологической среде;
- диагностирование имеющейся геоакустической модели.

■ Схема экспериментов

В августе 2020 года и повторно в августе 2021 года в заливе Петра Великого Японского моря были проведены экспериментальные сейсмоакустические исследования (рис. 1). В работе использовались низкочастотный сейсмоакустический излучатель с несущей частотой 33 Гц, гидроакустический низкочастотный излучатель электромагнитного типа с генерацией акустических сигналов в полосе частот 25–40 Гц, с рабочей глубиной погружения до 20 м. Излучатель развивает эффективное звуковое давление на 1 метре от центра излучателя до 1 кПа. Излучался М-последовательный сигнал с 20 периодами на символ, длительностью 155 с. Центральная частота сигнала была 33 Гц. Прием осуществлялся на регистраторы гидрофизических полей, которые устанавливались в точку 1 в эксперименте 2020 года и в точку 2 в 2021 году, и три сейсмоакустические станции (рис. 1). Регистратор устанавливался в закорпанный бак наполненный водой. Регистратор гидрофизических полей обладает максимальной рабочей глубиной погружения до 200 м и автономностью до 14 суток и возможностью синхронизации между собой и с другими устройствами комплекса [5, 6]. Сейсмоакустическая станция представляет собой трехкомпонентный виброметр интеллектуальный цифровой Zet 7152. Виброметр имеет частотный диапазон от 0.05 до 400 Гц с динамическим диапазоном 176 дБ. Виброметры между собой имеют синхронизацию с помощью GPS модулей 3 мкс. Автономность

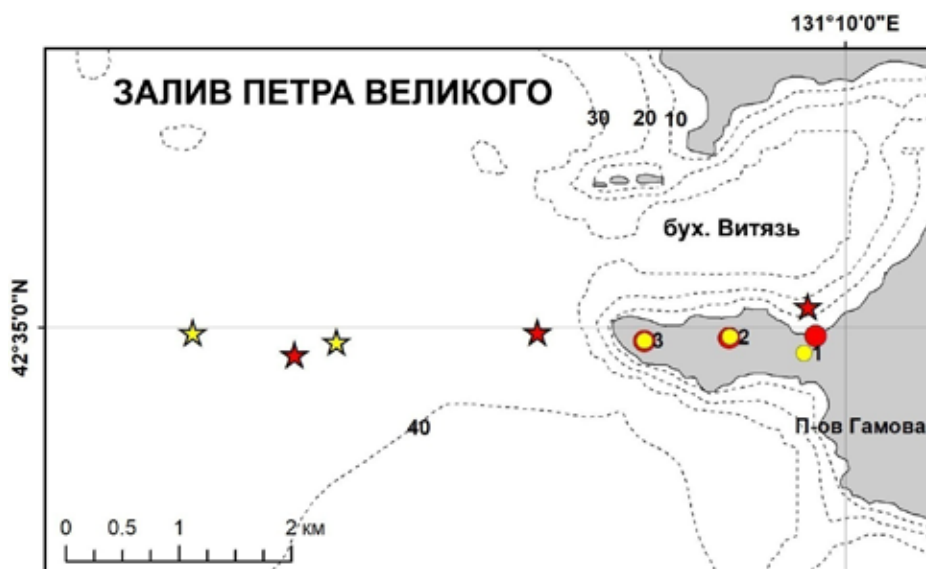


Рис. 1. Карта-схема экспериментальных сейсмоакустических работ за 2020 и 2021 гг. Звездочки – точки излучения, кружки – сейсмоприемники (1-3). Красным цветом показаны точки установки приборов в 2020 г, желтым – в 2021 г.

виброметра до 12 часов непрерывной работы. Виброметры были установлены таким образом, что ось X располагалась по направлению к точкам излучения. Совместное использование регистраторов и сейсмоакустических станций позволило синхронизировать излучение и прием. В 2020 г. тестирование приборов и синхронизацию между приемом и излучением провели на побережье, все приемные станции были установлены в первой точке приема, а тестируемые сигналы излучались в бухте Витязь. Далее все приборы в штатном режиме устанавливались в точках приема в соответствии со схемой, указанной на рис. 1. В 2021 г. все приборы синхронизировали по времени на «воздухе» прежде, чем они были установлены.

Расстояние между первой точкой приема и дальней точкой излучения составила 3400 м, а минимальное расстояние составило 700 м между третьей точкой приема и ближней точкой излучения в 2020 г. Максимальное расстояние в 2021 г. составило 4000 м между первой точкой излучения и дальней точкой приема, а минимальное 2000 м. Все расстояния указаны в подписи к рис. 3, 4.

■ Геоакустическая модель

В заливе Петра Великого Японского моря ранее проводилось геоакустическое моделирование геологической среды на основе данных геолого-геофизических исследований [9]. Мыс Шульца и подстилающий слой, который служит акустическим фундаментом, сложен из гранитов позднепермского возраста (рис. 2). Гранитный слой по данным геоакустической модели имеет плотность 2.79 г/см³, предельная скорость продольной волны равна 5400 м/с, скорость поперечной волны – 3300 м/с. Предельные петрофизические свойства гранита обусловлены тем, что характеристики получены на хорошо обработан-

ных цельных образцах породы, не подверженных выветриванию. На акустическом фундаменте вклиниваются два осадочных слоя с близкими акустическими характеристиками. Верхний осадочный слой представлен преимущественно среднезернистыми песками с примесью мелкозернистой компоненты позднеплейстоцен-голоценового возраста. Акустические характеристики верхнего осадочного слоя получены на основе эмпирических зависимостей гранулометрического состава проб песка со скоростями продольной, поперечной волн и плотностью. Рассчитанные значения акустических параметров поверхностного осадочного слоя в точках отбора проб интерполированы в геоакустической модели. Для акустической трассы получены средние значения скорости продольной, поперечной волн и плотности осадочного слоя позднеплейстоцен-голоценового возраста. Средняя скорость продольной волны составила 1690 м/с, поперечной волны – 415 м/с и плотность – 1.98 г/см³. Нижний осадочный слой сложен крупно-среднезернистыми песками нижне-среднего плейстоцена. Скорость продольной волны в нижнем осадочном слое составляет 1850 м/с, скорость поперечной волны – 520 м/с и плотность – 2.15 г/см³. Скорости поверхностных волн имеют разные оценочные характеристики от 0.87 до 0.96 от скорости поперечной волны [2]. Нами выбран средний коэффициент 0.91 к скорости поперечной волны подстилающего слоя.

■ Обсуждение

Расчет времени прохождения разного типа сигналов на основе геоакустической модели акустической трассы проводился с помощью МПВ. Результаты расчетов представлены в табл. 1 для эксперимента 2020 г. и в табл. 2 для эксперимента 2021 г.

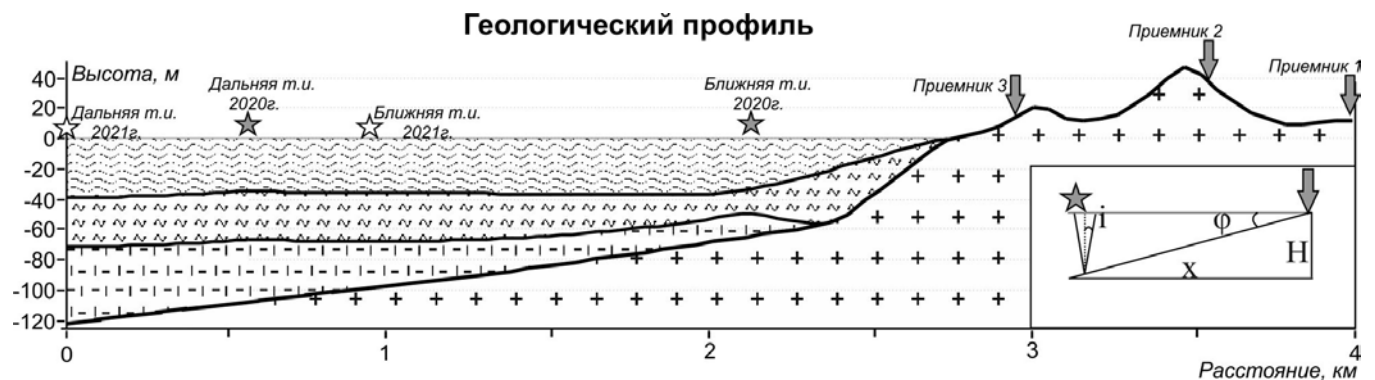


Рис. 2. Геологический разрез от дальней точки излучения (т.и.) до приемника № 1. Первый осадочный слой – среднезернистый песок, второй слой – крупно-среднезернистые пески и гранитный слой. Вставка – схема для расчета МПВ

Таблица 1. Расчетные времена пробега МПВ разного типа волн по акустической трассе эксперимента, проведенного 2020 г., на основе геоакустической модели

Тип волн	Точка излучения	Среда распространения	Время, с (1й п.п.)	Время, с (2й п.п.)	Время, с (3й п.п.)
Продольные волны	1	вода	1.213	0.833	0.467
		1-й слой песка	1.104	0.767	0.441
		2-й слой песка	1.024	0.716	0.418
		гранит	0.39	0.284	0.183
	2	вода	2.267	1.893	1.52
		1-й слой песка	2.039	1.707	1.376
		2-й слой песка	1.878	1.575	1.272
		гранит	0.683	0.579	0.475
Поперечные волны	1	вода	x	x	x
		1-й слой песка	4.413	3.039	1.714
		2-й слой песка	3.540	2.444	1.386
		гранит	0.605	0.432	0.265
	2	вода	x	x	x
		1-й слой песка	8.22	6.87	5.521
		2-й слой песка	6.578	5.502	4.425
		гранит	1.083	0.914	0.744
Поверхностные волны	1	вода–1-й слой	4.893	3.369	1.899
		1-й слой–2-й слой	3.929	2.711	1.536
		2-й слой–гранит	0.666	0.474	0.289
	2	вода–1-й слой	9.118	7.621	6.123
		1-й слой–2-й слой	7.305	6.108	4.912
		2-й слой–гранит	1.198	1.009	0.821

Геометрия волновода представляет собой клин, в данном случае определение времени распространения сейсмоакустических сигналов (продольных волн) сводится к решению следующей задачи:

$$t = \frac{1}{V} \left\{ x/\cos\varphi + H/\cos i \right\} + \frac{H_1}{V_p}, \quad (1)$$

где x – расстояние от источника до приемника сигнала, H_j – толщина осадочного слоя, i – угол преломления между осадочными слоями, φ – угол наклона поверхности слоя распространения сигнала (схема представлена на рис. 2, вставка). Выражение – это время прохождения сигнала в воде до осадков. В случае расчета времени прохождения поперечных и поверхностных волн по трассе использовались скорости продольных волн в расчете вертикальной составляющей.

На рис. 3 показаны нормированные корреляционные функции между сигналами, принятыми на регистратор гидрофизических полей или на трехкомпонентные виброметры, и математической моделью сигнала, полученные в ходе эксперимента 2020 г. Видно, что время приходов сигналов на компоненту

виброметра Z, излученных с первой точки, составляет на первом приемнике примерно 1 с, на втором приемнике – 0.25 и 0.9 с и на третьем – 0.3 и 1 с. Близкие по значению времена приходов в расчетах – это поверхностные волны на границе песок – гранит и продольные волны в песках. Принятые на X и Y компоненты приемника похожие времена прохождения поверхностных волн на границе песок – гранит и скорости продольных волн в воде и песках. Так же можно сказать, что близкие значения скорости поперечной волны в граните, однако выделить их отдельно не представляется возможным. На рис. 4 показаны нормированные корреляционные функции между, принятыми на регистратор гидрофизических полей или на трехкомпонентных виброметрах и математической моделью сигнала, полученные в ходе эксперимента 2021 г. Необходимо отметить, что есть значительные различия в картине принятых сигналов, полученных в экспериментах 2020 и 2021 гг. Дальняя точка приема в эксперименте 2020 г. была расположена на берегу залива Витязь, виброметр был установлен на песок (рис. 1, красная точка номер 1). На рис. 3, а наблюдается всего один приход на всех

Таблица 2. Расчетные времена пробега МПВ разного типа волн по акустической трассе эксперимента, проведенного в 2021 г., на основе геоакустической модели

Тип волн	Точка излучения	Среда распространения	Время. с (1й п.п.)	Время. с (2й п.п.)	Время. с (3й п.п.)
Продольные волны	1	вода	2	1.733	1.333
		1-й слой песка	1.802	1.565	1.21
		2-й слой песка	1.565	1.452	1.128
		гранит	0.631	0.556	0.445
	2	вода	2.667	2.333	1.933
		1-й слой песка	2.394	2.098	1.743
		2-й слой песка	2.209	1.939	1.615
		гранит	0.816	0.723	0.612
Поперечные волны	1	вода	х	х	х
		1-й слой песка	7.256	6.292	4.846
		2-й слой песка	5.816	5.047	3.893
		гранит	0.984	0.863	0.681
	2	вода	х	х	х
		1-й слой песка	9.666	8.461	7.015
		2-й слой песка	7.739	6.778	5.624
		гранит	1.287	1.136	0.954
Поверхностные волны	1	вода-1-й слой	8.048	6.979	5.375
		1-й слой-2-й слой	6.457	5.603	4.321
		2-й слой-гранит	1.085	0.95	0.748
	2	вода-1-й слой	10.722	9.385	7.781
		1-й слой-2-й слой	8.594	7.526	6.244
		2-й слой-гранит	1.422	1.253	1.051

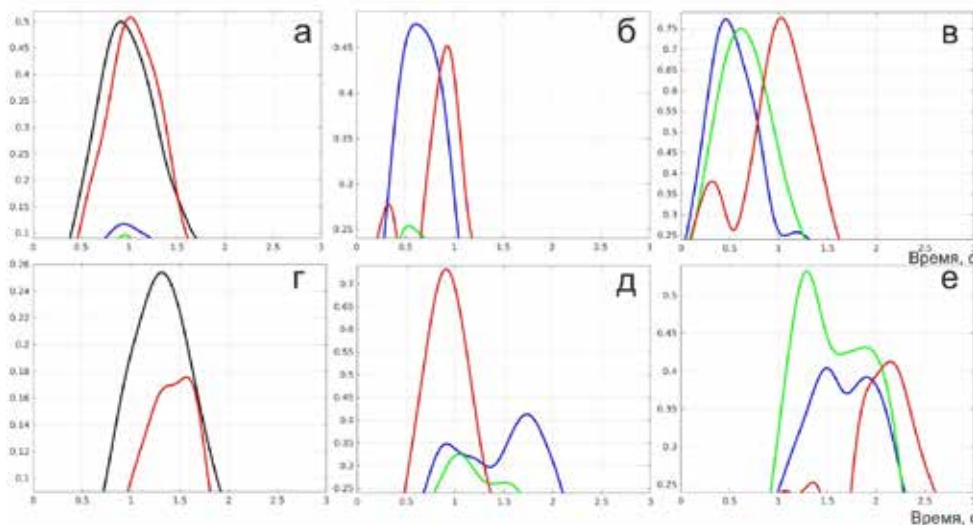
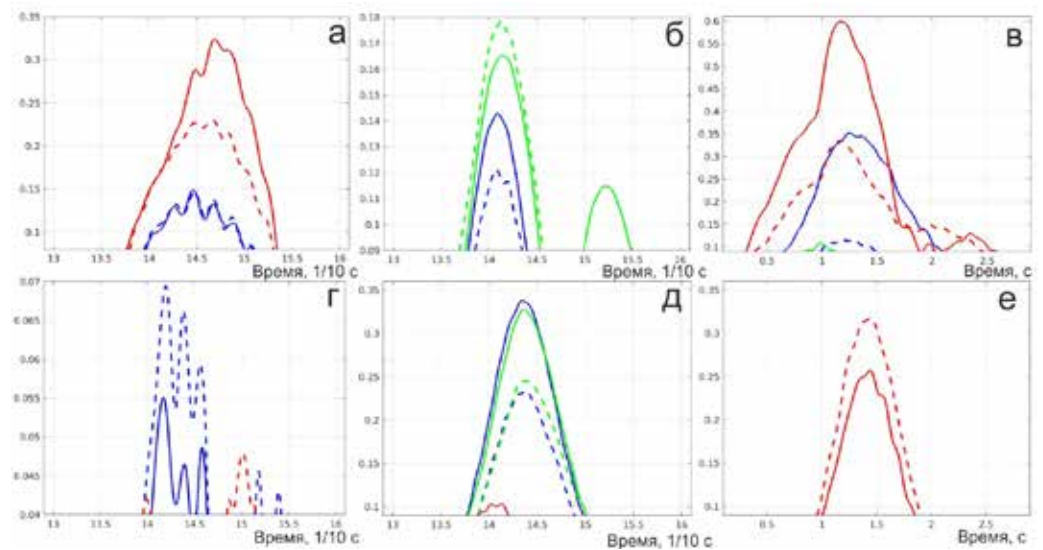


Рис. 3. Нормированные корреляционные функции между сигналами, принятыми на регистратор гидрофизических полей (а, г) и трехкомпонентные виброметры Zet 7152, и математической моделью сигнала. X координата показана синим цветом, Y – зеленый, Z – красный. а,б,в) Ближняя к берегу точка излучения, прием на виброметре № 1, 2, 3 соответственно (расстояния 1.82, 1.25, 0.7 км), г, д, е) Дальняя от берега точка излучения, прием – виброметр № 1, 2, 3 соответственно (расстояния 3.4, 2.84, 2.28 км)

компонентах, когда расстояние между точкой излучения и приема составила 1.82 км. Компоненты X и Y виброметра зафиксировали сигналы на уровне шумов. При увеличении расстояния между приемом и излучением до 3.4 км наблюдается только сигнала,

полученные от компоненты Z виброметра (рис. 3, г, красные графики). Наблюдается два прихода на Z-компоненте – 0.9 и 1.1 с. Вместе с тем гидрофоны, установленные вблизи виброметра, четко зафиксировали приход одного сигнала (рис. 3, а, г, черный гра-

Рис. 4. Нормированные корреляционные функции между принятыми на регистратор гидрофизических полей (а, г) и трех компонентных виброметрах Zet 7152 и математической моделью сигнала. X – синим цветом, Y – зеленый, Z – красный. Сплошной – первое излучение на точке, штриховое – второе излучение. а, б, в) Близкая к берегу точка излучения, прием на виброметре № 1, 2, 3 соответственно (расстояния 3, 2.6, 2 км), г, д, е) Дальняя от берега точка излучения, прием – виброметр № 1, 2, 3 соответственно (расстояния 4, 3.5, 2.9 км).



фик). В эксперименте 2021 г виброметр был перемещен выше по склону холма, как показано на рис. 1, где он отмечен желтым кружком под 1-м номером. Нормированные корреляционные функции между виброметром под номером 1 и дальними точками излучения на расстояниях 3 и 4 км получены до 7 приходов сигналов, зафиксированных компонентами X и Z. Близкими по значению между экспериментальными и расчетными значениями оказались, также как и в эксперименте 2020 г, продольные волны в воде и слоях песка, поверхностные волны на границе песок – гранит. Однако не удалось идентифицировать группу сигналов с временами прихода от 1.8 до 2.6 с (рис. 4, в), что может свидетельствовать о необходимости корректировать геоакустическую модель данного участка шельфа. Но существуют оценки скорости распространения поверхностных волн, когда происходит взаимное влияние продольных волн в сопредельных слоях и самой поверхностной волны, близкие к продольной волне подстилающего слоя [1]. Таким образом, скорость распространения волн, полученных в экспериментах, варьируется в пределах 1100–1400 м/с. А также не понятен механизм формирования большого количества близких по скорости распространения сигналов, зарегистрированных на виброметре, который был установлен в глубине мыса Шульца.

Можно предположить, что сигналы, которые проходят по суше, скорее всего, будут распространяться в виде волны рэлеевского типа. Мыс Шульца является гранитным блоком, на поверхности которого находится небольшой верхний слой коры выветривания вместе с гумусом. Учитывая, что между первым и последним приемником примерно 1300 м, а скорость рэлеевской волны равна 2790 м/с, время пробега по

суше будет составлять примерно 0.466 с. Данная разность времен прихода сигналов четко фиксируется между компонентой Z первого виброметра и компонентами X и Y третьего виброметра в обоих экспериментах 2020 г. и 2021 г.

Заключение

Проведено исследование трансформации различного типа сейсмоакустических волн при прохождении через границу гидросфера–литосфера и в процессе движения акустических сигналов в геологической среде. На суше уверенно фиксируются сейсмоакустические сигналы на трехкомпонентные виброметры и регистраторы гидрофизических полей, которые были сформированы гидроакустическим излучателем в воде на расстоянии до 4 км. Установлено, что акустические сигналы, излучаемые в воде согласно геоакустической модели, достигают гранитного слоя, преодолевая осадочные отложения с мощностью порядка 80 м и водную толщу. Продольная волна на границе песок–гранит трансформируется в волну рэлеевского типа, которая была зафиксирована на трехкомпонентных виброметрах. Кроме того, сейсмоакустические сигналы, достигая суши, также продолжают свой путь в виде поверхностной волны. Поперечные волны и поверхностные волны, которые могут возбуждаться в рыхлых донных отложениях и на их границах, нами зафиксированы не были.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана», номер госрегистрации: ААА-А-А20-120021990003-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безруков А.В. Некоторые особенности распространения нормальных волн в мелком море с неоднородным упругим дном // Акуст. журнал. 1989. Т. 35, № 4. С. 744–747.
2. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва: Наука, 1966. 169 с.
3. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452, № 3. С. 321–326. DOI: 10.1134/S1028334X13090158.
4. Кожевников В.М., Середкина А.И., Соловей О.А. Дисперсия групповых скоростей волн рэлея и трехмерная модель строения мантии Центральной Азии // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 10. С. 1564–1575. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.09.010.
5. Леонтьев А. П., Пивоваров А. А. Автономная приемная двухканальная гидроакустическая станция // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 144–145. DOI: 10.7868/S0032816213040095.
6. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В. и др. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135. DOI: 10.1134/S0020441216060191.
7. Мордвинова В.В., Артемьев А.А. Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по обменным волнам // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 6. С. 887–904. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.05.010.
8. Рэлей (Стретт Дж.В.) Теория звука. Т. 1. 2-е изд. М.: ГИТТИ, 1955.
9. Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130–136. DOI: elibrary_32317995_17941415.
10. Фершалов М.Ю., Петров П.С., Манульчев Д.С., Захаренко А.Д. Обобщение метода геоакустической инверсии по записи импульсного сигнала одиночным гидрофоном с учетом неоднородностей батиметрии // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1 (35). С. 51–59. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_05.
11. Paoletti L., Hegaży Y., Monaco S., Piva R. Prediction of shear wave velocity for offshore sands using CPT data – Adriatic sea // 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Huntington Beach, CA, USA, 2010.

Об авторах

САМЧЕНКО Александр Николаевич – к.г.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: геология и геофизика шельфа

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: samchenko@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-5184-0718

ПИВОВАРОВ Александр Анатольевич – научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

ШВЫРЕВ Алексей Николаевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: shvyrev@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0003-1184-8683

ЯРОЩУК Игорь Олегович – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана

Тел.: 8(423) 231-26-17

E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-3212-9752

Для цитирования:

Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ "ГИДРОСФЕРА-ЛИТОСФЕРА" В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2 (40). С. 74–82. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_08. EDN: YUABVG.

