ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 1, с. 82–86

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.344.56

БАЙКАЛЬСКИЙ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич[1], Д. А. Преснов[1,*], Ц. А. Тубанов[2], А. В. Черемных[3], Д. Л. Загорский[1], А. Н. Котов[1], А. С. Нумалов[1]

Поступило 21.08.2020 г.
После доработки 12.10.2020 г.
Принято к публикации 03.11.2020 г.

Представлены результаты полевого геофизического эксперимента в ледовых условиях озера Байкал, проведенного в интересах совершенствования представлений о процессах формирования и распространения гео-гидроакустических волновых процессов в системе “литосфера–гидросфера–ледовый покров”. Впервые продемонстрирована устойчивая регистрация сигналов удаленного вибросейсмического источника отдельными элементами вмороженной в лед сейсмогидроакустической антенной системы.

Ключевые слова: слоистая геофизическая среда, ледовый покров, озеро Байкал, вмороженная сейсмогидроакустическая антенна, вибросейсмический источник

DOI: 10.31857/S2686739721010217

ВВЕДЕНИЕ

Исследования сейсмогидроакустических волновых процессов в слоистой геофизической среде покрытого льдом водоема представляются важными и актуальными в связи с необходимостью экономического освоения шельфовой зоны Северного Ледовитого океана, развития транспортной и промышленной инфраструктуры Северного морского пути, а также решения ряда смежных задач, включая: мониторинг региональной сейсмичности, месторождений полезных ископаемых, изучение глубинного строения литосферы, контроль состояния ледового покрова в свете глобальных климатических изменений.

Основной задачей настоящей работы является обоснование возможности применения группы вмораживаемых в лед сейсмогидроакустических приемников для регистрации низкочастотных сигналов, несущих информацию о неоднородных структурах слоистой геофизической среды [7].

На сегодняшний день по сейсмическим данным построены крупномасштабные томографические модели мантии арктического региона [9]. С использованием поверхностных волн проведена томография Арктики в целом [6]. Кроме того, отметим результаты моделирования [10], свидетельствующие в пользу перспективности размещения станций на льду для решения задач сейсмологического мониторинга. Есть все основания полагать, что дальнейшее развитие современных сейсмотомографических методов позволит успешно применять их на покрытых льдом водоемах, в том числе и в локальных исследованиях [5].

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Полевые работы проводились в марте 2020 г. на льду озера Байкал вблизи поселка Бугульдейка Иркутской области (рис. 1). На протяжении всего эксперимента температура воздуха оставалась в пределах от 0 до 5°C, толщина льда составляла около 1 м, а его поверхность слегка подтаивала в дневные часы.

В качестве основного геофизического инструмента использовалась вмораживаемая антенная система, состоящая из нескольких автономных геогидроакустических модулей [11], включающих в себя и вертикальные велосиметры, созданные на основе молекулярно-электронных первичных преобразователей типа CME4211 производства отечественной компании “P-сенсорс”, обеспечивающих регистрацию сигнала с амплитудой до ±5.0 мм/с в диапазоне частот 0.033–50 Гц. Дополнительно на поверхности льда в центре малоапертурной группы был установлен аналогичный, но трехкомпонентный сейсмометр с цифровым регистратором Reftek-130, а подо льдом находились

[1] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия*
[3] *Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*
**E-mail: presnov@physics.msu.ru*

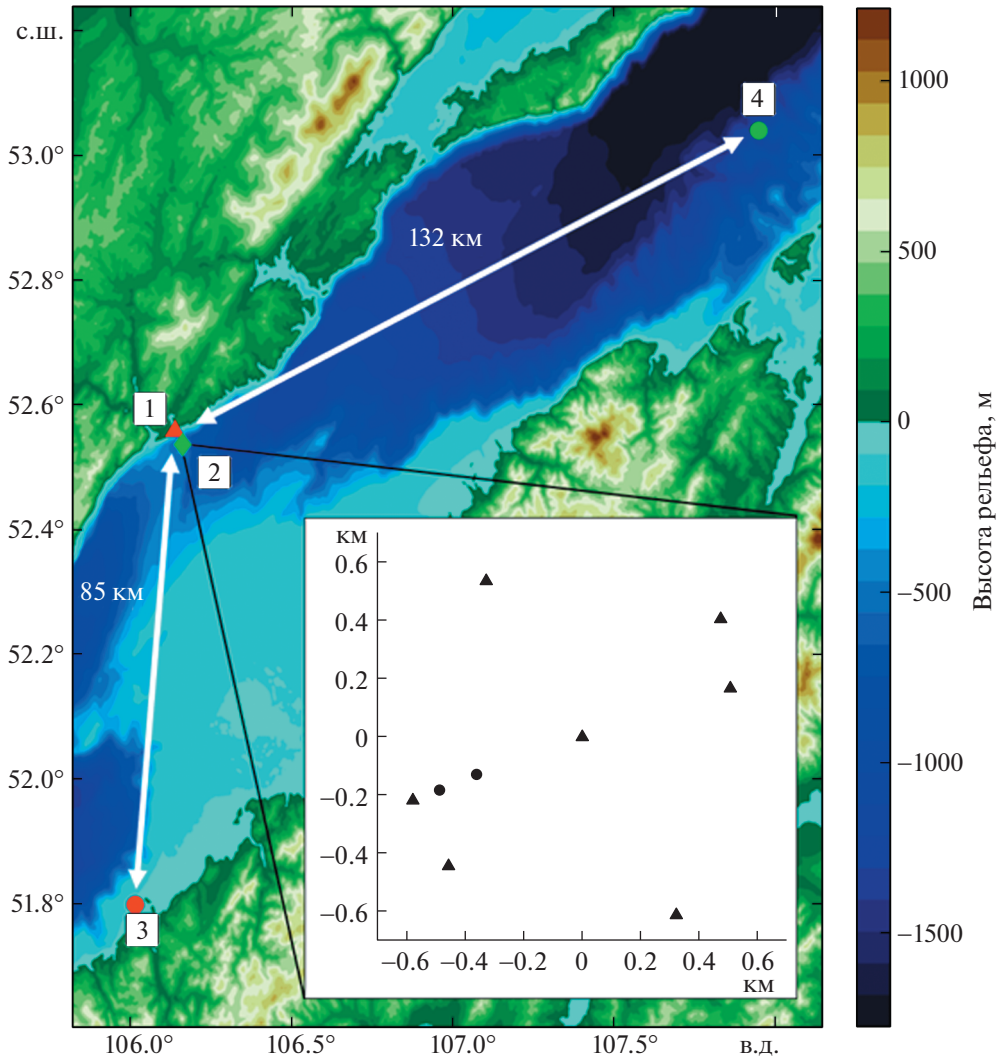

Рис. 1. Район работ и схема эксперимента на ледовом полигоне близ поселка Бугульдейка Иркутской области: 1 – опорная сейсмостанция на берегу, 2 – группа сейсмометров, установленных на поверхности льда (на врезке – схема расстановки приборов, где треугольники – сейсмометры, установленные на поверхности льда, в центре группы – трехкомпонентный сейсмоприемник; кружки – гидрофоны, размещенные в толще воды на глубине 20 м от поверхности льда; в наиболее восточной точке одновременно были установлены гидрофон и сейсмометр), 3 – сейсмический виброисточник, 4 – эпицентр местного землетрясения.

пьезокерамические гидрофоны для гидроакустических измерений в полосе частот 0.5–2500 Гц.

Геогидроакустическая антенная система с апертурой ~1.2 км на поверхности льда состояла из шести автономных модулей и одного трехкомпонентного сейсмометра (рис. 1). Глубина озера под ледовой антенной была около 400 м. Установка измерительной аппаратуры производилась с учетом опыта предшествующих исследований [4]. В толще льда оборудовалась лунка, позволяющая полностью погрузить в нее информационно-измерительный модуль, тем самым обеспечивая защиту от ветровой помехи.

В конструкции модулей предусмотрена возможность организации взаимодействия посредством беспроводного интерфейса (wi-fi) для дистанционно управления и доступа к регистрируемым данным. Отметим, что подобные решения успешно применяются сегодня для решения целого ряда практически значимых задач [12]. В ходе эксперимента с 13 по 15 марта были зарегистрированы сигналы удаленного вибросейсмического источника, а также местные землетрясения.

РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

Успешный опыт регистрации близких землетрясений на ледовом покрове озера Байкал [8] позволяет ставить задачу количественной интер-

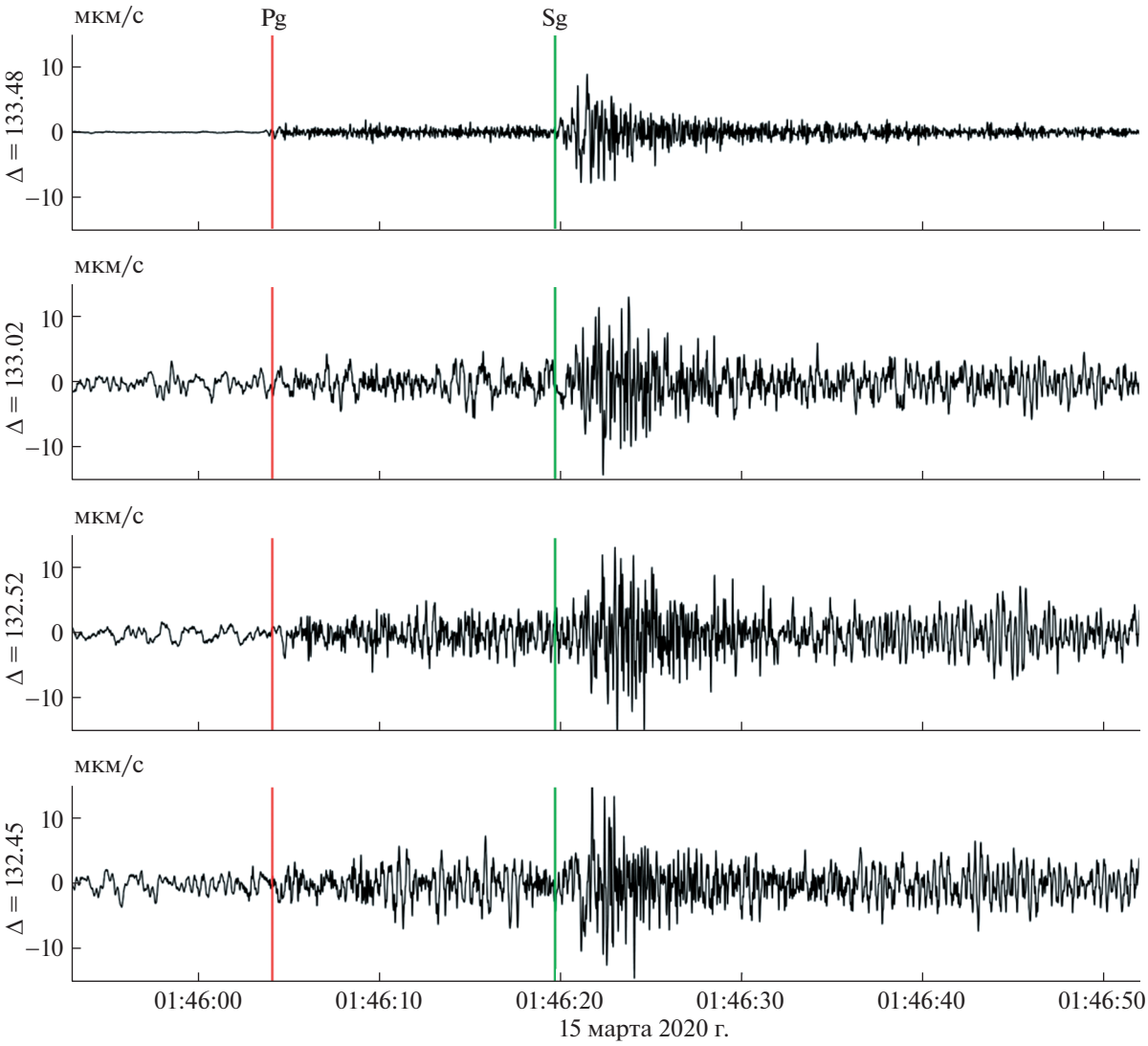

Рис. 2. Сейсмограммы землетрясения, зарегистрированные станциями на берегу (верхний график) и на поверхности льда. Слева от графиков указано эпицентральное расстояние для каждого сейсмоприемника в км. Вертикальными линиями отмечены соответственно времена вступлений фаз прямых волн -Pg и -Sg согласно региональному годографу для глубины гипоцентра, равной 10 км.

претации результатов сейсмологических наблюдений – определения эпицентра, магнитуды и решения механизма очага по данным вмороженных малоапертурных групп. В качестве примера рассмотрим землетрясение 15 марта 2020 г. (см. рис. 1), магнитуда которого по данным Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН не превысила величину 3.2 (энергетический класс 9.8).

На рис. 2 приведены сейсмограммы, зарегистрированные береговой и тремя юго-восточными ледовыми станциями, данные профильтрованы в полосе частот 0.4–15 Гц. Вертикальными линиями отмечены соответственно времена вступлений фаз прямых волн -Pg и -Sg согласно региональному годографу для глубины 10 км. При этом амплитуды вертикальной компоненты колебательной скорости на берегу и на поверхности льда сопоставимы.

Таким образом, наиболее интенсивная часть колебаний на льду вызвана обменной волной SgP на границе дна. Дальнейший анализ ледовых сейсмограмм обнаруживает присутствие квазипериодического сигнала на частоте 2.7 Гц, который может быть объяснен критической частотой второй нормальной моды гидроакустического волновода. И другие высокочастотные сигналы, называемые Т-фазой [3], скорость распространения которых близка к скорости звука в воде.

РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ УДАЛЕННОГО ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

Основной эксперимент был проведен с использованием мощного вибросейсмического источника ЦВО-100 [2], установленного на полигоне Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН в

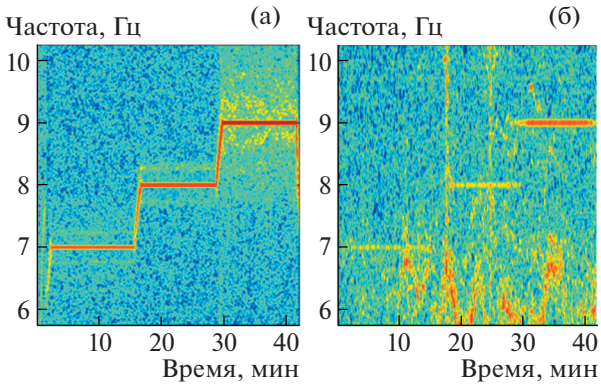

Рис. 3. Спектрограммы, полученные непосредственно вблизи мощного вибросейсмического источника (а) и на удаленном ледовом полигоне одним из геогидроакустических модулей вмороженной антенной системы (б).

окрестностях населенного пункта Бабушкин, на расстоянии 85 км от места расположения вмороженной антенной системы. В ходе эксперимента источник работал сеансами в монохроматическом режиме с последовательным изменением частоты. На рис. 3 приведены первые результаты удаленной регистрации работы виброисточника одним из модулей сейсмогидроакустической антенной системы (гидрофоном, размещенным в толще воды на глубине 20 м).

Таким образом, амплитуда акустического давления на частоте 9 Гц составила 0.2 мПа, при этом грубая оценка значений колебательной скорости составляет 0.13 нм/с, что сопоставимо с уровнями собственных шумов применявшихся сейсмометров. В то время, как сейсмоакустические сигналы уверенно принимаются в водной толще [1], для их непосредственной регистрации на льду целесообразно использование более чувствительных первичных преобразователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В натурном эксперименте получены новые экспериментальные данные, позволяющие более глубоко изучить особенности распространения сейсмо- и гидроакустических волновых полей естественного и антропогенного происхождения в условиях покрытой льдом акватории. Полученные результаты свидетельствуют в пользу возможности регистрации низкочастотных сейсмоакустических сигналов на поверхности ледового покрова вмороженными антенными системами, а также применения в арктических условиях известных методов изучения глубинного строения Земли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность директору ИЗК СО РАН, члену-корреспонденту РАН Д.П. Гладкочубу за содействие в организации и проведении натурного эксперимента, а также Л.Е. Собисевичу за конструктивную критику и плодотворные дискуссии.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-05-70034 и 19-35-90036).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адушкин В.В., Христофоров Б.Д.* Подводные и прибрежные взрывы / Под общ. ред. В.П. Дмитриченко. СПб. Типография Премиум Пресс. 2019. 256 с.
2. Алексеев А.С., Цибульчик Г.М. (ред.) Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 2004. 387 с.
3. *Носов М.А., Колесов С.В., Остроухова А.В., Алексеев А.Б., Левин Б.В.* Упругие колебания водного слоя в очаге цунами // ДАН. 2005. Т. 404. № 2. С. 255–258.
4. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Груздев П.Д., Игнатьев В.И., Коньков А.И., Мореев А.Ю., Тарасов А.В., Шувалов А.А., Шуруп А.С.* Томографическая оценка параметров водоема при наличии ледового покрова с использованием сейсмоакустических излучателей // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 5. С. 688–698.
5. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Исследование возможностей пассивной томографической реконструкции параметров мелкого моря по данным натурных измерений на поверхности льда // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 815–818.
6. *Середкина А.И.* Поверхностно-волновая томография Арктики по данным дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява // Физика Земли. 2019. № 3. С. 58–70.
7. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* О локализации геологических отдельностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // ДАН. 2018. Т. 479. № 1. С. 80–83.
8. *Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В.* Сравнительное исследование записей близких землетрясений на скальном грунте и ледовом покрове озера Байкал // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 55–66.
9. *Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л.* Структура верхней мантии арктического региона по данным региональной сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
10. *Serdyukov A., Koulakov I., Yablokov A.* Numerical Modelling of Seismic Waves from Earthquakes Record-

ed by a Network on Ice Floes // Geophysical Journal International. 2019. V. 218. № 1. P. 77– 87.

11. *Sobisevich A.L., Presnov D.A., Agafonov V.M., Sobisevich L.E.* New-Generation Autonomous Geohydroacoustic Ice Buoy // Seismic Instruments. 2018. V. 54. № 6. P. 677–681.

12. *Picozzi M., Milkereit C., Parolai S., Jaeckel K., Veit I., Fischer J., Zschau J.* GFZ Wireless Seismic Array (GFZ-WISE), a Wireless Mesh Network of Seismic Sensors: New Perspectives for Seismic Noise Array Investigations and Site Monitoring // Sensors. 2010. № 10. P. 3280–3304.

BAIKAL ICE-BASED SEISMOACOUSTIC EXPERIMENT

Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich[a], D. A. Presnov[a,#], Ts. A. Tubanov[b], A. V. Cheremnykh[c], D. L. Zagorskiy[a], A. N. Kotov[a], and A. S. Numalov[a]

[a] *Shmidt Institute of the Earth's Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*

[c] *Institute of the Earth's crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: presnov@physics.msu.ru*

The results of a geophysical field experiment on the ice sheet of the Lake Baikal, carried out in order to deeper understand the origin and development of geo-hydroacoustic wave processes in the "lithosphere-hydrosphere-ice cover" layered structure are presented. For the first time, the steady recording of signals from a distant vibroseismic source by means of sole elements of an ice-based seismo-hydroacoustic array has been demonstrated.

Keywords: layered geophysical medium, Lake Baikal, ice cover, ice-based seismo-hydroacoustic array, powerful vibroseismic source