ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 2, с. 158–163

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.34.016

СЕТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, УСТАНОВЛЕННАЯ НА ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДАХ: ЭКСПЕРИМЕНТ НА СЕВЕРЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2021 г. А. В. Яковлев[1,2,*], С. М. Ковалев[3], Ег. В. Шиманчук[3], Ев. В. Шиманчук[3], А. А. Нюбом[3]

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 16.10.2020 г.
Поступило 16.10.2020 г.
После доработки 16.11.2020 г.
Принято к публикации 17.11.2020 г.

С марта по май 2019 г. в рамках первого этапа программы “ТрансАрктика 2019” проводилась мультидисциплинарная сезонная научная экспедиция на НЭС “Академик Трёшников”. В рамках сейсмологической части программы шесть временных сейсмических станций были установлены в четырех разных точках на дрейфующей льдине в северной части Баренцева моря. Основной целью эксперимента была отработка технологии установки сейсмических станций на дрейфующих льдинах. Вторая цель заключалась в том, чтобы проверить, можно ли использовать полученные сейсмологические записи для регистрации локальных и удаленных землетрясений, и для исследования структуры литосферы в арктических регионах, а также процессов внутри льдины. После анализа записанных данных были обнаружены различные типы сейсмического сигнала, генерируемого ледовыми процессами, и зарегистрировано несколько сигналов от удаленных и региональных землетрясений. Дальнейший анализ сейсмограмм может быть использован для исследования процессов внутри льдин. Результаты эксперимента показали, что сейсмические датчики, установленные на дрейфующем льду, могут быть использованы для регистрации локальных и удаленных землетрясений.

Ключевые слова: временная сеть сейсмических станций, Арктика, дрейфующие льды, Баренцево море

DOI: 10.31857/S2686739721020213

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия по политическим и экономическим причинам арктический регион стал приоритетной целью для ряда стран. Существует несколько национальных и международных междисциплинарных программ, которые собирают и анализируют научные данные из Арктики. Однако эти исследования сопряжены со многими трудностями из-за суровых климатических условий и дороговизны полевых работ. Разработка новых технологий поможет снизить затраты и оптимизировать полевые работы, направленные на изучение геологического строения Северного Ледовитого океана.

Еще одной важной задачей является установление распределения сейсмичности. Согласно данным глобальных сейсмических сетей, большинство обнаруженных в настоящее время землетрясений локализованы вдоль хребта Гаккеля; другие районы Арктики, вследствие низкой плотности региональной сети сейсмических станций, кажутся асейсмичными. Недостаточная информация о фоновой сейсмичности может привести к неправильной оценке сейсмической опасности, что, в свою очередь, может стать причиной аварий при промышленной разработке и освоении природных ресурсов в высоких широтах.

Детальное изучение строения земной коры и фоновой сейсмичности требует развертывания плотной сети сейсмических станций, что чрезвычайно сложно в арктических условиях. Например, размещение донных сейсмометров или использование современной технологии MERMAIDS [1] в Северном Ледовитом океане сопряжено с риском из-за непредсказуемого поведения ледяных потоков. Установка станций на островах не обеспечивает достаточного покрытия для охвата большей части арктического региона. Поэтому специальные методы исследования высокоширотных тер-

[1] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[3] *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
**E-mail: JakovlevAV@ipgg.sbras.ru*

Таблица 1. Параметры сейсмических станций

Название станции	Сенсор	Регистратор	Регистрируемые компоненты	Частота регистрации	Усиление
TA1, TA2, TA3	Велосиметр GuralpCMG-6T (30 сек)	DataCube3 extc адаптером BoB (10:1)	Север, восток, вертикальная	200 Гц	2
Alfa	Велосиметр CME-4311-LT	Байкал-8	Север, восток, вертикальная	100 Гц	1
Beta, Gamma	Велосиметр CME-4311-LT и наклонометр ИН-Д3а-360	Байкал-8	Север, восток, вертикальная, X, Y	100 Гц	1

риторий востребованы и развиваются в разных странах.

Один из возможных способов исследования морских акваторий Арктики – установка сейсмических сетей на льдинах. Первые опыты с такими установками были выполнены Институтом Альфреда Вегенера (AWI) в Бремерхафене [2, 3]. Они показали, что такие плавучие сети способны регистрировать сейсмический сигнал от местных и региональных землетрясений. Одним из ключевых открытий этих исследований было обнаружение вторичных фаз, которые были идентифицированы как приход преобразованной S-волны. В работе [4] Сердюков А. с соавт. выполнили численное моделирование распространения сейсмических волн от землетрясения с реалистичными механизмами очагов и проанализировали сейсмические записи на льдине над водным слоем. Они доказали, что в этом случае, помимо первых вступлений P-волн, можно четко обнаружить вторичные фазы, которые соответствуют S-волнам в твердом слое, преобразованным в P-волны в слое воды. Возможность применения данных, зарегистрированных станциями, установленными на льду шельфовых морей, для задач сейсмической томографии и мониторинга рассматривается в статьях [5, 6].

С марта по май 2019 г. в рамках первого этапа программы “ТрансАрктика 2019” состоялась сезонная мультидисциплинарная научная экспедиция на НЭС “Академик Трёшников” Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) Росгидромета. Сейсмологический эксперимент был проведен специалистами ААНИИ и Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ). В данной работе представлены детали эксперимента и приведены первые результаты анализа полученных сейсмологических записей.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В рамках пассивного сейсмологического эксперимента шесть временных сейсмических станций в четырех разных локациях были установлены на дрейфующей льдине в северной части Баренцева моря (рис. 1). В результате эксперимента были получены непрерывные трехкомпонентные сейсмические записи.

Сейсмические станции были установлены в апреле 2019 г. на льдине возле судна, которое было “вморожено” в льды и дрейфовало вместе с ними (рис. 1). Четыре станции (TA2, TA3, Beta и Gamma) были установлены в трех разных местах 3 апреля, оставшиеся две станции (TA1 и Alfa) были установлены в одном месте 10 апреля. Станции TA1, TA2, Альфа и Гамма были демонтированы 23 апреля, станции TA3 и Бета – 24 апреля.

В сейсмическом эксперименте использовались две конфигурации приборов. Три станции были развернуты ИНГГ (TA1, TA2, TA3), оставшиеся три станции – ААНИИ (Alfa, Beta, Gamma). Типы приборов и использованная частота регистрации приведены в табл. 1. Для сравнения сейсмических сигналов, зарегистрированных станциями разной конфигурации, в двух локациях было установлено по два разных прибора.

ДАННЫЕ

После анализа зарегистрированных данных было выделено несколько типов сейсмического сигнала, генерируемого ледовыми процессами. Фоновый сигнал от изгибно-гравитационных волн с периодами от 1 до 10 с наблюдался при сильных порывах ветра и трещинообразовании. Волны зыби с периодами от 17 до 30 с наблюдались постоянно в течение всего периода работы сети.

Особенности физики регистрируемых волн можно проиллюстрировать записью на станции Beta. На рис. 2 показана совместная запись колебаний ледяного покрова от волн зыби и при сдвиговых движениях льда, порождающих автоколебательные процессы. На вертикальной компоненте (Z) хорошо видны волны зыби с периодом около 17–18 с, на остальных компонентах четко выделяются изгибно-гравитационные волны от автоколебательных процессов с периодом 2–3 с.

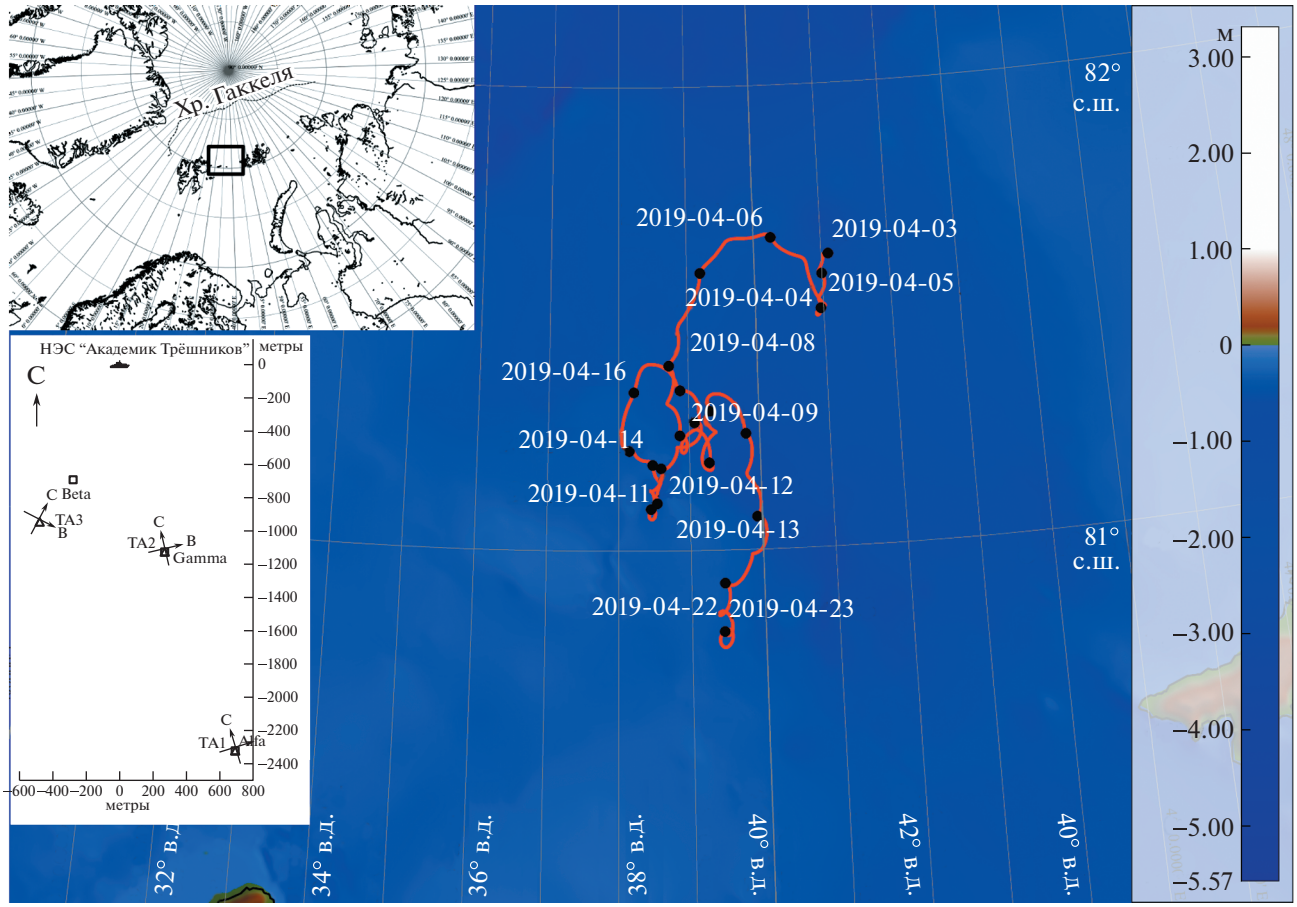

Рис. 1. Карта с траекторией дрейфа станции TA3. На вставке в левом верхнем углу показан район проведения эксперимента. На вставке слева показано взаиморасположение станций и судна в 12:00 UTC 10.04.2019. Стрелками показана ориентация горизонтальных компонент станций ИНГГ.

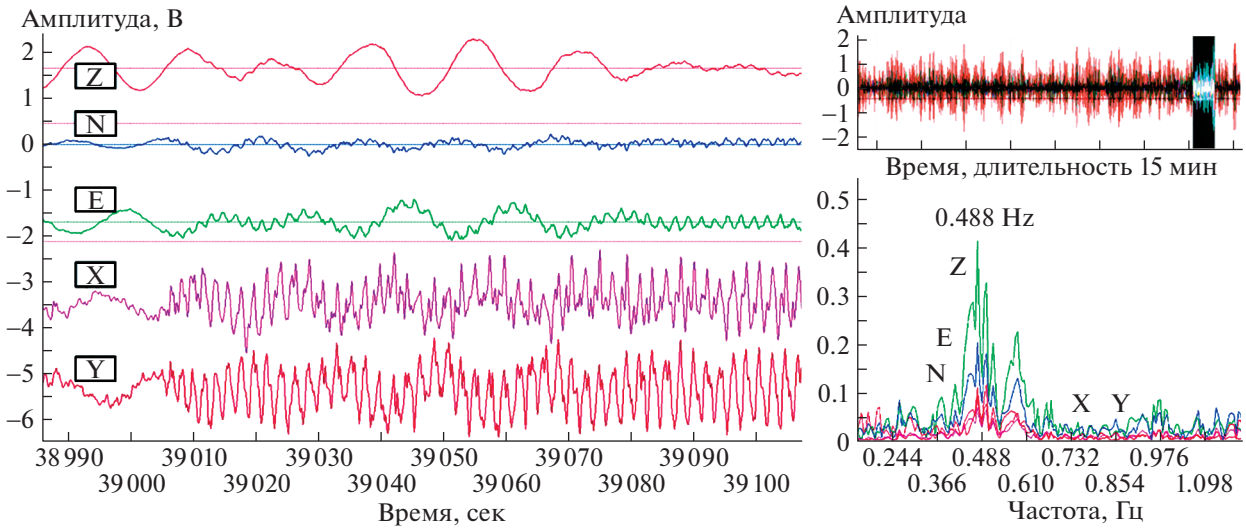

Рис. 2. Фрагмент записи трехкомпонентного сейсмометра (Z, N, E) и наклонометра (X, Y) и ее амплитудный спектр. Справа вверху на одной шкале показаны 15-минутный отрезок записи всех компонент, на которой черным цветом отмечено положение окна, показанное слева в увеличенном масштабе. Максимальные амплитуды в спектре, показанном справа внизу, наблюдаются в полосе 0.4–0.6 Гц. Станция Beta, 17.04.2019 г.

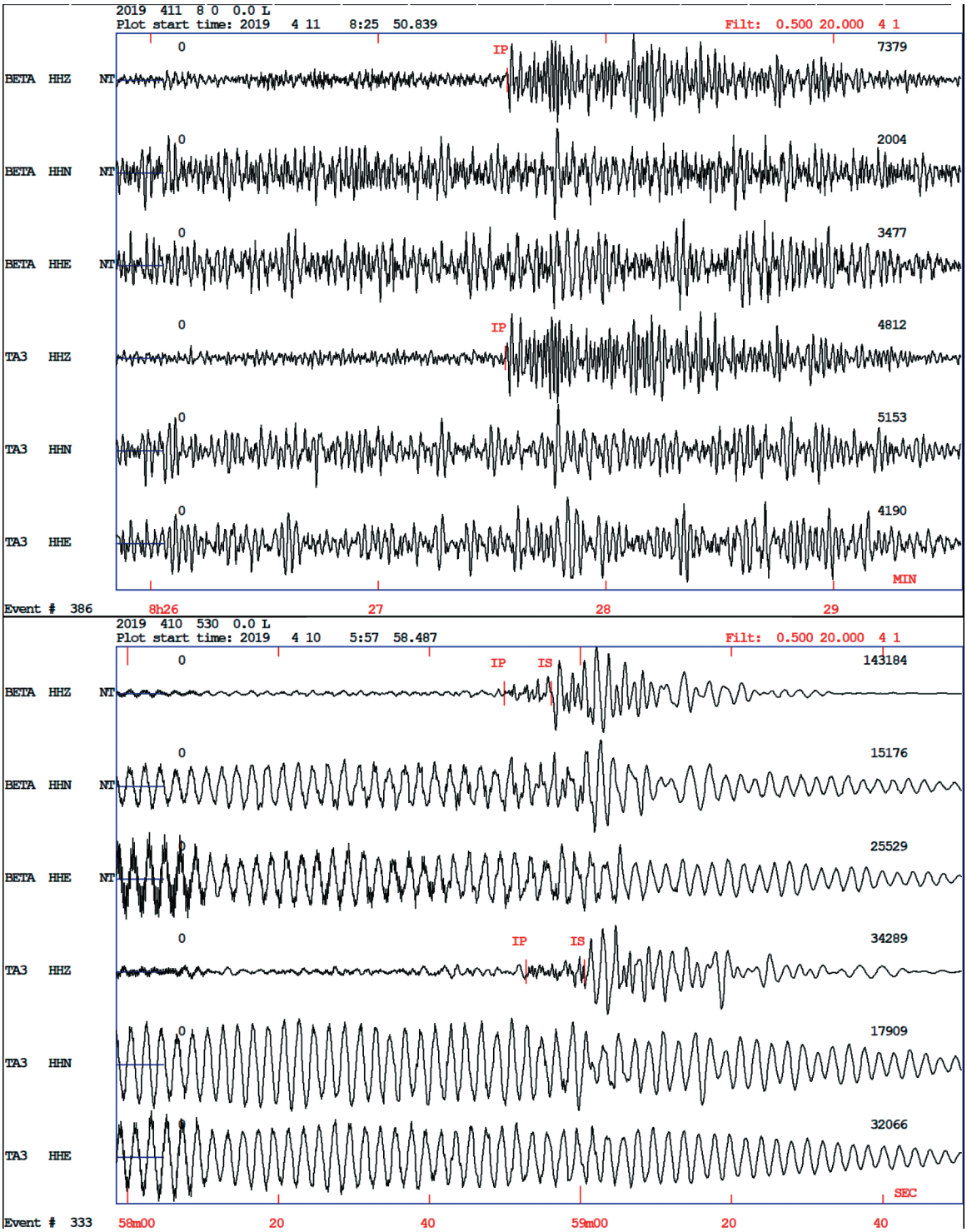

Рис. 3. Примеры записей удаленного (вверху) и регионального (внизу) землетрясений. К записям применен полосовой фильтр 0.5–20 Гц. Для визуализации использован программный комплекс SEISAN [7].

При этом в спектре максимальные амплитуды колебаний ледяного покрова, вызванных сдвиговыми движениями льда, наблюдаются в полосе частот 0.4–0.6 Гц. Дальнейшая обработка данных с учетом скорости дрейфа, метеорологических параметров и анализ результатов в различных точках позволят выявить природу этого явления.

В процессе разрушения ледяного покрова наблюдалась повышенная величина горизонтальных смещений льда. Анализ полученных волно-

вых событий во льду показал, что автоколебания, обусловленные подвижками льда, могут служить признаками возникновения трещин и разломов льда. Информация о частоте регистрации и длительности процессов деформирования льда может быть использована для краткосрочного прогноза нарушения ледяного покрова.

В результате первоначального анализа сейсмограмм был обнаружен сигнал от нескольких удаленных и региональных землетрясений. Например, на рис. 3 вверху мы показываем запись удаленного события (эпицентральное расстояние 52°), которое было идентифицировано в международном сейсмологическом каталоге (ISC) как землетрясение, произошедшее в 08:18:23 UTC 11 апреля 2019 г. недалеко от Японии (40.35° с.ш., 143.35 в.д., глубина 35 км, MS = 6.0) [8].

Внизу на рис. 3 показан пример записи регионального землетрясения, которое произошло примерно в 05:58 UTC 10 апреля 2019 г. Мы можем четко определить как первичную фазу P-, так и вторичную фазу, которая предположительно идентифицирована как преобразованная S-волна. Исходя из разницы между этими двумя фазами, мы оцениваем, что расстояние до этого землетрясения составляет около 500 км. Из-за малой апертуры сети определение координат землетрясения невозможно. В каталоге ISC мы не смогли идентифицировать землетрясение с аналогичным временем возникновения в районе исследования. Это дает основание утверждать, что использование плавучих сетей может значительно улучшить качество обнаружения сейсмичности с умеренными и небольшими магнитудами. Примечательно, что на записи удаленного и регионального события только на вертикальной компоненте регистрируется релевантная информация, так как траектории лучей продольных P- и конвертированных поперечных Sp-волн от землетрясений, распространяющиеся в воде, имеют субвертикальную ориентацию из-за значительно более низких значений скорости в воде (около 1.44 км/с), и, как следствие, практически не имеют горизонтальных составляющих движения частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного эксперимента показали, что размещение сейсмических станций на дрейфующих льдинах может быть использовано не только для изучения процессов в ледовом покрове, но и для регистрации локальной и удаленной сейсмичности, что подтверждает выводы, сделанные в работах [2, 3]. В ходе экспериментов были зарегистрированы сейсмические сигналы от различных процессов внутри льдин, а также сигналы от нескольких удаленных и местных землетрясений. Эксперимент показал, что использование плавучих сетей может значительно улучшить качество обнаружения сейсмичности умеренных и малых магнитуд. Для получения информации о сейсмическом строении земной коры Арктического региона необходимо создать сейсмическую сеть, состоящую из более чем десятка станций, расположенных на значительном удалении друг от друга, работающих не менее нескольких месяцев. Шлиндвайн с соавт. [2] предлагают размещать станции группами по три-четыре станции с малой апертурой, поскольку ошибка синхронизации GPS на разных льдинах может быть слишком большой. Такая сеть сможет регистрировать достаточное количество землетрясений, а полученные данные могут быть использованы для изучения глубинных структур с помощью сейсмической томографии и других сейсмических методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимных рецензентов, высказавших полезные замечания, которые позволили улучшить изложение представленных материалов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена частично за счет средств гранта РНФ 18-17-00095, и частично поддержана целевой научно-технической программой Росгидромета 5.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simons F.J., Nolet G., Georgief P., Babcock J.M., Regier L.A., Davis R.E.* On the Potential of Recording Earthquakes for Global Seismic Tomography by Low-cost Autonomous Instruments in the Oceans // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2009. Т. 114. № B5. https://doi.org/10.1029/2008JB006088
2. *Schlindwein V., Müller C., Jokat W.* Microseismicity of the Ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean: A pilot study // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. № 1. С. 100–112. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03308.x
3. *Läderach C., Schlindwein V.* Seismic Arrays on Drifting Ice Floes: Experiences from Four Deployments in the Arctic Ocean // Seismological Research Letters. 2011. V. 82. № 4. P. 494–503. https://doi.org/10.1785/gssrl.82.4.494
4. *Serdyukov A., Koulakov I., Yablokov A.* Numerical Modelling of Seismic Waves from Earthquakes Recorded by a Network on Ice Floes // Geophys. J. Int. 2019. V. 218. № 1. P. 74–87. https://doi.org/10.1093/gji/ggz148
5. *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.

6. *Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Research of Shallow Sea Passive Tomography Based on Ice Measurements Data // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2020. Вып. 84. V. 6. P. 669–672. https://doi.org/10.3103/S1062873820060209
7. ISC Bulletin. 2020. On-line Bulletin. https://doi.org/10.31905/D808B830
8. *Havskov J., Ottemoller L.* Seis An Earthquake Analysis Software // Seismological Research Letters. 1999. Т. 70. № 5. С. 532–534. https://doi.org/10.1785/gssrl.70.5.532

SEISMIC NETWORK ON DRIFTED ICE FLOES: A CASE STUDY IN NORTH BARENTS SEA

A. V. Jakovlev[a,b,#], S. M. Kovalev[c], Eg. V. Shimanchuk[c], Ev. V. Shimanchuk[c], and A. A. Nubom[c]

[a] *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[b] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[c] *Arctic and Antarctic Research Institute, Sankt-Petersburg, Russian Federation*

[#] *E-mail: JakovlevAV@ipgg.sbras.ru*

Presented by academician of RAS M. I. Epov October 16, 2020

From March to May 2019, a seasonal multidisciplinary scientific expedition on the EV “Akademik Tryoshnikov” was conducted in the framework of the first stage of the “TransArctica 2019” program. Within the seismological part, six temporary seismic stations were installed at four different locations on a drifted ice floe in the North Barents Sea. The first aim of the experiment was to elaborate technology of installation of the seismic stations on drifting ice floes. The second aim was to check if obtained seismological records could be used for registration of the local and remote earthquakes and provide data to investigate the lithosphere structure in the Arctic regions, as well as processes within the ice floe. After analysis of the recoded data, different types of the seismic signal generated by processes in the ice were observed and several signals from remote and regional earthquakes were detected. Further analysis of the seismograms could be used for investigations of the processes within ice floes. The results of the experiment have shown that seismic sensors installed on the drifting ice could be used for recording of local and remote earthquakes.

Keywords: Arctic, Barents Sea, ice floes, ice processes, seismic network