

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-815-825

## ICE FLOE SEISMIC STATION FOR REGISTRATION OF EARTHQUAKES AND SEISMIC NOISES IN THE ARCTIC SEAS

**A. A. Krylov, K. A. Roginsky, O. Yu. Ganzha**

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

*The development of a design and prototype of an ice floe seismic station for recording earthquakes and seismic noises in the Arctic seas, as well as the concept of its use are considered in the paper. The Arctic and Subarctic are among the key regions influencing global processes on Earth. The need for long-term seismic monitoring in the arctic and subarctic waters of Russia from ice, as well as the improvement of the corresponding equipment, is due to the great scientific interest in the complex geodynamics and tectonics of the region, the deep structure of the lithosphere, and the need to assess various geological hazards during the active development of the Arctic and the construction of critical infrastructure there. When developing the design of the ice floe seismic station, special attention is paid to a number of parameters that, according to the authors, are key for optimal long-term seismic monitoring from stationary or drifting ice. These parameters are the use of seismic sensors with an extended registration frequency range; the presence of a hydrophone registration channel; ensuring continuous monitoring of equipment and prompt data collection throughout the entire observation period; providing flexibility in the type and number of sensors used; ensuring operability at low temperatures and strong winds; ensuring waterproof of the main components of the station. The vastness of the subarctic and arctic water areas of Russia and a large list of tasks solved with the help of seismic monitoring from ice lead to the possibility of a wide application of the described equipment. Undoubtedly, the advantages of the presented equipment include its adaptability to harsh Arctic conditions, the possibility of remote data transmission, as well as the use of domestic hardware base.*

*Keywords: ice floe seismic station, seismometer, hydrophone, Arctic, Wi-Fi, online remote control.*

### **For citation:**

Krylov, Artem A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Yu. Ganzha. "Ice floe seismic station for registration of earthquakes and seismic noises in the Arctic seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 815–825. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-815-825.

**УДК 550.34.03**

## НАЛЕДНАЯ СЕЙСМОСТАНЦИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

**А. А. Крылов, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация

*Настоящее исследование посвящено разработке дизайна и прототипа наледной сейсмостанции для регистрации землетрясений и сейсмических шумов в арктических морях, а также концепции ее использования. В работе отмечается, что регионы Арктики и Субарктики оказывают существенное влияние на глобальные процессы, происходящие на Земле. Необходимость долговременного сейсмического мониторинга в арктических и субарктических акваториях России со льда, а также совершенствование соответствующей аппаратуры, обусловлены большим научным интересом к сложной геодинамике и тектонике региона, глубинному строению литосферы и необходимостью оценки различного рода геологических опасностей в процессе активного освоения Арктики и возведения там критической инфраструктуры. При разработке дизайна наледной сейсмостанции особое внимание уделялось следующим параметрам, которые, по мнению авторов работы, являются ключевыми для оптимального долговременного сейсмического мониторинга со стационарного или дрейфующего льда: применение сейсмодатчиков с расширенным частотным диапазоном регистрации; присутствие гидрофонного канала регистрации; обеспечение непрерывного контроля за оборудованием и оперативного сбора данных в течение всего периода наблюдений; обеспечение*

*гибкости в применяемом типе и количестве датчиков; обеспечение работоспособности при низких температурах и сильном ветре; обеспечение водонепроницаемости основных узлов станции. Отмечается, что обширность субарктических и арктических акваторий России и большое количество решаемых с помощью сейсмического мониторинга со льда задач приводят к возможности широкого применения описанного оборудования. Сделан вывод о том, что к преимуществам представленного оборудования относятся приспособленность к суровым арктическим условиям, возможность удаленной передачи данных, а также использование отечественной аппаратурной базы.*

*Ключевые слова: наледная сейсмостанция, сейсмометр, гидрофон, Арктика, Wi-Fi, дистанционный контроль онлайн.*

**Для цитирования:**

Крылов А. А. Наледная сейсмостанция для регистрации землетрясений и сейсмических шумов в арктических морях / А. А. Крылов, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 815–825. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-815-825.

## **Введение (Introduction)**

Арктика и Субарктика являются одними из ключевых регионов, оказывающих влияние на глобальные процессы, происходящие на Земле. Это обуславливает большой научный интерес к сложной геодинамике и тектонике Арктического и Субарктического регионов. Кроме того, актуальность и значимость изучения сейсмичности и глубинного строения литосферы Арктики определяются необходимостью активного освоения Севера. В последние два десятилетия наблюдается активизация строительства в российских северных акваториях добывающих платформ, нефтегазовых терминалов, ответственных объектов энергетической инфраструктуры, военных баз и других стратегически важных объектов. Усиливается роль Северного морского пути. По мере потепления климата, которое наблюдается наиболее выражено в Арктическом регионе, и уменьшения ледового покрова данная тенденция будет усиливаться. При этом для предотвращения возможных техногенных катастроф, связанных с эксплуатацией ответственных сооружений, при проектировании необходимо проводить тщательную оценку сейсмической и других геологических опасностей.

Особенности сейсмичности и глубинного строения литосферы обширного Арктического региона мало изучены. Информацию о сейсмичности акватории Северного Ледовитого океана получают в основном за счет обработки записей удаленных наземных сейсмостанций. Поэтому доступны данные лишь о достаточно сильных землетрясениях. Изучение глубинного строения литосферы проводилось по данным немногочисленных работ с помощью *активной сейсмики*. Во многом малоизученность северных морей связана с труднодоступностью арктических регионов, суровым климатом, а также недостатком специализированного научного оборудования, способного эффективно функционировать в таких неблагоприятных условиях. В частности, для регистрации землетрясений и исследования сейсмотектоники какого-либо региона необходимо развертывание сети сейсмостанций непосредственно вблизи изучаемых тектонических структур. Для арктических и субарктических морей, которые большую часть года покрыты льдами, это означает необходимость в совершенствовании средств регистрации сейсмичности на морском дне либо со льда.

В 2000-х гг. была продемонстрирована принципиальная возможность регистрации сейсмических сигналов от землетрясений с помощью сети сейсмографов (сейсмогруппы с апертурой 1 км), расположенных на дрейфующем льду: проекты AMORE2001 [1]–[3], AGAVE [4], [5]. В ходе этих экспериментов были зафиксированы сигналы сотен микроземлетрясений, связанных с вулканической активностью на хребте Гаккеля. Регистрация сейсмических сигналов производилась с помощью автономных станций на основе короткопериодных сейсмоприемников Mark 4LC с собственной частотой колебаний 1 Гц (гидрофоны при этом не применялись). Используемая в указанных экспериментах аппаратура изначально предназначена для регистрации сейсмических сигналов в стандартных условиях на Земле и не является оптимальной для долговременного сейсмического

мониторинга в условиях арктических и субарктических морей со стационарного или дрейфующего льда с оперативной передачей данных.

Целью настоящего исследования является разработка дизайна и прототипа наледной сейсмостанции для регистрации землетрясений и сейсмических шумов в арктических морях, а также концепции ее использования.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Дизайн наледной сейсмостанции.* При разработке дизайна наледной сейсмостанции особое внимание уделялось параметрам, которые, по мнению авторов данной работы, являются ключевыми для оптимального длительного сейсмического мониторинга со стационарного или дрейфующего льда:

- применение сейсмометров с расширенным частотным диапазоном регистрации;
- присутствие гидрофонного канала регистрации;
- обеспечение непрерывного контроля за оборудованием и оперативного сбора данных в течение всего периода наблюдений;
- обеспечение гибкости в применяемом типе и количестве датчиков;
- обеспечение работоспособности при низких температурах и сильных ветрах;
- обеспечение водонепроницаемости основных узлов станции.

На рис. 1 приведена принципиальная схема наледной сейсмостанции. В металлическом контейнере, который вмораживается в лед, помещаются трехкомпонентный сейсмометр, сейсмический регистратор и цифровой компас / наклономер. Контейнер имеет форму цилиндра с верхней крышкой, прикрепляющейся к фланцу контейнера с помощью болтов. Внешний диаметр контейнера 276 мм позволяет устанавливать его в лунку, подготовленную во льду буром 300 мм. Высота контейнера 750 мм. Верхняя крышка диаметром 400 мм не дает просесть контейнеру, прочно удерживая его на льдине. Между крышкой и фланцем помещена резиновая морозостойкая прокладка. Лед в Арктике имеет температуру не ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Заглубление контейнера позволяет создать рабочую температуру внутри контейнера относительно стабильную и не опускающуюся ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  [6]. Прочный корпус обеспечивает защиту аппаратуры от воды, позволяет избежать возможных деформаций льдом и защищает от воздействия животных. Помимо сейсмометров регистрация сигналов производится также с помощью широкополосного гидрофона, который опускается в лунку через трубу на кабеле на глубину 20 м.

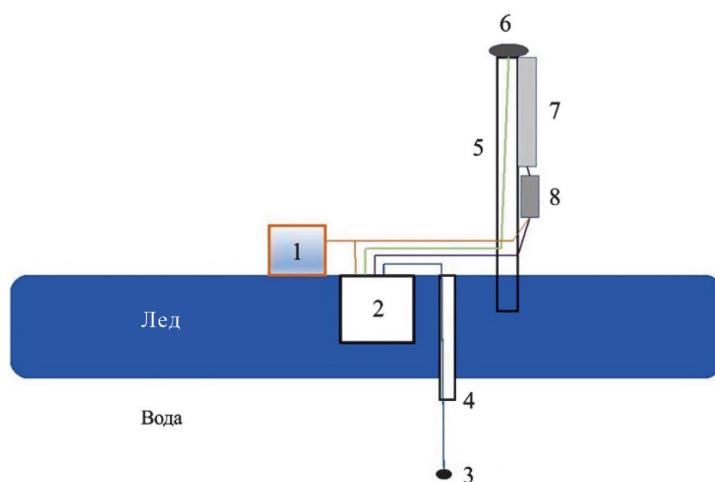


Рис. 1. Принципиальная схема наледной сейсмостанции:

- 1 — блок аккумуляторной батареи; 2 — контейнер с сейсмометрами, сейсмическим регистратором и дополнительной электроникой; 3 — гидрофон с кабелем; 4 — лунка во льду со вставленной трубой; 5 — мачта; 6 — GPS-антенна; 7 — антенна для беспроводной передачи данных; 8 — модем беспроводной передачи данных

Сейсмостанция комплектуется расположенными в контейнере (рис. 2) трехкомпонентным низкочастотным велосиметром СПВ-3К, четырехканальным регистратором сигналов ДЕЛЬТА-03М, а также блоком дополнительных датчиков (температура в контейнере, электронный компас, наклономер, индикатор напряжения батареи) для контроля состояния станции (разработчик — ООО «Логистические системы»). К контейнеру присоединяется кабель с низкочастотным гидрофоном 5007 м (разработчик — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН), блок аккумуляторной батареи (АКБ), GPS-антенна для синхронизации внутренних часов регистратора и определения текущих координат, а также модем беспроводной передачи данных Ubiquiti Rocket M2 с секторальной антенной Ubiquiti AirMax Sector 2G-16-90, используемой для организации беспроводного моста вместе с круговой антенной Ubiquiti AirMax Omni 2G-12.

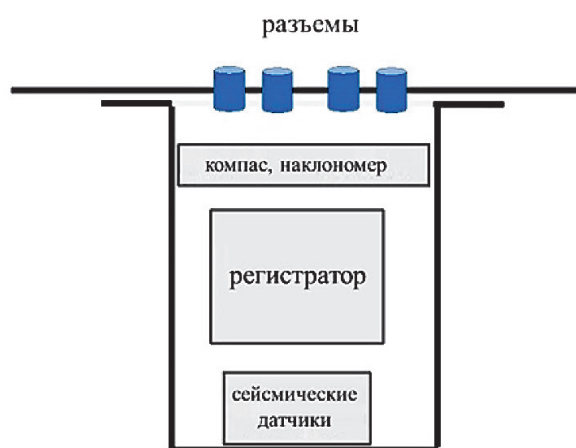


Рис. 2. Схема расположения элементов станции на шасси в контейнере

Возможна комплектация станции дополнительными автономными датчиками, имеющими канал связи Ethernet или RS-232. Основные технические характеристики сейсмометров, регистратора и гидрофона приведены в табл. 1–3, изображения основных элементов станций — на рис. 3.

Таблица 1

**Основные технические характеристики велосиметра СПВ-3К**

| Технические характеристики                                | Численные значения |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|
| Число компонентов                                         | 3                  |
| Диапазон частот по уровню 3дБ, Гц                         | 0,5–65             |
| Динамический диапазон, не менее, дБ                       | 120                |
| Коэффициент преобразования, В/(м/с)                       | 500                |
| Максимальная амплитуда сигнала на симметричных выходах, В | ±3,5               |
| Допустимое отклонение СПВ-3К от вертикали, град.          | ±15                |
| Напряжение питания, В                                     | 6–25               |
| Потребляемая мощность, Вт                                 | 0,65               |
| Диаметр, мм                                               | 160                |
| Высота (с ручкой), мм                                     | 135                |
| Вес (без кабеля), кг                                      | 2,9                |
| Диапазон рабочих температур, °С                           | –30...+55          |
| Герметичность                                             | IP67               |

Таблица 2

**Основные технические характеристики регистратора  
сейсмических сигналов «ДЕЛЬТА-03М»**

| Технические характеристики                                   | Численные значения                   |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Число каналов                                                | 4/8                                  |
| Диапазон регистрируемых частот, Гц                           | 0,1–240                              |
| Мгновенный динамический диапазон                             | 120                                  |
| Потребляемая мощность автономно/в составе локальной сети, Вт | 1,0 / 1,2                            |
| Напряжение питания, В                                        | 9–27                                 |
| Установка точного времени                                    | GPS                                  |
| Диапазон рабочих температур, °С                              | –40...+60                            |
| Габаритные размеры, мм                                       | 250 × 170 × 62                       |
| Вес, кг                                                      | 1,3                                  |
| Кварцевый генератор                                          | 10 <sup>–7</sup> (10 <sup>–8</sup> ) |
| Объем флэш-память (SD), Гб                                   | 32                                   |
| Интерфейс                                                    | Ethernet 10/100, RS-232              |
| Дистанционное управление                                     | Да                                   |
| Конвертор форматов                                           | CSS, MiniSEED, ASCII                 |

Таблица 3

**Основные технические характеристики гидрофона 5007 м**

| Технические характеристики        | Численные значения |
|-----------------------------------|--------------------|
| Диапазон частот, Гц               | 0,04–2500          |
| Чувствительность при 15 Гц, мВ/Па | 7,2 ± 0,5          |
| Динамический диапазон, дБ         | 100                |
| Диаметр, мм                       | 50                 |
| Максимальная глубина, м           | 5000               |



Рис. 3. Наледная сейсмостанция и ее основные комплектующие:

- 1 — внешний вид контейнера и шасси с приборами;  
2 — регистратор сейсмических сигналов ДЕЛЬТА-03М;  
3 — трехкомпонентный велосиметр СПВ-3К в корпусе; 4 — гидрофон 5007 м

Аккумуляторная батарея (АКБ) размещается на льду, рядом со станцией, и обеспечивает снабжение узлов станции постоянным напряжением 12 В. АКБ изготовлен на основе литий-титановых (LTO) элементов Yinlong LTO 66160A-30Ah, работающих при низких температурах до  $-40...-50$  °С. Основные технические характеристики АКБ приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные технические характеристики  
литий-титанового аккумулятора (одной ячейки)  
Yinlong LTO-66160A-30Ah**

| Технические характеристики                | Численные значения                                                                     |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Номинальная емкость ячейки, А·ч           | 30 (фактическая до 33,4)                                                               |
| Номинальное напряжение, В                 | 2,3                                                                                    |
| Максимальное напряжение заряда, В         | 2,9                                                                                    |
| Минимальное напряжение разряда, В         | 1,5                                                                                    |
| Ток разряда продолжительный, А (при 6 °С) | 180                                                                                    |
| Метод зарядки                             | CC–CV                                                                                  |
| Время заряда, ч                           | Быстрое 0,2, стандартное 0,5                                                           |
| Температурный режим заряда и разряда, °С  | $-50...+65$                                                                            |
| Условия хранения                          | В течение месяца $-(20-45)$ °С,<br>в течение года $(-20...+20)$ °С, влажность $< 70\%$ |
| Размеры                                   | Диаметр: 66 мм, длина: 160 мм (210 мм с винтом)                                        |
| Размеры винта                             | M12 × 1,75 мм                                                                          |
| Химический состав                         | Li4Ti5O12                                                                              |
| Вес, гр.                                  | 1180                                                                                   |

Металлическая труба диаметром 80 мм вмораживается в лед, обеспечивая постановку гидрофона. После установки труба замерзает вместе с кабелем. При демонтаже труба выламывается из льда вместе с кабелями и отправляется в лабораторию для размораживания. Наледная сеймостанция может быть использована как полностью автономный прибор с внутренним накоплением данными и последующим считыванием при обслуживании станции, а также с использованием беспроводной системы передачи данных (СПД), предназначенной для обмена ими по радиоканалу между регистратором ДЕЛЬТА-03М и управляющим компьютером.

Беспроводной мост для удаленной передачи данных построен на основе секторальной антенны Ubiquiti AirMax Sector 2G-16-90 и круговой антенны Ubiquiti AirMax Omni 2G-12, оснащенных модемами беспроводной передачи данных Ubiquiti Rocket M2. Технические параметры моста приведены в табл. 5, схема и фото — на рис. 4. Антенны СПД, а также GPS-антенна, устанавливаются на металлической мачте диаметром 80 мм. При правильном монтаже и отсутствии помех СПД обеспечивает передачу данных в полудуплексном режиме со скоростью до 150 Мбит/с и дальностью связи, в паре с антеннами Ubiquiti Air Max может достигать 50 км при благоприятных условиях.

Оператор может удаленно настроить или проверить точное время, изменить режимы работы регистратора сейсмических сигналов ДЕЛЬТА-03М, скопировать накопленную сейсмологическую информацию и подготовить носитель к приему новых данных дистанционно. Помимо собственно сигналов от датчиков доступная информация включает также температуру в контейнере, азимут и наклон контейнера, напряжение АКБ. Анализ этой информации позволяет получить заключение о работоспособности станции и при необходимости принять решение о ее посещении.

Таблица 5

**Основные технические характеристики беспроводного моста  
Ubiquiti Rocket M2 + Ubiquiti AirMax Sector 2G16–90 + Ubiquiti AirMax Omni 2G-12**

| Технические характеристики                                | Численные значения     |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| Рабочая частота, ГГц                                      | 2,4                    |
| Способ передачи данных                                    | Полудуплексный         |
| Внешний интерфейс                                         | Ethernet 10/100 Base-T |
| Напряжение питания радиомодема, В                         | 12                     |
| Мощность, потребляемая радиомодемом в режиме передачи, Вт | 6,5                    |
| Скорость передачи данных не менее, Мбит/с                 | 150                    |
| Максимальная дальность связи, км                          | 50                     |
| Масса радиомодема, кг                                     | 0,4                    |
| Рабочая температура, °C                                   | –30...+60              |

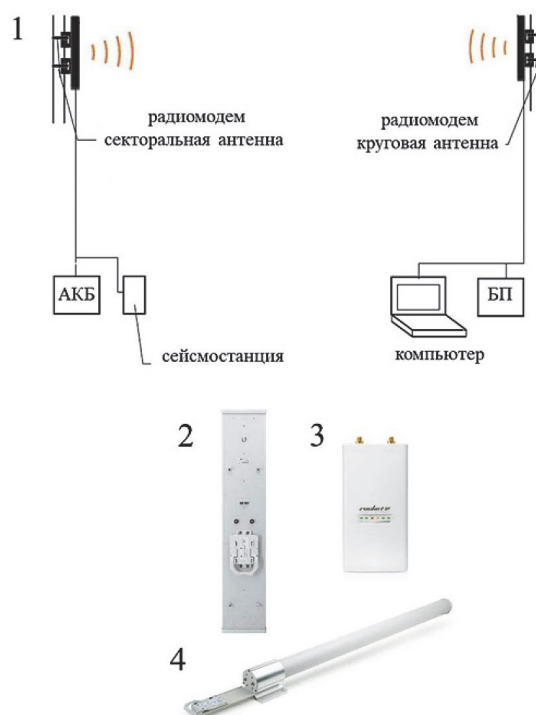


Рис. 4. Расположение элементов беспроводного моста для удаленной передачи данных:

- 1 — схема монтажа беспроводной СПД;  
2 — секторальная антенна Ubiquiti AirMax Sector 2G- 16–90;  
3 — модем СПД Ubiquiti Rocket M2;  
4 — круговая антенна Ubiquiti AirMax Omni 2G-12

Способы установки станций и решаемые с их помощью научные задачи. В зависимости от целей исследования наледная сейсмостанция может быть использована как в одиночной постановке, так и в составе сети сейсмостанций. На рис. 5 показаны примеры расстановки наземных станций в дельте р. Лены по схеме локальной сети и малоапертурной сейсмогруппы. Апертура локальной сети, как правило, несколько десятков километров, в то время как апертура сейсмогруппы — в пределах нескольких километров.

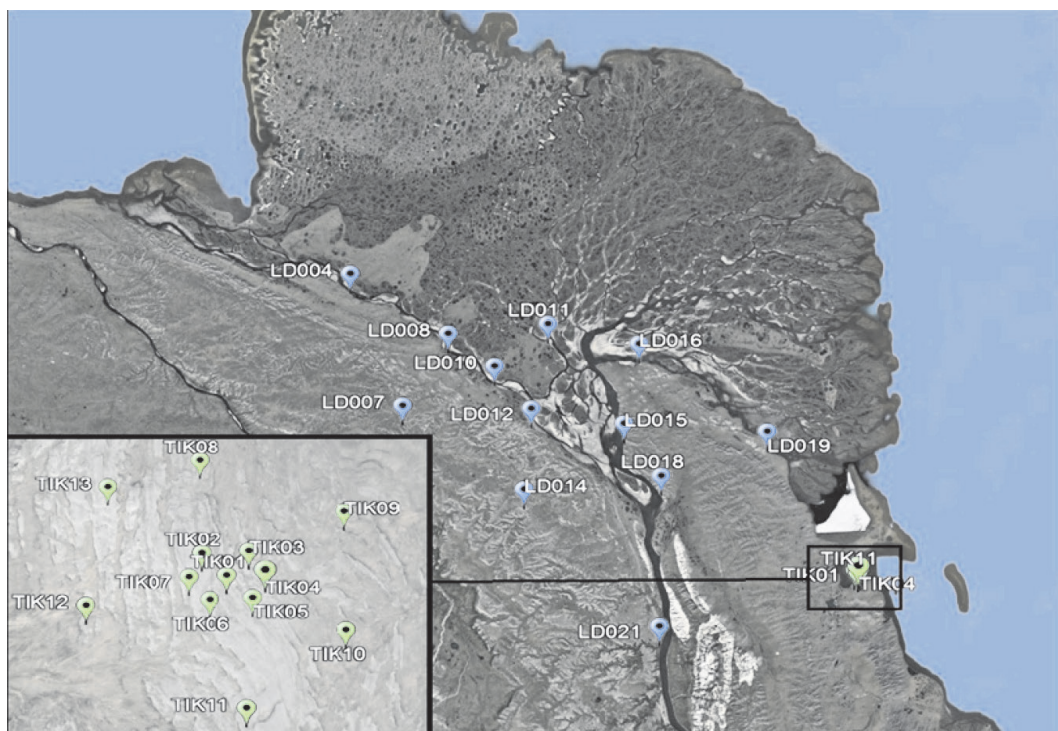


Рис. 5. Пример расстановки сети сейсмостанций в дельте р. Лены

Условные обозначения:

- синие значки — по схеме локальной сети;  
зеленые значки — по схеме малоапертурной сейсмогруппы

### Обсуждение (Discussion)

Развертывание сети сейсмостанций позволяет решить следующие задачи:

- регистрация сигналов от локальных и удаленных землетрясений и определение их основных параметров: расположение эпицентра и магнитуды, составление каталога и графика повторяемости землетрясений;
- выявление взаимосвязи зарегистрированных землетрясений с разломными зонами, их картирование, уточнение и кластеризация расположения эпицентров, выявление и анализ роев землетрясений;
- изучение взаимосвязи сейсмичности с другими геологическими опасностями, такими как оползни, цунами, массированное выделение геофлюидов из осадков и т. д.;
- мониторинг льдотрясений, динамики ледников и других процессов в криосфере;
- определение скоростных разрезов коры и верхней мантии методами пассивной сейсмотомографии, использующей как сигналы от локальных и удаленных землетрясений, так и сейсмические шумы;
- обобщение и комплексный анализ всего полученного объема данных, их сейсмологическая, сеймотектоническая и геодинамическая интерпретация.

#### Потенциальное применение

Обширность субарктических и арктических акваторий России приводит к возможности широкого применения описанного оборудования. Например, в качестве пилотного применения наледной сейсмостанции для решения задач по сеймотектонике хорошо подходит Беломорский регион, который является одним из наиболее тектонически активных районов в пределах всей Восточно-Европейской платформы (ВЕРП). Данные за исторический и инструментальный периоды наблюдений указывают на повышенную сейсмическую активность западной части региона, особенно в районе Кандалакшского грабена — главной активной структуры Белого моря [7]–[10].

В рельефе кристаллического фундамента северо-восточного сегмента ВЕП выделяется система рифтогенных желобов, получивших название *рифтовой системы Белого моря* (РСБМ), которые от Белого моря погружаются к юго-востоку под чехол Мезенской синеклизы. Современная сейсмичность Беломорского региона проявляется в виде землетрясений небольшой магнитуды. Распределение эпицентров в Беломорском регионе демонстрирует повышенную сейсмическую активность западной части бассейна и слабую активность восточной и центральной частей [8], [11].

В связи с тем, что наиболее активный район микрособытий расположен в северо-западной части Кандалакшского залива, целесообразной является установка наледной сейсмостанции в районе Кандалакшского залива. Станция может быть установлена напротив деревни Нильмогуба в 5–10 км от берега (в прямой видимости) для обеспечения беспроводного моста. Дополнительно несколько наземных сейсмостанций может быть установлено на Беломорской биологической станции МГУ и в деревне Черная речка. Таким образом, образуется треугольник со сторонами 10 км, 10 км и 5 км.

Основным потенциальным способом применения группы наледных сейсмостанций является установка малоапертурной сейсмогруппы в окрестности дрейфующей станции (ледовой платформы) «Северный полюс» для изучения тектоники и геодинамики Арктического бассейна [12]. В окрестности вмороженной платформы возможна установка сейсмогруппы из минимум четырех наледных сейсмостанций. Апертура сети 1–2 км, удаленность от судна до ближайшей сейсмостанции — 2–5 км.

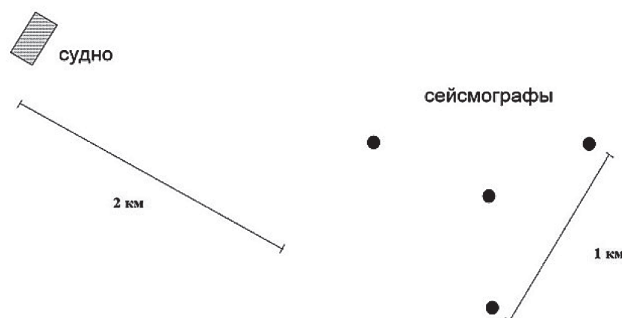


Рис. 6. Проект расположения сейсмостанций в окрестности вмороженной ледовой платформы «Северный полюс»

Беспроводной мост будет обеспечивать оперативный удаленный контроль и сбор сейсмических данных со станций на борт платформы. Записи сейсмостанций можно использовать не только для исследования сейсмичности, но и для сейсмотомографии пассивными методами с применением как сигналов от локальных и удаленных землетрясений, так и сейсмических шумов. Проект расположения станций приведен на рис. 6.

### Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Представленный дизайн и прототип наледной сейсмостанции для регистрации землетрясений и сейсмических шумов в арктических морях, а также концепция их использования демонстрируют возможность решения широкого спектра сейсмологических задач за счет долговременного мониторинга сейсмических сигналов со стационарного или дрейфующего льда.
2. Необходимость долговременного мониторинга в арктических и субарктических акваториях России со льда, а также совершенствование соответствующей аппаратуры обусловлены большим научным интересом к сложной геодинамике и тектонике региона и необходимостью оценки различных геологических опасностей в процессе активного освоении Арктики и формирования там критической инфраструктуры.
3. Безусловно, к преимуществам представленного оборудования можно отнести его приспособленность к суровым арктическим условиям, возможность удаленной передачи данных, а также использование отечественной аппаратурной базы.

### Источники финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2021–0011 (разработка и описание аппаратуры) при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00533 (описание способов расстановки станций и решаемых задач) и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-45.2022.1.5 (описание потенциальной области применения станций).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schlindwein V. Seismoacoustic evidence for volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean / V. Schlindwein, C. Müller W., Jokat // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32. — Is. 18. DOI: 10.1029/2005GL023767.
2. Schlindwein V. Microseismicity of the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: a pilot study / V. Schlindwein, C. Müller, W. Jokat // *Geophysical Journal International*. — 2007. — Vol. 169. — Is. 1. — Pp. 100–112. DOI: 10.1111/j.1365–246X.2006.03308.x.
3. Schlindwein V. Mid-ocean-ridge seismicity reveals extreme types of ocean lithosphere / V. Schlindwein, F. Schmid // *Nature*. — 2016. — Vol. 535. — Pp. 276–279. DOI: 10.1038/nature18277.
4. Schlindwein V. Location and source mechanism of sound signals at Gakkel ridge, Arctic Ocean: Submarine Strombolian activity in the 1999–2001 volcanic episode / V. Schlindwein, C. Riedel // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2010. — Vol. 11. — Is. 1. DOI: 10.1029/2009GC002706.
5. Koulakov I. Low-degree mantle melting controls the deep seismicity and explosive volcanism of the Gakkel Ridge / I. Koulakov, V. Schlindwein, M. Liu, T. Gerya, A. Jakovlev, A. Ivanov // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41467-022-30797-4.
6. Писарев С. В. Современные дрейфующие роботизированные устройства для контактных измерений физических характеристик арктического бассейна / С. В. Писарев // *Океанологические исследования*. — 2019, — Т. 47. — № 4. — С. 5–31. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).1.
7. Никонов А. А. Исторические землетрясения / А. А. Никонов // *Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления* / Под ред. Н. В. Шарова. — Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. — С. 192–213.
8. Ассиновская Б. А. Инструментальные данные о землетрясениях Карельского региона / Б. А. Ассиновская // *Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления*; под ред. Н. В. Шарова. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. — С. 213–229.
9. Балувев А. С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1 : 1500000) / А. С. Балувев, В. А. Журавлев, Е. Н. Терехов, Е. С. Пржиялговский. — М.: ГЕОС, 2012. — 104 с.
10. Морозов А. Н. Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений / А. Н. Морозов, Н. В. Ваганова, В. Э. Асминг, Я. А. Михайлова // *Физика Земли*. — 2018. — № 2. — С. 104–123. DOI: 10.7868/S0002333718020096.
11. Никонов А. А. Голоценовая тектоническая активность и сейсмичность Беломорского бассейна [Электронный ресурс] / А. А. Никонов, С. В. Шварев. — Режим доступа: <https://ifz.ru/nauka/fundamentalnyie/golocenovaya-tektonicheskaya-aktivnost-i-sejsmichnost-belomorskogo-bassejna> (дата обращения: 11.05.2017).
12. Рогинский К. А. Сейсмогруппа для регистрации землетрясений в онлайн режиме вдоль маршрута дрейфа платформы «Северный полюс» / К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа, А. А. Крылов // *Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021): материалы XVII Всеросс. науч.-техн. конф.* — М.: — ИО РАН им. П. П. Шишова, 2021. — С. 62–64.

### REFERENCES

1. Schlindwein, Vera, Christian Müller, and Wilfried Jokat. “Seismoacoustic evidence for volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean.” *Geophysical Research Letters* 32.18 (2005). DOI: 10.1029/2005GL023767.
2. Schlindwein, Vera, Christian Müller, and Wilfried Jokat. “Microseismicity of the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: a pilot study.” *Geophysical Journal International* 169.1 (2007): 100–112. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03308.x.
3. Schlindwein, Vera, and Florian Schmid. “Mid-ocean-ridge seismicity reveals extreme types of ocean lithosphere.” *Nature* 535 (2016): 276–279. DOI: 10.1038/nature18277.

4. Schlindwein, Vera, and Carsten Riedel. "Location and source mechanism of sound signals at Gakkel ridge, Arctic Ocean: Submarine Strombolian activity in the 1999–2001 volcanic episode." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11.1 (2010). DOI: 10.1029/2009GC002706.
5. Koulakov, Ivan, Vera Schlindwein, Mingqi Liu, Taras Gerya, Andrey Jakovlev, and Aleksey Ivanov. "Low-degree mantle melting controls the deep seismicity and explosive volcanism of the Gakkel Ridge." *Nature Communications* 13.1 (2022): 1–10. DOI: 10.1038/s41467-022-30797-4.
6. Pisarev, C. V. "Modern drifting robotized devices for contact measurements of physical characteristics of the Arctic basin." *Journal of Oceanological Research* 47.4 (2019): 5–31. DOI: 10.29006/1564–2291.JOR-2019.47(4).1.
7. Nikonov, A. A. "Istoricheskie zemletryaseniya." *Glubinnoe stroenie i seismichnost' Karel'skogo regiona i ego obramleniya*. Edited by N. V. Sharov. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2004. 192–213.
8. Assinovskaya, B. A. "Instrumental'nye dannye o zemletryasenyakh Karel'skogo regiona." *Glubinnoe stroenie i seismichnost' Karel'skogo regiona i ego obramleniya*. Edited by N. V. Sharov. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2004. 213–229.
9. Baluev, A. S, V. A. Zhuravlev, E. N. Terekhov, and E. S. Przhivalgovskii. *Tektonika Belogo morya i prilagayushchikh territorii*. M.: GEOS, 2012.
10. Morozov, A. N., N. V. Vaganova, Y. A. Mikhailova, and V. E. Asming. "Seismicity of the north of the Russian plate: relocation of recent earthquakes." *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 54.2 (2018): 292–309. DOI: 10.1134/S1069351318020143
11. Nikonov, A. A., and S. V. Shvarev. "Golotsenovaya tektonicheskaya aktivnost' i seismichnost' Belomorskogo bassejna." Web. 11 May 2017 <<https://ifz.ru/nauka/fundamentalnyie/goloczenovaya-tektonicheskaya-aktivnost-i-seismichnost-belomorskogo-bassejna>>.
12. Roginsky, K. A., O. Yu. Ganzha, and A. A. Krylov. "Seismic group for registering earthquakes in online mode along the drift route "north pole" platform." *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2021). Materialy XVII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. IO RAN, 2021. 62–64.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Крылов Артём Александрович** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова  
Российской Академии наук  
117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36  
e-mail: [artiomkrlyv@ocean.ru](mailto:artiomkrlyv@ocean.ru)

**Рогинский Константин Александрович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова  
Российской Академии наук  
117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36  
e-mail: [roginskiy@list.ru](mailto:roginskiy@list.ru)

**Ганжа Олег Юрьевич** — главный специалист  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова  
Российской Академии наук  
117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36  
e-mail: [ganzhaoy@mail.ru](mailto:ganzhaoy@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Krylov, Artem A.** — PhD,  
Senior Research Scientist  
P. P. Shirshov Institute of Oceanology  
of Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovsky prospekt,  
Moscow, 117997,  
Russian Federation  
e-mail: [artiomkrlyv@ocean.ru](mailto:artiomkrlyv@ocean.ru)

**Roginskiy, Konstantin A.** — PhD,  
Senior Research Scientist  
P. P. Shirshov Institute of Oceanology  
of Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovsky prospekt,  
Moscow, 117997,  
Russian Federation  
e-mail: [roginskiy@list.ru](mailto:roginskiy@list.ru)

**Ganzha, Oleg Yu.** — Chief Specialist  
P. P. Shirshov Institute of Oceanology  
of Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovsky prospekt,  
Moscow, 117997,  
Russian Federation  
e-mail: [ganzhaoy@mail.ru](mailto:ganzhaoy@mail.ru)