

Оптимальная методика использования радиобуев в морской сейсморазведке

- Табырца С.Н. Леонова Н.Е., Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), г. Санкт-Петербург.
- Пискарев А.Л., Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), Санкт-Петербургский государственный университет Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В регионах со сложной ледовой обстановкой сейсморазведочные работы модернизируют под поставленные задачи с учетом имеющегося оборудования. В статье рассматриваются некоторые особенности применения радиоакустических буй в комплексе с методом МОВ ОГТ на примере опыта зарубежных и российских исследований.

Ключевые слова: сейсморазведка, радиоакустические буй, сонобуй, МОВ-МПВ, МОВ ОГТ, геофизические исследования, Северный Ледовитый океан.

Применение радиобуев в морской сейсморазведке в Арктике, а также и в Антарктике, потребовало разработки специальной методики, учитывающей экстремальные условия проведения работ в полярных регионах. На выбор оптимальной методики влияет много факторов, – начиная от характеристик судна, с которого ведутся работы, и заканчивая непредсказуемо меняющейся ледовой обстановкой. В данной статье основное внимание уделено тем условиям и параметрам использования радиобуев, которые, по опыту выполненных работ, представляются наиболее важными или необходимыми для учета при планировании работ в полярных регионах.

Радиобуи, радиоакустические буй или сонобуй применяются в сейсморазведке в сложных ледовых условиях, когда нет возможности провести традиционные работы МОВ ОГТ с длинной косой по причине высокой вероятности оборвать ее и потерять во льдах. В таких случаях выполняется комплекс сейсморазведочных работ – МОВ ОГТ – с короткой косой (200-600м) и попутной расстановкой

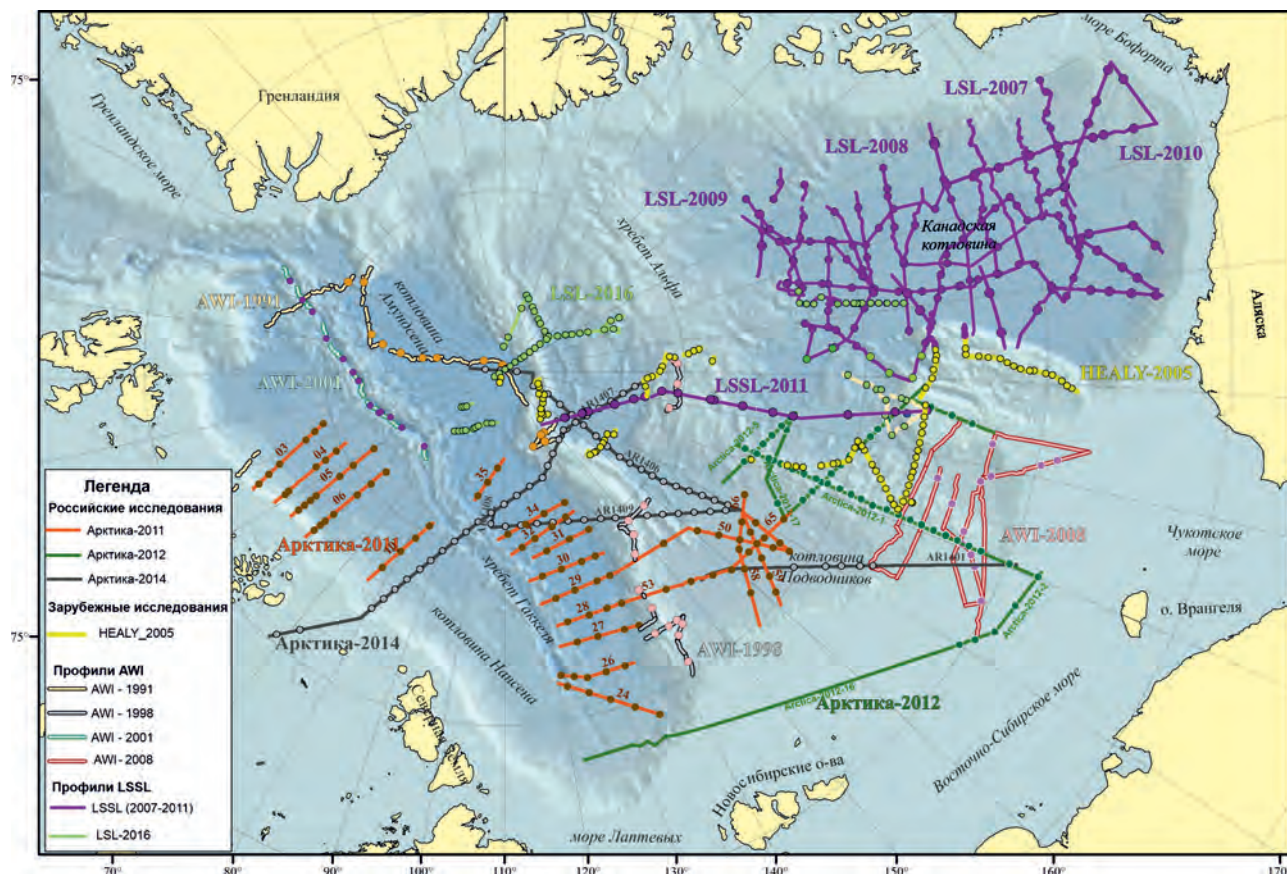
радиобуев по методике МОВ-МПВ [Буценко В.В. и др., 2018; Казанин Г.С. и др., 2017]. На Рис.1 показана схема профилей МОВ ОГТ с положением радиобуев (показаны точками на профилях МОВ ОГТ), выполненных в северных арктических широтах.

Комплекс работ

Основными работами в данном комплексе являются работы МОВ ОГТ с короткой косой. Работы проводятся с применением пневмоисточника или группы пневмоисточников небольшого объема (6-20л), использующихся для работ МОВ ОГТ. Радиобуи расставляются попутно с проходом по профилю судна с сейсморазведочной косой, и одновременно с производимым отстрелом. Методика отработки данного комплекса работ в российских экспедициях «Арктика 2011-2014» показана на Рис.2.

Обоснование применения комплекса методов

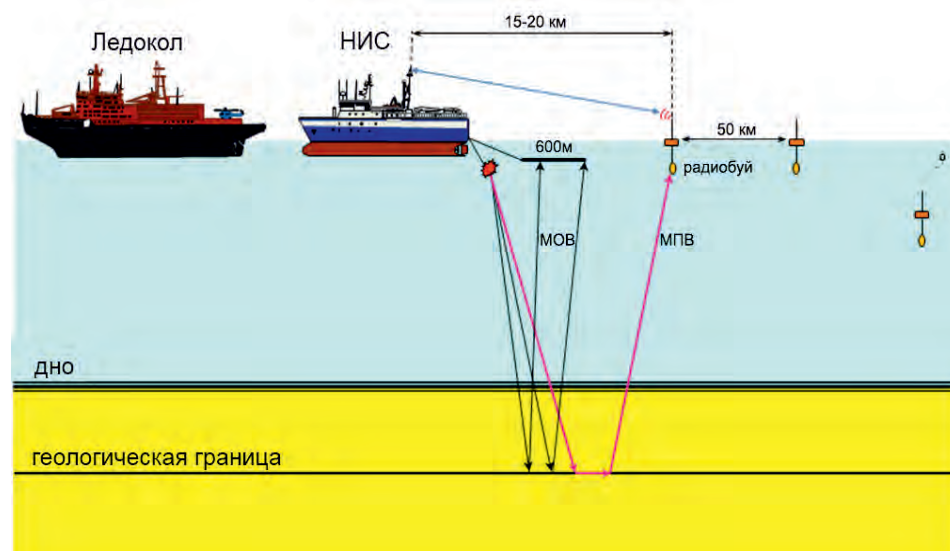
Название методики МОВ-МПВ означает, что регистрируются и, при дальнейшей обработке, используются оба типа



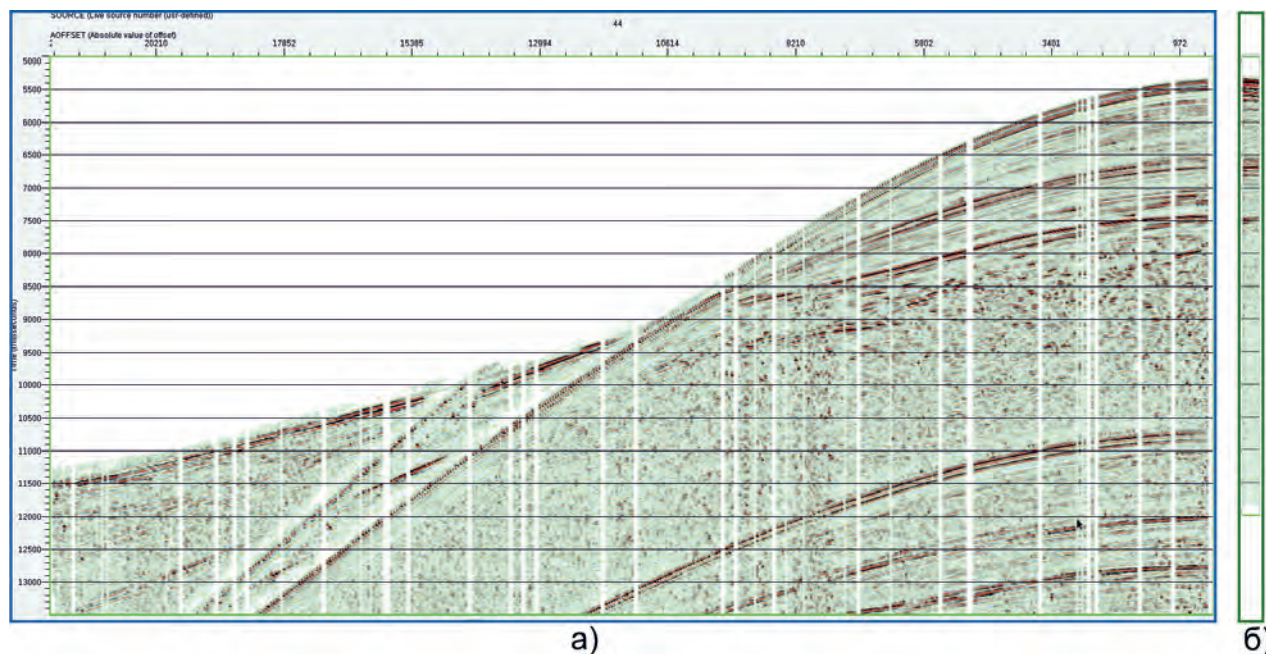
▲ Рис. 1. Схема расположения сейсморазведочных профилей работ МОВ ОГТ с расположением радиобуев.

волн – и отраженные, и преломленные (рефрагированные). Отраженные волны на сейсмограммах МОВ-МПВ регистрируются на больших удалениях (Рис.3) по сравнению с отраженными волнами на сейсмограммах МОВ ОГТ (длина приемной косы в данном примере 600 м), и именно наличие кривизны годографа отраженных волн на сейсмограммах

МОВ-МПВ позволяет при обработке определить скоростные параметры пород, слагающих разрез [Tabyrtsa S.N. et al., 2023]. Но при попутной расстановке радиобуев зондирования МОВ-МПВ являются однонаправленными, что приводит к искаженным значениям скоростей при сложном рельефе границ. Определить же положение и рельеф



◀ Рис. 2. Методика отработки профиля комплексом методов МОВ ОГТ и МОВ-МПВ с применением радиобуев.



▲ Рис. 3. Сравнение сейсмограмм по данным МОВ-МПВ (а) и МОВ ОГТ (б) в одном пикете профиля 1407 (экспедиции «Арктика-2014»).

границ возможно по данным МОВ ОГТ. Таким образом, только при совместной обработке данных МОВ ОГТ и МОВ-МПВ можно получить достоверные скоростные характеристики среды и рельеф границ.

Радиобуи

Конструктивно радиобуи могут выглядеть по-разному (примеры показаны на Рис. 4), но принцип их работы схожий: приемник (один или несколько гидрофонов), погружен в воду на глубину, опреде-

▼ Рис. 4. Радиобуи: а) фото из американо-канадской экспедиции LSSL [Mosher, D. et al., 2013], б) фото из российской экспедиции («Арктика-2014»).



ляемую конструкцией, что для радиобуя на Рис. 4а – составляет 60 м, а для радиобуя на Рис. 4б – 8 м. Данные с радиобуя транслируются через передающую антенну на судно.

Представленные для примера на рисунке буи являются самозатопляемыми буями одноразового использования, но работы МОВ-МПВ проводятся также и с буями, извлекаемыми на борт после получения данных [Leitchenkov, G. et al., 2008].

В сложных ледовых условиях использованию радиобуев всегда отдавалось предпочтение перед применением донных станций, по причине высокой стоимости последних, а также как следствие негативного опыта, показавшего, что в условиях сложной ледовой обстановки извлечение донных станций практически невозможно. Опыт китайских коллег в 2021 и 2023 году [Weiwei Ding et al., 2022; Zhang, T. et al., 2024] при работах на хребте Гаккеля показал, что хотя работы с донными станциями могут быть успешно проведены и в сложных ледовых условиях, время, потраченное на ожидание всплытия и поиск одной

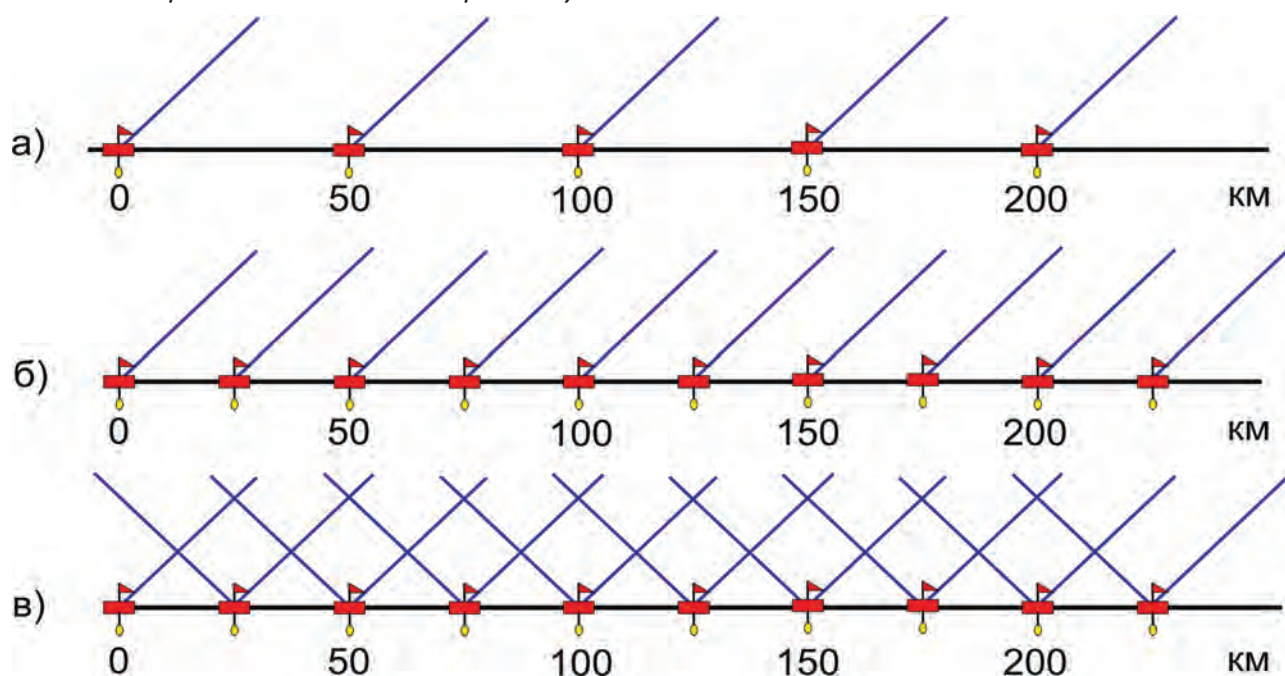
станции, оказавшейся подо льдом, в среднем, составило около трех часов. В экспедиции «JASMINe» в 2021г было поставлено также 120 сонобучев. [Weiwei Ding et al., 2022].

Особенности расстановки радиобуев

При отработке профилей в российских экспедициях «Арктика 2011-2014», как показано на Рис. 2, большая часть радиобучев расставлялась по ходу судна каждые 50 км. На Рис. 5а показан вариант такой расстановки, – черная линия показывает положение профиля с радиобуями, расположенными через каждые 50 км, синяя линия, выходящая по диагонали, имитирует одну ветвь полученного зондирования длиной 30 км (максимальная длина зарегистрированных удалений в экспедициях «Арктика 2011-2014»).

В результате дальнейшей обработки данных создаются либо скоростные колонки, в которых скорости определяются в одной точке по профилю, обычно это точка постановки, либо строится глубинная скоростная модель, и тогда информация о распределении скоростей между буями интерполируется. В дан-

▼ Рис. 5. Варианты постановки радиобуев.



ном случае (Рис. 5а) информация интерполируется минимум на 20 км, и потеря информации с одного радиобуя оказывает значительное влияние на конечный результат работы, так как геологические условия, а значит и скоростные характеристики среды, через 70 км могут значительно измениться. Чем чаще планируется постановка буев, тем надежнее будет результат (Рис. 5б). Встречная система зондирования позволяет учесть влияние рельефа (Рис. 5в). Такой вариант расстановки возможен, если постановка радиобуев производится до прохода судна-источника впереди профиля, например, с судна-проводчика, если такое судно участвует в работах, или с вертолета. [Mosher, D. et all., 2013; Chain, D et all., 2015, Gårdfeldt, K. et all., 2017).

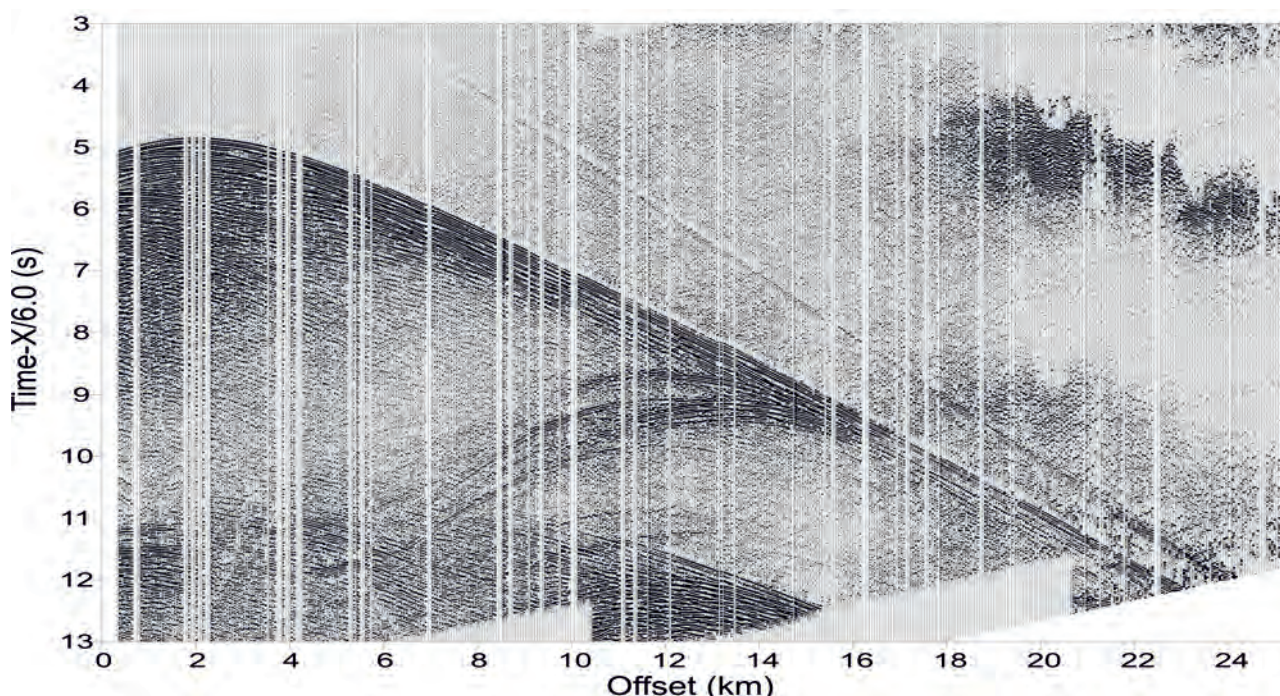
Можно сделать вывод, что постановка буев через небольшие расстояния (5-30 км) с возможностью пересечения годографов – наиболее предпочтительный вариант (см. Рис. 5 в), но на практике, из-за необходимости выполнить большой объем работ при ограниченном количестве буев, постановка радиобуев осуществляется с большим интервалом (см. Рис. 5 а), и потеря информации с одной

станции может значительно повлиять на результат.

При сбросе радиобуев также важно заранее выбрать будущее место постановки. Предпочтение отдается местам с ровным рельефом и желательно горизонтально-слоистой средой на протяжении того отрезка профиля, на котором планируется регистрация [Chain, D et all., 2015]. Постановка буев в заведомо слоисто-горизонтальной среде значительно облегчает дальнейшую обработку и интерпретацию данных. Работы в условиях сильно расчлененного рельефа с регистрацией однонаправленной ветви сейсмограммы зондирования приводят к затруднениям в определении скоростей.

На Рис. 6 приведен пример сейсмограммы зондирования, полученной в экспедиции «Арктика-2014» на хребте Гаккеля. На сейсмограмме в зоне отраженных волн присутствуют дифрагированные волны, а преломленные волны не выходят в первые вступления. Такие сейсмограммы в дальнейшей обработке обычно не используются.

▼ Рис. 6. Сейсмограмма зондирования в редукции 6 км/с (хребет Гаккеля, «Арктика-2014»).



Особенности регистрации данных

Помимо выбора точки постановки радиобуя, на результат влияют также качество и дальность приема радиосигнала от радиобуя, которые могут зависеть от:

- Конфигурации приемной антенны [Chain, D et all., 2015] и ее расположение над уровнем моря [Coackley B., et all., 2005];
- Возможного влияния расположенных вблизи других антенн, передающих радиосигналы [Coackley B., et all., 2005];
- Помех от вертолета, если он работает одновременно с сейсморазведочными работами [Chain, D et all., 2015];
- Сложной ледовой обстановки, наличия торосов [Coackley B., et all., 2005], а также обледенения антенн;
- Технических особенностей радиобуя.

При попутных работах с МОВ ОГТ, чаще всего используется одна пушка или группа пушек с общим объемом от 6-20 л, что в среднем дает возможность регистрации сигнала на расстоянии до 20-30

км. Но результаты работ, где работы МОВ-МПВ выполнялись не попутно, а независимо от МОВ ОГТ с более мощным источником объемом 40-80 л [Leitchenkov, G. et all., 2008] характеризуются хорошим качеством сигнала и удалениями до 40-55 км, что является прекрасным результатом для данного вида работ.

Еще одним важным фактором, влияющим на дальнейшую обработку, является точность определения местоположения буя в каждый момент времени его передачи данных на судно. Пример дрейфа буя в экспедиции «Арктика-2011» показан на Рис. 7. Для учета дрейфа может использоваться GPS система, установленная на радиобуй для передачи навигационных данных.

В экспедиции «Арктика-2011» минимальный дрейф составлял 400 м, а максимальный – 4,7 км, в среднем же радиобуй дрейфовал на 1-1,5 км. Без данных навигации добавляется необходимость уточнения местоположения буя с учетом дрейфа. Задача усложняется, если к тому

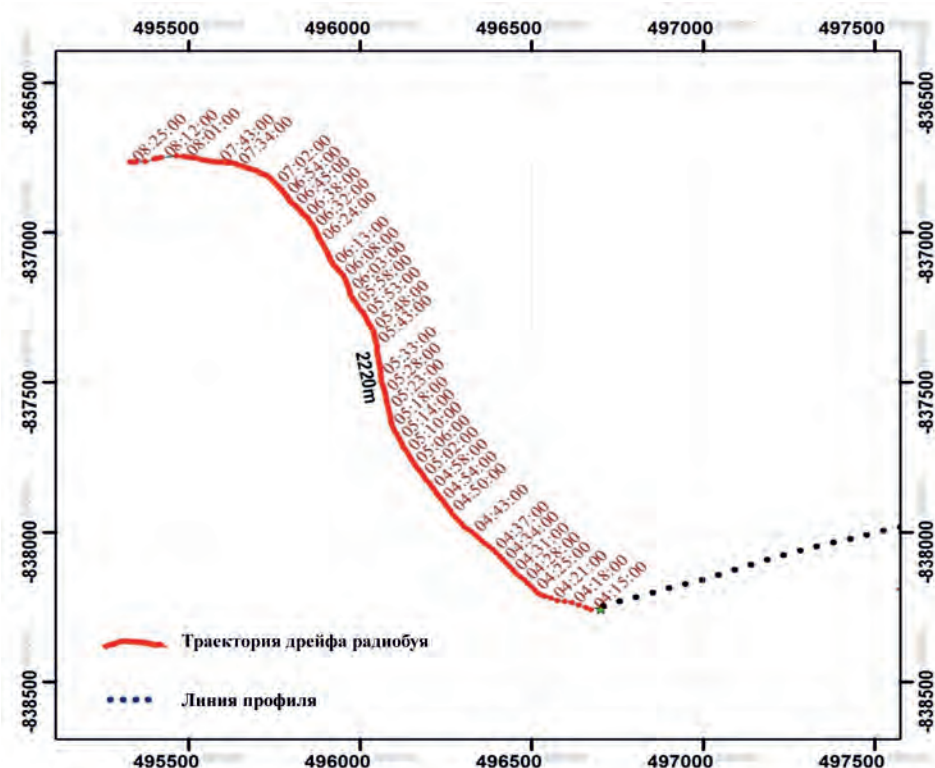


Рис. 7.
Пример дрейфа
радиобуя
(экспедиция
«Арктика-2011»).

же судно-источник отклоняется от линии профиля в силу сложной ледовой обстановки и не выдерживает заданную скорость судна (обычно 4-4,5 узла), что при отстреле с равномерным интервалом по времени, может привести к наложению или пропускам трасс в сейсмических файлах.

В российских экспедициях «Арктика-2011-2014» для определения местоположения радиобуев использовалась установленная на них GPS-система. В случаях, когда GPS система отсутствует необходимо выполнить корректировку местоположения с учетом дрейфа. [Chain, D et all., 2015; Evangelatos, J. et all., 2017; Bruguier, N. J., 1997].

Проведение работ с использованием радиобуев имеет свои преимущества и недостатки

Преимущества:

- Возможность проведения работ в сложных ледовых условиях;
- Проведение попутных работ с МОВ ОГТ с использованием одного источника, как следствие, экономия времени;
- Определение скоростных характеристик среды;
- Стоимость радиобуев ниже стоимости донных сейсмостанций.

Недостатки применения радиобуев:

- Чаще всего, одноразовое использование радиобуев;
- Необходимость учета дрейфа (если не установлена GPS-система);
- Влияние внешних факторов на передачу и качество данных;
- Как правило, максимальная длина удалений 20-30 км;
- Необходимость дополнения работ сейморазведочными работами МОВ ОГТ.

Выводы

При выборе оптимальной методики работ необходимо исходить из необходимости решения главной геологической задачи в запланированное время проведения полевых работ с учетом меняющейся ледовой обстановки. Методика зависит также и от бюджета работ и типа оборудования, которое предполагается использовать.

В идеальном варианте, работы МОВ-МПВ стоит проводить отдельно, расставляя радиобуи многоразового использования с установленной на них GPS системой с судна-проводника или вертолета через 5-30 км, а при отстреле использовать источник объемом от 20 л, и при возможности, собирать радиобуи и использовать повторно.

Однако в большинстве случаев, оптимальная методика работ – это комплекс сейморазведочных работ МОВ ОГТ и МОВ-МПВ, которые выполняются попутно. При этом радиобуи расставляются по возможности с меньшим расстоянием друг к другу в точках, определенных заранее, с учетом геологических условий и морфологии морского дна.

Литература

1. Буценко В.В., Киреев А.А., Безумов Д.В., Поселова Л.Г., Леонова Н.Е., Смирнов О.Е., Караев Г.Н., Жолондз А.С., Бруй Е.В., Табырца С.Н., Булаткина К.И. Согласованная скоростная модель и актуализированная карта мощности осадочного чехла Арктического бассейна на основе современной обработки новых сейсмических данных/ 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане: сб. науч.тр. ; под ред. В.Д. Каминского, Г.П. Аветисова, В.Л. Иванова. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. С. 171-180.
2. Казанин Г.С., Поселов В.А., Заяц И.В., Иванов Г.И., Макаров Е.С., Васильев А.С., Смирнов О.Е. Комплексные геофи-

зические исследования в районе центральной глубоководной части Северного Ледовитого океана, Разведка и охрана недр, №10, 2017, С.25-30.

3. Bruguier, N. J., and T. A. Minshall, Accurate modelling of sonobuoy refraction data to determine velocity variations in oceanic crust, *Marine Geophysical Researches* 19: 25–36, 1997.

4. Chian, D. and Lebedeva-Ivanova, N., 2015. Atlas of Sonobuoy Velocity Analyses in Canada Basin; Geological Survey of Canada, Open File 7661, 1 .zip file. doi:10.4095/29585

5. Coakley B., Kristoffersen Y., Hopper J.: Cruise Report for Underway Geophysics Program HLY 05-03, 84 p. University of New Hampshire (2005)

6. Evangelatos, J. et al. “The sedimentary and crustal velocity structure of Makarov Basin and adjacent Alpha Ridge.” *Tectonophysics* 696 (2017): 99-114.

7. Gårdfeldt, K., & Lindgren, Å. (2017). SWEDARCTIC Arctic Ocean 2016: Expedition Report.

8. Leitchenkov, G., Guseva, J., Gandyukhin, V. et al. Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies. *Mar Geophys Res* 29, 135–158 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11001-008-9051-z>

9. Mosher, D. & Chapman, C. & Shimeld, J. & Jackson, H. & Chian, Deping & Verhoef, J. & Hutchinson, D. & Lebedeva-Ivanova, Nina & Pederson, Richard. (2013). High Arctic marine geophysical data acquisition. *The Leading Edge*. 32. 524-536. DOI: 10.1190/tle32050524.1

10. Tabyrtsa, S.N., Zholondz, A.S., Polovkov, V.V. (2023). Joint Processing Technology of MCS Data (600 m Streamer) and Wide-Angle Reflection/refraction Seismic Sonobuoy Soundings Acquired in Ice Conditions During Expedition “ARCTIKA-2014”. In: Chaplina, T. (eds) *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-*

2023). CIWO 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47851-2_42

11. Weiwei Ding, Xiongwei Niu, Tao Zhang, Shangguo Chen, Shanhu Liu, Pingchuan Tan, Fansheng Kong, Zidi Jin, Songhua Huang, Chonghua Wei, Yinxia Fang, Qiuci Sun, Jiabiao Li, Submarine wide-angle seismic experiments in the High Arctic: The JASMINe Expedition in the slowest spreading Gakkel Ridge, *Geosystems and Geoenvironment*, Volume 1, Issue 3, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100076>.

12. Zhang, T., Li, J., Niu, X. et al. Highly variable magmatic accretion at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge. *Nature* 633, 109–113 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07831-0>.

Подробнее об авторах



Табырца
Светлана Николаевна
ведущий инженер,
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»



Леонова
Наталья Евгеньевна
ведущий инженер,
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»



Пискарев
Алексей Лазаревич
профессор, д.г.-м.н.,
ведущий инженер, ФГБУ
«ВНИИОкеангеология»,
Санкт-Петербургский
государственный
университет –
Институт наук о Земле.