

УДК 550.344

СЕЙСМОТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЛАПТЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПЕРВЫЙ ОПЫТ ГОДИЧНОЙ ПОСТАНОВКИ ДОННЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ НА ШЕЛЬФЕ

© 2020 г. А. А. Крылов^{a, b, *}, А. И. Ивашенко^a, С. А. Ковачев^a, Н. В. Цуканов^a, М. Е. Куликов^a, И. П. Медведев^a, Д. А. Ильинский^{a, b}, Н. Е. Шахова^{c, d}

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия

^bМосковский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

^cНациональный исследовательский Томский государственный университет, просп. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

^dInternational Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks,
Koyukuk Dr. str., 2160, PO Box 757340, Fairbanks, AK 99775 USA

*e-mail: artyomkrlv@ocean.ru

Поступила в редакцию 04.07.2020 г.

После доработки 07.08.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

Выполнен обзор современных представлений о сейсмотектонике и сейсмичности Лаптевоморского региона, главной особенностью которого является рифтовая система, простирающаяся на шельфе от континентального склона, к которому подходит срединно-океанический хребет Гаккеля, до побережья материка. Существуют несколько моделей развития региона на современном этапе, но ни одной из них нельзя отдать предпочтение из-за недостатка локальных инструментальных наблюдений за микросейсмичностью шельфа, характерной для рифтовых зон. Альтернативным подходом является установка донных сейсмических станций непосредственно на шельфе. В ходе 73-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” была установлена временная сеть, состоящая из 7 широкополосных донных сейсмостанций на шельфе моря Лаптевых. Сравнительный анализ спектров шумов, вычисленных по записям гидрофона, донного сейсмографа и волнографа, показал, что амплитудный уровень шума сильно зависит от ветрового волнения, которое, в свою очередь, зависит от морского ледяного покрова, поэтому регистрационные возможности локальной группы донных сейсмостанций ограничены зимними периодами наблюдений.

Ключевые слова: сейсмотектоника, сейсмичность, шельф, море Лаптевых, временные локальные сети наблюдений, донные сейсмостанции

DOI: 10.31857/S0203030620060140

ВВЕДЕНИЕ

Шельф моря Лаптевых является одним из ключевых регионов Земли, где срединно-океанический спрединговый хребет Гаккеля переходит в континентальную рифтовую зону. Основная цель 73-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, который состоялся в море Лаптевых в период с 21 сентября по 25 октября 2018 г., — выполнение комплекса биогеохимических, геофизических и геологических исследований в рамках изучения выходов метана (сипов) из донных отложений, которые были впервые обнаружены в 2011 г. и количественно оценены [Shakhova et al., 2015]. Постановка локальной сети донных сейсмостанций была одной из составляющих данного проекта. В результате 20-летних исследований, выполненных в рамках международного проекта ISSS (International Siberian Shelf Studies) в морях Восточ-

ной Арктики (МВА), было показано, что аномалии растворенного метана и массивованная разгрузка пузырькового метана из донных осадков в водную толщу—атмосферу обусловлены деградацией подводной мерзлоты [Шахова и др., 2009; Shakhova et al., 2010, 2014, 2017, 2019].

По мнению многих ученых, сейсмотектонические события могут влиять на интенсивность разгрузки метана и других компонентов геофлюидов [Field, Jennings, 1987; Kelley et al., 1994; Kusku et al., 2005; Бондур, Кузнецова, 2012; Обжиров, 2018; Собисевич и др., 2018]. В данном случае речь идет о влиянии сейсмотектонической активности на потоки пузырькового метана на шельфе моря Лаптевых, где находится более 80% всей подводной мерзлоты.

Но прежде необходимо изучить условия эксплуатации донных сейсмостанций в суровой об-

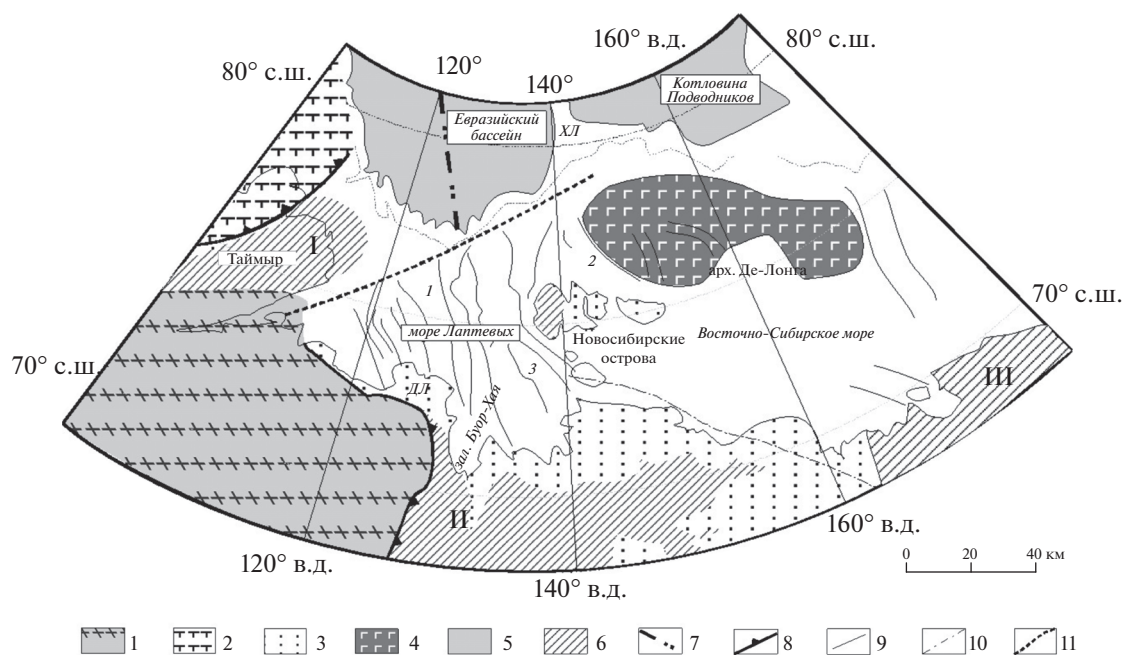


Рис. 1. Схема главных структурных элементов континентальной окраины моря Лаптевых и сопредельных областей, по [Драчев, 2000].

1 – Восточно-Сибирский кратон; 2 – Карский массив; 3 – кайнозойские отложения; 4 – вулканическое поднятие Де-Лонга; 5 – океанические отложения; 6 – покровно-складчатые системы: Таймырская (I), Верхояно-Колымская (II), Новосибирско-Чукотская (III); 7 – осевая зона хр. Гаккеля; 8 – надвиговые границы складчатых поясов; 9 – сбросы (рифты: 1 – Усть-Ленский, 2 – Новосибирский, 3 – Усть-Янский); 10 – Южно-Анжуйская шовная зона; 11 – разлом Хатанга–Ломоносова; ХЛ – хребт Ломоносова, ДЛ – дельта Лены.

становке моря Лаптевых, характерные параметры шумов и регистрационные возможности станций в разное время года. Кроме того, новые данные о сейсмичности и современной тектонике Лаптевоморского региона крайне необходимы для инженерных работ по детальной оценке сейсмической опасности для обслуживания функционирования Северного морского пути и разработки месторождений углеводородов на российском арктическом шельфе.

СЕЙСМОТЕКТОНИКА ЛАПТЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА

Лаптевоморский сегмент Северного Ледовитого океана включает акваторию шельфа моря Лаптевых и сопряженные структуры побережья и простирается от Таймырского полуострова на западе до Новосибирских островов на востоке (рис. 1). Здесь сочленяются структуры Сибирской платформы, Таймырской, Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской покровно-складчатых систем. Характерной особенностью моря Лаптевых является широкое развитие крупных рифтовых структур, простирающихся на шельфе от континентального склона, к которому подходит юго-восточный фланг хребта Гаккеля, входящего в мировую систему подводных срединно-океани-

ческих хребтов и протягивающегося более чем на 1700 км при ширине 80–160 км из северной Атлантики [Богданов и др., 1998]. Он характеризуется довольно высокой сейсмической активностью. В то же время рифтовая зона на продолжении хребта Гаккеля на шельфе моря Лаптевых имеет диффузную сейсмичность [Аветисов, 2000, 2002]. Эта зона до 500 км шириной и около 700 км протяженностью образована серией грабенов, заполненных осадками. Основанием для рифтовых зон служат, вероятнее всего, позднепалеозойские–мезозойские складчатые пояса [Drachev et al., 2010], структурно-вещественные комплексы которых перекрыты верхнемеловыми и кайнозойскими осадками мощностью от 1.5 до 15 км. Сдвиговая зона Хатанга–Ломоносов является границей между хребтом Гаккеля и рифтовой системой моря Лаптевых [Драчев, 2000, 2002].

Сейсмические пояса Лаптевоморского региона являются границами между Евразийской и Северо-Американской плитами [Богданов и др., 1998; Аветисов, 2000]. Самая западная граница сейсмической области расположена вблизи границы мощной литосферы Сибирской плиты, а глубины очагов землетрясений в основном не превышают 25 км на континенте и 10 км под океаном [Franke et al., 2000; Fujita et al., 2009]. Предполагается, что полюс вращения расположен, ве-

роятнее всего, к югу от дельты р. Лена. Анализ данных по эпицентрам землетрясений указывает на то, что фазы сжатия и растяжения сменяют друг друга в пределах очень небольших расстояний. Возможно, это связано с близостью полюса вращения. Растяжение коры согласно [Franke et al., 2000] происходит в восточной части района моря Лаптевых. Решения механизмов очагов землетрясений недостаточно надежны и дают значительный разброс в ориентировке плоскостей разрыва, что не позволяет более детально описать тектонические смещения.

Сейсмически активные структуры, с которыми связано формирование окраинно-континентальной кайнозойской рифтовой системы, представлены преимущественно северо-западными сбросами и субортогональными им сдвигами. Сбросы ограничивают систему узких грабенов и прогибов северо-западного простирания, имеющих длину до 200–250 км при ширине 40–60 км, а также совокупность подводных поднятий [Драчев, 2000; Franke et al., 2001]. Из них наиболее крупным элементом рифтовой системы является Усть-Ленский грабен, которой протягивается на расстояние 400–420 км в меридиональном направлении от южной оконечности залива Буор-Хая. Ширина грабена в северной части достигает 150–170 км и постепенно сужается к югу до 30–40 км. Структура грабена на всем протяжении ограничена сбросами с вертикальной амплитудой до 0.3–1.0 км и он заполнен осадками мощностью до 10 км [Сейсмо тектоника ..., 2017].

Второй крупный линеймент прослеживается в северо-западном направлении от залива Буор-Хая через дельту р. Лены, в Оленёкский и Анабарский заливы моря Лаптевых и далее к полуострову Таймыр. За последние 100 лет в его пределах было зарегистрировано около 400 землетрясений на глубинах 10–30 км с энергетическим классом $K = 7–14$ (магнитуа $M \leq 6$), внутри которой имеется ряд скоплений с повышенной плотностью эпицентров землетрясений [Сейсмо тектоника ..., 2017]. Эта зона маркирует Оленекский разлом. Фокальные глубины возрастают от 10 до 25 км в южном направлении по направлению к Сибирской континентальной окраине. Исключение составляют фокальные механизмы Таймырских землетрясений, отмеченные на западной окраине шельфа моря Лаптевых, решение которых указывает на режим сжатия [Имаев и др., 2000] (рис. 2, табл. 1).

Интересно, что сейсмически активные структуры в море Лаптевых изучались с точки зрения построения долговременной сейсмической модели — на сотни тысяч лет вперед для численного моделирования цунамиопасности побережья [Куликов и др., 2019а, б]. Искусственный каталог землетрясений был составлен по методу Монте-

Карло, затем было проведено численное моделирование генерации и распространения цунами, и в заключение — статистическая обработка расчетных данных и получение вероятностных оценок высот заплесков волн цунами на побережье. В результате этих расчетов выяснилось, что побережье моря Лаптевых является наиболее уязвимым в смысле волн цунами среди побережий остальных арктических морей.

Погружение шельфа и приморских низменностей в течение кайнозоя носило общий характер и захватывало не только отдельные грабены и впадины, но и разделяющие их поднятия. Надвиги и складки несогласно перекрыты горизонтально залегающими верхнеплиоценовыми отложениями. Эти данные подтверждают, что процессы растяжения, характерные для кайнозойской истории шельфа, в конце миоцена были нарушены эпизодом сжатия. Сейсмические данные показывают, что на шельфе моря Лаптевых в настоящее время преобладают условия растяжения.

По данным [Имаев и др., 2000], начиная с кайнозойского времени, активными являлись разломы двух направлений. Для субмеридиональных разломов характерны преимущественно сбросовые и взбросовые движения, а по субширотным разломам — преобладают разнонаправленные сдвиговые смещения. Подчеркивается, что ориентировки осей палеотектонических напряжений находятся в удовлетворительном соответствии с направлением относительных перемещений Северо-Американской и Евразийской литосферных плит.

По данным [Сейсмо тектоника ..., 2017], в южном континентальном обрамлении моря Лаптевых по совокупности геолого-геофизических данных выявлены системы региональных и локальных разломов, которые были активны в кайнозое. Кинематика этих зон подтверждается диаграммами трещиноватости и решением фокальных механизмов очагов землетрясений. По особенностям пространственного расположения, протяженности и кинематики выделяются четыре группы разломных зон: Приморская система сбросо-сдвигов, Западно-Верхоянская система надвигов, Хараулахская система сдвига-сбросов и Буорхайнская система сбросов.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕГИОНА, ПОСТРОЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Современные тектонические процессы в рифтовой зоне Северного Ледовитого океана (хребет Гаккеля) оказывают воздействие на шельф, что выражается в сопряженности структур шельфа и рифтовых океанических структур, а также в повышенной сейсмичности области шельфа. Существование рифтовой системы моря Лаптевых объ-

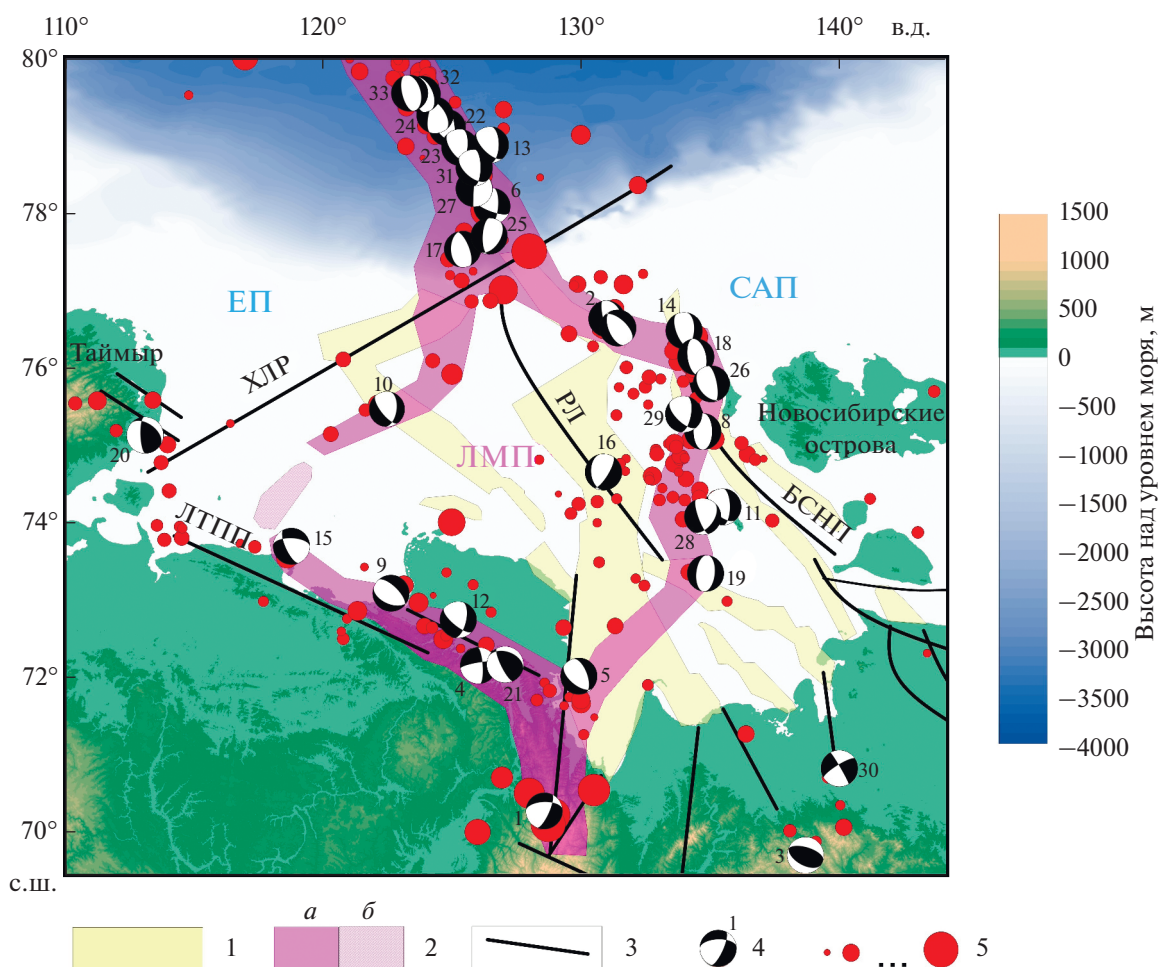


Рис. 2. Схема сейсмотектоники Лаптевоморского региона, по [Аветисов, 2000; Сейсмотектоника ..., 2017] с изменениями и дополнениями.

1 — грабены на дне моря Лаптевых [Сейсмотектоника..., 2017]; 2 — граница Лаптевской микроплиты [Аветисов, 2000]; *a* — уверенная, *б* — предполагаемая; 3 — главные разломные зоны и отдельные разломы; 4 — эпицентры и фокальные механизмы землетрясений (нижняя полусфера) с соответствующим порядковым номером (см. табл. 1); 5 — эпицентры землетрясений с магнитудой $3.0 < M \leq 6.8$, по данным ISC [International ..., 2020]; ЕП — Евразийская плита; САП — Северо-Американская плита; ЛМП — Лаптевская микроплита; ХЛР — Хатанга-Ломоносовский разлом; РЛ — разлом Лазарева; БСНП — Бельковско-Святоносский прогиб; ЛТПП — Лено-Таймырская зона пограничных поднятий.

ясняется тем, что данный регион на протяжении последних 60–70 млн лет являлся одним из сегментов границы Северо-Американской и Евразийской плит в Арктике [Драчев, 2000].

Несмотря на интерес к сложной геодинамике региона, до недавнего времени информация о сейсмичности моря Лаптевых и его обрамления базировалась, в основном, на данных далеких станций, что позволяло иметь приближенное представление об особенностях распределения эпицентров. Очевидной была лишь ярко выраженная линейность пояса землетрясений хребта Гаккеля и ее исчезновение при переходе на шельф — расщепление на восточную и западную зоны сейсмичности, обусловленные разрядкой напряжений, генерируемых в осевой зоне. Также предполагалось наличие осевой сейсмоактивной

зоны рифтогенеза, привязываемой к Усть-Ленскому прогибу, проходящей через центральную часть шельфа восточнее дельты Лены и через губу Буор-Хая выходящей на континент [Аветисов, 1993; Аветисов и др., 2001].

Помимо работы с середины 1980-х годов нескольких стационарных сейсмостанций Якутского филиала Геофизической службы РАН в районе поселка Тикси, локальных инструментальных сейсмологических исследований в Лаптевоморском регионе было проведено лишь несколько (рис. 3): экспедиции ПГО “Севморгеология” в 1972–1976 гг. (район Новосибирских островов) [Аветисов, 1982] и 1985–1988 гг. (дельта р. Лена и побережье губы Буор-Хая) [Аветисов, 1991]. Это позволило зарегистрировать в районе моря Лаптевых значительное количество более слабых со-

Таблица 1. Механизмы очагов землетрясений в районе моря Лаптевых за период наблюдений 1927–2019 гг.

№	Дата и время в очаге, ч м	φ° , с.ш.	λ° , в.д.	h , км	M_w	Механизм очага			Источник
						STK°	DIP°	$SLIP^\circ$	
1	14.11.1927 г. 00:12	70.262	128.685	15	6.7	268	46	–35	F, 2009
2	03.12.1960 г. 20:21	76.595	131.142	15	5.1	167	72	–90	F, 2009
3	19.04.1962 г. 23:16	69.737	138.708	15	6.0	287	51	82	F, 2009
4	20.05.1963 г. 17:01	72.162	126.517	15	5.5	356	70	–164	F, 2009
5	21.07.1964 г. 09:56	71.989	129.934	13.9	5.5	130	45	–112	F, 2009
6	25.08.1964 г. 13:47	78.035	126.557	15	6.7	111	64	–146	Б, 1972
7	07.04.1969 г. 20:26	76.481	131.227	15	5.5	157	45	–73	F, 2009
8	23.04.1977 г. 14:49	75.191	134.494	10	4.9	180	45	–90	GCMT, 2020
9	01.02.1980 г. 17:30	73.056	122.592	10.5	5.3	315	55	–78	GCMT, 2020
10	10.06.1983 г. 02:13	75.427	122.495	15	5.6	142	59	–118	GCMT, 2020
11	12.08.1984 г. 15:28	74.169	135.108	2.5	5.0	134	45	–126	F, 2009
12	15.06.1986 г. 06:55	72.727	125.271	10	4.7	130	60	–134	F, 2009
13	22.02.1987 г. 01:22	78.853	125.979	10	5.4	136	51	–122	GCMT, 2020
14	22.09.1987 г. 22:05	76.403	134.375	11.6	5.5	159	52	–107	GCMT, 2020
15	25.11.1987 г. 17:28	73.673	118.753	10	5.1	272	50	–142	F, 2009
16	01.01.1988 г. 14:36	74.654	130.903	10	5.1	31	65	–73	GCMT, 2020
17	21.03.1988 г. 23:31	77.523	125.476	15	6.4	339	58	–101	GCMT, 2020
18	05.08.1989 г. 06:55	76.109	134.535	2.9	5.3	172	50	–87	GCMT, 2020
19	13.03.1990 г. 00:32	73.325	134.898	15	5.3	186	45	–90	GCMT, 2020
20	09.06.1990 г. 18:24	75.120	113.051	15	5.0	178	68	115	СК, 2017
21	01.03.1991 г. 01:57	72.153	126.846	39.4	5.2	154	70	108	F, 2009
22	17.02.1992 г. 00:02	79.161	124.679	15	5.9	355	54	–65	GCMT, 2020
23	21.01.1993 г. 13:43	78.854	125.575	28.6	5.5	7	53	–59	GCMT, 2020
24	12.02.1993 г. 10:52	79.212	124.507	19.7	5.0	193	59	–60	GCMT, 2020
25	05.10.1993 г. 21:28	77.712	126.411	34.2	5.2	183	59	–106	GCMT, 2020
26	22.06.1996 г. 16:47	75.812	134.962	15	5.8	349	63	–78	GCMT, 2020
27	19.04.1997 г. 15:26	78.432	125.818	10	5.5	183	88	–88	USGS, 2020
28	07.12.2003 г. 09:16	74.104	134.818	17.9	5.1	160	69	–118	GCMT, 2020
29	04.07.2008 г. 04:55	75.398	134.039	19.3	5.0	10	54	–50	GCMT, 2020
30	29.05.2014 г. 05:07	70.814	140.052	13.9	4.9	330	84	–162	GCMT, 2020
31	22.06.2014 г. 23:58	78.526	125.832	10.6	4.8	360	59	–60	GCMT, 2020
32	27.04.2018 г. 00:27	79.401	123.818	12	4.8	171	52	–80	GCMT, 2020
33	13.05.2019 г. 00:43	79.408	123.897	19.5	5.3	166	54	–90	GCMT, 2020

Примечание. Координаты гипоцентра (φ , λ , h) взяты по каталогу GEM v.7 [Storchak et al., 2013, 2015; Di Giacomo et al., 2018]. Из двух возможных плоскостей разрыва в очаге предпочтение отдавалось плоскости, согласующейся по простираанию с основными разломами региона. Источники: Б, 1972 – [Балакина и др., 1972]; СК, 2017 – [Середкина, Козьмин, 2017]; F, 2009 – [Fujita et al., 2009]; GCMT, 2020 – [Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012; Global ..., 2020]; USGS, 2020 – [U.S. Geological ..., 2020].

бытий с магнитудой меньше 4 и составить банк сейсмологических данных по Арктическому региону [Аветисов и др., 2001].

Отдельно следует упомянуть сейсмологический эксперимент с донными сейсмографами в губе Буор-Хая [Ковачев и др., 1994]. В 1989 г. в бухте Буор-Хая сотрудниками Института океанологии АН СССР были проведены наблюдения с ав-

тономными донными сейсмографами (см. рис. 3). В эксперименте использовались приборы с поверхностным реперным бумом, устанавливаемые на дно на капроновом фале. Всего за трехнедельный период регистрации было записано 68 микроземлетрясений, из которых 27 – тремя и большим числом донных станций. Для 26 микротолчков с магнитудами $M_L = 0-2.5$ были определены гипо-

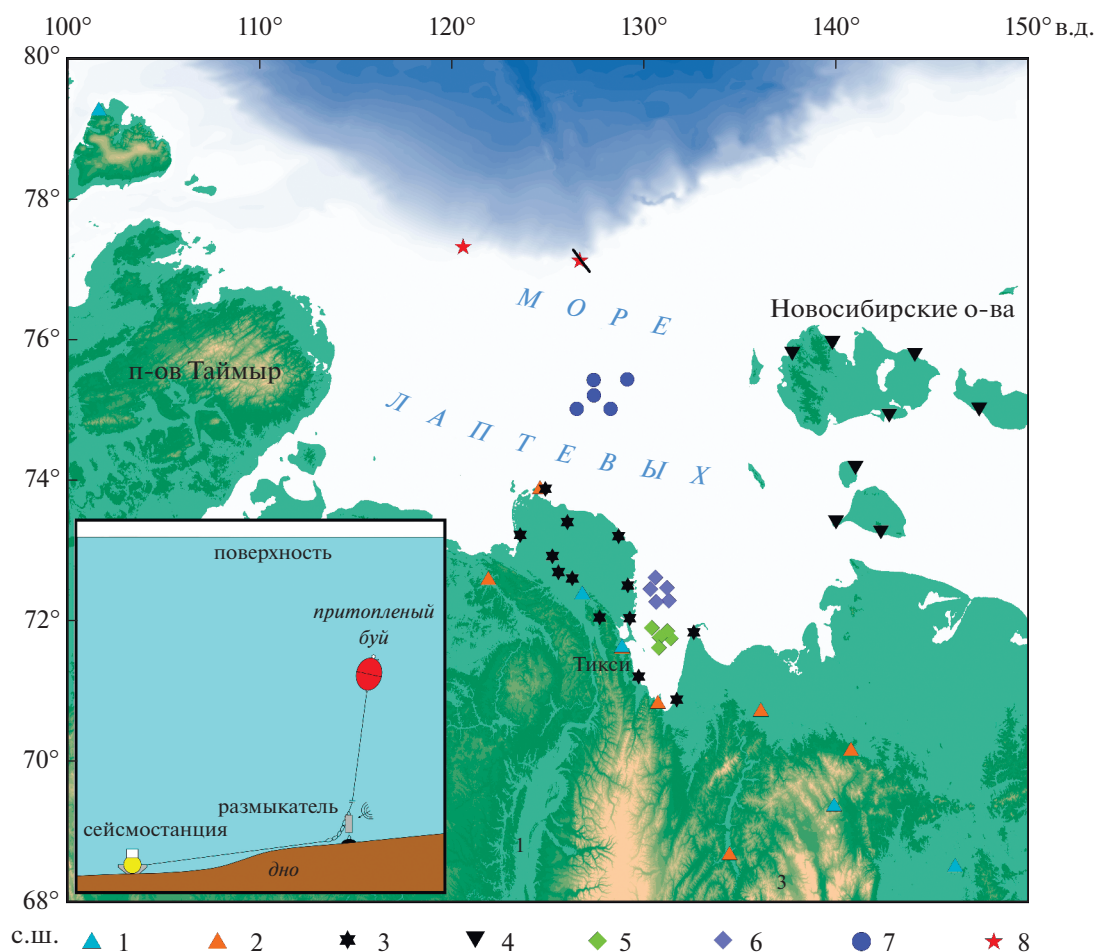


Рис. 3. Расположение постоянных и временных сетей наземных и донных сейсмостанций в районе моря Лаптевых.

1, 2 — постоянные и временные сейсмостанции ЕГС РАН [ФИЦ ..., 2020]; 3, 4 — временные сейсмостанции во время серии экспериментов 1985–1988 гг. [Аветисов, 1991] и серии экспериментов 1972–1976 гг. [Аветисов, 1982] соответственно; 5, 6 — временные донные сейсмостанции во время экспериментов в заливе Буор-Хая в 1989 г. (полигоны 1 и 2, по [Ковачев и др., 1994] соответственно); 7, 8 — временные донные сейсмостанции на шельфе моря Лаптевых и на континентальном склоне во время первой постановки 2018–2019 гг. (см. табл. 2) соответственно; зачеркнутая звезда — потерянная станция; на врезке — схема постановки донных сейсмостанций на шельфе (точки 1–5) с притопленным буйем.

центры. Результаты выявили в первом приближении стабильность сейсмического режима всего региона и локального участка в его пределах, т.к. угол наклона графика повторяемости микроземлетрясений незначительно отличался от угла наклона графика повторяемости землетрясений с $M > 4.5$ для всего региона срединно-океанического хребта Гаккеля. Примечательным оказалось наличие мантийной сейсмичности в районе губы Буор-Хая на глубинах до 65 км. Кроме того, оказалось, что в земной коре губы Буор-Хая наблюдается необычная картина распределения тектонических напряжений с глубиной: в верхних слоях земной коры преобладает сжатие, на глубинах 20–25 км напряжения близки к 0 (землетрясения не происходят), в нижних слоях коры и верхней мантии наблюдается растяжение. Это позволило

предложить оригинальную геодинамическую модель Лаптевоморского шельфа, предполагающую изгиб литосферы [Гарагаш и др., 1999; Ковачев и др., 2017].

В 2013 г. в районе острова Муостах в юго-восточной части моря Лаптевых была установлена на один месяц группа из 17 донных сейсмостанций для исследования глубины залегания вечной мерзлоты методом спектральных отношений горизонтальной и вертикальной компоненты сейсмического шума. Эксперимент дал основания предположить, что кровля подводной мерзлоты прослеживается вблизи береговой линии до глубины осадка 20 м, что близко со значениями, полученными в результате электромагнитных исследований и бурения скважины на глубине 4 м около мыса Буор-Хая [Overduin et al., 2015]. В

рамках проведения 5-летней программы научного бурения с припайного льда (2011–2015 гг.) в заливе Буор-Хая метод электропрофилирования был напрямую отвалидирован по данным 17 скважин (глубиной до 58 м) [Shakhova et al., 2017], что показало на отсутствие подводной мерзлоты до глубины 100 м и более на большинстве исследованных точек, при глубине моря больше 4 м. Данная работа является первым этапом исследований для выявления связей между сейсмотектонической активностью и пространственным распределением источников разгрузки пузырькового метана в контексте состояния подводной мерзлоты и выявления природы источников метана [Shakhova et al., 2009, 2010, 2014, 2015, 2017, 2019].

Единственная явная линейная зона межплитной сейсмичности, соответствующая хребту Гаккеля, на стыке с континентальной окраиной раздваивается, оконтуривая эпицентрами наиболее сильных землетрясений (с магнитудой больше 4) основную часть шельфа моря Лаптевых. Плотность зарегистрированных до настоящего времени эпицентров более слабых событий (с магнитудой меньше 4) на основной акватории шельфа невелика и распределение их близко к рассеянному. Приурочить их к той или иной системе разломов затруднительно.

Существует несколько геодинамических моделей, касающихся своеобразной современной тектоники шельфа моря Лаптевых. Согласно одной из них [Аветисов 2000, 2002], на шельфе моря Лаптевых выделяется литосферная микроплита, которую называют Лаптевской микроплитой (см. рис. 2). Данная модель основывается, в основном, на сейсмологических наблюдениях, из которых видно, что предполагаемая Лаптевская микроплита обрамляется очагами относительно сильных землетрясений с магнитудами от 4 до 6.

В других работах [Drachev, 2000] говорится о возможном выделении двух микроплит — Усть-Ленской и Восточно-Лаптевской — с несколькими возможными вариантами конфигурации границ и кинематики, основываясь на сейсмологических данных и результатах морского многоканального сейсмопрофилирования МОВ ОГТ, гравиметрических данных и геологических исследований материкового обрамления. Существуют также модели [Лобковский, 2016], которые описывают такие микроплиты как коровые образования, способные совершать горизонтальные перемещения по нижнекоровому пластичному астенослою. Такие модели основываются на обобщении классической теории тектоники плит, в котором последние рассматриваются как деформируемые тела — тектонике деформируемых литосферных плит. Исчерпывающих доказательств в пользу той или иной геодинамической модели для Лаптевоморского региона на сегодняшний день не существует.

В целом, имеющегося объема зарегистрированных сейсмических событий в Лаптевоморском регионе явно недостаточно для полноценного описания его сейсмического режима и геодинамической картины. Плотность зарегистрированных до настоящего времени эпицентров на основной акватории шельфа невелика и распределение их близко к рассеянному, приурочить их к той или иной системе разломов затруднительно. Это приводит к недостатку информации для построения детальной модели зон возможных очагов землетрясений. Масштаб и детальность существующей на данный момент генерализированной базы данных линейных и площадных зон возможных очагов землетрясений для Северной Евразии [Uotomov, 1999], разработанной в рамках Программы оценки глобальной сейсмической опасности, недостаточны для качественной оценки сейсмической опасности Лаптевоморского региона. Такая оценка необходима ввиду наличия там населенных пунктов, инфраструктуры и перспективы ее развития для обслуживания функционирования Северного морского пути и разработки месторождений углеводородов на шельфе.

Поэтому с 2016 г. группой сотрудников Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (Германия), Потсдамского университета (Германия), Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Якутского филиала Единой геофизической службы РАН была запущена серия полевых работ по развертыванию временных локальных сетей сейсмостанций в окрестности п. Тикси и в дельте реки Лена — проект “СИОЛА” [Гайсслер и др., 2018]. На сегодняшний момент уже получены записи двух наземных экспериментов: 9-месячные записи локальной сети в дельте р. Лена (7–12 сейсмостанций) и 13 сейсмостанций к юго-востоку от поселка Тикси, используемых в качестве малоапертурной сейсмогруппы (кампании 2016–2017 и 2017–2018 гг.).

В Арктическом регионе в 2017 г. на территории зоны ответственности Российской Федерации зарегистрировано 13 землетрясений с $m_b \geq 4.3$, из них 10 землетрясений с эпицентрами — севернее Северной Земли, одно землетрясение с эпицентром — восточнее Северной Земли, и два — севернее Земли Франца-Иосифа. Самые сильные землетрясения в Арктическом регионе произошли на глубине 10 км севернее Земли Франца-Иосифа, оба с магнитудами $m_b = 5.7$ [Маловичко и др., 2018].

В 2018 г. в Арктическом регионе на территории зоны ответственности Российской Федерации зарегистрировано 11 землетрясений с $m_b \geq 4.2$, из них 7 — севернее Северной Земли, 1 — восточнее Северной Земли, 2 — севернее Земли Франца-Иосифа и 1 — севернее Шпицбергена. Поскольку эпицентры землетрясений 2017 и 2018 гг. распола-

гались далеко от поселков, сведений об их ощущении нет [Маловичко и др., 2019].

Кроме того, осенью 2018 г. сотрудниками ИО РАН и МФТИ была установлена временная сеть из 7 широкополосных донных сейсмостанций на шельфе моря Лаптевых.

НОВАЯ ВРЕМЕННАЯ СЕТЬ ДОННЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ. 73-й И 78-й РЕЙСЫ НИС “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”

Сейсмотектонические события могут влиять на интенсивность разгрузки метана и других компонентов геофлюида, что может проявиться в дестабилизации гидратов, массивованном выбросе метана, образовании воронок различного диаметра (от сантиметров до сотен метров), в просадке грунтов и других георисках [Field, Jennings, 1987; Kelley et al., 1994; Kusu et al., 2005; Бондур, Кузнецова, 2012; Обжиров, 2018; Собисевич и др., 2018]. Кроме того, метан, в случае, когда он имеет эндогенный, глубинный характер, может поступать с больших глубин по разломам и доходить до уровня залегания газогидратов, где смешивается с приповерхностным метаном. В море Лаптевых наличие метановых выбросов может быть связано с существованием рифтовой системы. Глубинными источниками метана, мигрирующего по рифтовым разломам вверх, являются крупные нефтегазовые залежи осадочных бассейнов арктического шельфа. Слабые землетрясения, происходящие в таких зонах, указывают на активные разломы. Поэтому локальный мониторинг микросейсмичности в МВА может служить дополнительным источником информации о природе метановых сипов, в дополнение к изотопным методам [Sapart et al., 2017].

Постановка локальной сети донных сейсмостанций на шельфе моря Лаптевых была выполнена в 73-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”, который состоялся в период с 21 сентября по 25 октября 2018 г. Подъем станций осуществлялся в 78-м рейсе того же судна в период с 16 сентября по 21 октября 2019 г.

Функционировавшая в сезон 2018–2019 гг. на шельфе моря Лаптевых временная локальная сеть состояла из пяти донных автономных сейсмостанций МПССР (морская придонная станция сейсмоакустической разведки) (см. рис. 3). МПССР укомплектованы гидрофоном ГГ-7 (производство ИО РАН) с диапазоном частот 0.1–25000 Гц по уровню 0.7, блоком горизонтальных молекулярно-электронных широкополосных сейсмических датчиков СМЕ-4311 (производство ООО “Р-сенсорс”) с диапазоном частот 0.016–50 Гц, трехкомпонентным блоком сейсмических датчиков с собственной частотой 10 Гц

(два горизонтальных СГ-10 и один вертикальный СВ-10 производства ООО “ОЙО-ГЕО Импульс Интернэшнл”), работающих в диапазоне частот 10–200 Гц, 8-канальным сейсмическим регистратором с возможностью синхронизации внутренних часов по GPS и блоком батарей. Запись производится с частотой дискретизации 100 Гц (поэтому реальный частотный диапазон записи для всех датчиков ограничен верхней частотой 40–50 Гц). Автономность сейсмостанций по питанию и объему памяти (32 Гб) составляет примерно 8 месяцев, автономность работы гидроакустических размыкателей – 1.5 года. Ввиду наличия льдов в море Лаптевых большую часть года, эти донные станции были установлены по схеме с притопленным буем (см. рис. 3, врезка). Штатное всплытие притопленного буя выполняется с помощью акустической команды, подаваемой на размыкатель. Диапазон глубин постановки, примерно 36–42 м, с одной стороны, позволяет с большой вероятностью избежать затирания станций стамухами, с другой стороны, при подъеме позволит найти станции тралением 120-метрового отрезка фала между станцией и балластом, если не срабатывают гидроакустические размыкатели.

Помимо группы из пяти станций на шельфе были еще установлены две самовсплывающие донные сейсмостанции на континентальном склоне на глубинах 280–350 м. Одна из них была утеряна, записи с другой требуют длительной предварительной технической обработки и пока не рассматриваются в рамках настоящей работы. В дополнение к станциям на шельфе в точке 3 (см. рис. 3) также был установлен автономный регистратор волнения АРВ-К14-1 (ООО “СКТБ ЭлПА”, г. Углич), предназначенный для периодической регистрации абсолютного давления и температуры морской воды. Регистратор оснащен кварцевым барочувствительным элементом, мембрана которого прогибается от воздействия давления столба жидкости, деформируя закрепленный на ней силочувствительный пьезоэлемент. Запись производилась с частотой дискретизации 1 Гц (табл. 2).

При исследовании сейсмических шумов на записях донных сейсмостанций выяснилось, что шумовая обстановка на дне очень сильно зависит от ледовой обстановки на шельфе. На рис. 4 показаны временные спектрограммы (сонограммы) записей одного из широкополосных горизонтальных сейсмодатчиков СМЕ-4311 (а) и гидрофона ГГ-7 (б), установленных в точке 5 (см. рис. 3), а также записи автономного регистратора волнения АРВ-К14-1 (в), установленного в точке 3 (см. рис. 3).

Выбор записей сейсмостанции в точке 5 для анализа шумов обусловлен тем, что ее период функционирования максимальный (из тех стан-

Таблица 2. Координаты и даты работы донных сейсмостанций на шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых в 2018–2019 гг. (положение станций на рис. 3)

Номер станции	Широта, град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	Глубина моря, м	Даты работы
1	75.01137	126.52483	37	06–09.10.2018
2	75.01173	128.26237	36	05–12.10.2018
3	75.20322	127.40412	40	06–08.10.2018
4	75.42210	127.39082	42	06.10.2018–08.02.2019
5	75.43138	129.13213	40	06.10.2018–08.03.2019
Склон 1	77.30772	120.60985	350	15.10.2018–31.05.2019
Склон 2	77.11362	126.68113	280	Утеряна

ций, что были установлены на шельфе) – 5 месяцев, с 6 октября 2018 г. по 8 марта 2019 г. Регистратор волнения проработал все 12 месяцев. Временные спектрограммы записей гидрофона и сейсмоприемника были рассчитаны с помощью оконного преобразования Фурье в скользящем окне Хэмминга длительностью 2.5 часа с 50%-м перекрытием. Спектрограммы записей автономного реги-

стратора волнения выполнены с помощью метода Уэлча [Welch, 1967] в скользящем окне Кайзера-Бесселя длительностью двое суток с 50%-м перекрытием.

На спектрограммах записей сейсмоприемника и гидрофона видно, что основное усиление сигнала происходит в низкочастотном диапазоне с максимумом в области 0.1–0.2 Гц. Причем в пе-

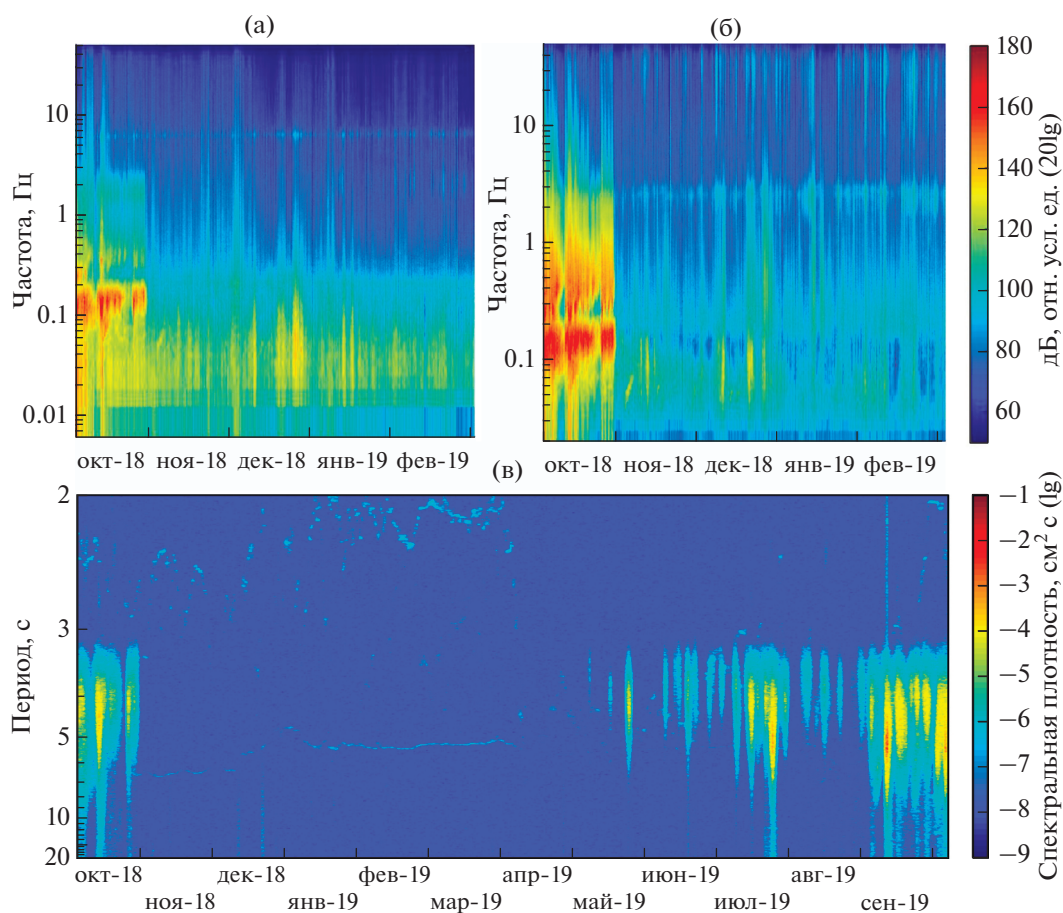


Рис. 4. Временные спектрограммы шума (сонограммы), вычисленные по записям одного из широкополосных горизонтальных сейсмоприемников СМЕ-4311 (а) и гидрофона ГГ-7, установленных в точке 5 (см. рис. 3) (б), а также по записи автономного регистратора волнения АРВ-К14-1 (в), установленного в точке 3 (см. рис. 3).

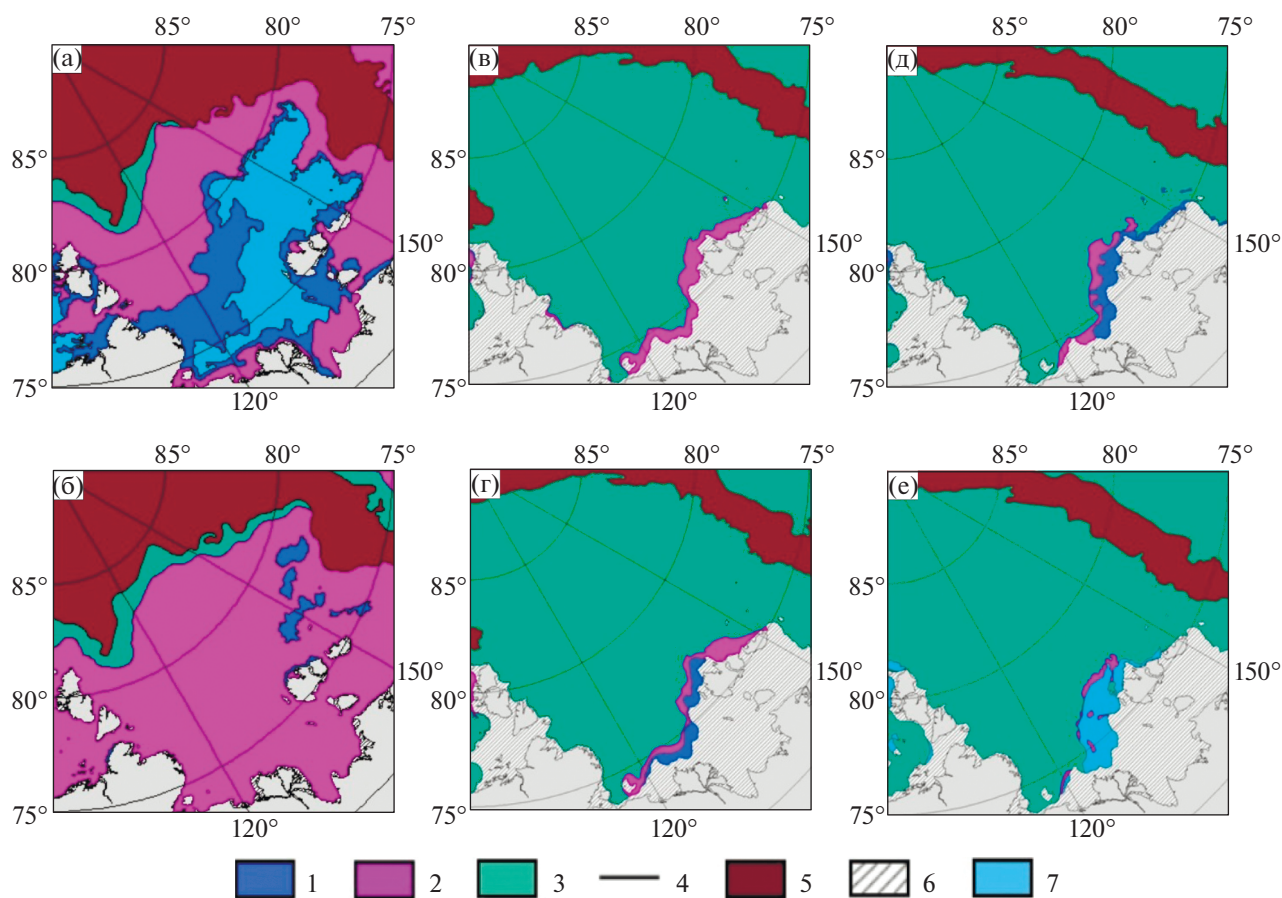


Рис. 5. Ледовая обстановка в море Лаптевых, по данным ААНИИ Росгидромета [ААНИИ ..., 2020], по состоянию на: (а) 28–30.10.2018 г.; (б) 04–06.11.2018 г.; (в) 21–23.04.2019 г.; (г) 28–30.04.2019 г.; (д) 19–21.05.2019 г.; (е) 26–28.05.2019 г. 1 – нилас (1–10 см); 2 – молодой лед (10–30 см); 3 – однолетний лед (30–200 см); 4 – границы зон льда; 5 – старый лед; 6 – припай; 7 – чисто.

риод 1–2 ноября 2018 г. уровень низкочастотного сигнала падает на три порядка (на ~60 дБ). Такую же картину демонстрирует и спектрограмма записи автономного регистратора волнения. Максимум усиления наблюдается в диапазоне периодов 6–13 с, что соответствует ветровому волнению моря и зыби. Уровень сигнала автономного регистратора волнения начинает эпизодически увеличиваться с конца апреля 2019 г., а во второй половине мая снова становится постоянно высоким, как в октябре.

На рис. 5 представлены фрагменты карт ледовой обстановки, разработанных ААНИИ [ААНИИ ..., 2020]. Рисунок 5а соответствует периоду 28–30.10.2018 г., когда в акватории моря Лаптевых еще есть обширные участки, свободные от льда. В следующий период, 04–06.11.2018 г., которому соответствует рис. 5б, акватория уже полностью покрыта молодым льдом. Таким образом, образование сплошного льда в акватории моря Лаптевых пришлось на период 31.10.2018–04.11.2018 гг. Значительное снижение уровня сейсмических

шумов на записях сейсмоприемника и гидрофона, а также на записи регистратора волнения произошло именно в этот период времени.

Период времени, когда акватория моря Лаптевых была полностью покрыта сплошным льдом, продлился вплоть до 21–23.04.2019 г., что продемонстрировано на рис. 5в. Уровень сейсмических шумов и сигнала регистратора волнения остается низким. А в следующий период 28–30.04.2019 г., которому соответствует рис. 5г, уже присутствуют участки с ниласом, который представляет собой тонкую эластичную корку льда толщиной 0–10 см, легко прогибающуюся на воде под влиянием волн зыби. Наличие участков ниласа наблюдается вплоть до 19–21.05.2019 г. (см. рис. 5д). В период с середины апреля до середины мая сигнал волнового регистратора начинает постепенно восстанавливаться. Начиная же с 26–28.05.2019 г. (см. рис. 5е), с появлением значительных участков чистой воды, сигнал волнового регистратора выходит на прежний уровень, как в октябре 2018 г. в диапазоне периодов 6–13 с. Таким образом, можно

сделать вывод о том, что уровень сейсмических шумов на шельфе моря Лаптевых на глубине 36–42 м сильно зависит от наличия ветрового волнения и ледовой обстановки. Наличие сплошного льда приводит к значительному уменьшению ветрового волнения моря и, вследствие этого, к соответствующему уменьшению уровня сейсмических шумов.

На рис. 6 представлены кривые спектральной плотности мощности (СПМ) сейсмического шума, вычисленные по записям того же широкополосного горизонтального сейсмоприемника СМЕ-4311 в точке 5. СПМ рассчитана методом модифицированных периодограмм с предварительным определением автокорреляционной последовательности в прямоугольном окне длительностью 5 ч с последующим осреднением. На том же рис. 6 представлены кривые моделей NHNM (new high-noise model) и NLNM (new low-noise model) [Peterson, 1993], а также расширение моделей NHNM и NLNM согласно работе [Wolin, McNamara, 2019] и кривая спектра собственных шумов датчика СМЕ-4311. По расположению кривых СПМ сейсмического шума, записанного на сейсмостанциях, относительно кривых моделей NHNM и NLNM можно судить о регистрационных возможностях установленных станций.

Кривые СПМ для периода времени, соответствующего сплошному льду в Арктическом регионе (зеленого цвета), колеблются около кривой NHNM, и по уровню в диапазоне периодов $T \approx 0.1$ –10 с близки к спектрам островных и прибрежных станций в Тихом океане (Гуам, Раптонга, Рапануи и др. [Peterson, 1993]).

В то же время, из рис. 6 видно, что кривая СПМ для периода времени, соответствующего чистой воде, лежит выше кривой СПМ для периода, соответствующего сплошному льду: в короткопериодном диапазоне, $T \approx 0.1$ с ($f \approx 10$ Гц) – на 20 дБ; в диапазоне $T = 1$ –5 с ($f = 0.2$ –1 Гц) – на 30 дБ; в длиннопериодном диапазоне $T > 13$ с ($f < 0.08$ Гц) – на 10 дБ. В безледный период времени кривая СПМ (синего цвета) всюду лежит выше кривой NHNM, поэтому выделение сигналов микроземлетрясений на записях требует применения специальных методов.

На частотах 5–10 Гц действует механизм генерации микросейсм при обрушении волн [Webb, 2002]. На кривых СПМ для обоих периодов времени наблюдается локальный максимум при значениях $T = 0.1$ –0.12 с ($f = 8$ –10 Гц) (см. рис. 6, цифра 3). Подобные максимумы на записях горизонтальных компонент на частотах $f = 6$ –10 Гц при постановке станции на мягкий грунт объясняют так называемым *каплинг-эффектом*, искажением высоких частот записей вследствие паразитных колебаний в системе “станция–балласт–мягкий грунт” [Webb, 1998].

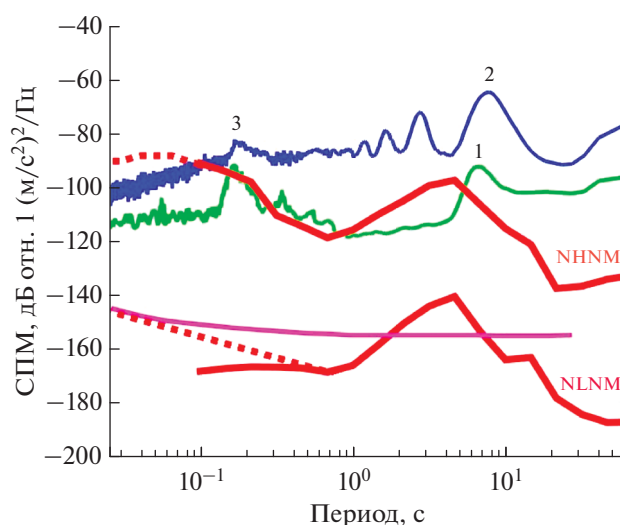


Рис. 6. Спектральная плотность мощности сейсмического шума, вычисленная по записям широкополосного горизонтального сейсмоприемника СМЕ-4311, установленного в точке 5 (см. рис. 3): синяя линия – в период с 06.10.2018 по 01.11.2018 г. (чистая вода); зеленая линия – в период с 01.11.2018 по 08.03.2019 г. (сплошной лед). Сплошные линии красного цвета – модели NHNM (new high-noise model) и NLNM (new low-noise model) [Peterson, 1993]; красные пунктирные линии – расширение моделей NHNM и NLNM согласно работе [Wolin, McNamara, 2020]; фиолетовая линия – кривая уровня собственных шумов сейсмоприемника СМЕ-4311; цифры 1, 2, 3 – указывают на локальные экстремумы в спектрах (см. пояснения в тексте).

Примечание: для выражения СПМ сейсмических шумов в дБ принято применять множитель 10 при вычислении десятичного логарифма.

Любопытным фактом является устойчивое повышение уровня шумов в длиннопериодном диапазоне: здесь не происходит характерного для кривых NHNM и NLNM снижения в диапазоне $T = 4$ –11 с. Такой вид кривых СПМ на морском дне встречается в литературе, например, [Webb et al., 1998; Romanowicz et al., 1998; New Manual ..., 2012], и объясняется наклонами донной сейсмостанции вследствие действия придонных течений. Резкое возрастание уровня СПМ при значениях периода $T > 30$ с также связывают с морскими инфрагравитационными волнами [Webb, 1998].

Кривая СПМ для периода времени, соответствующего сплошному льду, характеризуется также локальным максимумом в окрестности периода $T = 6$ с (см. рис. 6, цифра 1). Компоненты сейсмического шума при значениях спектрального периода $T = 6 \pm 2$ с ($f = \sim 0.2$ Гц) являются наиболее “энергетическими” и представляют собой так называемые *вторичные микросейсмы* [Webb, 1998; New Manual ..., 2012]. Согласно наиболее распространенным гипотезам [Longuet-Higgins, 1950; Hasselmann, 1963], вторичные микросейсмы инду-

цируются стоячей волной, образующейся вследствие суперпозиции волн противоположной направленности в море. Первичные возмущения возникают в областях низкого атмосферного давления на акваториях (циклоны). Из рис. 6 видно, что локальный максимум в окрестности $T = 6 \pm 2$ с присутствует как в период времени со льдом, так и безо льда (см. рис. 6, цифры 1, 2). Однако в безледный период спектральный пик гораздо более выражен, к тому же наблюдается четкая резонансная картина с основным резонансным периодом $T_0 = 8 \pm 2$ с ($f_0 = 0.125$ Гц) и с дополнительными резонансными частотами $3f_0$, $5f_0$, $7f_0$. Это, возможно, говорит о наложении частот вторичных микросейсм и колебаний, возникающих вследствие локальных флуктуаций гидростатического давления от действия ветрового волнения.

Высокий уровень сейсмических шумов в период времени, когда акватория свободна ото льда, приводит к большим затруднениям при детектировании землетрясений, по крайней мере, в осенний период (сентябрь–октябрь), для которого характерна штормовая погода. В отдельные непродолжительные штилевые окна уровень шумов значительно падает (до ~40 дБ). В течение октября 2018 г., судя по спектрограммам на рис. 4, было два выраженных штилевых окна: 12–14 октября и 23–28 октября. Именно в эти периоды были обнаружены несколько сигналов от локальных слабых землетрясений. В остальные же дни октября наблюдался очень высокий уровень шумов, на фоне которых нестационарные сигналы имели сильно искаженную волновую форму. На записях с ноября 2018 г. по март 2019 г., когда акватория была покрыта сплошным льдом, обнаружено несколько сигналов от локальных слабых землетрясений, региональных землетрясений умеренной силы, а также телесейсмические сигналы от удаленных событий, присутствующих в международных бюллетенях.

На предварительном этапе определение координат и глубин очагов зарегистрированных слабых землетрясений не производилось, в основном по причине отсутствия датчиков для вертикальной компоненты сейсмического сигнала в донных станциях, как наиболее информативной.

На рис. 7 приведены примеры волновых форм и спектров сигналов: от локального слабого землетрясения с магнитудой $M_L = 2.0$, произошедшего 28.11.2018 г., 17:12:54.65 UTC на расстоянии 30 км от точки регистрации (см. рис. 7а); от регионального землетрясения с магнитудой $M_L = 3.5$, произошедшего 25.2.2019 г., 18:18:9.33 UTC на расстоянии около 500 км от точки регистрации (см. рис. 7б); от удаленного землетрясения с магнитудой $M_s = 7.0$, произошедшего на расстоянии 3400 км от точки регистрации (см. рис. 7в) (Аляска, 30.11.2018 г., 17:29:28.3 UTC).

Сигнал от локального слабого землетрясения, приведенный на рис. 7а, характеризуется широким диапазоном частот 1–40 Гц. Частоты ниже 1 Гц были отфильтрованы, т.к. представляют собой стационарные шумовые колебания. Сигнал от регионального землетрясения (см. рис. 7б) характеризуется узким частотным диапазоном 4–8 Гц. Частоты до 2 Гц зашумлены и были отфильтрованы для визуального восприятия волновой формы землетрясения. Колебания на частотах более 8 Гц ослаблены вследствие затухания. Сигнал от удаленного сильного землетрясения (см. рис. 7в) характеризуется низкочастотным спектром 0.02–1 Гц и включает в себя хорошо выраженный пакет поверхностных волн.

Вид приведенных на рис. 7 волновых форм и спектров приводит к выводу о том, что в период времени, когда уровень сейсмических шумов понижен из-за уменьшения ветрового волнения вследствие штиля или полного покрытия акватории льдом, чувствительность и частотные характеристики гидрофона ГГ-7 и сейсмоприемников СМЕ-4311 в составе использованной МПССР достаточны для надежной регистрации как высокочастотных сигналов от слабых локальных землетрясений, так и низкочастотных сигналов от сильных удаленных землетрясений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описываемый эксперимент — это первый опыт ИО РАН годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе в условиях северных морей. В отечественной периодике нет упоминаний о подобных работах. Поэтому применимость данной схемы постановки в ледовых условиях, сейсмостанций данной конструкции и датчиков является отдельным предметом исследования.

Самый важный вывод из результатов проведенного эксперимента — сильная зависимость регистрационных возможностей сети донных сейсмостанций от ветрового волнения, которое, в значительной степени определяется степенью ледового покрытия моря Лаптевых, что приводит к снижению уровня сейсмических шумов почти на три порядка (~30 дБ для СПМ). По-видимому, регистрационные возможности сети донных сейсмостанций ограничены зимними периодами наблюдений (ноябрь — апрель), как это следует из наблюдений автономного регистратора волнения АРВ-К14-1 (см. рис. 4, нижний рисунок). В летние периоды наблюдений интерес представляют так называемые “штилевые окна”, когда уровень сейсмических шумов падает до минимума и становится возможным регистрировать локальные слабые землетрясения с приемлемым разрешением.

Второй аспект проведенного эксперимента — отсутствие записей придонного течения, без ко-

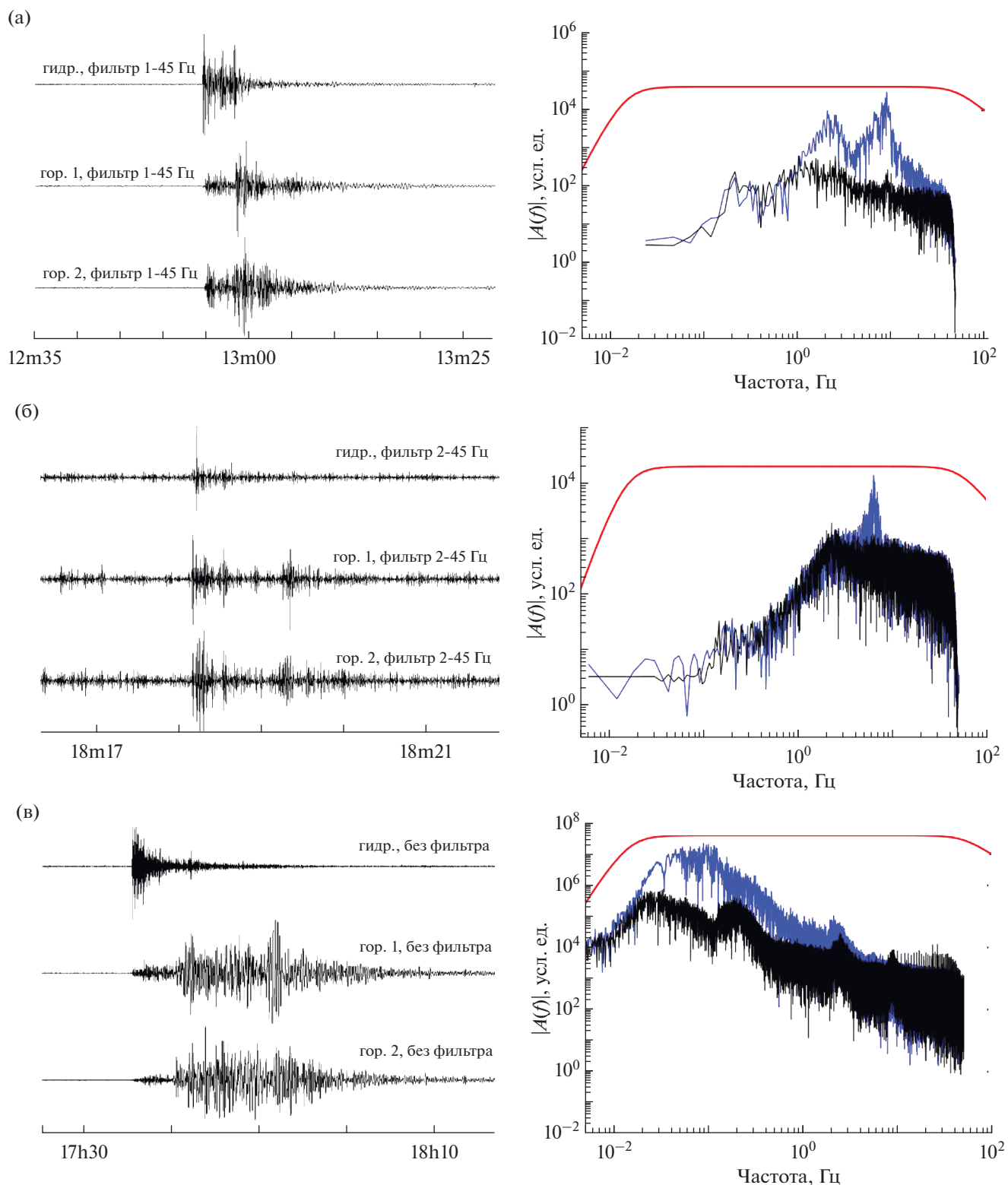


Рис. 7. Примеры зарегистрированных сигналов и их амплитудных спектров Фурье от локального микроземлетрясения с магнитудой $M_L = 2.0$ (28.11.2018 г., 17:12:54.65 UTC), произошедшего на расстоянии 30 км от точки регистрации (а); регионального землетрясения с магнитудой $M_L = 3.5$ (25.2.2019 г., 18:18:9.33 UTC), произошедшего на расстоянии около 500 км от точки регистрации (б); удаленного землетрясения с магнитудой $M_s = 7.0$, (Аляска, 30.11.2018 г., 17:29:28.3 UTC), произошедшего на расстоянии 3400 км от точки регистрации (в). Красная линия — нормированная АЧХ сейсмоприемника СМЕ-4311, синяя линия — амплитудный спектр Фурье сигнала землетрясения (компонента гор. 1, после фильтрации), черная линия — амплитудный спектр Фурье шума (компонента гор. 1, после фильтрации).

торых все рассуждения о влиянии течений на шумовые характеристики донных сейсмостанций представляются умозрительными.

Все пять МПССР на шельфе были подняты в 2019 г. через год после постановки. При этом лишь один буй всплыл штатно при срабатывании гидроакустического размыкателя. Остальные четыре станции были успешно подняты при тралении кошками 120-метрового отрезка веревки, выложенного на дне между станцией и балластом. При зацепе кошкой веревки буи всплывали на поверхность. Оказалось, что все размыкатели сработали штатно и сбросили балласт, однако запаса плавучести буюв было недостаточно, чтобы дернуть веревку со дна, видимо, из-за наносов грунта. Одна из самовсплывающих станций на континентальном склоне была утеряна, т.к. не удалось установить с ней связь по гидроакустическому каналу после года эксплуатации. Причины этого до конца не ясны. Успешное траление самовсплывающих станций на глубине около 300 м крайне маловероятно.

Ни одна станция не была залита водой, однако лишь три станции содержали записи длительностью от четырех до семи месяцев. При комнатной температуре расчет ресурса батарей показал примерно восемь месяцев. Уменьшение длительности работы предположительно произошло из-за падения емкости щелочных батарей при температуре, близкой к нулю (на дне). Еще три станции работали всего несколько дней. Это произошло вследствие обрыва проводов между батарейными блоками, видимо, при постановке станций в штормовых условиях: ударах о борт и жесткой посадке на грунт.

Уроки первой годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе моря Лаптевых следует учесть при проведении последующих экспедиций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе освещаются современные представления о сейсмотектонике и сейсмичности Лаптевоморского региона. Особое внимание уделено обзору инструментальных сейсмологических наблюдений в регионе, в том числе новейших, впервые проведенных на шельфе моря Лаптевых с помощью постановки донных сейсмостанций. Новые данные о сейсмичности Арктического региона крайне необходимы для выявления возможной связи между сейсмотектонической активностью, состоянием подводной мерзлоты и разгрузкой метана геологического происхождения.

Новейшие работы по развертыванию временных локальных сетей сейсмостанций, которые начались в дельте р. Лена с 2016 г. и на шельфе моря Лаптевых с 2018 г., призваны восполнить этот пробел.

Сравнительный анализ спектров шумов, вычисленных по записям донного сейсмографа, гидрофона и волнографа, установленных в центре моря Лаптевых в ходе 73-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, показал, что амплитудный уровень шума сильно зависит от ветрового волнения, которое, в свою очередь, зависит от ледового покрытия моря, поэтому регистрационные возможности локальной группы донных сейсмостанций ограничены зимними периодами наблюдений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН И.П. Семилетову, начальнику 73-го и 78-го рейсов НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2018–2019 гг.), и академику РАН Л.И. Лобковскому – за организационное содействие в выполнении программы морских сейсмологических работ в рейсах, П.Д. Ковалеву – за помощь в организации измерений морского волнения, а также входившим в сейсмологический отряд студентам МФТИ и другим участникам экспедиций за помощь в палубных работах по установке и подъему донных сейсмостанций. Кроме того, авторы признательны руководителю лаборатории опасных геологических процессов ИО РАН Б.В. Баранову за всестороннее обсуждение вопросов, касающихся тектоники Лаптевоморского региона.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0149-2019-0005 (обзор публикаций о сейсмичности и сейсмотектонике), государственной программы повышения конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации среди ведущих мировых научно-образовательных центров (программа 5-100) (описание локальных инструментальных исследований), при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-05-00533А (обработка записей донных сейсмографов, анализ сейсмических шумов), № 18-05-60250 (измерение и анализ ветрового волнения) и № 18-05-01018 (анализ каталогов землетрясений). Экспедиционная часть исследований в контексте выявления характерных особенностей состояния подводной мерзлоты и масштаба разгрузки пузырькового метана выполнена на борту НИС “Академик Мстислав Келдыш” в рамках гранта РНФ (проект № 15-17-20032) и гранта Правительства РФ (№ 14, Z50.31.0012/03.19.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аветисов Г.П. Глубинная структура Новосибирских островов и прилегающих акваторий по сейсмологическим данным // Советская геология. 1982. № 11. С. 113–122.

- Аветисов Г.П.* Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления // Вулканонология и сейсмология. 1991. № 6. С. 59–69.
- Аветисов Г.П.* Некоторые вопросы динамики литосферы моря Лаптевых // Физика Земли. 1993. № 5. С. 28–38.
- Аветисов Г.П.* Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. Вып. 3. С. 104–114.
- Аветисов Г.П.* О границах литосферных плит на шельфе моря Лаптевых // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 793–796.
- ААНИИ: Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. СПб., 2020. URL: <http://www.aari.ru/>
- Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В. и др.* Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 191 с.
- Богданов Н.А., Хаин В.Е., Розен О.М. и др.* Объяснительная записка к Тектонической карте морей Карского и Лаптевых. М.: Институт литосферы и внутренних морей РАН, 1998. 127 с.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях Арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43.
- Гайсслер В.Х., Баранов Б.В., Шибяев С.В. и др.* Российско-Германский проект “Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона” // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 102–106.
- Гарагаш И.А., Ковачев С.А., Кузин И.П.* Некоторые результаты анализа напряженного состояния земной коры бухты Буор-Хая (море Лаптевых) // Вулканонология и сейсмология. 1999. № 2. С. 75–80.
- Драчев С.С.* Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. № 6. С. 43–58.
- Драчев С.С.* О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60–76.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмоструктура Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 227 с.
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Соловьев С.Л.* Кратковременное изучение микросейсмичности губы Буор-Хая, море Лаптевых, с помощью донных сейсмографов // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 65–76.
- Ковачев С.А., Крылов А.А., Иванов В.Н. и др.* Напряженное состояние Лаптевоморской литосферной микроплиты по данным морских сейсмологических наблюдений // Естественные и технические науки. 2017. № 4. С. 52–57.
- Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П. и др.* Цунамиопасность Арктического побережья России. Часть 1. Каталог вероятных цунамигенных землетрясений // Геориск. 2019а. № 2. С. 18–32.
- Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П. и др.* Цунамиопасность Арктического побережья России. Часть 2. Численное моделирование цунами // Геориск. 2019б. № 3. С. 6–17.
- Лобковский Л.И.* Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и северо-восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495.
- Маловичко А.А., Коломиец М.В., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2017 году // Геоэкология. 2018. № 6. С. 59–68.
- Маловичко А.А., Коломиец М.В., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2018 году // Геоэкология. 2019. № 4. С. 51–60.
- Обжиров А.И.* О газогеохимических предвестниках сейсмических активизаций, землетрясений и вулканических проявлений на Камчатке и в Охотском море // Гео-системы переходных зон. 2018. Т. 2. № 1. С. 57–68.
- Сейсмоструктура северо-восточного сектора Российской Арктики / Под ред. Л.П. Имаевой, И.И. Колодезниковой (Институт земной коры СО РАН, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 134 с.
- Середкина А.И., Козьмин Б.М.* Очаговые параметры Таймырского землетрясения 9 июня 1990 г. // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 2. С. 214–217.
- 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 // Докл. РАН. 2018. Т. 479. № 1. С. 80–83.
- Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая Служба Российской Академии наук”. Обнинск, 2020. URL: <http://www.gsr.ru/new/struct/>
- Шахова Н.Е., Юсупов В.А., Салюк А.Н. и др.* Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 3. С. 398–401.
- Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A.* The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project // Earth System Science Data. 2018. V. 10(4). P. 1877–1899.
- Drachev S.S.* Laptev Sea Rifted Continental Margin: Modern Knowledge and Unsolved Questions // Polarforschung. 2000. V. 68. № 1–3. P. 41–50.
- Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M.* Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview / Eds B. A. Vining, S. C. Pickering // Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers // Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference. Published by the Geological Society, London, 2010. P. 591–619.
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. of Geophysical Research. 1981. V. 86(B4). P. 2825–2852.
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. V. 200–201. P. 1–9.
- Field M.E., Jennings A.E.* Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake // Marine Geology. 1987. V. 77(1–2). P. 39–51.
- Franke D., Hinz K., Block M. et al.* Tectonics of the Laptev Sea Region in North-Eastern Siberia // Polarforschung. 2000. V. 68. № 1–3. P. 51–58.

- Franke D., Hinz K., Oncken O.* The Laptev Sea Rift // *Marine and Petroleum Geology*. 2001. V. 18(10). P. 1083–1127.
- Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G. et al.* Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // *Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: A Tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Special Publication Series. 2009. V. 4. P. 117–145.
- Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project. Электронный ресурс. 2020. URL: <http://www.globalcmt.org/>
- Hasselmann K.A.* A statistical analysis of the generation of microseisms // *Reviews of Geophysics*. 1963. V. 1(2). P. 177–209.
- International Seismological Centre. Thatcham, Berkshire, United Kingdom. Электронный ресурс. 2020. URL: <http://www.isc.ac.uk/>
- Kelley J.T., Dickson S.M., Belknap D.F. et al.* Giant sea-bed pockmarks: Evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine // *Geology*. 1994. V. 22(1). P. 59–62.
- Kuscu I., Okamura M., Matsuoka H. et al.* Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of Izmit, Sea of Marmara, NW Turkey // *Marine Geology*. 2005. V. 215(3–4). P. 193–214.
- Longuet-Higgins M.S.* A theory for the generation of microseisms // *Philosophical Transactions of the Royal Society A. London*. 1950. V. 243(857). P. 1–35.
- New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2) / Ed. P. Bormann. Potsdam: Deutsches Geo-ForschungsZentrum GFZ, IASPEI, 2012. <https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2>
- Overduin P.P., Haberland C., Ryberg T. et al.* Submarine permafrost depth from ambient seismic noise // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42(18). P. 7581–7588.
- Peterson J.* Observation and modeling of seismic background noise // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1993. № 93–322. P. 1–95.
- Romanowicz B., Stakes D., Montagner J.P. et al.* MOISE: A pilot experiment towards long term sea-floor geophysical observatories // *Earth Planets and Space*. 1998. V. 50(11–12). P. 927–937.
- Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I. et al.* The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosciences*. 2017. V. 14. № 9. P. 2283–2292.
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327(5970). P. 1246–1250.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geosciences*. 2014. V. 7(1). P. 64–70.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. V. 373. Article ID: 20140451.
- Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications*. 2017. V. 8. № 15872.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.* Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. V. 9(6). № 251.
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I. et al.* Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // *Seismological Research Letters*. 2013. V. 84. № 5. P. 810–815.
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R. et al.* The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 239. P. 48–63.
- U.S. Geological Survey. Электронный ресурс. 2020. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Webb S.C.* Broadband seismology and noise under the ocean // *Reviews of Geophysics*. 1998. V. 36. № 1. P. 105–142.
- Welch P.D.* The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. V. AU-15. № 2. P. 70–73.
- Wolin E., McNamara D.E.* Establishing High-Frequency Noise Baselines to 100 Hz Based on Millions of Power Spectra from IRIS MUSTANG // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020. V. 110. № 1. P. 270–278.

Seismotectonics and Seismicity of the Laptev Sea Region: State of the Art and the First Experience of Annual Installation of the Bottom Seismic Stations on Shelf

A. A. Krylov^{1, 2, *}, A. I. Ivashchenko¹, S. A. Kovachev¹, N. V. Tsukanov¹, M. E. Kulikov¹,
I. P. Medvedev¹, D. A. Il'insky^{1, 2}, and N. E. Shakhova^{3, 4}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nahimovsky prosp., 36, Moscow, 117997 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Institutsky lane, 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701 Russia*

³*National Research Tomsk State University, Lenin prosp., 36, Tomsk, 634050 Russia*

⁴*International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks,
Koyukuk Dr. str., 2160, PO Box 757340, Fairbanks, AK 99775 USA*

*e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru

We give a review of present-day representations on seismotectonics and seismicity of the Laptev Sea region with a rift system being its main feature that extends over the shelf from the continental slope where it meets the mid-ocean Gakkel Ridge up to the continent coast. Several models exist of the recent evolution of the region, however, no one is preferable due to the lack of local instrumental observations of microseismicity characterizing rift zones. Alternative approach is a direct deployment of bottom seismic stations on shelf. We have installed the local network consisting of seven broadband bottom seismic stations in the center of the Laptev Sea during the 73 cruise of RV “Academik Mstislav Keldysh”. Comparative analysis of noise spectra, calculated using the records of hydrophone, bottom seismograph and wave recorder has shown that amplitude level of noise spectra strongly depend on the wind waves, which in turn depend on ice cover of the sea, and therefore recording opportunities of the group of bottom seismic stations are restricted to the winter observational periods.

Keywords: seismotectonics, seismicity, shelf, Laptev Sea, temporary local observational networks, bottom seismic stations