

УДК 550.348. (100)

Сейсмологические наблюдения в Антарктиде

© 2019 г. О.Е. Старовойт¹, А.А. Маловичко¹, С.Г. Пойгина¹,
Д.Г. Бадалян¹, В.В. Крумпан², А.М. Милехина¹

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; ²ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Показана история развития сейсмологических наблюдений в Антарктиде. Представлены карты расположения действующих сейсмических станций и эпицентров землетрясений на территории материка за инструментальный период мониторинга (1956–2018 гг.) по данным международных центров. Российские сейсмические станции осуществляют мониторинг сильных землетрясений Земного шара, землетрясений в районе сейсмического пояса вокруг Антарктиды и локальных явлений в Антарктиде, в том числе местных землетрясений и разрывов ледникового покрова. С 1999 г. станция «Новолазаревская» оснащена цифровым оборудованием. Сделан анализ сейсмичности шестого континента, показаны записи самых сильных землетрясений Антарктики (2007, 2008 и 2012 гг.) станциями «Мирный» и «Новолазаревская».

Ключевые слова: Антарктида, сейсмическая станция, сейсмологические наблюдения, цифровая запись, сводная обработка, землетрясение.

Для цитирования: Старовойт О.Е., Маловичко А.А., Пойгина С.Г., Бадалян Д.Г., Крумпан В.В., Милехина А.М. Сейсмологические наблюдения в Антарктиде // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 11–22. doi: . DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.01>

В рамках подготовки к Международному геофизическому году (МГГ) 1957–1958 гг. в СССР была разработана программа Советской антарктической экспедиции, в которую, по предложению директора Геофизического института АН СССР Г.А. Гамбурцева, были включены сейсмические наблюдения на станциях «Мирный», «Оазис Бангера» и «Восток» с целью изучения сейсмичности Южного полушария и контроля за возможными иностранными испытаниями ядерного оружия в этой части земного шара, в т.ч. в самой Антарктиде [Гамбурцев, Гамбурцева, 2003].

Первая советская сейсмическая станция в Антарктиде «Мирный» (международный код MIR) была организована в 1956 г. в составе 1-ой Комплексной антарктической экспедиции (КАЭ) АН СССР. Сотрудник Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) А.Д. Сытинский активно участвовал в её проектировании, технологическом оснащении и обслуживании [Александр..., 2019]. Многие годы, вплоть до своей кончины, в 2003 г., Александр Дмитриевич курировал в АНИИ работу российских антарктических сейсмических станций. Ранее сейсмические наблюдения на шестом континенте проводились только на трёх зару-

бежных станциях: ANC (Marguerite Bay) в 1947–1948 гг. и ОНС (O'Higgins) с 1955 по 2006 г. – на Антарктическом полуострове; ТАА (Tette Adelie) в 1955–1963 гг. – на Земле Адели.

Станция «Мирный» расположена на берегу моря Дейвиса (Индийский сектор Южного океана) на небольшом выступе, получившем название п-ов Мирный. Постройки станции размещены на четырёх выходах скальных пород – сопках Комсомольская, Радио, Моренная и Ветров, сложенных мигматизированными кристаллическими сланцами, габбродолеритами и чарнокитами. Берег материка представляет собой снежно-ледяной барьер высотой 15–20 м над уровнем моря. Сейсмический павильон в виде стандартного щитового дома был установлен над котлованом глубиной 2 м, вырубленным в монолитной скале на фундаменте из стальных ферм [Саватюгин, Преображенская, 1999].

Вот как описывает непростые условия работы на станции «Мирный» в 1959 г. (4-я Советская антарктическая экспедиция (САЭ)) один из первых зимовщиков-сейсмологов, сотрудник Института физики Земли АН СССР Вадим Александрович Ан: «В моём домике сейсмостанции не было предусмотрено выхода с верхним люком, как в большинстве домов Мирного.

На всякий случай я заранее подготовил несколько бамбуковых шестов, чтобы потом изнутри высунуть их через снег — указать спасателям, где мой вход. Когда меня засыпало, я испугался — не задохнусь ли под снегом — и несколько раз за ночь протыкал снег, чтобы был доступ воздуха. Утром ребята меня откопали, пришлось делать временный выход наверх. Многие дома Мирного, особенно по центральной «улице» (конечно, имени Ленина) были засыпаны ещё в предыдущие экспедиции. Ходить приходилось через вертикальный лаз, иногда метра два высотой.» (рис. 1) [Ан, 2017].



а



б

Рис. 1. Сейсмический павильон станции «Мирный» (стандартный щитовой дом) в 1959 г.: а — до пурги; б — после пурги (видны только шест и временный выход на крыше домика) [Ан, 2017]

В 1961 г. в 3060 км к западу от станции «Мирный» была построена ещё одна советская станция «Новолазаревская» (6-я САЭ, начальник В.И. Гербович). Она расположена на крайней юго-восточной оконечности оазиса Ширмахера, примерно в 80 км от берега моря Лазарева. Оазис представляет собой участок коренных пород, вытянутых узкой полосой длиной около 17 км и шириной около 3 км в направлении с запада—северо-запада на восток—юго-восток; его рельеф

— типичный мелкосопочник с абсолютными отметками до 228 м. Оазис сложен в основном толщами докембрийского возраста, состоящими из кислых гнейсов и кристаллических сланцев с интрузиями габброноритов, габбродиоритов и жилами пегматитов. Мощность четвертичных отложений обычно не превышает нескольких метров. В оазисе насчитывается до 180 озёр. В 1961 г. при создании станции были построены четыре сборно-щитовых дома и ряд научных павильонов. В 1962 г. в период работы 7-й САЭ строительство было продолжено, в 100 м к юго-западу от основных сооружений был построен ещё один сборно-щитовой дом, где была размещена геофизическая, в т.ч. сейсмометрическая аппаратура [Саватюгин, Преображенская, 1999]. Сейсмическая станция «Новолазаревская» (международный код NVL) начала регистрацию 1 апреля 1962 г., первым сейсмологом стал Геннадий Романович Контарев.

Станции «Мирный» и «Новолазаревская» с самого начала работы были включены в Единую сеть сейсмологических наблюдений СССР, созданную Институтом физики Земли АН СССР при активном участии академических институтов России и практически всех (кроме асейсмичной Прибалтики) Союзных Республик СССР. С 1994 г. они входят в телесеismicкую сеть Геофизической службы РАН (ныне ФИЦ ЕГС РАН), главной задачей которой является обеспечение непрерывного мониторинга сейсмоактивных зон земного шара, включая Россию. На российские антарктические сейсмостанции были возложены следующие функции:

- мониторинг сильных землетрясений земного шара с магнитудой $M > 6$;
- регистрация землетрясений сейсмоактивной зоны вокруг Антарктиды;
- регистрация локальных явлений в Антарктиде, в том числе местных землетрясений и разрывов ледникового покрова.

В настоящее время Российская антарктическая экспедиция (РАЭ) осуществляет свою деятельность на пяти постоянно действующих антарктических станциях — «Мирный», «Новолазаревская», «Беллинсгаузен», «Прогресс» и «Восток», а также на полевых базах «Молодёжная», «Ленинградская», «Русская», «Дружная-4» и полевом лагере «Оазис». Работа ведётся по полному комплексу программ мониторинга природной среды Антарктики: стандартные метеорологические и актинометрические наблюдения, контроль ледовых условий и общего содержания озона (ОСО), геофизические наблюдения по геомагнитной и ионосферной программам,

а также аэрологические и сейсмологические наблюдения [Состояние..., 2018]. Сейсмическая аппаратура установлена только на двух станциях, причём на станции «Мирный» наблюдения временно законсервированы (с 26 декабря 2012 г.).

Оснащение обеих сейсмостанций много лет было представлено набором аналоговой аппаратуры — сейсмометрами с высокочувствительным короткопериодным каналом СКМ-3 и среднепериодным сейсмографом СКД с каналом пониженной чувствительности [Старовойт, Мишаткин, 2001].

В мае-июле 1999 г. на станции «Новолазаревская» была установлена широкополосная 16-рядная цифровая аппаратура SDAS, разработанная и изготовленная Центральной опытно-методической экспедицией (ЦОМЭ) ГС РАН совместно с научно-производственным объединением «Геотех» [Старовойт и др., 2004]. Эта аппаратура имеет полосу пропускания 0.04–5 Гц, частоту квантования 20 отсч/с и динамический диапазон порядка 90 дБ, что позволило перейти на цифровую технологию сбора, хранения и обработки сейсмических записей [Старовойт, Мишаткин, 2001; Красилов и др., 2006; Габсатарова, Пойгина, 2005; Косой и др., 2000]. Комплект широкополосных сейсмометров СВКД(Z), СГКД(NS) и СГКД(EW) на станции «Новолазаревская» был установлен в штольне (рис. 2а),



а



б

Рис. 2. Вход в штольню (а) и Геодом (б) на станции «Новолазаревская»

расположенной на глубине 7 м в монолитном выходе коренных пород (гнейсах) и отстоящей от места расположения аппаратуры сбора и обработки данных на расстояние 50 м. Кроме сейсмометров, в штольне находятся блок сбора и выделения сейсмического сигнала DAS (RT97-08) и система резервного питания DAS (щелочные аккумуляторы НК-55).

Компьютерная часть размещается в сейсмолаборатории Геодома (рис. 2б), построенного в 1980 г. и занимает две комнаты. В одной комнате установлен основной компьютер обработки и архивации (она же является жилым помещением сейсмолога), во второй установлен резервный компьютер обработки и архивации и блок ARS. Под Геодомом был сооружён отапливаемый павильон, куда были перенесены сейсмометры, регистрация началась в июне 1981 года. После переноса сейсмометров в штольню это помещение стало использоваться как мастерская, для хранения старого оборудования и запасных частей, а также для проведения научных наблюдений на бетонных постаментов [Калинкин, 2019].

Уникальное расположение сейсмометров на монолитных выходах коренных пород практически асейсмичного материка, вдали от цивилизации, создающей высокий уровень шумов, позволяет регистрировать сейсмические волны от землетрясений, происходящих на значительных расстояниях от этих станций (землетрясения с магнитудой $M=6$ и более регистрируются на расстоянии, достигающем 165° (около 18000 км). Высокочувствительная аппаратура позволяет следить также и за менее интенсивными землетрясениями океанического пояса, окружающего материк на 15–25-градусном удалении от побережья.

Обработка аналоговых сейсмологических данных на станциях «Мирный» (вплоть до 2012 г.) и «Новолазаревская» (до апреля 1999 г.) состояла из следующих этапов. Сейсмограммы, полученные в результате непрерывных наблюдений, подвергались предварительной обработке, которая включала ведение регистрационного журнала смены сейсмограмм, выделение сигналов точного времени и определение поправок времени, оформление сейсмограмм. Затем проводилась интерпретация записей землетрясений, состоящая в выделении вступлений сейсмических волн, определении времени и чёткости вступлений, идентификации сейсмических волн и определении основных параметров землетрясений. Все работы по обработке записей землетрясений проводились в соответствии с [Кондорская и др., 1981].

Результаты интерпретации заносились в станционный журнал, на основе которого

составлялись ежедневные оперативные сводки, отправляемые по телеграфу в Информационно-обработывающий центр (ИОЦ) ГС РАН. Сводки использовались в сводной обработке землетрясений при составлении ежедекадных оперативных каталогов и Сейсмологических бюллетеней [*Сейсмологический бюллетень*, 2019]. Помимо этого, ежедневно осуществлялось слежение за уровнем микросейсм и выделение на записях прибора СКМ-3 короткопериодных колебаний, связанных с разрывами ледникового покрова Антарктиды. Полученные сейсмограммы и станционные журналы по возвращении экспедиции передавались для изучения в обсерваторию «Пулково» (г. Санкт-Петербург), а оттуда – на хранение в архив ГС РАН (г. Обнинск).

С апреля 1999 г. обработка цифровых записей землетрясений на станции «Новолазаревская» проводится на компьютере с помощью программы WSG, разработанной в ГС РАН [*Красилов и др.*, 2006], в соответствии с методикой [*Габсатарова, Пойгина*, 2005] и включает всебя выделение вступлений сейсмических волн, определение времени и чёткости вступлений, идентификацию сейсмических волн и определение основных параметров землетрясений (времени в очаге, расстояния до эпицентра и магнитуды). Координаты эпицентров по данным одной станции не определяются или определяются с большой погрешностью. Результаты интерпретации заносятся в электронную базу данных, на основе которых составляются ежедневные оперативные сводки, отправляемые в ИОЦ ФИЦ ЕГС РАН. Эти данные используются в сводной обработке землетрясений при составлении ежедекадных оперативных каталогов и Сейсмологических бюллетеней [*Сейсмологический бюллетень*, 2019]. Обработываются записи разрывов ледникового покрова, выделяются интервалы «возможно разрывов ледникового покрова» длительностью от нескольких секунд до трёх минут, но остаётся проблема их однозначной интерпретации, т.к. частотный состав этих записей совпадает с частотным составом шумов. После подключения в январе 2011 г. к Интернету появилась возможность получать данные о землетрясениях из разных сейсмологических центров, что позволило существенно улучшить качество обработки цифровых записей на станции. Цифровые записи и результаты обработки архивируются на компакт-дисках, которые по возвращении экспедиции передаются в архив ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск).

Качество работы аппаратуры и обработки записей землетрясений на станциях «Мирный» и «Новолазаревская» во многом зависит от ква-

лификации сейсмолога. В разные годы количество полностью обработанных землетрясений по отношению к общему числу зарегистрированных вступлений колебалось в процентном соотношении от 4 до 64 %, а количество обработанных землетрясений с $MPSP \geq 6$ – от 31 до 90 % от их общего числа.

Начиная со времени подготовки к МГГ 1957–1958 г., Антарктида стала континентом тесного сотрудничества учёных разных стран. По данным Международного сейсмологического центра (ISC), в разные годы здесь работало 44 сеймостанции и пять сейсмических микрогрупп. В настоящее время действуют 24 трёхкомпонентные сейсмические станции и четыре микрогруппы [*International...*, 2019a] (рис. 3). Совместная обработка данных антарктических сейсмических станций позволяет международным и национальным центрам (ISC [*International...*, 2019b], Геологическая служба США – NEIC [*USGS*], ФИЦ ЕГС РАН – GSGSR [*Сейсмологический бюллетень*, 2019] и др.) с достаточной большой точностью определять координаты гипоцентров и другие параметры очагов землетрясений на ледяном континенте.

Большая часть очагов землетрясений, регистрируемых антарктическими станциями, находится в Южном полушарии, в районах, входящих в так называемый сейсмический пояс Антарктиды, значительное число – на территории Индонезии, Вануату, Новой Зеландии, Южной Америки, Южной Африки, моря Скоша, Южных Шетландских, Южных Сандвичевых, Соломоновых островов, Санта-Круз, а также Австрало-Антарктического поднятия, Африкано-Антарктического, Атлантического и Южно-Тихоокеанского океанических хребтов.

Сейсмический пояс Антарктиды приурочен к зонам альпийской молодой складчатости, расположенной далеко в океане вокруг Южного континента. Этот пояс соединён с главными сейсмическими поясами земного шара [*Гутенберг, Рихтер*, 1948]. Так, от острова Маккуори к западу Тихоокеанский сейсмический пояс соединяется через Австрало-Антарктическое поднятие с сейсмическим поясом Индийского океана и далее, через Африкано-Антарктический океанический хребет с Атлантическим сейсмическим поясом.

Наличие эпицентров землетрясений между Южно-Антильским и Африкано-Антарктическим хребтами (о-ва Буве, Южные Сандвичевы) указывает на связь Тихоокеанского и Атлантического сейсмических поясов. Юго-западная часть Тихоокеанского пояса соединяется через Южно-

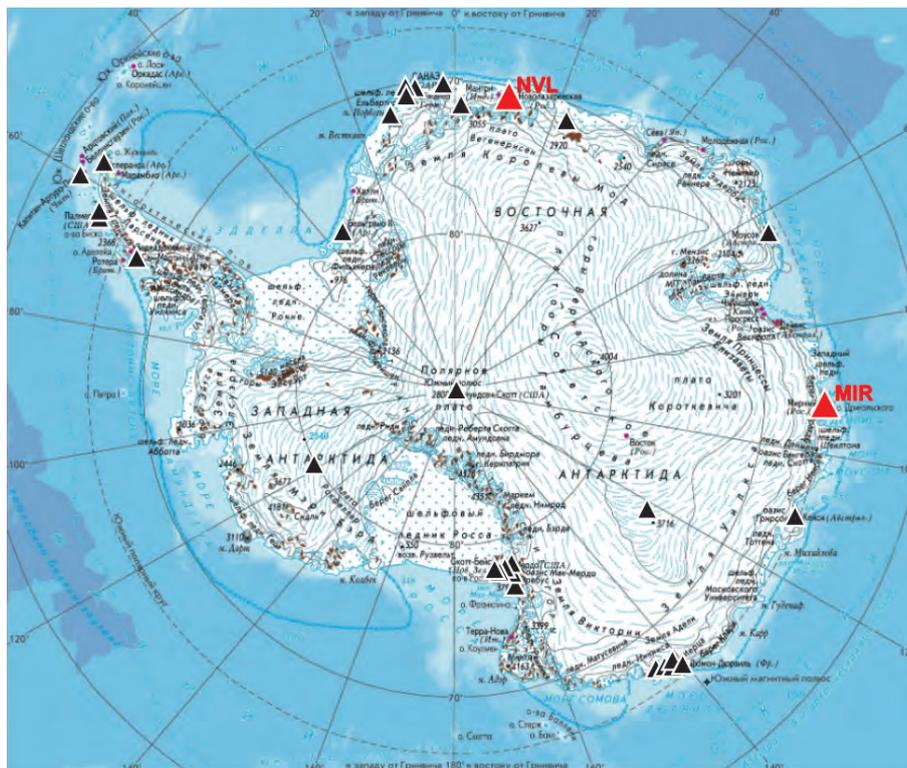


Рис. 3. Расположение российских станций «Новолазаревская» и «Мирный», а также зарубежных сейсмических станций, действующих в настоящее время в Антарктиде

Тихоокеанский хребт с Южно-Американским сейсмическим поясом. Так что асейсмичная Антарктида окружена активным сейсмическим поясом. В этом можно усматривать проявление процесса раскола Гондваны [Грушинский, Дралкин, 1988]. Асейсмичной территория континентальной части Антарктиды многие годы считалась из-за отсутствия сейсмических наблюдений. С увеличением числа цифровых сейсмических станций Глобальной сети, а, значит, и чувствительности этой сети количество зарегистрированных землетрясений (в основном слабых, так называемых ледотрясений или ледяных землетрясений) в континентальной части Антарктиды в последние три десятилетия значительно выросло (рис. 4). Но, как и прежде, любое произошедшее на ледяном континенте сейсмическое событие уникально для специалистов, т.к. остаются вопросы о причинах его возникновения.

На рис. 5 представлена карта землетрясений на территории и вблизи берегов Антарктиды за инструментальный период сейсмических наблюдений с 1956 года.

Наибольшая сейсмическая активность на шестом континенте была отмечена в период с 28 мая 2007 г. по 28 ноября 2008 г., когда число зарегистрированных землетрясений составило 18, в т.ч. два форшока в 2007 г. и 15 афтершоков

в 2008 г. землетрясения 4 ноября 2007 г. с $m_b=5.7$. Самый сильный афтершок с $m_b=5.0$ произошёл 23 июля 2008 года. Эпицентры этих событий находились на Земле Уилкса в 60–80 км к юго-востоку от аэродрома Уилкинс. Цифровая запись самого сильного за всю историю инструментальных наблюдений землетрясения в Антарктиде 4 ноября 2007 г. с $m_b=5.7$ на станции «Новолазаревская» с отметками вступления основных сейсмических фаз P , S и LRM показана на рис. 6.

На рис. 7 (а, б) показаны сейсмограммы землетрясения 23 июля 2008 г. в 08^h12^m с $m_b=5.0$ на Земле Уилкса: цифровая запись станцией

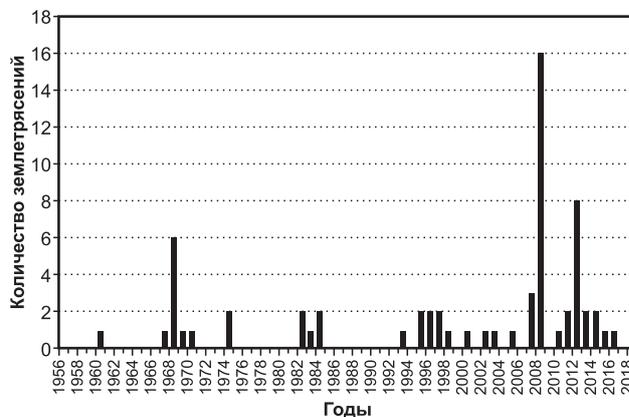


Рис. 4. Распределение количества землетрясений в континентальной части Антарктиды по годам

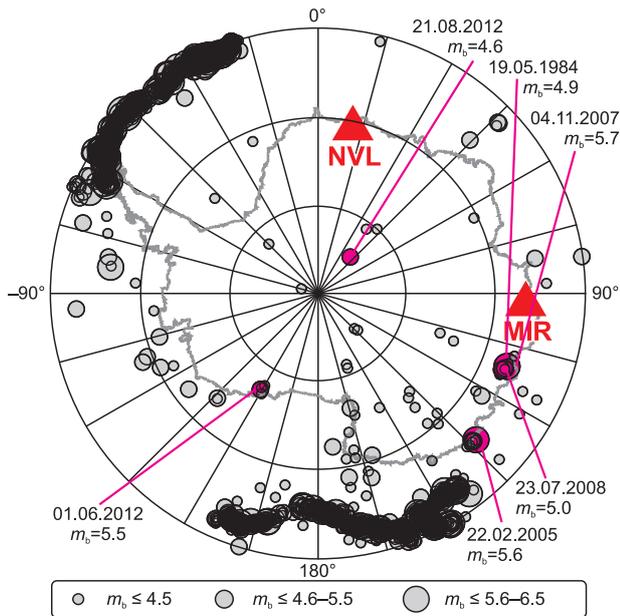


Рис 5. Карта землетрясений Антарктиды за инструментальный период наблюдений (1956–2018 гг.) по данным ФИЦ ЕГС РАН, NEIC и ISC.

Розовыми выносками показаны эпицентры наиболее сильных землетрясений в Антарктиде: 22 февраля 2005 г. с $m_b=5.6$ в бухте Дейвиса, близ берега Клари; 19 мая 1984 г. с $m_b=4.9$, 4 ноября 2007 г. с $m_b=5.7$ и 23 июля 2008 г. с $m_b=5.0$ в районе аэродрома Уилкинса; 1 июня 2012 г. на берегу Сондерса с $m_b=5.5$

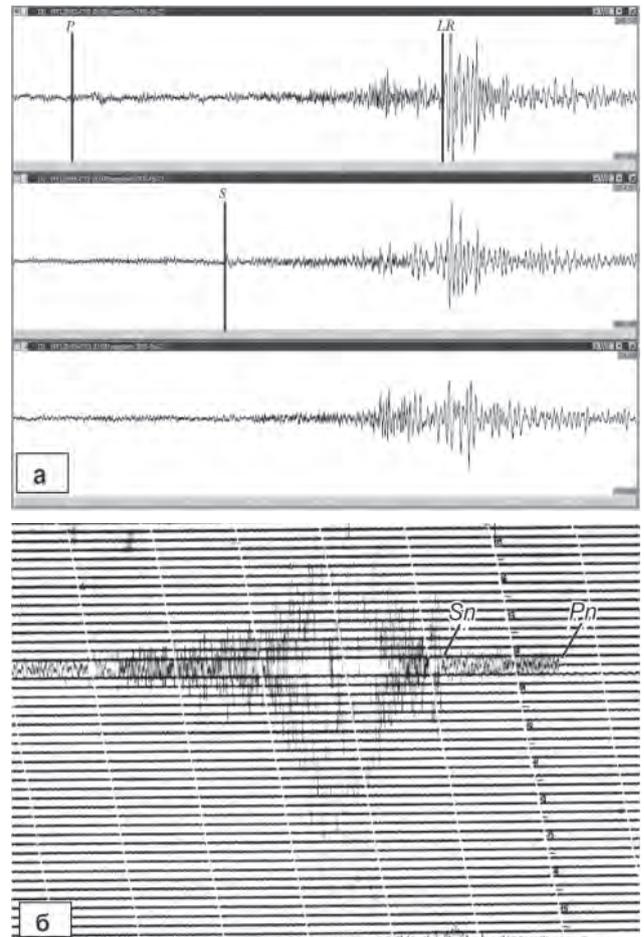


Рис. 7. Запись землетрясения 23 июля 2008 г. в 08^h12^m с $m_b=5.0$ на Земле Уилкса ($\varphi=67.20^\circ\text{S}$, $\lambda=112.31^\circ\text{E}$) станциями NVL ($\Delta=3570$ км) (а) и MIR ($\Delta=842$ км) (б)

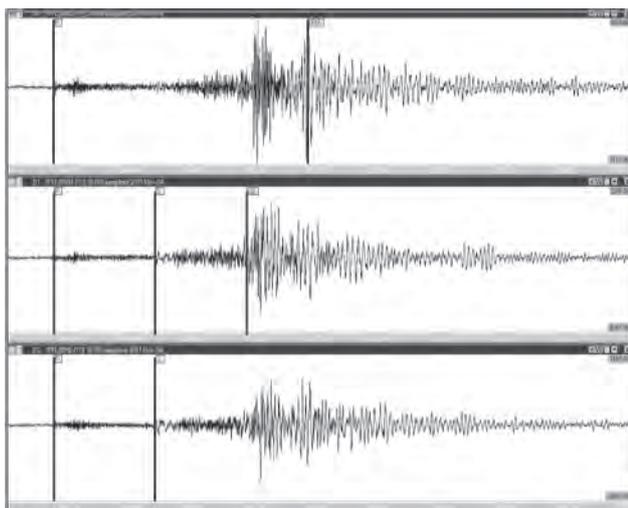


Рис. 6. Запись землетрясения 4 ноября 2007 г. в 20^h35^m с $m_b=5.7$ на Земле Уилкса ($\varphi=67.14^\circ\text{S}$, $\lambda=111.50^\circ\text{E}$) станцией NVL ($\Delta=3550$ км)

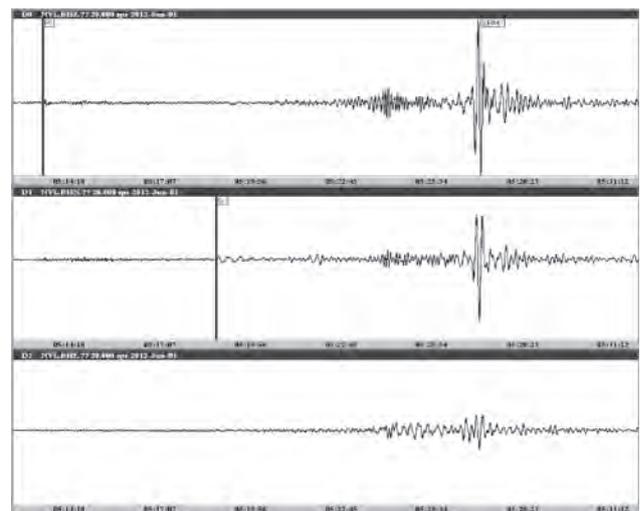


Рис. 8. Трёхкомпонентная запись станции NVL ($\Delta=3510$ км) землетрясения 01.06.2012 г. в 05^h07^m с $m_b=5.5$ на берегу Сондерса ($\varphi=77.19^\circ\text{S}$, $\lambda=148.87^\circ\text{W}$)

«Новолазаревская» с отметками вступлений основных сейсмических фаз P , S и LR , а также аналоговая запись сейсмометра СКМ-3 на станции «Мирный» с отметками вступлений фаз Pn и Sn .

На рис. 8 показана трёхкомпонентная цифровая запись станцией «Новолазаревская» одного из самых сильных землетрясений в Антарктиде 1 июня 2012 г. в 05^h07^m с $m_b=5.5$ на берегу Сондерса. Землетрясению предшествовали два форшока 13 января 2012 г. с $m_b=4.5$ и 4.6. 1 июня через 15 час 10 мин последовал афтершок с $m_b=4.2$, ещё один с $m_b=4.1$ зарегистрирован 6 сентября 2012 г. Эти слабые события станции «Новолазаревская» и «Мирный» не зарегистрировали.

21 августа 2012 г. в 09^h26^m станцией «Новолазаревская» было зарегистрировано ещё одно интересное сейсмическое событие с $m_b=4.6$ [International..., 2019] в центральной части Восточной Антарктиды в горах Гамбурцева (рис. 5, 9). Оно стало самым сильным землетрясением в континентальной части Антарктиды за всю историю наблюдений.

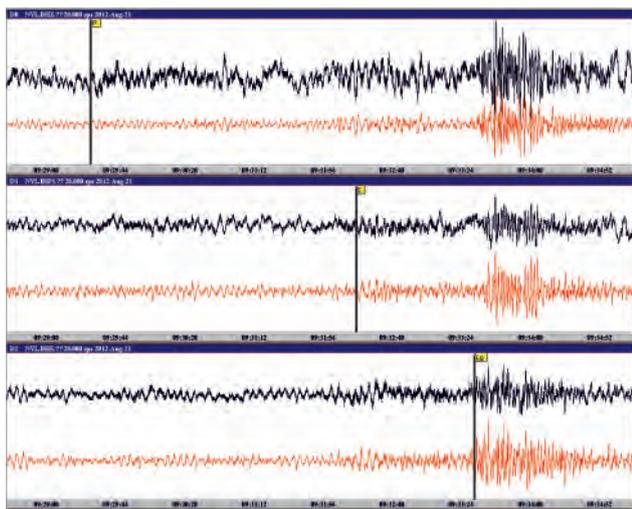


Рис. 9. Трёхкомпонентная запись станцией NVL ($\Delta=1630$ км) землетрясения 21.08.2012 г. в 09^h26^m в Восточной Антарктиде ($\varphi=84.41^\circ S$, $\lambda=41.50^\circ E$ с $m_b=4.6$).

Верхние (чёрные) кривые — нефильтрованная запись, нижние (красные) кривые — запись фильтрована в полосе 0.2–1.4 Гц

Регулярная работа стационарных сейсмических станций, в т.ч. российских, вносит весомый вклад в исследование ледяного континента, в частности, они играют большую роль в изучении микросейсм, т.е. микроколебаний почвы, связанных с целым рядом причин. В период весеннего таяния льда при сильных ветрах воз-

никают короткопериодные микросейсм — сезонные явления. В то же время длиннопериодные микросейсм наблюдаются круглогодично — они связаны с атмосферными возмущениями, происходящими за внешней кромкой льдов. В основном микросейсм сопутствуют штормовой погоде с ветрами, дующими в сторону берега. Таким образом, они связаны с погодными условиями и указывают на циркуляцию атмосферы в различных областях над океаном. Короткопериодные микросейсм появляются также при подвижках льда, отколах айсбергов, разрывах ледников. Эти микросейсм дают ценную информацию для изучения динамики ледового покрова [Грушинский, Дралкин, 1988]. На рис. 10 показан пример записи длиннопериодных штормовых микросейсм станцией NVL в феврале 2017 года. Для регистрации короткопериодных микросейсм аппаратуре станции NVL не хватает динамического диапазона (0.04–5 Гц).

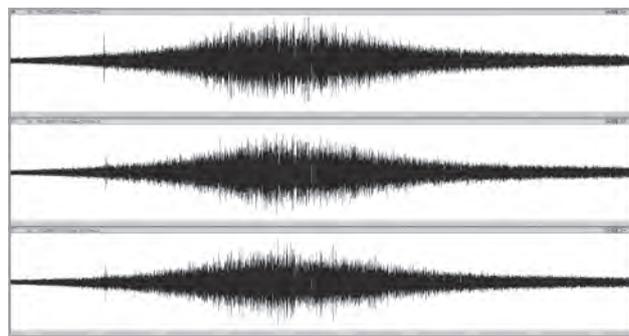


Рис. 10. Запись штормовых микросейсм 21–22 февраля 2017 г. станцией NVL

В последнее время всё больше сейсмологов начинают изучать ледяные землетрясения и другие сейсмические сигналы из криосферы, в частности, сотрудники норвежского центра NORSAR использовали в своих исследованиях дрейфа айсбергов записи станций MIR и NVL.

Работа учёных из Технологического института Джорджии, США, показала, что антарктическая мерзлота чувствительна к сейсмическим волнам даже очень удалённых землетрясений, что подтвердилось сейсмическими записями антарктических станций Чилийского землетрясения 2010 г. с $M=8.8$. «В то время по Антарктиде прокатилось несколько небольших ледотрясений, большинство из которых были запущены во время или сразу после прохождения длиннопериодных волн Релея, генерируемых чилийским катаклизмом, — писал один из авторов исследования Чжиган Пэн (Zhigang Peng). — Это несколько отличается от типичных для

Антарктиды микро землетрясений. Дрожь провоцируют как волны Релея, так и волны Лява — однако похоже, ледотрясения производят лишь волны Релея. Это позволяет предположить, что механизм ледотрясения может несколько отличаться от регулярных землетрясений. Возможно, лёд более восприимчив к изменениям, производимым волнами Релея в отношении земли, когда кора может сжиматься или расширяться. Поскольку эти волны проходят близко к поверхности, они вызывают образование трещин и разломов во льдах, что и регистрируется сейсмическими станциями как ледотрясения». Некоторые ледотрясения были короткими всплесками, длившимися менее одной секунды. Другие же были более длительными — до 10 секунд. Дрожь прошла по разным частям континента и была зафиксирована как вдоль побережья, так и в районе Южного полюса. Также Чжиган Пэн выяснил, что по крайней мере некоторые из ледотрясений сами создают поверхностные волны, так что они, вероятно, формируются очень близко к поверхности льда. Чилийское землетрясение 2010 г. произошло на относительно близком расстоянии от Антарктиды (примерно 5000 км), так что получившийся эффект гонга вполне логичен [Peng et al., 2014].

На записях станций MIR и NVL этот эффект обнаружить не удалось. Аналоговая сейсмограмма прибора СКМ ($\Delta T=0.2-1.3$ с) на станции MIR из-за наложения дорожек записи Чилийского землетрясения оказалась практически нечитаемой, к тому же ей, как и цифровой записи станции NVL, не хватило динамического диапазона для регистрации этих короткопериодных (5–20 Гц) событий.

По итогам работ РАЭ в Государственном научном центре «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ААНИИ) выпускаются электронные квартальные бюллетени «Состояние природной среды Антарктики» [Квартальный..., 2019], где раз в год, начиная с 1999 г., публикуются работы российских сейсмических станций на этом материке. Результаты обработки и анализа сейсмограмм станций «Мирный» и «Новолазаревская» за период 1957–1987 гг., проводимых сотрудниками станции «Пулково», были опубликованы в ежегодниках «Землетрясения в СССР» [Кочетов, Лазарева, 1989; 1991; 1993]. С 2003 по 2012 г. результаты сейсмических наблюдений в Антарктиде публиковались в ежегодном издании «Землетрясения Северной Евразии» [Пойгина, 2009–2015; 2016–2018].

Большой вклад в организацию работы станций «Мирный» и «Новолазаревская» в советское

время внесли сотрудники сейсмической станции «Пулково», которая с 1957 г. стала Полярным территориальным центром для сейсмостанций в Арктике и Антарктиде. А.П. Лазарева, Т.В. Маторина и С.Ф. Оборина готовили сейсмологов для самостоятельной работы на антарктических станциях, обучали определению параметров сейсмографов и обработке сейсмограмм. Во время зимовок осуществлялся оперативный контроль бюллетеней, передаваемых со станций по телетайпу. После возвращения экспедиций в Пулково вышеупомянутыми сотрудницами производились приёмка и оценка качества материалов наблюдений, а затем А.П. Лазарева и В.В. Кочетов (Крумпан) обрабатывали, анализировали и обобщали полученные данные [Кочетов, Лазарева, 1989; 1991; 1993]. В последние 30 лет подготовка и обучение сейсмологов, выезжающих на работу в Антарктиду, а также техническое сопровождение станций осуществляется сотрудниками Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН в г. Обнинске (Л.С. Чепкунас, Н.А. Жбрыкунова, Д.Г. Бадалян, Д.Ю. Мехрюшев, И.П. Габсатарова, Т.Г. Левкина, М.В. Коломиец, М.А. Попов и др.). Изучением и обобщением сейсмологических данных российских антарктических станций занимается научный сотрудник С.Г. Пойгина [Квартальный..., 2019; Пойгина, 2009–2015; 2016–2018].

До 2008 г. весь архив антарктических сейсмостанций хранился на станции «Пулково», а затем был перевезён в г. Обнинск. В настоящее время все материалы наблюдений — аналоговые сейсмограммы станций «Мирный» (с июля 1956 г. по декабрь 2012 г.) и «Новолазаревская» (с апреля 1962 г. по апрель 1999 г.), компакт-диски с записями волновых форм станции «Новолазаревская» (с мая 1999 г. по март 2019 г.), результаты обработки аналоговых и цифровых сейсмограмм (станционные журналы, сводки, базы данных), а также ежегодные отчёты по сейсмическим наблюдениям и паспорта станций, — находятся на хранении в центральном архиве ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск) и предоставляются по запросам широкому кругу пользователей.

Работа в Антарктиде отличается повышенным уровнем трудностей, к которым относятся и экстремальные погодные условия, и сложность деятельности специалистов, и относительная изоляция от остального мира. Необходимо отметить самоотверженную работу сотрудников, неоднократно принимавших участие в антарктических экспедициях — М.М. Ферчев, В.Т. Такпешев, В.П. Чугунов, Б.А. Шельяков, С.А. Польгун, В.Д. Осокин, Я.А. Шварцбург,

А.П. Дубровин, М.В. Бабий, П.Н. Студенов, В.С. Кузьмин, М.И. Грачев, П.Л. Косой, А.В. Савенков и В.И. Зайцев, а также Б.Д. Беликов, В.П. Трипольников, Г.И. Ковалев и другие, в т.ч. А.А. Калинин, который за период времени с 2003 по 2018 г. работал на станции «Новолазаревская» в девяти РАЭ.

Авторы выражают благодарность сотруднику ИДГ РАН В.А. Ану за любезно предоставленную рукопись автобиографии и фотографии, а также сотрудникам архива ФИЦ ЕГС РАН Д.А. Дорошенко, Л.В. Астафьевой и Е.Б. Тереховой за помощь в подборке материалов к статье.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00453-19-02.

Литература

- Александр Дмитриевич Сытинский (1925–2003) // Федеральная целевая программа «Мировой океан». Подпрограмма «Изучение и исследование Антарктики». Российская антарктическая экспедиция [Сайт]. — URL: http://www.aagi.aq/persons/sytinsky/sytinsky_ru.html. Дата обращения 02.04.2019.
- Ан В.А. Краткая история жизни советского (российского) корейца. Автобиографический очерк. Гл. 7. КАЭ-4. — М.: Личные фонды автора, 2017.
- Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Сценарий суточной обработки трёхкомпонентной записи одной станции программой WSG v 5.516 и выше. Приложение 3 // Результаты проведения комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений и обработки данных на базе стационарных и мобильных сейсмических сетей (отчёт ЦОМЭ ГС РАН за 2004 год) / Под ред. Д.Ю. Мехрюшева. — Обнинск: Фонды ГС РАН, 2005.
- Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г. Григорий Александрович Гамбурцев, 1903–1955 / Отв. ред. В.Н. Страхов. — М.: Наука, 2003. — С. 163.
- Грушинский Н.П., Дралкин А.Г. Антарктида. — М.: Недра, 1988. — 199 с. [Электронный ресурс]. — URL: <https://litresp.ru/chitat/ru/%D0%93/grushinskij-nikolaj-pantelejmonovich/antarktida>
- Гутенберг Б., Рихтер Ч. Сейсмичность Земли. — М.: Иностранная литература, 1948. — 160 с.
- Калинкин А.А. Научно-технический отчёт по сейсмологии. Станция «Новолазаревская». 63 Российская антарктическая экспедиция. — Обнинск: Фонды ФИЦ ЕГС РАН, 2019.
- Квартальный бюллетень «Состояние природной среды Антарктики» [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.aagi.aq> Дата обращения 02.04.2019.
- Кондорская Н.В., Аранович З.И., Соловьева О.Н., Шебалин Н.В. (отв. сост.). Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. — М.: Наука, 1981. — 272 с.
- Косой П.Л., Дубровин А.П., Пойгина С.Г. VI. Сейсмические наблюдения в Антарктиде в 1999 г. // Состояние природной среды Антарктики. Июль–сентябрь 2000 г. / Под ред. В.В. Лукина. — СПб., 2000. — С. 47–55. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.aagi.aq>
- Кочетов В.В., Лазарева А.П. Землетрясения Антарктиды // Землетрясения в СССР в 1988 году. — М.: Наука, 1991. — С. 218–219.
- Кочетов В.В., Лазарева А.П. Землетрясения Антарктиды // Землетрясения в СССР в 1989 году. — М.: Наука, 1993. — С. 236–237.
- Кочетов В.В., Лазарева А.П. Землетрясения Антарктиды в 1957–1984 гг. // Землетрясения в СССР в 1986 году. — М.: Наука, 1989. — С. 187–188, 337.
- Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. — Обнинск: ГС РАН, 2006. — С. 77–83.
- Пойгина С.Г. Обзор сейсмичности. Сейсмические наблюдения в Антарктиде // Землетрясения Северной Евразии, 2003–2012 гг. — Обнинск: ГС РАН, 2009–2015; ФИЦ ЕГС РАН, 2016–2018.
- Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. В 3-х т. Т. I. Первая — Двадцатая советская антарктическая экспедиция. — СПб: Гидрометеоздат, 1999 [Электронный ресурс]. — URL: <http://os.x-pdf.ru/20raznoe/270316-1-lmsavatyugin-mappreobrazhenskaya-rossiyskie-issledovaniya-antarktike-t.php>
- Сейсмологический бюллетень (ежедекадный). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. — URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/
- Состояние природной среды Антарктики. Квартальный бюллетень. Июль–сентябрь 2018 г. / Под ред. В.В. Лукина. — № 3 (84). — СПб., 2018. — С. 1. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.aagi.aq>
- Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Мехрюшев Д.Ю., Коротин А.В., Красилов С.А., Галушко В.В., Коломиец Ю.Н., Пойгина С.Г., Каменская О.П. Исследование, разработка и создание в Российской Федерации системы сейсмических и геодинамических наблюдений для непрерывного национального и глобального сейсмического мониторинга. Отчёт по договору № 01.700.12.0094 от 01.10.2004. — Обнинск: Фонды ГС РАН, 2004. — С. 77.
- Старовойт О.Е., Мишаткин В.И. Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.). — М.—Обнинск: ГС РАН, 2001. — 88 с.

International Seismological Centre (ISC). International Registry of Seismograph Stations. Station search [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/registries/search/> – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2019a.

International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2019b.

Peng Zh., Walter J.I., Aster R.C., Nyblade A., Wiens D.A., Anandkrishnan S. Antarctic icequakes triggered by the 2010 Maule earthquake in Chile // Nature Geoscience. – 2014. – V. 7. – P. 677–681. – URL: <https://www.nature.com/articles/ngeo2212>

USGS. Earthquakes. Search Earthquake Catalog [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Сведения об авторах

Старовойт Олег Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, рук. науч. напр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: olstar1933@gmail.com

Маловичко Алексей Александрович, член-корреспондент РАН, научный руководитель ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: amal@gsras.ru

Пойгина Светлана Германовна, науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: sveta@gsras.ru

Бадалян Дмитрий Герасимович, зав. отд. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: dbad@gsras.ru

Крумпан Владимир Владимирович, инженер I кат. – рук. с/с «Пулково» ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kvv@plkv.gsras.ru

Милехина Александра Михайловна, мл. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: amilekhina@gsras.ru

Seismological observations in Antarctica

© 2019 O.E. Starovoi¹, A.A. Malovichko¹, S.G. Poygina¹,
D.G. Badalyan¹, V.V. Krumpan², A.M. Milekhina¹

¹GS RAS, Obninsk, Russia; ²GS RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract The history of seismological observations development in Antarctica is shown. Maps of the existing seismic stations and earthquake epicenters location on the mainland territory for the instrumental monitoring period (1956–2018) are presented according to data from International centers. Russian seismic stations monitor major earthquakes around the globe, earthquakes in the seismic zone around Antarctica, and local seismic phenomena in Antarctica, including local earthquakes and ice sheet ruptures. Since 1999, the Novolazarevskaya seismic station has been equipped with digital equipment. An analysis of the sixth continent seismicity was made; the records of the Antarctic strongest earthquakes (2007, 2008, and 2012) by the GS RAS stations Mirny and Novolazarevskaya were shown.

Keywords Antarctica, seismic station, seismological observations, digital records, summary processing, earthquake.

For citation Starovoi, O.E., Malovichko, A.A., Poygina, S.G., Badalyan, D.G., Krumpan, V.V., & Milekhina, A.M. (2019). [Seismological observations in Antarctica]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 1(1), 11–22. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.01>

References

- Aleksandr Dmitriyevich Sytinskii (1925–2003). Personalities. Retrieved August 26, 2019, from http://www.aari.aq/persons/sytinsky/sytinsky_ru.html
- An, V.A. (2017). *Kratkaya istoriya zhizni sovetskogo (rossiyskogo) koreytsa. Avtobiograficheskiy ocherk. Gl. 7. KAE-4* [A brief history of the Soviet (Russian) Korean life. Autobiographical sketch. Ch. 7. CAE-4]. Moscow, Russia: Personal funds of the author. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P., & Poygina, S.G. (2005). [The scenario of daily processing of a three-component record of one station by the program WSG v 5.516 and higher. Appendix 3]. In *Rezultaty provedeniya kompleksnykh seismologicheskikh i geofizicheskikh nablyudeniy i obrabotki dannykh na baze statsionarnykh i mobil'nykh seismicheskikh setey (otchet CEME GS RAS za 2004 god)* (red. D.Yu. Mekhryushev) [Results of complex seismological and geophysical observations and data processing on the basis of stationary and mobile seismic networks (report of the CEME GS RAS for 2004) (Ed. D.Yu. Mehryushev)]. Obninsk, Russia: Funds of the GS RAS. (In Russ.).
- Gamburtsev, A.G., & Gamburtseva, N.G. (2003). *Grigoriy Aleksandrovich Gamburtsev, 1903-1955 (Otv. red. V.N. Strakhov)* [Grigoriy Aleksandrovich Gamburtsev, 1903–1955 (Ed. V.N. Strakhov)]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 163 p. (In Russ.).
- Grushinskiy, N.P., & Dralkin, A.G. (1988). [Antarctica]. Moscow: Nedra Publ. Retrieved from <https://litresp.ru/chitat/ru/%D0%93/grushinskij-nikolaj-pantelejmonovich/antarktida>. (In Russ.).
- GS RAS. (2019). Bulletin of Teleseismic Stations. Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013/
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1954). *Seismicity of the Earth and associated phenomena*. Princeton Univ. Press, Princeton.
- International Seismological Centre. (2019). International Registry of Seismograph Stations, Station search, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/registries/search/>
- International Seismological Centre. (2019). On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2019. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
- Kalinkin, A.A. (2019). *Nauchno-tekhnicheskij otchet po seismologii. Stantsiya «Novolazarevskaya». 63 Rossiyskaya antarkticheskaya ekspeditsiya* [Scientific and technical report on seismology. Station “Novolazarevskaya”. 63 Russian Antarctic Expedition]. Obninsk, Russia: Funds of the GS RAS (In Russ.).
- Kochetov V.V., & Lazareva, A.P. (1993). [Earthquakes in Antarctica]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1989 godu* [Earthquakes in the USSR, 1989] (pp. 236–237). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Kochetov, V.V., & Lazareva A.P. (1991). [Earthquakes in Antarctica]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1988 godu* [Earthquakes in the USSR, 1988] (pp. 218–219). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Kochetov, V.V., & Lazareva, A.P. (1989). [Earthquakes in Antarctica in 1957–1984]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1986 godu* [Earthquakes in the USSR, 1986] (pp. 187–188). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Kondorskaya, N.V., Aranovich, Z.I., Solov'yeva, O.N., & Shebalin, N.V. (1981). *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seismicheskikh stantsiyakh Yedinoy sistemy seismicheskikh nablyudeniy SSSR* [Instructions on the production and processing of observations procedure at seismic stations of a Unified system of seismic observations of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 272 p. (In Russ.).
- Kosoy, P.L., Dubrovin, A.P., & Poygina, S.G. (2000). [VI. Seismic observations in Antarctica in 1999]. In *Sostoianie prirodnoi sredy Antarktiki. Iiul'–sentiabr' 2000 g. (Pod red. V.V. Lukina)* [Quarterly Bulletin “State of Antarctic Environment”. July–September 2000 (Ed. V.V. Lukin)] (pp. 47–55). Retrieved from http://www.aari.aq/default_en.html/
- Krasilov, S.A., Kolomiyets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of processing of digital seismological data using the WSG software package]. In *Materialy Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly “Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh”* [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”] (pp. 77–83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Peng, Z., Walter, J.I., Aster, R.C., Nyblade, A., Wiens, D.A., & Anandakrishnan, S. (2014). Antarctic icequakes triggered by the 2010 Maule earthquake in Chile. *Nature Geoscience*, 7(9), 677.
- Poygina, S.G. (2009–2018). [Review of seismicity. Seismic observations in Antarctica]. In *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii, 2003–2012 gg.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2003–2012]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Quarterly Bulletin “State of Antarctic Environment”. (2018). July–September 2018 (Ed. V.V. Lukin), no. 3 (84), p. 1. Retrieved from: http://www.aari.aq/default_en.html/
- Quarterly Bulletin “State of Antarctic Environment”. Retrieved August 26, 2019, from http://www.aari.aq/default_en.html/
- Savatyugin, L.M., & Preobrazhenskaya, M.A. (1999). *Rossiyskiye issledovaniya v Antarktike. T. 1. Pervaya – Dvadtsataya sovetskaya antarkticheskaya ekspeditsiya* [Russian studies in the Antarctic. Vol. I. First – Twentieth Soviet Antarctic Expedition]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ. Retrieved from <http://os.xpdf.ru/20raznoe/270316-1-lmsavatyugin-mapreobrazhenskaya-rossiyskie-issledovaniya-antarktike-t.php>. (In Russ.).

Starovoi, O.E., & Mishatkin, V.I. (2001). *Seismicheskie stantsii Rossiiskoi akademii nauk (sostoianie na 2001 g.)* [Seismic stations of the Russian Academy of Sciences (Status on 2001)]. Moscow-Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 88 p. (In Russ.).

Starovoi, O.E., Gabsatarova, I.P., Mekhryushev, D.Yu., Korotin, A.V., Krasilov, S.A., Galushko, V.V., Kolomiets, Yu.N., Poygina, S.G., & Kamenskaya, O.P. (2004). *Issledovaniye, razrabotka i sozdaniye v Rossiyskoy Federatsii sistemy seysmicheskikh i geodinamicheskikh nablyudeniy dlya nepreryvnogo natsional'nogo i global'nogo seysmicheskogo monitoringa. Otchet po*

dogovoru № 01.700.12.0094 ot 01.10.2004 [Research, development and creation in the Russian Federation of a system of seismic and geo-dynamic observations for continuous national and global seismic monitoring. Report under the contract No. 01.700.12.0094 dated 10/01/2004]. Obninsk, Russia: Funds of the GS RAS, 77 p. (In Russ.).

USGS. (2019). Earthquakes, Search Earthquake Catalog (2019). U.S. Geological Survey National Earthquake Information Center, Federal Center Denver, Colorado. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Information about authors

Starovoi Oleg Evgen'evich, PhD, Head of Research of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: olstar1933@gmail.com

Malovichko Aleksei Aleksandrovich, Corresponding Member of the RAS, Scientific Leader of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: amal@gstras.ru

Poygina Svetlana Germanovna, Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: sveta@gstras.ru

Badalyan Dmitrii Gerasimovich, Head of Department of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: dbad@gstras.ru

Krumpan Vladimir Vladimirovich, Cat. I Engineer – Head of Pulkovo Seismic Station of the GS RAS, St. Petersburg, Russia. E-mail: kvv@plkv.gstras.ru

Milekhina Aleksandra Mikhailovna, Junior Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: amilekhina@gstras.ru