ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья Геология

Сейсмичность тектонических структур Южного полярного региона

А.А.Баранов✉, Н.В.Андреева
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Баранов А.А., Андреева Н.В. Сейсмичность тектонических структур Южного полярного региона // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16613. С. 42-51. EDN BGWDAT

Аннотация
В работе изучается сейсмичность Южного полярного региона от Южного полюса до 50-й параллели южной широты. В сейсмоопасных зонах Южного океана – Сандвичевой зоне субдукции, на хребте Маккуори и на Антарктическом срединном хребте за период наблюдений происходили землетрясения различного генезиса с магнитудой M > 8. Эти события могут вызывать существенные цунами. Для хребта Маккуори характерен сдвиговый механизм очага землетрясения, тогда как для района Сандвичевой зоны субдукции получены разные механизмы. За инструментальный период наблюдений зафиксирована слабая внутриконтинентальная сейсмичность Антарктиды, что опровергает представление об асейсмичности этого континента. Сейсмичность наблюдается на границах тектонических блоков или приурочена к прибрежным районам. В континентальном внутриплитном регионе Антарктиды землетрясения происходят в нескольких обстановках. Тектоническими вероятно являются события в Трансантарктических горах и некоторых подледных рифтовых впадинах, а также разрозненные события в центральной части континента. Сейсмичность в прибрежной зоне и на континентальной окраине может быть связана с ледниковой изостатической корректировкой с региональным тектоническим компонентом в некоторых местах. Наблюдаемая в Антарктиде сейсмичность низкая по сравнению с другими континентальными внутриплитными регионами. Сильнейшие события внутри континента имеют магнитуду 5-6. Авторами выявлены внутриконтинентальные области повышенной сейсмичности. Показана корреляция внутриконтинентальной сейсмичности с подледными впадинами Восточной Антарктиды. Часть событий с магнитудами ниже пороговых не фиксируется. Кроме того, сейсмичность частично подавляется толстым ледяным покровом.

Ключевые слова
Антарктида; Южный океан; хребет Маккуори; Сандвичева дуга; сейсмичность; пассивная окраина

Финансирование
Работа выполнена в рамках Госзадания Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН.

Поступила: 13.11.2024 ***Принята: 05.06.2025*** ***Онлайн: 07.07.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Антарктическая плита, пятая по размеру среди всех литосферных плит, простирающаяся на площади примерно 60×10^6 км^2, почти полностью окружена системами протяженных срединно-океанических хребтов и граничит с плитами Наска, Южно-Американской, Сомалийской, Африканской, Австралийской, Тихоокеанской и Хуан-Фернандес, плитой Скоша, включая Сандвичеву и Шетландские микроплиты. В настоящее время зоны субдукции в основном отсутствуют, за исключением антарктических тектонических окраин с Южно-Американской плитой, плитой Скоша и Шетландской микроплитой [1]. Таким образом, большую часть границы плиты составляют или срединно-океанические хребты, или трансформные разломы. Антарктическая плита включает Антарктиду, находящуюся примерно в центре; плато Кергелен; отдельные острова вулканического происхождения и часть Южного океана (рис.1).

Формирование Антарктической плиты началось примерно в то же время, что и распад суперконтинента Гондвана [2, 3]. При распаде Гондваны Антарктида двигалась на юг, формируя и развивая дивергентную границу с Австралией. Разрыв континентальной перемычки между Антарктидой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 42-51
© А.А.Баранов, Н.В.Андреева, 2025

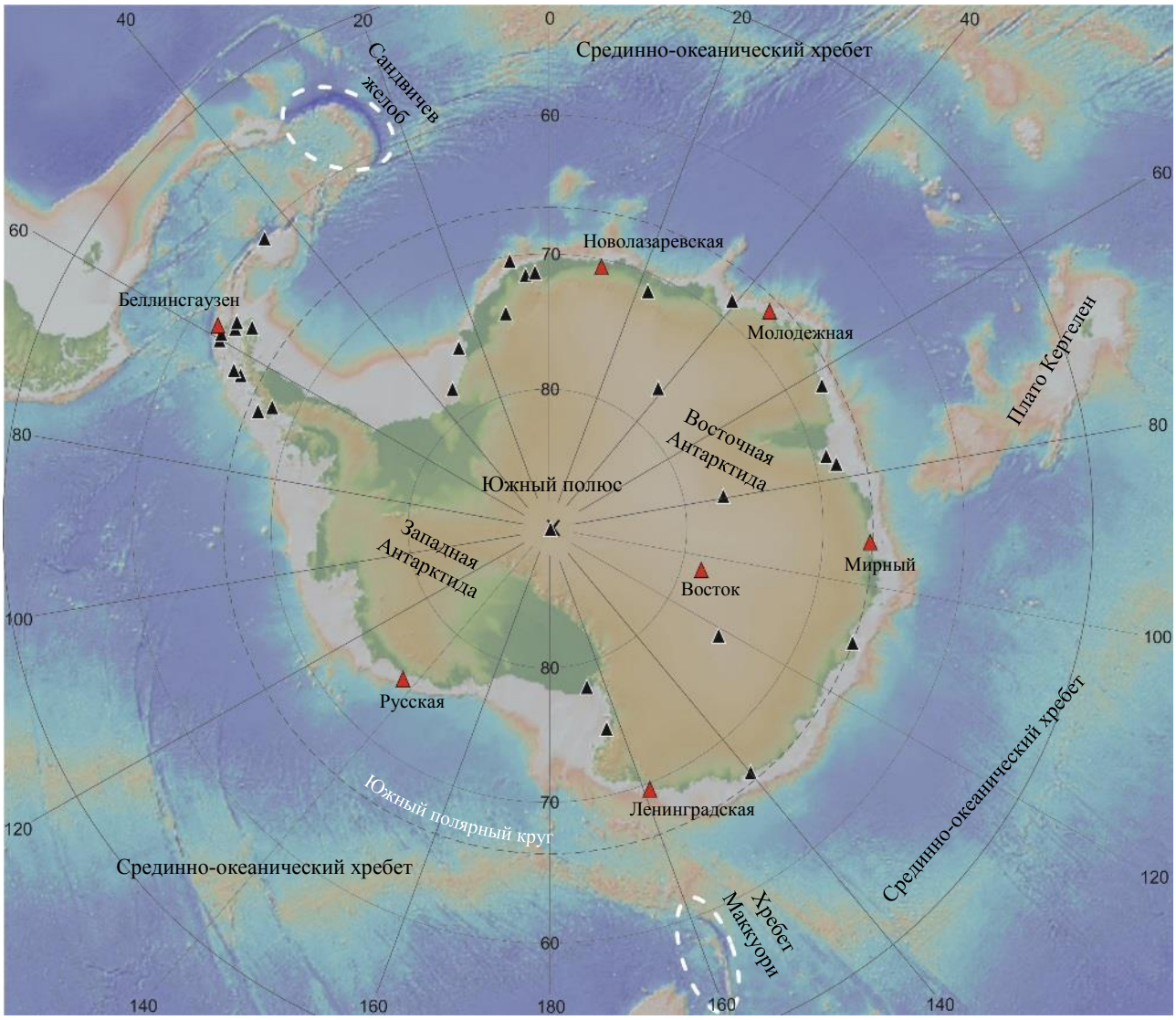


Рис.1. Общая карта Южного полярного региона (на основе [4] с дополнениями). Белые овалы – области, генерирующие цунами от сильных сейсмических событий; красные треугольники – расположение российских станций, черные – зарубежные сейсмические станции, действующие в Антарктиде

и Южной Америкой около 35 млн лет назад, а также раскрытие океана между Австралией и Антарктидой привели к изоляции Антарктиды, возникновению Антарктического циркумполярного течения (течения Западных Ветров) с последующим полным оледенением и общему похолоданию климата [5, 6]. В настоящее время преобладающее горизонтальное движение Антарктической плиты оценивается примерно в 1 см/год по направлению к Атлантическому океану [7-9].

Антарктида содержит породы различного возраста и происхождения от архея до кайнозоя [10]. Площадь Антарктиды составляет около 14×10^6 км^2, а ледовый щит покрывает почти весь континент, скрывая подледный рельеф и тектонические структуры [11]. Коренные породы обнажаются в основном у берегов и в горах. Мощности коры и осадков сильно меняются в зависимости от тектонического блока и его эволюции. Для Западной Антарктиды характерно наличие утоненной коры, больших и глубоких осадочных бассейнов [12, 13], а также широкое распространение вулканов разного типа, в том числе подледных [14, 15]. Литосфера под Западной Антарктидой сильно неоднородна и преимущественно утонена [16-18], а тепловой поток повышен [19-21]. Восточная Антарктида представляется более стабильным континентальным блоком, однако и там выявлены районы с утоненной корой и осадочные бассейны [12, 13]. Литосфера и тепловой поток Восточной Антарктиды также неоднородны [18-20].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Долгое время имело место представление об асейсмичности Антарктиды. Сейсмичность Южного полярного региона плохо изучена в силу труднодоступности. Постоянных сейсмических станций мало, и распределение их неравномерно, а сезонные сейсмические измерения сопряжены со сложной логистикой и суровыми климатическими условиями как на суше, так и в море. Кроме того, в Южном океане мало островов, где можно разместить сейсмические станции. За счет активного развития глобальных сейсмических сетей (GSN) и увеличения количества локальных сейсмостанций в Антарктическом регионе поток данных увеличился. В частности, развернута локальная сейсмическая сеть вокруг станции Ноймайер III, сейсмические наблюдения проводились Индией на станции Маитри, австралийцами разработана широкополосная сейсмическая сеть, охватывающая большой регион между станциями Муссон и Кейси, протягивающаяся до 75 град ю.ш. [22].

С увеличением числа станций обнаружилась внутриконтинентальная сейсмичность [23, 24], не связанная с расположением действующих вулканов. Последний каталог сейсмических событий в Антарктиде за период 1 января 2000 – 1 января 2021 гг. содержит около 60000 событий с магнитудой от 1 до 4,5 [25].

В центральных районах, где лед имеет толщину несколько километров [26], сейсмичность подавляется ледовым покровом, однако обнаружены редкие события с магнитудами 4 и более. В настоящей работе исследуется сейсмичность Южного полярного региона и ее связь с тектоническими структурами. Сейсмичность Антарктиды и Южного океана оценивается на основе данных, собираемых международным сейсмологическим центром (ISC) [27, 28]. Анализируется связь сейсмичности с различными тектоническими структурами на суше и в океане.

Объект исследований

Главным объектом исследования являются сейсмические события в Южном полярном регионе. В свою очередь, сейсмичность определяется напряженным состоянием региона и реологией его блоков. Сильные землетрясения происходят в основном на границах литосферных плит (рис.2). В Южном полярном регионе большая часть событий зафиксирована в Сандвичевой зоне субдукции, а также в районе Антарктического срединного хребта и хребта Маккуори [28, 29]. Здесь зафиксированы события с магнитудой $M_w > 8$. Рассмотрим сильнейшие землетрясения Южного полярного региона. На рис.2 приведены землетрясения с $M_w > 8$ южнее 50 град ю.ш. К югу от 50-й параллели произошло четыре землетрясения с $M_w > 8$ – два в Сандвичевой зоне субдукции (1929, $M_w = 8{,}1$; 2021, $M_w = 8{,}1$); одно в районе хребта Маккуори (1989, $M_w = 8$) и одно в районе о-вов Баллени (1998, $M_w = 8{,}1$) внутри Антарктической плиты (см. таблицу).

События с $M_w > 8$ Южного полярного региона за период инструментальных наблюдений

Дата	Время	Широта, град	Долгота, град	Глубина, км	M_w	Местоположение
27.06.1929	12:47:13	–55.373	–29.345	15	8,1	Южные Сандвичевы острова
23.05.1989	10:54:46	–52.341	160.568	10	8,0	Хребет Маккуори
25.03.1998	3:12:25	–62.877	149.527	10	8,1	Острова Баллени
12.08.2021	18:35:17	–58.3753	–25.2637	23	8,1	Южные Сандвичевы острова

Землетрясение 2021 г. в Сандвичевой дуге (12.08.2021, $M_w = 8{,}1$, $h = 23$ км) вызвало значительное цунами, зарегистрированное сразу в трех океанах* впервые после цунами в Индийском океане 2004 г. [30].

Решение фокального механизма определяется как взброс, близкий к взрезу (одна из нодальных поверхностей почти вертикальна) [31-33]. Землетрясение произошло на глубине примерно 23 км в Сандвичевой зоне субдукции через 3 мин после форшока магнитудой $M_w = 7{,}5$, который находился на глубине ~63 км и ~90 км к северу. В районе землетрясения Южно-Американская плита погружается на запад под плиту Скоша со скоростью ~7 см/год относительно плиты.

* NOAA Center for Tsunami Research – Tsunami Event – August 12, 2021. https://nctr.pmel.noaa.gov/sandwichislands20210812/ (дата обращения 13.11.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 42-51
© А.А.Баранов, Н.В.Андреева, 2025

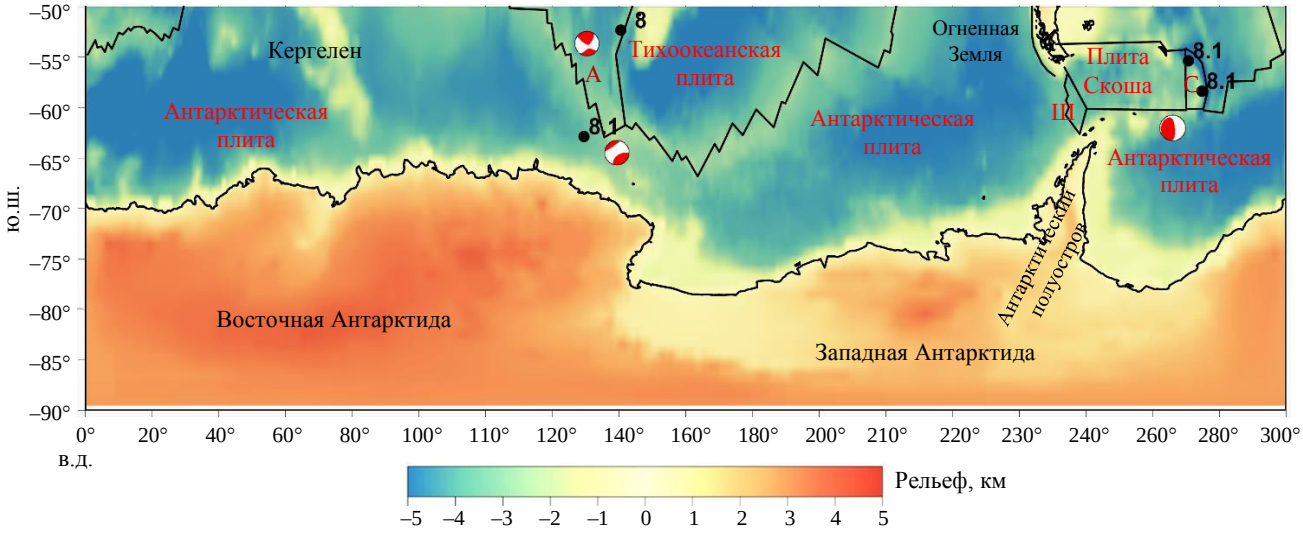


Рис.2. Землетрясения в Южном полярном регионе (южнее 50° ю.ш.) за период 1900-2024 гг. с $M_w > 8$ по данным каталога ISC [27, 28]. Черная линия – границы плит; А – Австралийская плита; С – Сандвичева микроплита; Ш – Шетландская микроплита. Фокальные механизмы приведены для тех событий, для которых есть данные

В течение 24 ч после главного толчка магнитудой M = 8,1 был обнаружен 61 афтершок магнитудой $M_w = 4,5$ и выше. Последовательность афтершоков за этот период включает три с магнитудой не меньше 6 ($M_w = 6$, $M_w = 6,2$ и $M_w = 6,3$). Афтершоки охватывают параллельное желобу расстояние примерно в 470 км, простираясь от форшока магнитудой $M_w = 7,5$ на юг до тройного соединения между плитами Южной Америки, Скоша и Антарктической.

Землетрясение на хребте Маккуори (23.05.1989, $M_w = 8$, $h = 10$ км) имеет сдвиговый механизм с небольшой взбросовой компонентой. Это событие является одним из сильнейших сдвиговых землетрясений по магнитуде [34]. Длина разлома оценивается примерно в 120 км. Разрыв распространялся с юга на север с относительно высокой скоростью. Крупное сдвиговое землетрясение, подобное этому, производит значительные вертикальные смещения на дне океана и возбуждает цунами. Фактически, небольшие цунами наблюдались на южном побережье Австралии.

Землетрясение (25.03.1998, $M_w = 8,1$, $h = 10$ км) произошло в районе о-вов Баллени, недалеко от тройного сочленения Антарктического хребта с хребтом Маккуори. Это сильное океаническое внутриплитное землетрясение также имеет сбросовое решение фокального механизма, но с небольшой сдвиговой компонентой [35, 36], и характеризуется сложным поведением с разрывом на нескольких сегментах разломов.

На рис.3 приведены землетрясения с $M_w > 7$ южнее 50° ю.ш. События с $M_w > 7$ зарегистрированы в двух областях: в районе хребта Маккуори на границе Австралийской и Тихоокеанской плит (трансформный разлом) и вдоль границ плиты Скоша, включая Сандвичеву микроплиту (см. рис.1-3).

На рис.4 более детально приведены землетрясения с $M_w > 7$ южнее 50 град ю.ш. для района плиты Скоша глубиной до 30 км по данным каталога ISC [27, 28]. Механизмы очагов различны: на северной и южной границе плиты Скоша преобладает сдвиговый тип, в районе Сандвичева желоба распределение по типам фокальных механизмов более разнообразно – присутствуют события со сдвигом, сбросом, взбросом, а также промежуточным типом движения в виде сдвиго-сброса.

Записаны и рои относительно слабых землетрясений, связанные с извержением вулканов. Например, во второй половине 2020 г. неожиданно возникла сейсмическая активность в виде крупного роя землетрясений небольшой магнитуды в количестве более 80 тыс. толчков, произошедших вблизи оконечности Антарктического п-ова [37, 38]. Это явление предложено объяснить пробуждением «спящего» подводного вулкана, расположенного под морским дном в проливе Брансфилда между Южными Шетландскими о-вами и северо-западной оконечностью Антарктиды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

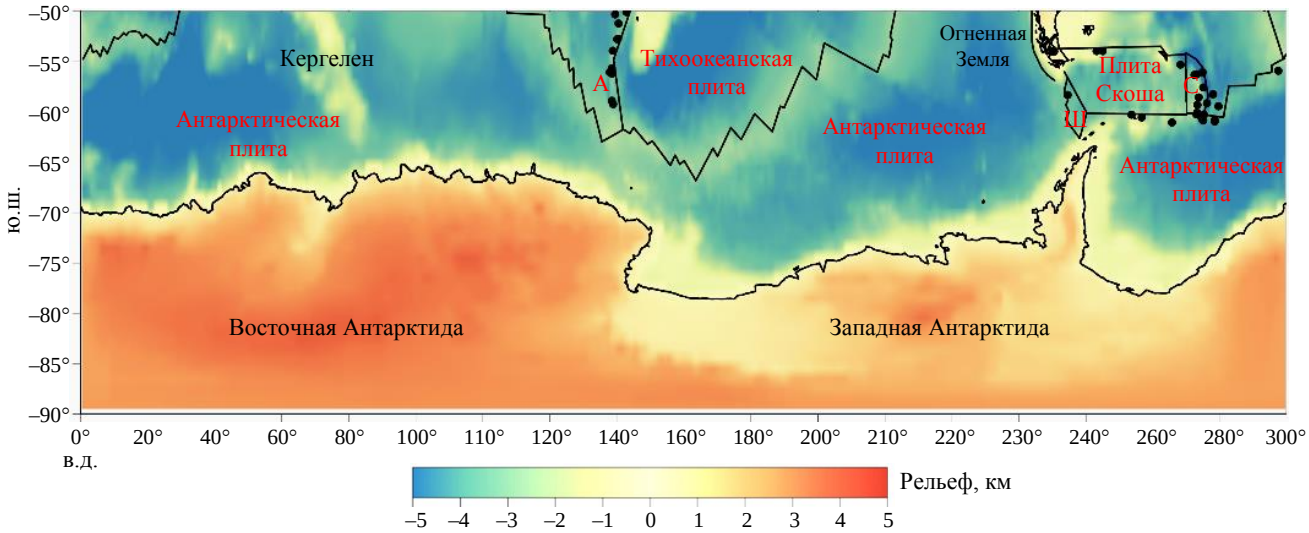


Рис.3. Землетрясения в Южном полярном регионе (южнее 50° ю.ш.) за период 1900-2024 гг. с $7 < M_w < 8$ по данным каталога ISC [27, 28]. Условные обозначения см. на рис.2

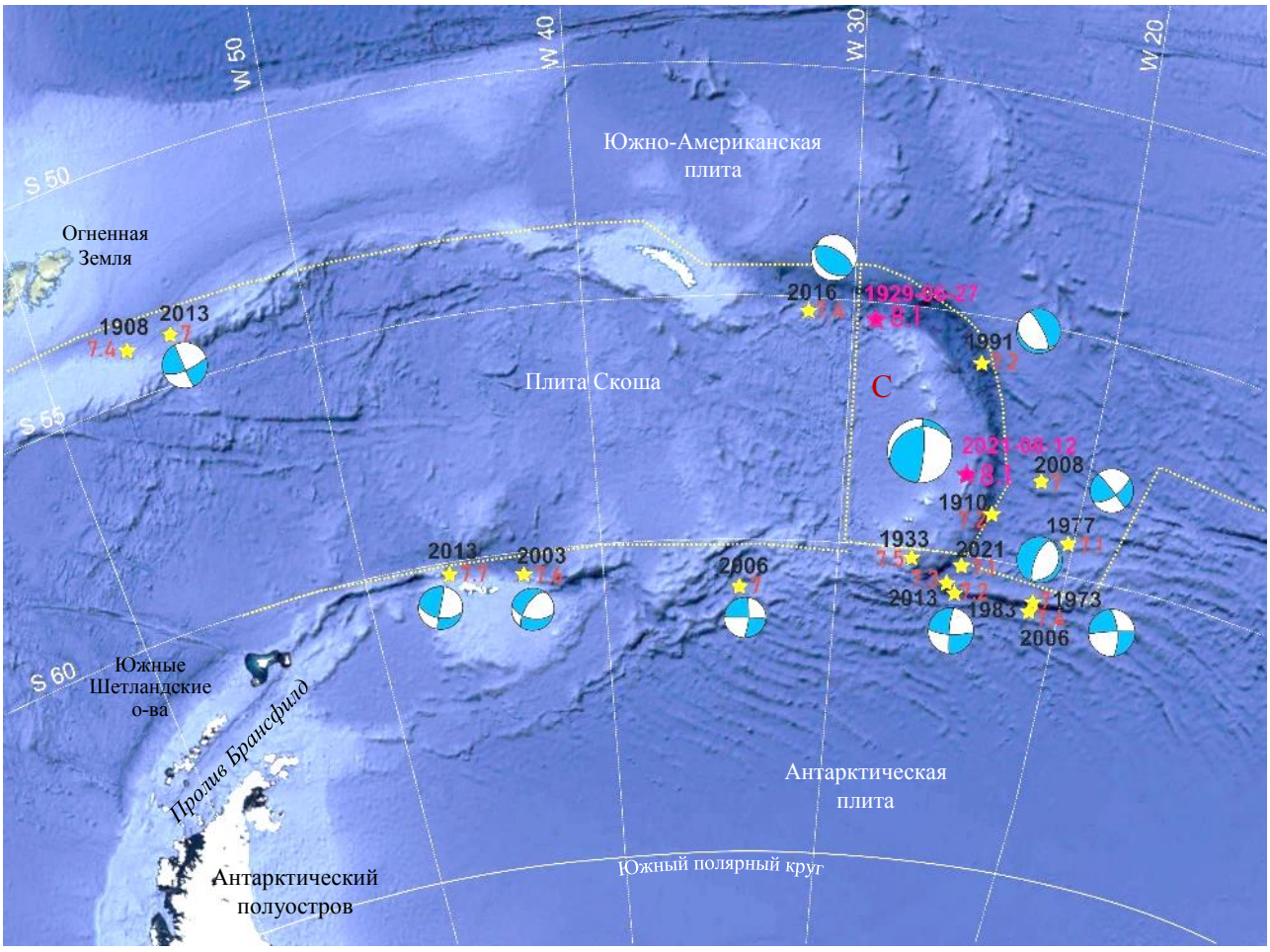


Рис.4. Сейсмические события в районе плиты Скоша $M_w \geq 7$ глубиной до 30 км по данным каталога ISC [27, 28]. С – Сандвичева микроплита; желтыми звездочками обозначены эпицентры землетрясений с $7 \leq M_w < 8$, розовыми – с $M_w \geq 8$. Размеры обозначений фокальных механизмов соответствуют разным магнитудам – большой для $M_w \geq 8$, поменьше – $M_w \geq 7$

Внутриконтинентальная сейсмичность

На рис.5 показана сейсмичность за весь период инструментальных наблюдений с 1907 по 2024 годы, согласно каталогу ISC [27, 28], с $M_b > 3$ для Антарктиды и прибрежных районов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 42-51
© А.А.Баранов, Н.В.Андреева, 2025

Унификация магнитуд для слабых событий проводилась к магнитуде M_b при помощи самостоятельно выведенных формул на основе корреляционных зависимостей: $M_b = 0{,}95$, $M_w = 0{,}11$, коэффициент корреляции составил 0,73; $M_b = 1{,}29$, $M_s = 1{,}75$, коэффициент корреляции – 0,92.

Слабые события в основном сосредоточены у побережья континента, однако имеются и редкие события внутри континента. В прибрежных районах зафиксированы события с магнитудой $M_b > 5$. В то же время в центральных районах, где лед имеет толщину несколько километров, сейсмичность подавляется ледовым покровом, но обнаружены редкие события с магнитудами до 5. Основные районы с концентрацией сейсмичности выделены черными овалами на рис.5.

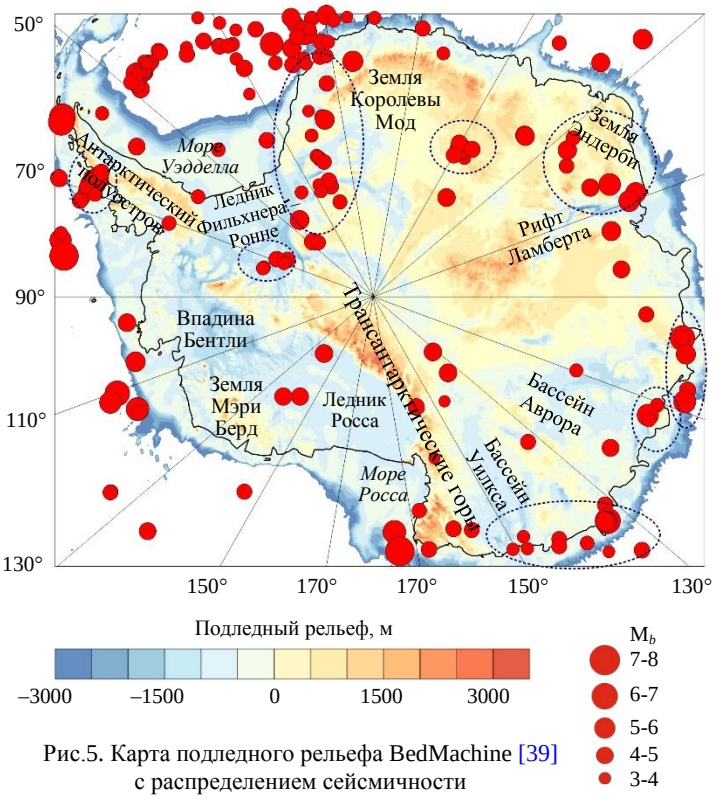


Рис.5. Карта подледного рельефа BedMachine [39] с распределением сейсмичности

На рис.6 приведены землетрясения с $M_b > 3$ южнее 65° ю.ш. Индо-Австралийского блока Восточной Антарктиды и части Западной Антарктиды (Антарктический п-ов, горы Элсуэрт и ледник Фильхнера – Ронне). Сейсмичность на границе Западной и Восточной Антарктид в районе Земли Котса связана с продолжающимися процессами тектонического характера – рифтогенезом в узких подледных впадинах Земли Котса. Южнее сейсмичность также ассоциирована со впадинами вокруг границ бассейна Фильхнера – Ронне с блоком Дюфек и горами Пенсакола. Далее на восток в центральной части Земли Королевы Мод обнаружена компактная сейсмичность с магнитудами более 4 неизвестного генезиса.

Сейсмичность Земли Эндерби в районе гор Принс-Чарльз вероятно связана с их вертикальным подъемом, обусловленным рифтогенными процессами во впадине Ламберта. В основном слабые события сосредоточены у побережья, однако имеются и редкие события внутри континента. В середине Антарктического п-ова находится область компактной слабой сейсмичности неизвестного генезиса. Возможно, это проявление подледной вулканической активности, аналогичное вулканическому рою в проливе Брансфилда (см. рис.4).

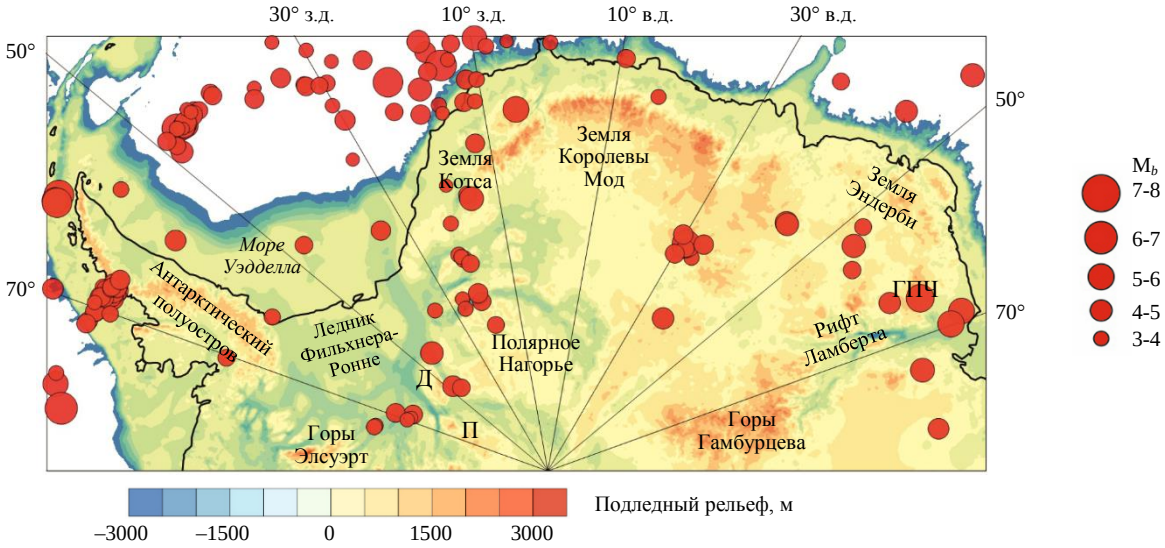


Рис.6. Сейсмичность части Западной Антарктиды и Индо-Антарктического блока Восточной Антарктиды

Д – блок Дюфек; П – горы Пенсакола; ГПЧ – горы Принс-Чарльз

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

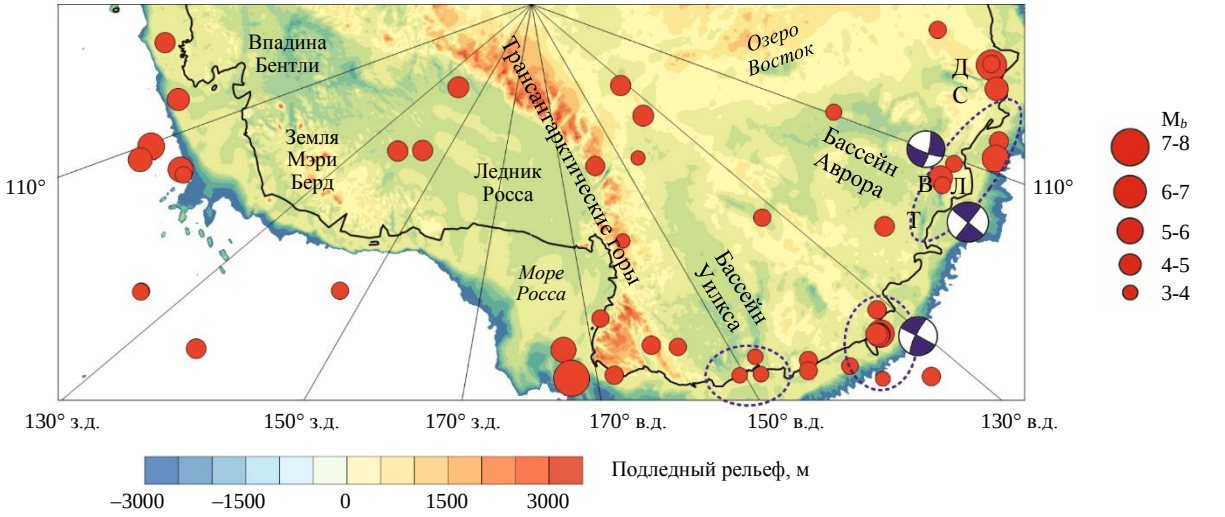


Рис.7. Сейсмичность части Западной Антарктиды и Австрало-Антарктического блока Восточной Антарктиды
Д – впадина Денмана; С – впадина Скотта; В – впадина Вандерфорда; Т – впадина Тоттена; Л – купол Лоу

В Австрало-Антарктическом блоке Восточной Антарктиды в некоторых прибрежных районах зафиксировано существенное количество сейсмических событий (рис.7). Так, в районе выхода ледников Денмана и Скотта к берегу обнаружено несколько событий, в том числе 05.02.1977, M_b = 6,2, h = 27 км. Восточнее у берега для впадин Вандерфорда и Тоттена на границе с тектоническим блоком Лоу очаги землетрясений сконцентрированы в осевой части рифта, но землетрясения отмечаются и в бортах депрессии Вандерфорда – Тоттена. Сильнейшее событие в этой области (04.11.2007, M_b = 5,7, h = 10 км) имеет сдвиговый механизм очага [27, 28]. Преимущественно сдвиговым механизмом характеризуется еще одно событие – 19.05.1984, M_b = 5,1, h = 33 км. Восточнее прибрежная часть бассейна Уилкса отличается умеренной сейсмичностью с магнитудами до 5. Сильнейшее обнаруженное событие в этом районе (22.02.2005, M_b = 5,4, h = 10 км) также имеет сдвиговый механизм (рис.7).

Генезис сейсмически активных структур

На протяжении многих десятилетий Антарктида считалась асейсмичным материком. Однако за последнее время на Антарктическом континенте обнаружены небольшие землетрясения, хотя активность гораздо слабее, чем на других континентах. Число тектонических землетрясений, зарегистрированных в Антарктиде, увеличивалось с развитием сейсмических сетей и локальных сейсмических измерений.

Сейсмичность Антарктиды может иметь несколько контролирующих факторов – тектонические силы, действующие на земные плиты, включая контрастные границы тектонических провинций и основные разломы; а также силы, вызванные нагрузкой и частичной разгрузкой ледяного покрова, доминирующего на континенте. Анализ пространственного распределения землетрясений Антарктиды на десятилетия отстает от других континентов из-за нехватки станций глобальной сейсмической сети в Южном полушарии и трудностей эксплуатации временных сейсмических сетей в негостеприимных внутренних районах Антарктиды. Анализ механизмов источника отстает еще больше из-за низких магнитуд землетрясений.

Сейсмичность в рамках каждой тектонической обстановки позволяет разделить исследуемый район на пять регионов: высокосейсмичный по границам плиты Скоша; высокосейсмичный в районе хребта Маккуори; слабосейсмичные прибрежные районы Антарктиды; континентальные низкосейсмичные регионы; слабосейсмичный регион морской части Антарктической плиты вдали от границ.

Внутриплитные землетрясения могут иметь разную природу. Неглубокие землетрясения обычно наблюдаются вдоль разломов, тогда как глубокофокусные события происходят в погружающейся в мантию плите и связаны с деформациями в ней. Землетрясение 25.03.1998, M_w = 8,1, h = 10 км [35, 36] обусловлено растяжением Антарктической плиты, которое происходит от тройного Антарктического хребта с хребтом Маккуори на юг в сторону Трансантарктических гор.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 42-51
© А.А.Баранов, Н.В.Андреева, 2025

По полученным данным можно предположить, что внутриконтинентальные события связаны с границами тектонических блоков, в основном с активными рифтами [40-42], тогда как сейсмичность вдоль берегов связана с изостатической ледниковой корректировкой и отколом крупных айсбергов. Большинство тектонических землетрясений вдоль побережья Антарктиды вызвано остаточными напряжениями, накопленными после частичной дегляциации в голоцене. Возможен и обратный эффект – тектоническое событие может быть триггером начала откола айсберга, схода подводного оползня или ускорения сползания неустойчивого покровного ледника. В свою очередь, оползень или откол ледника может быть инициирован умеренным сейсмическим событием. Подобные явления могут сопровождаться существенными цунами.

В настоящее время ведутся комплексные исследования в районе оз. Восток [43]. В частности, проводится моделирование геомеханического взаимодействия ледникового щита с подстилающей водной и твердой поверхностью [44].

Обсуждение результатов и заключение

Сейсмичность в Антарктиде и Южном океане проанализирована на основе данных каталога ISC за период с 1900 по 2024 гг. Внутри Антарктической плиты сильнейшее землетрясение произошло недалеко от о-вов Баллени (25.03.1998, $M_w = 8{,}1$). На Антарктическом континенте преобладает низкомагнитудная сейсмичность, однако имеются события с $M > 5$. Сейсмические события сгруппированы по нескольким регионам и в прибрежной зоне. Внутриконтинентальная сейсмичность обусловлена тектоническими процессами и ледотрясениями. Тектонические события связаны с границами блоков земной коры, в том числе с активными рифтами, тогда как прибрежная сейсмичность может быть следствием тектонической разгрузки в результате таяния ледников в голоцене. Зарегистрированная сейсмичность подтверждает современную активность рифтов Земли Котса, рифтов Ламберта, Скотта, Денмана, Вандерфорда и Тоттена.

Весь Южный полярный регион обладает существенной сейсмичностью. Сандвичев желоб и хребет Маккуори генерируют события с $M_w > 8$, при которых существует значительная цунамигенная опасность. В этих же районах Южного океана зарегистрированы многочисленные события магнитудой $M_w > 7$ с различными механизмами очагов. Вопрос о возможных событиях с $M_w > 8{,}5$ в Сандвичевой зоне субдукции и хребте Маккуори остается открытым. Ни одно из названных событий не привело к гибели людей из-за удаленности от населенных пунктов, уязвимых для землетрясений и цунами.

Важным результатом является обнаружение двух роев землетрясений – вулканического в проливе Брансфилда у оконечности Антарктического п-ова и на побережье полуострова южнее. Следует учитывать слабое покрытие Южного полярного региона сейсмическими станциями, так как часть событий не попала в сейсмические каталоги. Для более детальных исследований нужно больше сейсмических станций в регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P. et al.* ITRF2014 plate motion model // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 209. Iss. 3. P. 1906-1912. DOI: 10.1093/gji/ggx136

2. *Storey B.C., Granot R.* Chapter 1.1 Tectonic history of Antarctica over the past 200 million years // Volcanism in Antarctica: 200 Million Years of Subduction, Rifting and Continental Break-up. London: The Geological Society, 2021. Vol. 55. P. 9-17. DOI: 10.1144/M55-2018-38

3. *Лейченков Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Агранов Г.Д.* Формирование и эволюция микроконтинентов плато Кергелен, Южная часть Индийского океана // Геотектоника. 2018. № 5. С. 3-21. DOI: 10.1134/S0016853X1805003X

4. *Ryan W.B.F., Carbotte S.M., Coplan J.O. et al.* Global Multi-Resolution Topography synthesis // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2009. Vol. 10. № 3. № Q03014. DOI: 10.1029/2008GC002332

5. *Pérez L.F., Bohoyo F., Hernández-Molina F.J. et al.* Tectonic activity evolution of the Scotia-Antarctic Plate boundary from mass transport deposit analysis // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121. Iss. 4. P. 2216-2234. DOI: 10.1002/2015JB012622

6. *Левитан М.А., Лейченков Г.Л.* История кайнозойского оледенения Антарктиды и седиментации в Южном океане // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 2. С. 115-136. DOI: 10.7868/S0024497X14020062

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

7. *Savchyn I., Brusak I., Tretyak K.* Analysis of recent Antarctic plate kinematics based on GNSS data // Geodesy and Geodynamics. 2023. Vol. 14. Iss. 2. P. 99-110. DOI: 10.1016/j.geog.2022.08.004

8. *Savchyn I.* Establishing the correlation between the changes of absolute rotation poles of major tectonic plates based on continuous GNSS stations data // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2022. Vol. 19. № 2 (206). P. 167-176. DOI: 10.13168/AGG.2022.0006

9. *Young A., Flament N., Maloney K. et al.* Global kinematics of tectonic plates and subduction zones since the late Paleozoic Era // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. Iss. 3. P. 989-1013. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.05.011

10. *Leitchenkov G.L., Grikurov G.E.* The Tectonic Structure of the Antarctic // Geotectonics. 2023. Vol. 57. Suppl. 1. P. S28-S33. DOI: 10.1134/S0016852123070087

11. *Morlighem M., Rignot E., Binder T. et al.* Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13. Iss. 2. P. 132-137. DOI: 10.1038/s41561-019-0510-8

12. *Baranov A., Tenzer R., Bagherbandi M.* Combined Gravimetric–Seismic Crustal Model for Antarctica // Surveys in Geophysics. 2018. Vol. 39. Iss. 1. P. 23-56. DOI: 10.1007/s10712-017-9423-5

13. *Baranov A., Morelli A.* The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // Tectonophysics. 2023. Vol. 846. № 229662. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229662

14. *van Wyk de Vries M., Bingham R.G., Hein A.S.* A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // Exploration of Subsurface Antarctica: Uncovering Past Changes and Modern Processes. London: The Geological Society, 2018. Vol. 461. P. 231-248. DOI: 10.1144/SP461.7

15. *Geyer A., Roberto A.D., Smellie J.L. et al.* Volcanism in Antarctica: An assessment of the present state of research and future directions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 444. № 107941. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107941

16. *Wiens D.A., Shen W., Lloyd A.J.* The seismic structure of the Antarctic upper mantle // The Geochemistry and Geophysics of the Antarctic Mantle. London: The Geological Society, 2023. Vol. 56. P. 195-212. DOI: 10.1144/M56-2020-18

17. *Lucas E.M., Soto D., Nyblade A.A. et al.* P- and S-wave velocity structure of central West Antarctica: Implications for the tectonic evolution of the West Antarctic Rift System // Earth and Planetary Science Letters. 2020. Vol. 546. № 116437. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116437

18. *Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М.* Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 100-105. DOI: 10.31857/S2686739723600911

19. *Lösing M., Ebbing J., Szwillus W.* Geothermal Heat Flux in Antarctica: Assessing Models and Observations by Bayesian Inversion // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. № 105. DOI: 10.3389/feart.2020.00105

20. *Artemieva I.M.* Antarctica ice sheet basal melting enhanced by high mantle heat // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 226. № 103954. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103954

21. *Reading A.M., Stål T., Halpin J.A. et al.* Antarctic geothermal heat flow and its implications for tectonics and ice sheets // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Iss. 12. P. 814-831. DOI: 10.1038/s43017-022-00348-y

22. *Reading A.M.* On Seismic Strain-Release within the Antarctic Plate // Antarctica. Springer, 2006. P. 351-356. DOI: 10.1007/3-540-32934-X_43

23. *Kanao M.* Seismicity in the Antarctic Continent and Surrounding Ocean // Open Journal of Earthquake Research. 2014. Vol. 3. № 1. P. 5-14. DOI: 10.4236/ojer.2014.31002

24. *Mishra O.P.* Seismo-Geophysical Studies in the Antarctic Region: Geodynamical Implications // Assessing the Antarctic Environment from a Climate Change Perspective. Springer, 2022. P. 287-341. DOI: 10.1007/978-3-030-87078-2_17

25. *Castro A.F.P., Schmandt B., Nakai J. et al.* (Re)Discovering the Seismicity of Antarctica: A New Seismic Catalog for the Southernmost Continent // Seismological Research Letters. 2024. Vol. 96. № 1. P. 576-594. DOI: 10.1785/0220240076

26. *Frémand A.C., Fretwell P., Bodart J.A. et al.* Antarctic Bedmap data: Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) sharing of 60 years of ice bed, surface, and thickness data // Earth System Science Data. 2023. Vol. 15. Iss. 7. P. 2695-2710. DOI: 10.5194/essd-15-2695-2023

27. *Storchak D.A., Giacomo D.D., Engdahl E.R. et al.* The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2015. Vol. 239. P. 48-63. DOI: 10.1016/j.pepi.2014.06.009

28. *Giacomo D.D., Engdahl E.R., Storchak D.A.* The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10. Iss. 4. P. 1877-1899. DOI: 10.5194/essd-10-1877-2018

29. *Bondár I., Engdahl E.R., Villaseñor A. et al.* ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), II. Location and seismicity patterns // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2015. Vol. 239. P. 2-13. DOI: 10.1016/j.pepi.2014.06.002

30. *Roger J.H.M., Jamelot A., Hébert H. et al.* The South Sandwich Tsunami of 12 August 2021: An Underestimated Widespread Tsunami Hazard Around the World // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2024. Vol. 129. Iss. 12. № e2024JC021433. DOI: 10.1029/2024JC021433

31. *Zhe Jia, Zhongwen Zhan, Hiroo Kanamori.* The 2021 South Sandwich Island M_w 8.2 Earthquake: A Slow Event Sandwiched Between Regular Ruptures // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49. Iss. 3. № e2021GL097104. DOI: 10.1029/2021GL097104

32. *Лутиков А.И., Габсатарова И.П., Донцова Г.Ю., Жуковец В.Н.* Сильное землетрясение 12.08.2021 г., MW = 8.3 вблизи Южных Сандвичевых островов // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 4. С. 142-158. DOI: 10.21455/GPB2022.4-10

33. *Metz M., Vera F., Carrillo Ponce A. et al.* Seismic and Tsunamigenic Characteristics of a Multimodal Rupture of Rapid and Slow Stages: The Example of the Complex 12 August 2021 South Sandwich Earthquake // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022. Vol. 127. Iss. 11. DOI: 10.1029/2022JB024646

34. *Satake K., Kanamori H.* Fault parameters and tsunami excitation of the May 23, 1989, MacQuarie Ridge Earthquake // Geophysical Research Letters. 1990. Vol. 17. Iss. 7. P. 997-1000. DOI: 10.1029/GL017i007p00997

35. *Henry C., Das S., Woodhouse J. H.* The great March 25, 1998, Antarctic Plate earthquake: Moment tensor and rupture history // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. Vol. 105. Iss. B7. P. 16097-16118. DOI: 10.1029/2000JB900077

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

36. *Hjörleifsdóttir V., Kanamori H., Tromp J.* Modeling 3-D wave propagation and finite slip for the 1998 Balleny Islands earthquake // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2009. Vol. 114. Iss. B3. № B03301. DOI: 10.1029/2008JB005975

37. *Cesca S., Sugan M., Rudzinski Ł. et al*. Massive earthquake swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 89. DOI: 10.1038/s43247-022-00418-5

38. *Olivet J.L., Bettucci L.S., Castro-Artola O.A. et al.* A seismic swarm at the Bransfield Rift, Antarctica // Journal of South American Earth Sciences. 2021. Vol. 111. № 103412. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103412

39. *Morlighem M., Rignot E., Binder T. et al.* Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13. Iss. 2. P. 132-137. DOI: 10.1038/s41561-019-0510-8

40. *Баранов А.А, Лобковский Л.И.* Глубочайшие впадины на суше в Антарктиде как результат кайнозойской активизации рифтогенеза // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 1. С. 50-55. DOI: 10.31857/S2686739724010065

41. *Голынский Д.А., Голынский А.В.* Уникальные геологические структуры района купола Лоу и ледников Вандерфорда и Тоттена (Земля Уилкса) по данным геофизических исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 212-231. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-212-231

42. *Lough A.C., Wiens D.A., Nyblade A.* Reactivation of ancient Antarctic rift zones by intraplate seismicity // Nature Geoscience. 2018. Vol. 11. Iss. 7. P. 515-519. DOI: 10.1038/s41561-018-0140-6

43. *Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н. и др.* Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде// Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724-741.

44. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

***Авторы*: Алексей Андреевич Баранов,** *канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, aabaranov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7793-5555* (*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*), **Надежда Вячеславовна Андреева,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-3819-2824* (*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0