

## МИРОВЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СЕТИ И КАТАЛОГИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. Д. Гвишиани<sup>1,2</sup> , Б. В. Дзеранов<sup>1,3,\*</sup> , А. А. Скоркина<sup>4</sup> , Б. А. Дзедобов<sup>1,3</sup> <sup>1</sup>Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Россия<sup>3</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,  
г. Владикавказ, Россия<sup>4</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук,  
г. Москва, Россия\* **Контакт:** Б. В. Дзеранов, b.dzeranov@gcras.ru

Статья посвящена обзору функционирующих в настоящее время сейсмологических агентств, создаваемых, развиваемых и поддерживаемых ими сейсмических мониторинговых сетей, а также производимых каталогов землетрясений. Особое внимание сфокусировано на международных и национальных сейсмологических центрах и сейсмических сетях. Исторический экскурс о первых наблюдениях, выполняемых сейсмическими сетями, дополняет картину. Рассмотрены базовые параметры основных сейсмических сетей и принципы функционирования сейсмологических центров. Обсуждены ключевые характеристики сейсмических каталогов, определяющие критерии их качества. Приведен системно-аналитический подход к решению актуальной задачи создания наиболее полных и представительных каталогов землетрясений с унифицированной магнитудной шкалой путем интегрирования в изучаемом регионе воедино данных из международных, национальных и региональных каталогов.

**Ключевые слова:** сейсмические сети; сейсмологические агентства; каталоги землетрясений; представительная магнитуда; шкала магнитуд; полнота каталога, объединение каталогов землетрясений.

**Цитирование:** Гвишиани А. Д., Дзеранов Б. В., Скоркина А. А., Дзедобов Б. А. Мировые сейсмические сети и каталоги землетрясений // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES1012. — DOI: 10.2205/2024es000901

### Введение

Каталоги землетрясений являются основным интегральным результатом сейсмического мониторинга. Они составляют основу для проведения большинства современных исследований, направленных на изучение сейсмического режима региона, построение оценок сейсмической опасности и сейсмического риска. Каталоги позволяют, в том числе, изучать и оценивать частоту возникновения сильных землетрясений в рассматриваемом сейсмоактивном регионе. Информация о расположении зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), являющаяся центральной при проведении работ по оценке сейсмической опасности, в значительной степени базируется на данных о произошедших ранее землетрясениях [Wang, 2010]. Таким образом, сейсмический мониторинг и формируемые на его базе каталоги землетрясений являются основополагающими компонентами современных сейсмологических исследований.

Первые прототипы современного регистрирующего сейсмического оборудования появились еще в конце XIX века [Dewey and Byerly, 1969]. Тем не менее, началом инструментальных сейсмологических наблюдений принято считать 1904–1906 годы, когда начали внедряться сейсмометры Вихерта и Голицына [Agnew, 2002; Aki and Richards, 2002]. Тогда же появились методы, позволяющие на записи «смещение-время» не просто

Получено: 15 октября 2023 г.

Принято: 15 января 2024 г.

Опубликовано: 29 февраля 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

идентифицировать землетрясение, но и определить его параметры и энергию [Голицын, 1912]. В 30-х годах XX века благодаря работам Ч. Рихтера основной мерой энергии землетрясения становится магнитуда [Richter, 1935].

Первые мониторинговые наблюдения, выполняемые сейсмическими сетями, были реализованы в Японии и Калифорнии в 20-е годы XX века [Gutenberg, 1932; Wadati, 1928]. Это позволило получить региональные зависимости амплитуд от расстояния [Wadati, 1928; 1931]. Изучение таких зависимостей по региональному каталогу землетрясений [Gutenberg, 1932] привело к повсеместному введению магнитуды [Richter, 1935].

У нас в стране идея создания первой сейсмической сети была высказана И. В. Мушкетовым в 1888 г. [Minina, 2019]. За ее создание взялся академик Б. Б. Голицын, с именем которого связано становление инструментальных сейсмологических наблюдений. В 1906 г. им был разработан электромагнитный сейсмограф, представляющий собой фундаментальную инновацию в сейсмометрии. Б. Б. Голицыным было предложено создание в России сейсмических станций двух классов: для регистрации удаленных (телесеизмических) и близких сильных (региональных) землетрясений [Minina, 2019].

Несмотря на стремительное увеличение количества сейсмических станций в мире начиная с 1904–1906 гг., две первые стандартизованные сети начали развиваться только в 1956–1958 гг. Это советская Единая сеть сейсмических наблюдений (ЕССН) [Кондорская и Федорова, 1996] и американская World-Wide Standardized Seismograph Network (WWSNN) [Kisslinger and Howell, 2003; Oliver and Murphy, 1971]. Целью их создания, в первую очередь, являлся взаимный контроль ядерных взрывов.

Первоначально сейсмические станции вели запись в аналоговом виде. С годами произошел, почти полностью, переход на цифровой формат регистрации. С развитием средств связи и передачи данных сейсмические сети перестали ограничиваться локальными масштабами. На сегодняшний день сейсмические сети могут быть как национальными или региональными, так и глобальными. Основное различие между ними заключается в масштабе исследования, пространственном разрешении, количестве, качестве и разнообразии получаемых данных и скорости их обработки [Гвишиани и др., 2023; Havskov and Alguacil, 2004].

Настоящий обзор посвящен краткому представлению мировых сейсмических сетей и их сейсмологических центров, ведущих мониторинг и изучение землетрясений в планетарном масштабе. Иными словами, здесь идет речь о глобальных и крупных региональных сетях, получающих данные о землетрясениях всего земного шара для некоторого магнитудного порога. При этом, базовое финансирование этих сетей и их центров осуществляется отдельными странами или группами стран. К ним относятся Российская Федерация, Китайская Народная Республика, Соединенные Штаты Америки, Франция, Япония, Европейские страны, входящие в EMSC или ORFEUS. Отдельно следует здесь упомянуть Организацию Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (СВВТО), являющуюся самостоятельной международной организацией.

## 1. Сейсмические сети и сейсмологические центры

На сегодняшний день самым крупным сейсмологическим центром в мире является IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) — консорциум из более чем 125 университетов США. Центр ведет исследования в области сейсмического мониторинга и распространения сейсмологических данных. В IRIS поступают данные с более чем 8 тыс. сейсмических станций из всех стран мира (<https://www.iris.edu>) (дата обращения: 26.12.2023). В 2023 г. произошло слияние IRIS с UNAVCO (некоммерческий консорциум, созданный для расширения использования методов геодезии в геологических исследованиях). Образованная в результате объединения организация называется Консорциум EarthScope.

Говоря о других наиболее крупных и важных мировых сейсмических сетях, необходимо упомянуть сеть американской Геологической службы USGS (The United States Geological Survey). В ее состав входят: Глобальная сейсмографическая сеть GSN (Global

Seismographic Network), Передовая национальная сейсмическая система ANSS (Advanced National Seismic System) и Национальный центр информации о землетрясениях NEIC (The National Earthquake Information Center).

Отметим также европейскую сеть ORFEUS (Observatories and Research Facilities for European Seismology), французскую глобальную сеть широкополосных сейсмологических станций GEOSCOPE (French Global Network of Seismological Broadband Stations), сеть японского метеорологического агентства JMA (Japan Meteorological Agency), китайский центр сейсмических сетей CENC (China Earthquake Networks Center), сеть Единой геофизической службы Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН), а также сеть Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний СТВТО (The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization).

Приведем базовые характеристики основных сейсмических сетей и сейсмологических центров.

**(1.1) Единая геофизическая служба Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН, [http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd\\_news.htm](http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm))** является базовой организацией, осуществляющей сейсмический мониторинг на территории Российской Федерации. Она является преемницей первой стандартизированной сейсмической сети в мире — ЕССН (Единая система сейсмических наблюдений СССР). Датой ее образования считается 4 января 1963 г., когда в г. Обнинске была создана Центральная геофизическая обсерватория (ЦГО) «Москва» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР.

В настоящее время ФИЦ ЕГС РАН имеет иерархическую структуру и включает в себя следующие филиалы:

- Центральное отделение, г. Обнинск (68 станций), код сети OBGRS;
- Лаборатория сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива, г. Воронеж (11 станций), код сети OBGRS: VMGRS;
- Алтае-Саянский филиал, г. Новосибирск (89 станций), код сети ASGRS;
- Камчатский филиал, г. Петропавловск-Камчатский (97 станций), код сети KAGR;
- Сахалинский филиал, г. Южно-Сахалинск (59 станций), код сети SAGR;
- Магаданский филиал, г. Магадан (16 станций), код сети NEGR;
- Дагестанский филиал, г. Махачкала (17 станций), код сети DAGR;
- Северо-Осетинский филиал, г. Владикавказ (13 станций), код сети NOGR;
- Кольский филиал, г. Апатиты (9 станций), код сети KOGR;
- Байкальский филиал, г. Иркутск (51 станция), код сети BAGR;
- Якутский филиал, г. Якутск (23 станции), код сети YAGR;
- Бурятский филиал, г. Улан-Удэ (9 станций), код сети BUGR.

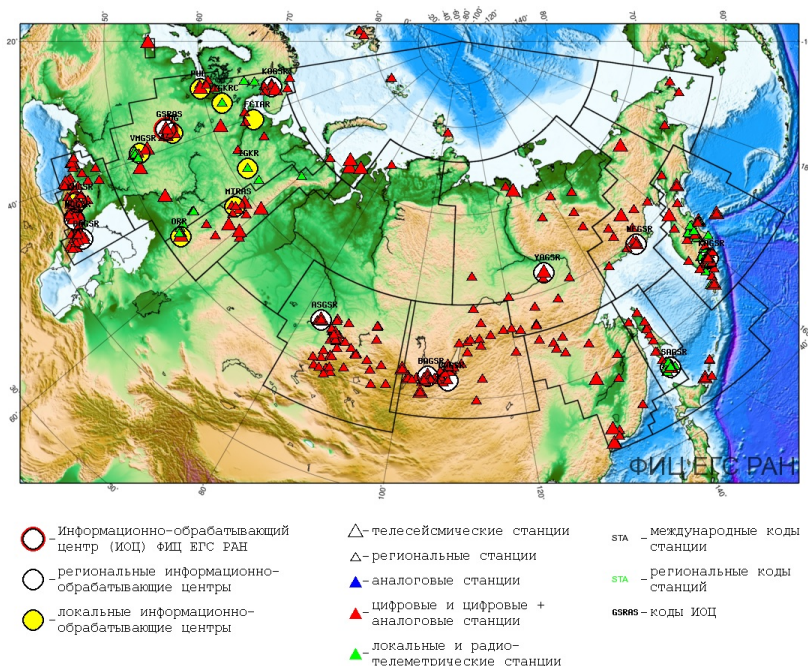
Отметим, что ФИЦ ЕГС РАН тесно сотрудничает и использует данные ряда сейсмологических центров, функционирующих на базе российских научных организаций:

- Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь (5 станций), код сети MIRAS;
- Архангельская сейсмическая сеть, г. Архангельск (8 станций), код сети FCIAR;
- Институт динамики геосфер РАН, г. Москва (4 станции), код сети IDG.

Схема расположения станций ФИЦ ЕГС РАН показана на рис. 1.

ФИЦ ЕГС РАН ведет фундаментальные научные и прикладные исследования в области сейсмологии и других смежных разделов геофизики. Совместно с Росгидрометом РФ выполняются исследования, направленные на предупреждение о цунами на Дальнем Востоке. В рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СТВТО) обеспечивается функционирование 9 сейсмических станций международной системы мониторинга, осуществляется мониторинг вулканической активности на Камчатке, и др.

Результаты сейсмического мониторинга, выполняемого ФИЦ ЕГС РАН, ежегодно публикуются в сборниках «Землетрясения Северной Евразии» (<http://www.gsras.ru/zse>) [ФИЦ ЕГС РАН, 2023b] и «Землетрясения в России» (<http://eqru.gsras.ru>) [ФИЦ ЕГС РАН, 2023a]. Следует отметить, что сейсмичность Российской Федерации в этих



**Рис. 1.** Расположение сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН (<http://eqr.gsras.ru/index.php?inc=main>, дата обращения: 26.12.2023).

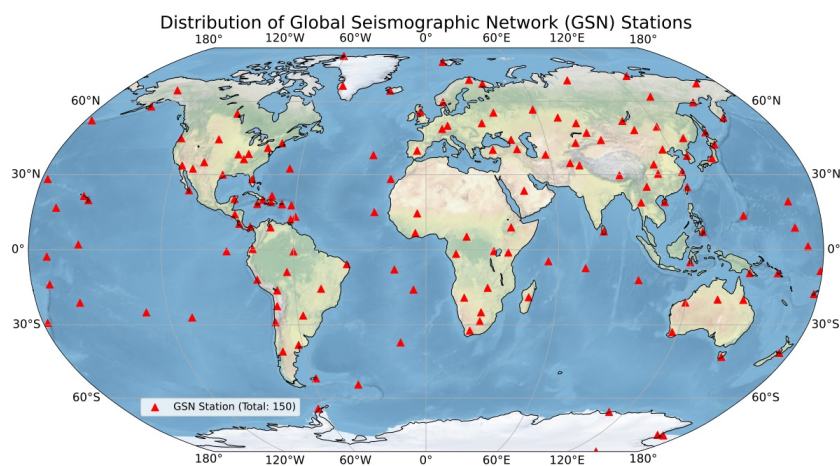
сборниках представлена в виде набора следующих отдельных каталогов, с перекрывающимися зонами ответственности региональных филиалов:

- Северный Кавказ;
- Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь;
- Арктика;
- Алтай и Саяны;
- Прибайкалье и Забайкалье;
- Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион;
- Якутия;
- Северо-Восток России и Чукотка;
- Камчатка и Командорские острова.

Такое разбиение обусловлено преемственностью деления территории СССР на XIV подрегионов на основе генеральной сеймотектонической общности, принятой при составлении [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. 1977] выдающимися советскими сейсмологами Н. В. Кондорской и Н. В. Шебалиным. Необходимо отметить, что в советский период при составлении ежегодников «Землетрясения в СССР» использовалось еще более подробное деление на регионы.

На сайте ФИЦ ЕГС РАН ([http://www.gsras.ru/new/ssd\\_news.htm](http://www.gsras.ru/new/ssd_news.htm)) ведется оперативное информирование о произошедших землетрясениях, а также организован онлайн доступ к сейсмическим каталогам и волновым формам.

**(1.2.1) Глобальная сейсмографическая сеть (Global Seismographic Network (GSN), <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/gsn-global-seismographic-network>)** — постоянно действующая сеть современных цифровых сейсмических станций, соединенных телекоммуникационной сетью, служащая многоцелевым научным центром и социальным ресурсом для целей мониторинга. Сеть является глобальной преемницей одной из первых стандартизованных сетей WWSNN и состоит из 150 сейсмических станций (рис. 2), относительно равномерно покрывающих поверхность Земли. Отметим, что 12 станций расположены на территории России и обслуживаются ФИЦ ЕГС РАН.



**Рис. 2.** Расположение сейсмических станций сети GSN

(<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/gsn-global-seismographic-network>, дата обращения: 26.12.2023).

Доступ к данным сети GSN можно получить на сайте IRIS. В рамках IRIS на долю GSN приходится относительно небольшой объем данных, но глобально распределенная сеть широкополосных сейсмоприемников с низким уровнем шума делает эти данные ценными. Количество станций в GSN остается относительно постоянным в течение долгого времени. Это позволяет сосредоточиться на улучшении качества существующих станций [Ringler et al., 2019].

**(1.2.2) Передовая национальная сейсмическая система (Advanced National Seismic System (ANSS)),** <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/anss-advanced-national-seismic-system>) была учреждена Геологической службой США (USGS) в 2000 г. На данный момент она является основной организацией, занимающейся координацией сейсмологических исследований, а также сейсмическим мониторингом в США. В рамках своей мониторинговой деятельности ANSS включает в себя Национальную сейсмическую сеть, Национальный центр информации о землетрясениях (NEIC), Национальный проект сильных движений и 15 региональных сейсмических сетей, управляемых USGS и ее партнерами [U.S. Geological Survey, 2017]. Большая часть станций ANSS оснащена одновременно широкополосными сейсмометрами и сейсмометрами сильных движений. Региональные сети состоят из плотно расположенных станций в сейсмоактивных районах для регистрации достаточно слабых землетрясений и повышения точности определения их характеристик.

По результатам своей деятельности ANSS формирует комплексный каталог ANSS Comprehensive Catalog (ComCat). Он содержит параметры очагов землетрясений и другую информацию, полученную от сетей, входящих в ANSS. Каталог ComCat также интегрирует информацию о параметрах очагов землетрясений из каталогов Centennial Catalog и Global Centroid Moment Tensor Catalog. Новые и обновленные данные добавляются в каталог динамически по мере того, как источники публикуют или обновляют продукты. Доступ к ComCat осуществляется через страницу онлайн-поиска (<https://earthquake.usgs.gov/data/comcat>), на которой пользователь может выбрать интересующие его землетрясения по широкому спектру критериев.

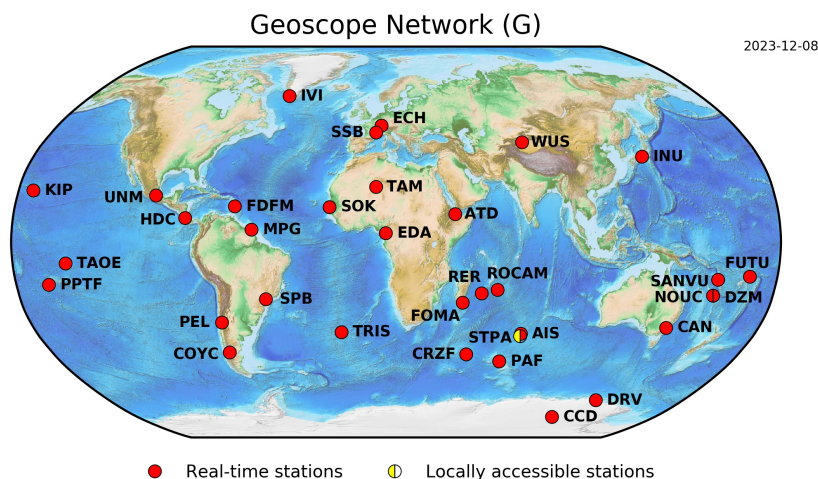
**(1.2.3) Национальный центр информации о землетрясениях (National Earthquake Information Center (NEIC)),** <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>, расположенный в городе Голден, штат Колорадо (США), создан в 1966 г. в составе USGS. В рамках своей деятельности NEIC решает три основные задачи:

- Максимально быстрое и возможно точное определение координат эпицентра и магнитуды всех значительных землетрясений, происходящих в мире. NEIC оперативно

- распространяет эту информацию среди заинтересованных национальных и международных агентств, исследователей и широкой общественности.
- Сбор и предоставление ученым и общественности обширной базы сейсмических данных для научных исследований. NEIC является национальным центром данных и архивом информации о землетрясениях.
- Проведение исследовательской работы по улучшению возможностей регистрации землетрясений и пониманию механизма землетрясений [Benz, 2017].

**(1.3.1) Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр (Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC), <https://www.emsc-csem.org>)** основан в 1975 г. Европейской сейсмологической комиссией (ESC). Он представляет собой некоммерческую организацию, объединяющую 84 института из 55 стран мира. Россию в организации представляет ФИЦ ЕГС РАН. В 1987 г. Совет Европы наделил EMSC полномочиями основной организации, обеспечивающей Европейскую систему оповещения по основным опасностям (<https://www.emsc-csem.org/#2>, дата обращения: 26.12.2023). EMSC формирует каталоги, пользуясь данными ORFEUS, накапливаемыми в настоящее время в GFZ Potsdam. К данным организован удаленный доступ с помощью пакета ObsPy [Beyreuther et al., 2010]. Последнее дает возможность строить унифицированные модели сейсмичности для территории Европы [Kotha et al., 2020], покрытой несколькими десятками отдельных сетей [Cauzzi et al., 2021].

**(1.3.2) Французская глобальная сеть широкополосных сейсмологических станций (French Global Network of broad band seismic stations (GEOSCOPE), <http://geoscope.ipgp.fr>)** — созданная в 1982 г. сеть из 35 широкополосных сейсмических станций для решения задачи глобального инструментального мониторинга (рис. 3). Станции работают непрерывно и передают данные в режиме реального времени, что позволяет использовать их, в том числе, центрами оповещения о цунами. Данные большинства станций поступают в центр данных Парижского института физики Земли и архивируются после проверки [Roult et al., 2013]. GEOSCOPE предоставляет данные и информацию о землетрясениях, произошедших в мире, с магнитудой более 5.5–6.0. Аналогичная информация может быть предоставлена для более слабых землетрясений, например, произошедших во Франции или в европейско-средиземноморском регионе. На сайте GEOSCOPE можно получить доступ к каталогам землетрясений начиная с 2006 г.



**Рис. 3.** Расположение широкополосных станций глобальной сети GEOSCOPE (<http://geoscope.ipgp.fr>, дата обращения: 26.12.2023).

**(1.4) Сети сейсмического мониторинга Японии.** Высокая сейсмическая активность Японии обусловила значительную плотность сетей сейсмического мониторинга, их разнообразие и высокую степень аппаратной оснащенности. Дополнительный импульс развитию сетей придали разрушительные землетрясения, произошедшие в Кобе в 1995 г.

и Тохоку в 2011 г. [Ozawa *et al.*, 2011]. Оба события были классифицированы как природные катастрофы, принесшие убытки порядка нескольких сотен миллиардов долларов. Организацией и обслуживанием сетей сейсмических наблюдений на территории Японии занимается Национальный исследовательский институт наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), <https://www.bosai.go.jp/e>). В число японских сейсмических сетей входят: K-NET, KiK-net, Hi-net и F-net [Aoi *et al.*, 2020]. Кроме того, создана сеть V-net для мониторинга вулканической активности. После землетрясения Тохоку 2011 г. на дне океана были развернуты сети S-net и DONET для оперативной регистрации подводных землетрясений и связанных с ними цунами [Aoi *et al.*, 2020].

В целях раннего предупреждения о землетрясениях и цунами сейсмические данные передаются в режиме реального времени в Японское метеорологическое агентство (Japan Meteorological Agency (JMA), <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>). Следует отметить, что JMA создает и развивает как свои сейсмические сети, так и участвует в развитии указанных выше сетей. JMA играет важную роль в предоставлении странам северо-западной части Тихоокеанского региона прогнозной информации о цунами.

**(1.4.1) K-NET (Kyoshin Network,** [https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview\\_kyoshin\\_index\\_en.html](https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview_kyoshin_index_en.html)) — общенациональная сеть мониторинга сильных движений, состоящая из более чем 1000 сейсмических станций, равномерно покрывающих территорию Японии через каждые 20 км. Сеть K-NET функционирует с июня 1996 года.

**(1.4.2) KiK-net (Kiban Kyoshin Network** [https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview\\_kyoshin\\_index\\_en.html](https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview_kyoshin_index_en.html)) — сеть мониторинга сильных движений, состоящая из пар сейсмографов, установленных на поверхности земли и в скважине вместе с сейсмометрами высокой чувствительности (Hi-net). Такие пары приборов установлены примерно в 700 пунктах по территории всей Японии.

**(1.4.3) Hi-net** (<https://www.hinet.bosai.go.jp/summary>) — сеть высокочувствительных сейсмографов для мониторинга микроземлетрясений, состоящая из почти 800 станций со средним расстоянием между ними 20 км. Сейсмометры установлены в забое скважин на глубине 100–3500 м для снижения шума, создаваемого ветром, морскими волнами и деятельностью человека.

**(1.4.4) F-net** (<https://www.fnet.bosai.go.jp>) — сеть из 70 широкополосных станций, предназначенная для оперативного определения характеристик землетрясений. Сейсмометры устанавливаются в глубине штольни, где температура и давление стабильны. Это позволяет измерять колебания грунта в широком диапазоне частот. Записи сети позволяют получать информацию о механизмах очагов землетрясений и структуре Земли.

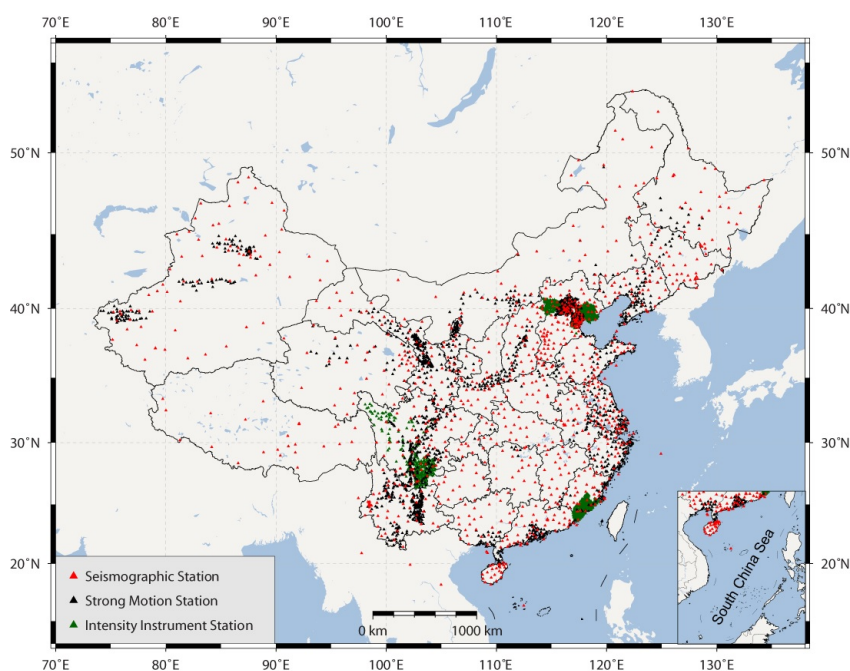
**(1.4.5) V-net** (<https://www.vnet.bosai.go.jp>) — сеть наблюдений за 16 вулканами с целью разработки прогнозов извержений и смягчения рисков от вулканической опасности. Пункты наблюдения оборудованы несколькими типами приборов, в том числе, скважинными сейсмометрами, скважинными наклономерами, GPS приемниками и широкополосными сейсмометрами.

**(1.4.6) S-net** (<https://www.seafloor.bosai.go.jp>) — сеть наблюдений за дном океана, состоящая из 150 пунктов наблюдения, расположенных от острова Хоккайдо до префектуры Тоба. Каждый пункт оборудован сейсмометрами и датчиками давления воды для наблюдения за подводными землетрясениями и цунами. Регистрируемые данные передаются на наземные станции по оптоволоконному кабелю и поступают в NIED в режиме реального времени.

**(1.4.7) DONET** (<https://www.seafloor.bosai.go.jp>) — сеть наблюдений за дном океана, состоящая из 51 станции у г. Куманонада и пролива Кии. На станциях установлен широкий спектр приборов для мониторинга землетрясений и цунами. Сеть спроектирована так, чтобы ее можно было легко расширить, заменить или добавить станции и приборы. Данные передаются в исследовательские институты и университеты в режиме реального времени.

Измерения в режиме реального времени с помощью сетей наблюдения за дном океана S-net и DONET увеличивают заблаговременность предупреждений о подводных землетрясениях и предоставляют оперативную и точную информацию о цунами.

**(1.5) Центр сейсмических сетей Китая (The China Earthquake Networks Center (CENC), <https://www.cenc.ac.cn>)** основан 18 октября 2004 г. CENC наделен полномочиями оперативного руководства и управления национальной сейсмической сетью Китая CSN (Chinese Seismic Network). Сегодня CSN состоит из сейсмографической сети, сети сильных движений и инженерно-сейсмометрической сети — всего 4082 станции (рис. 4). Отметим, что сейсмографическая сеть охватывает всю континентальную часть Китая, а две другие сети расположены в сейсмоопасных зонах. Все станции Китая обслуживаются 31-м региональным центром, функционирующими под управлением CENC [Dai and An, 2020].



**Рис. 4.** Расположение станций сети CSN [Dai and An, 2020]. Красным обозначены сейсмографические станции, черным — станции сильных движений, зеленым — станции инженерно-сейсмометрической сети.

**(1.5.1) Сейсмографическая сеть (The Seismographic Network)** насчитывает 1107 станций, в том числе 166 национальных и 941 региональную. Национальные станции в основном оснащены 120-секундными сверхширокополосными сейсмометрами (некоторые станции имеют сверхширокополосные 360-секундные сейсмометры), которые используются для мониторинга глобальной сейсмичности. На региональных станциях преимущественно установлены широкополосные сейсмометры 60-х годов для мониторинга региональной сейсмической активности. Различия в плотности расположения станций в разных регионах Китая связаны со степенью экономического развития и плотностью населения. Этим объясняется более плотное размещение станций на востоке Китая по сравнению с его западной частью. Данные от станций в реальном времени передаются в CENC через региональные центры.

**(1.5.2) Сеть сильных движений (The Strong Motion Network)** состоит из 1965 станций, оснащенных акселерометрами (2g) для регистрации ускорений в ближней зоне. При этом, только 393 станций передают данные в CENC в режиме реального времени через сетевой центр.

**(1.5.3) Сеть инструментов интенсивности (The Intensity Instrument Network)** состоит из 1010 станций, распределенных по территориям шести провинций: Пекин, Тяньцзинь, Хэбэй, Сычуань, Юньнань и Фуцзянь. В сочетании со станциями других



сетей Китая они используются для оперативного оповещения об интенсивности и тестирования раннего предупреждения о землетрясениях. Чтобы улучшить возможности мониторинга сильных землетрясений в приграничных районах Китая и во всем мире в режиме, близком к реальному, CENC обменивается сейсмическими данными с глобальной сейсмографической сетью GSN. Отметим, что кроме этого, CENC обменивается данными с Корейской метеорологической администрацией (Korea Meteorological Administration (КМА), <https://www.kma.go.kr/neng>). При возникновении землетрясения магнитудой выше 5,0 CENC отправляет данные волновых форм с 20 национальных станций на FTP-сервер IRIS.

**(1.6) Организация Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), <https://www.ctbto.org>)** основана в 1996 г. и включает 50 основных и 120 вспомогательных сейсмических станций, расположенных по всему миру. Как было отмечено выше, на территории России расположены 9 станций CTBTO, обслуживаемых ФИЦ ЕГС РАН. Отметим, что система мониторинга также включает 11 гидроакустических, 60 инфразвуковых и 80 радионуклидных станций (рис. 5). Станции сети CTBTO регистрируют данные, которые передаются для анализа в международный центр обработки данных в Вене. Результаты анализа отправляются государствам-участникам Организации [Coyne et al., 2012].



Рис. 5. Схема международной системы мониторинга CTBTO (<https://www.ctbto.org/our-work/ims-map>, дата обращения: 26.12.2023).

## 2. Сейсмологические агентства и проекты планетарного масштаба

Кроме регулярных сейсмических сетей существуют сейсмологические агентства и проекты, которые, не обладая собственными сетями, агрегируют и обрабатывают данные других сетей и создают соответствующие каталоги и бюллетени землетрясений. К перечню таковых в первую очередь необходимо отнести Международный сейсмологический центр (ISC), The Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT) и SCARDEC.

**Международный сейсмологический центр (The International Seismological Centre (ISC), <http://www.isc.ac.uk>)** основан в 1964 г. как независимая международная организация, в которую входят многие страны, включая Российскую Федерацию. Организации, представляющие страны-участницы в ISC, ежегодно платят членские взносы. ISC было создано при содействии ЮНЕСКО в качестве преемника ISS (International Seismological Summary). Целью ISC является сбор, архивирование и обработка сейсмических данных, бюллетеней станций и сетей. ISC осуществляет подготовку и рас-

пространение бюллетеня с непрерывной окончательной сводкой сейсмичности в мире. Данные ISC обладают высокой степенью достоверности, но поступают с большим запаздыванием. Бюллетень базируется на информации, поступающей от более 130 сейсмических сетей и центров данных, расположенных по всему миру. Кроме того, ISC совместно с NEIC/USGS ведет международный реестр сейсмических станций. Совместно с IASPEI (Международная ассоциация сейсмологии и физики недр Земли, <http://www.iaspei.org>) в ISC ведется справочный список событий, включающий информацию о 12 090 землетрясениях и взрывах (с записями волновых форм на региональных и/или телесеизмических расстояниях), зарегистрированных с высокой точностью с 1959 по 2020 гг.

В течение почти 50 лет данные ISC являются общепринятым окончательным источником сейсмологической информации. Они используются учеными во всем мире для оценки сейсмической опасности, тектонических исследований и построения глобальных и региональных томографических и других геофизических моделей. Бюллетень ISC лежит в основе таких хорошо известных продуктов, как глобальная одномерная скоростная модель ak135 [Kennett and Engdahl, 1991; Kennett et al., 1995], а также каталоги ЕНВ [Engdahl et al., 2020; International Seismological Centre, nodate; Weston et al., 2018] и Centennial [Engdahl and Villaseñor, 2002]. Источник данных ISC представляет собой важный критерий контроля качества для СТВТО. Кроме того, он является базой для построения глобальной модели риска землетрясений (GEM) [Storchak et al., 2015].

**Глобальный тензор центроид-моментов (The Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT), [www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org))** — проект, основанный в Гарвардском университете США в 1982 г. До 2006 г. он назывался Гарвардский проект СМТ. В 2006 г. деятельность проекта СМТ переместилась в Колумбийский университет Нью-Йорка. С этого времени исследовательская работа продвигается под названием The Global Centroid-Moment-Tensor. Проект СМТ финансируется Национальным научным фондом США [Woodhouse and Deuss, 2015].

Каталог GCMT является важным источником информации, обобщающим глобальные сейсмические процессы за последние 40 лет. Создание каталога GCMT было трудоемкой работой, занявшей несколько десятилетий и позволившей получить высококачественный ресурс о размерах и ориентации очагов землетрясений. Определение механизма СМТ в настоящее время осуществляется для всех землетрясений с  $M_w \geq 5,0$ . В каталогах землетрясений магнитуды, рассчитанные GCMT, имеют соответствующий индекс в обозначении. На сегодняшний день каталог GCMT включает данные о параметрах более 40 000 землетрясений [Woodhouse and Deuss, 2015].

**База данных временных очаговых функций (Source Time Functions Database (SCARDEC), <http://scardec.projects.sismo.ipgp.fr>)** — веб-ресурс, содержащий: определения сейсмического момента, моментной магнитуды, механизма очага и временной функции очага для сильных землетрясений. Расчеты произведены с помощью одноименного метода (SCARDEC), основанного на деконволюции объемных волн [Vallée et al., 2010]. Вариант автоматизации методики был предложен в 2011 г. [Vallée et al., 2010] и в настоящее время применяется рутинно ко всем землетрясениям магнитудой выше 5,8, содержащимся в каталоге NEIC-PDE с 1992 г. База данных постоянно обновляется и пополняется на сервере Парижского института физики Земли (IPGP). Данные, начиная с 2014 года, можно визуализировать на веб-сайте GEOSCOPE.

Основной целью применения методики SCARDEC является оперативное получение более точных оценок моментных магнитуд, особенно для поверхностных сильных землетрясений (с  $M_w > 7,0-7,5$ , в том числе потенциально цунамигенных). Известно, что для таких землетрясений становится существенным вклад очагового процесса, а сам очаг не может быть представлен точечным источником (каким очаг землетрясения представляется в методе GCMT). Таким образом, в отличие от GCMT, в методе SCARDEC временная функция очага (производная сейсмического момента по времени) определяется, а не фиксируется. Это позволяет, в том числе, получить первые оценки того, насколько стремительно и равномерно развивался очаговый процесс во времени.

Оценки моментных магнитуд SCARDEC могут отличаться от оценок GCMТ на  $-0.2$  магнитудных единиц.

### 3. Каталоги землетрясений, их параметры и характеристики

Современное увеличение количества сейсмических станций привело к необходимости модернизации процесса обработки сейсмических данных. Первоначально, в эпоху установки одиночных станций (первые десятилетия XX века), основным результатом являлся бюллетень, который включал в себя информацию о типе сейсмических фаз, наблюдаемых на записи, и их параметрах: времена вступления, четкость вступления, знак вступления, амплитуда, период. В это время весьма распространенным методом определения местоположения землетрясения являлся «метод определения по одной станции». Однако достаточно скоро пришло понимание, что бюллетени с разных станций должны анализироваться совместно, что реализовал Дж. Милн, положив начало Международному сейсмологическому бюллетеню (International Seismological Summary, 1899–1912), правопреемником которого принято считать Международный сейсмологический центр.

В настоящее время обработка сейсмических данных осуществляется только по сети станций (региональной или глобальной), что позволило улучшить точность определения гипоцентра, а главное, автоматизировать сам процесс обработки. С другой стороны, стоит отметить, что существенно сократился объем сохраняемой информации с индивидуальных записей, как, например, качество вступления, тип фазы (первые вступления  $P$  не всегда интерпретируются как  $Pn, Pg$ ), количество телесеизмических фаз и т. д. Распространенные ранее бюллетени сейчас часто сменяют каталоги землетрясений, которые выпускают сейсмологические агентства, полученные по разному набору исходных данных. В целом можно сказать, что современные алгоритмы обработки сейсмологических данных являются гибкими и не унифицированными, продолжают модернизироваться, а вместе с этим будет продолжаться варьироваться и качество итогового результата — бюллетеня и/или каталога, соответственно.

Отметим, что качество каталога землетрясений зависит от таких функциональных характеристик регистрирующей сети и различных параметров, как: особенности регистрирующего оборудования, апертура сейсмической сети, процедуры локации (в том числе, скоростная модель) и определения магнитуд (в том числе, модель затухания сейсмических волн) и др. Все это, включая неоднородность времени регистрации сейсмических сетей, является причиной наблюдаемых отличий в данных о землетрясениях, представленных в различных каталогах.

Одной из центральных характеристик каталогов землетрясений является магнитуда представительной регистрации (представительная магнитуда)  $M_c$  [Mignan et al., 2011]. Магнитуда  $M_c$  представляет собой минимальную магнитуду, выше которой надежно регистрируются все землетрясения для заданной пространственно-временной области [Mignan and Woessner, 2012]. Она является ключевым параметром, отражающим эффективность сейсмической сети, т. е. ее регистрирующих возможностей. Для анализа каталога строят график повторяемости землетрясений [Wiemer, 2000]. На нем значение  $M_c$  будет соответствовать началу его линейной части [Vorobieva et al., 2013]. По наклону графика повторяемости ( $b$ -value) делается вывод об уровне сейсмичности региона. Чем больше значение параметра  $b$ , тем больше пропорция землетрясений малых магнитуд относительно больших.

Другой, часто проблемной, важной характеристикой каталогов землетрясений является шкала магнитуд. Она различается видом сейсмической волны, использованной для ее расчета.

Идея логарифмической шкалы магнитуд землетрясений была впервые предложена еще Чарльзом Рихтером в 1930-х годах для оценки силы землетрясений, происходящих в Южной Калифорнии [Richter, 1935]. Оценка магнитуды производилась с использованием относительно высокочастотных данных с близлежащих сейсмических станций. Такая шкала обозначалась  $M_L$ , где  $L$  маркирует локальную магнитуду. Впоследствии ее стали называть шкалой Рихтера, или локальной (региональной) магнитудой. С разви-

тием сейсмических сетей стало очевидно, что разработанная Рихтером шкала магнитуд действительна только для определенных диапазонов магнитуд и расстояний [Richter, 1935].

В число наиболее распространенных в настоящее время типов магнитуд, определяемых ведущими мировыми сейсмическими агентствами, входят введенные Бено Гутенбергом в 1945 г. [Gutenberg, 1945]:

- $M_s$  — магнитуда по поверхностным волнам Релея и Лява;
- $m_b$  — магнитуда по объемным волнам.

Необходимо отметить, что в своих работах Гутенберг первоначально стыковал шкалы  $M_s$  и  $m_b$  с  $M_L$  так, чтобы при  $M_L = 5,0$ ,  $M_s$  и  $m_b$  также были равны 5,0. Так реализовывалась идея привести региональные и телесеизмические магнитуды к единой шкале. Однако было обнаружено, что шкалы по-разному характеризуют разные диапазоны магнитуд.

- $M_w$  — моментная магнитуда, предложена Хиро Канамори в 1977 г. Она основана на сейсмическом моменте землетрясения.  $M_w$  наиболее тесно связана с энергией, выделившейся при землетрясении, и дает более надежные оценки для очень сильных землетрясений [Kanamori, 1977].

В первые годы после введения магнитуды  $M_w$  появились надежды, что она станет универсальной магнитудной шкалой. Однако, результаты последних исследований [Di Giacomo et al., 2021] показывают, что широкое применение  $M_w$  все еще не позволило на всем диапазоне магнитуд перейти к однородной универсальной магнитудной шкале, базирующейся на  $M_w$ .

В СССР была широко распространена оценка энергетического класса землетрясения —  $K$ , предложенная в 1964 Т. Г. Раутиан как десятичный логарифм энергии, высвободившейся при землетрясении. Энергетический класс является удобным параметром для слабых и средних землетрясений и может легко быть пересчитан в магнитуду с помощью соответствующих формул [Rautian et al., 2007]. Оценка силы землетрясений в энергетических классах до сих пор проводится на территории России и в постсоветском пространстве.

Планировалось, что оценка энергетического класса станет физическим параметром вместо безразмерной оценки магнитуды. Однако в [Абубажиров и др., 2018] было показано, что, несмотря на тесную связь с физическим параметром (энергией сейсмических волн), оценки класса, по сути, являются такими же оценками магнитуд.

#### 4. Интегрирование каталогов землетрясений

Одной из базовых составляющих сейсмического районирования является использование оптимального, представительного каталога землетрясений исследуемого региона. Однако в силу различных конфигураций мониторинговых сетей и методов обработки записей сейсмические агентства могут пропускать (не регистрировать) землетрясения, которые зафиксированы (локализованы) сетями других агентств. При этом информация о слабых событиях сосредоточена преимущественно в региональных каталогах. Таким образом, наиболее полную информацию обо всех произошедших землетрясениях можно получить только интегрированием (объединением) нескольких существующих для этого региона каталогов в единый. Такое объединение сейсмических данных из различных достоверных источников позволяет увеличить полноту и представительность сейсмических событий в интегрированном каталоге землетрясений.

В процессе объединения каталогов землетрясений необходимо возникает задача идентификации и удаления образующихся дублей (записей, в одном или разных каталогах, возможно относящихся к одному событию). Для целей интегрирования (системного объединения) каталогов землетрясений в [Vorobieva et al., 2022] была создана формализованная методика, использующая авторскую модификацию метода ближайшего соседа [Zaliapin and Ben-Zion, 2013; 2016]. Отметим, что особенность созданного в [Vorobieva et al., 2022] математического метода заключается в том, что

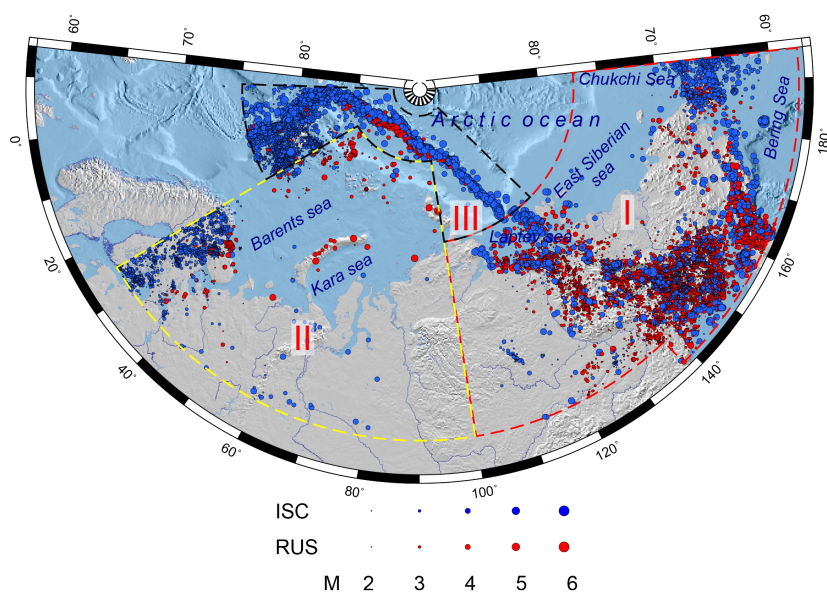
он дает возможность разделять возникающие дубли и афтершоки с высоким уровнем достоверности. Последнее является сложной задачей распознавания образов, т. к. и те и другие являются событиями, близкими в пространстве и времени.

Эффективность использования созданной методики продемонстрирована в [Vorobieva et al., 2022] на примере объединения каталогов ANSS и JMA афтершоковой последовательности японского землетрясения Тохоку 2011 г. [Ozawa et al., 2011]. Выбор объединяемых в [Vorobieva et al., 2022] подкаталогов сейсмических событий связан с существующими у многих сейсмологических сетей сложностями регистрации ранних афтершоков. Последние содержат важную информацию о физических механизмах, лежащих в основе возникновения землетрясений и постсейсмической деформации вокруг зоны разлома. По итогам интегрирования данных в каталоге ANSS было обнаружено более 700 событий, отсутствующих в каталоге JMA. Большинство из них произошло в начале афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку.

В 2021–2023 гг. в [Gvishiani et al., 2022; Vorobieva et al., 2023a,b] А. Д. Гвишиани, П. Н. Шебаляным, И. А. Воробьевой, Б. А. Дзэбевым и их соавторами впервые создан наиболее полный и представительный интегральный каталог землетрясений Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), включая срединно-океанические хребты Гаккеля и Книповича, а также архипелаг Шпицберген (рис. 6). В интегральном каталоге впервые выполнена унификация магнитудной шкалы. Каталог включает в себя интегрированные данные о землетрясениях из региональных каталогов ФИЦ ЕГС РАН (Якутия, Северо-восток России и Чукотка, Камчатка, Арктика, Восточно-Европейская платформа и Шпицберген), регионального каталога Архангельской сейсмической сети, регионального каталога западного сектора АЗРФ [Морозов и др., 2023] и данных ISC.

Каталог содержит информацию о 45 793 сейсмических событиях за период 1962–2022 гг. Он опубликован в свободном доступе на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли ([http://www.wdcb.ru/arctic\\_antarctic/arctic\\_seism\\_4.html](http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_seism_4.html), дата обращения: 26.12.2023). Необходимо отметить, что в процессе сборки объединенного каталога территория АЗРФ была разбита на три части (I — Восточный сектор [Gvishiani et al., 2022]; II — Западный сектор [Vorobieva et al., 2023a]; III — хребты Гаккеля и Книповича, архипелаг Шпицберген [Vorobieva et al., 2023b]). На первом этапе объединенные (интегральные) каталоги создавались отдельно для каждой из этих трех частей АЗРФ. Во-первых, это было связано как с пространственным разделением сейсмичности в АЗРФ, так и со сложностью построения во всем регионе корреляционных соотношений между различными магнитудами с целью унификации магнитудной шкалы. Во-вторых, такое разделение АЗРФ было продиктовано, в том числе, разнообразием и сложностью тектонических структур, включающих границу Евразийской и Североамериканской плит.

В 2024 г. И. А. Воробьевой, А. Д. Гвишиани, Б. А. Дзэбевым и Б. В. Дзерановым в [Vorobieva et al., 2024] был создан наиболее полный и представительный интегральный каталог землетрясений Осетинского сектора Большого Кавказа с унифицированной магнитудной шкалой. Каталог представляет собой объединение (интегрирование) данных о землетрясениях из каталогов ФИЦ ЕГС РАН (Кавказ, Северный Кавказ и Грузия), каталога Кавказа, подготавливаемого ранее Институтом геофизики АН Грузинской ССР, и каталога ISC. Интегрированный каталог содержит информацию о 16 285 событиях за период 1962–2022 гг. Авторская унифицированная магнитудная шкала, сведенная к «*rxh1-Mw*», является однородной. Каталог выложен в открытый доступ на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли (<http://www.wdcb.ru/sep/seismology/Ossetia/Ossetia.html>, дата обращения: 26.12.2023). Отметим, что в результате создания интегрированного каталога существенно пополнено начало афтершоковой последовательности Рачинского землетрясения 29.04.1991 г. с  $M = 7,0$  [Арефьев и др., 2006], являющегося сильнейшим зарегистрированным на Кавказе.



**Рис. 6.** Объединенный каталог землетрясений Арктической зоны Российской Федерации. I — Восточный сектор; II — Западный сектор; III — хребты Гаккеля и Книповича, архипелаг Шпицберген.

### 5. Обсуждение

В статье представлен обзор основных мировых и крупных национальных сейсмологических агентств и функционирующих под их управлением сейсмических сетей и центров данных. Также в обзоре рассмотрены базовые характеристики, определяющие критерии качества как записей о сейсмических событиях, так и каталогов землетрясений в целом. Необходимо отметить, что благодаря международному сотрудничеству сейсмологического сообщества в последние десятилетия начал активно развиваться процесс глобализации, выражающийся в том, что одни и те же сейсмические станции входят в состав разных сетей [Гвишиани и др., 2022]. Например, около 30 станций сети GSN одновременно входят в состав сети СВТВО, а 12 являются частью сети ФИЦ ЕГС РАН.

Вопрос стандартизации появления сопровождающей информации о работающих и появляющихся сейсмических сетях до сих пор остается открытым. Несмотря на поступающие начиная с 1912 г. (Б. Голицин) предложения о создании расширенного паспорта сейсмической станции [Haslinger et al., 2022], особенно актуального для возможности анализировать данные приборов регистрации сильных движений, и присвоение уникальных кодов сейсмическим сетям [Suarez et al., 2008], не всегда удается восстановить необходимую информацию, например, о скоростном строении верхних 30 м под станцией, о переносе станции (пусть и не значительном, то есть до 1 км), замене типа оборудования или способа установки и т. п. К сожалению, эти задачи предстоит решать ретроспективно.

Проблема стандартизации касается не только сейсмических сетей, но и итогового результата — каталогов землетрясений. История инструментальных сейсмологических наблюдений насчитывает уже более века. За это время количество сейсмических станций во всем мире выросло до нескольких десятков тысяч. От сейсмологов-пионеров, создававших и развивавших первые мониторинговые сети, сейсмология пришла к сотням международных, национальных и региональных сейсмологических агентств и центров. На фоне такого бурного и стремительного развития все еще остается актуальной и не до конца разрешенной задачей — создание, для конкретного сейсмоактивного региона, наиболее полного представительного каталога землетрясений с однородной магнитудной шкалой. Как уже было отмечено в работах [Gvishiani et al., 2022; Vorobieva et al., 2013;

Vorobieva et al., 2024; 2022; 2023a,b] был сделан существенный шаг вперед в процессе решения этой важной проблемы сейсмологии и оценки сейсмической опасности.

На глобальном уровне задачу решает ISC путем объединения данных о сейсмических событиях от множества мировых сетей и агентств. ISC на периодической основе формирует выверенный бюллетень землетрясений (Reviewed ISC Bulletin). В процессе его формирования автоматический алгоритм решает, какие события в базе данных ISC заслуживают рассмотрения аналитиками ISC. Решение основывается на максимальном значении из всех зарегистрированных магнитуд для данного сейсмического события. Необходимо отметить, что проходят проверку все землетрясения с  $M \geq 3,5$ , события с  $2,5 \leq M < 3,5$  проверяются выборочно, а с  $M < 2,5$  — не рассматриваются. Обычно аналитики пересматривают примерно 20% всех событий в базе данных ISC — в настоящее время от 3500 до 5000 в месяц. Работа выполняется с задержкой, примерно, 24 месяца, чтобы обеспечить наиболее полный сбор информации от сетей и центров обработки данных по всему миру. Такой подход гарантирует высокое качество проведенного анализа и полученного результата. В то же время каталог ISC поступает с большим запозданием. Это не позволяет использовать его в исследованиях, требующих результатов в текущем времени, или даже достаточно оперативно. Более того, ISC не работает с волновыми формами, а значит качество каталогов ISC всегда будет ограничено качеством поступающих бюллетеней от различных агентств.

Как следует из [Gvishiani et al., 2022; Vorobieva et al., 2024; 2023a,b], информация о слабых землетрясениях большей частью содержится в региональных каталогах. Например, в каталоге ISC отсутствует целый ряд событий, информация о которых имеется в региональных каталогах ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом системный подход, предложенный в [Vorobieva et al., 2022], является эффективным инструментом для создания представительных каталогов землетрясений с унифицированной (авторской) магнитудной шкалой.

Отметим, что формирование наиболее полных объединенных каталогов, содержащих всю известную информацию о слабых землетрясениях, позволит получать локальные оценки коэффициентов закона повторяемости и параметра закона продуктивности землетрясений [Shebalin et al., 2020]. Эти оценки будут определять регионально повторяемость событий разной силы, баланс между количеством больших и малых событий и фрактальную размерность носителя сейсмичности. Все это может позволить уточнить оценки сейсмической опасности и сейсмического риска. Последнее важно для оптимизации возможных экономических потерь и затрат на мероприятия по их предотвращению.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственных заданий Геофизического центра РАН, Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН и Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, утвержденных Минобрнауки России.

В работе использовались данные и сервисы, предоставленные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru>).

## Список литературы

- Абубакиров И. Р., Гусев А. А., Гусева Е. М. и др. Массовое определение моментных магнитуд  $M_w$  и установление связи между  $M_w$  и  $M_l$  для умеренных и слабых Камчатских землетрясений // Физика Земли. — 2018. — № 1. — С. 37–51. — DOI: [10.7868/S0002333718010039](https://doi.org/10.7868/S0002333718010039).
- Арефьев С. С., Рогожин Е. А., Быкова В. В. и др. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным // Физика Земли. — 2006. — № 1. — С. 30–44.
- Гвишиани А. Д., Добровольский М. Н., Дзеранов Б. В. и др. Большие данные в геофизике и других науках о Земле // Физика Земли. — 2022. — № 1. — С. 3–34. — DOI: [10.31857/S0002333722010033](https://doi.org/10.31857/S0002333722010033).
- Гвишиани А. Д., Панченко В. Я., Никитина И. М. Системный анализ Больших Данных для наук о Земле // Вестник Российской академии наук. — 2023. — Т. 93, № 6. — С. 518–525. — DOI: [10.31857/S0869587323060087](https://doi.org/10.31857/S0869587323060087).
- Голицын Б. Б. Лекции по сейсмометрии. — СПб : Типография Императорской Академии Наук, 1912. — 654 с.

- Кондорская Н. В., Федорова И. В. Сейсмические станции Единой системы сейсмических наблюдений СССР (ЕССН): На 01.01.90. — Москва : ОИФЗ РАН, 1996. — 36 с.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. *и др.* Сейсмичность западного сектора Российской Арктики // *Физика Земли*. — 2023. — № 2. — С. 115–148. — DOI: [10.31857/S0002333723020096](https://doi.org/10.31857/S0002333723020096).
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / под ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин. — Наука, 1977. — 536 с.
- ФИЦ ЕГС РАН. Землетрясения России в 2021 году. — 2023а.
- ФИЦ ЕГС РАН. Землетрясения Северной Евразии. — 2023b.
- Agnew D. C. History of seismology // *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. — Elsevier, 2002. — P. 3–11. — DOI: [10.1016/S0074-6142\(02\)80203-0](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80203-0).
- Aki K., Richards P. G. *Quantitative Seismology*. — 2nd ed. — Sausalito, CA : University Science Books, 2002. — 723 p.
- Aoi S., Asano Y., Kunugi T., *et al.* MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano // *Earth, Planets and Space*. — 2020. — Vol. 72, no. 1. — DOI: [10.1186/s40623-020-01250-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01250-x).
- Benz H. Building a National Seismic Monitoring Center: NEIC from 2000 to the Present // *Seismological Research Letters*. — 2017. — Vol. 88, 2B. — P. 457–461. — DOI: [10.1785/0220170034](https://doi.org/10.1785/0220170034).
- Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., *et al.* ObsPy: A Python Toolbox for Seismology // *Seismological Research Letters*. — 2010. — Vol. 81, no. 3. — P. 530–533. — DOI: [10.1785/gssrl.81.3.530](https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530).
- Cauzzi C., Bieńkowski J., Custódio S., *et al.* ORFEUS Services and Activities to Promote Observational Seismology in Europe and beyond // *EGU General Assembly*. — 2021. — DOI: [10.5194/egusphere-egu21-6119](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6119).
- Coyne J., Bobrov D., Bormann P., *et al.* CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability // *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*. — Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012. — DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch17](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch17).
- Dai G., An Y. China Earthquake Administration: Chinese Seismic Network // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*. — 2020. — Vol. 54, no. 2. — P. 28–40. — DOI: [10.31905/XWIVRBRI](https://doi.org/10.31905/XWIVRBRI).
- Dewey J., Byerly P. The Early History of Seismometry (to 1900) // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1969. — Vol. 59, no. 1. — P. 183–287.
- Di Giacomo D., Harris J., Storchak D. A. Complementing regional moment magnitudes to GCMT: a perspective from the rebuilt International Seismological Centre Bulletin // *Earth System Science Data*. — 2021. — Vol. 13, no. 5. — P. 1957–1985. — DOI: [10.5194/essd-13-1957-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-1957-2021).
- Engdahl E. R., Di Giacomo D., Sakarya B., *et al.* ISC-EHB 1964–2016, an Improved Data Set for Studies of Earth Structure and Global Seismicity // *Earth and Space Science*. — 2020. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1029/2019EA000897](https://doi.org/10.1029/2019EA000897).
- Engdahl E. R., Villaseñor A. Global seismicity: 1900–1999 // *International Handbook of Earthquake Engineering and Seismology*. — Elsevier, 2002. — P. 665–690. — DOI: [10.1016/S0074-6142\(02\)80244-3](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80244-3).
- Gutenberg B. Travel time curves at small distances, and wave velocities in southern California // *Gerlands Beitrage zur Geophysik*. — 1932. — Vol. 35. — P. 6–45.
- Gutenberg B. Magnitude determination for deep-focus earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1945. — Vol. 35, no. 3. — P. 117–130. — DOI: [10.1785/BSSA0350030117](https://doi.org/10.1785/BSSA0350030117).
- Gvishiani A. D., Vorobieva I. A., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12, no. 10. — P. 5010. — DOI: [10.3390/app12105010](https://doi.org/10.3390/app12105010).
- Haslinger F., Basili R., Bossu R., *et al.* Coordinated and Interoperable Seismological Data and Product Services in Europe: the EPOS Thematic Core Service for Seismology // *Annals of Geophysics*. — 2022. — Vol. 65, no. 2. — P. DM213. — DOI: [10.4401/AG-8767](https://doi.org/10.4401/AG-8767).
- Havskov J., Alguacil G. *Seismic networks* // *Modern Approaches in Geophysics*. — Springer Netherlands, 2004. — P. 211–257. — DOI: [10.1007/978-1-4020-2969-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2969-1_8).
- International Seismological Centre. Searching the ISC-EHB Bulletin. — DOI: [10.31905/PY08W6S3](https://doi.org/10.31905/PY08W6S3). — URL: <https://www.isc.ac.uk/isc-ehb/search/>.
- Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Vol. 82, no. 20. — P. 2981–2987. — DOI: [10.1029/JB082i020p02981](https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981).
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophysical Journal International*. — 1991. — Vol. 105, no. 2. — P. 429–465. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x).
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // *Geophysical Journal International*. — 1995. — Vol. 122, no. 1. — P. 108–124. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x).
- Kisslinger C., Howell B. F. *Seismology and physics of the Earth's interior in the US (1900–1960)* // *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part B*. — San Diego : Academic Press, 2003.



- Kotha S. R., Weatherill G., Bindi D., *et al.* Spatial Variability of Source and Attenuation Characteristics in Large Ground-Motion Datasets // EGU General Assembly. — 2020. — DOI: [10.5194/egusphere-egu2020-5187](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5187).
- Mignan A., Werner M. J., Wiemer S., *et al.* Bayesian Estimation of the Spatially Varying Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2011. — Vol. 101, no. 3. — P. 1371–1385. — DOI: [10.1785/0120100223](https://doi.org/10.1785/0120100223).
- Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. — Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 2012. — DOI: [10.5078/corssa-00180805](https://doi.org/10.5078/corssa-00180805).
- Minina E. V. Formation and development of seismological research in Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 350, no. 1. — P. 012009. — DOI: [10.1088/1755-1315/350/1/012009](https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012009).
- Oliver J., Murphy L. WWNSS: seismology's global network of observing stations // Science. — 1971. — Vol. 174. — P. 254–261.
- Ozawa S., Nishimura T., Suito H., *et al.* Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake // Nature. — 2011. — Vol. 475, no. 7356. — P. 373–376. — DOI: [10.1038/nature10227](https://doi.org/10.1038/nature10227).
- Rautian T. G., Khalturin V. I., Fujita K., *et al.* Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales // Seismological Research Letters. — 2007. — Vol. 78, no. 6. — P. 579–590. — DOI: [10.1785/gssrl.78.6.579](https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579).
- Richter C. F. An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1935. — Vol. 25, no. 1. — P. 1–32. — DOI: [10.1785/BSSA0250010001](https://doi.org/10.1785/BSSA0250010001).
- Ringler A. T., Steim J., Wilson D. C., *et al.* Improvements in seismic resolution and current limitations in the Global Seismographic Network // Geophysical Journal International. — 2019. — Vol. 220, no. 1. — P. 508–521. — DOI: [10.1093/gji/ggz473](https://doi.org/10.1093/gji/ggz473).
- Roult G., Montagnier J.-P., Romanowicz B., *et al.* The GEOSCOPE Program: Progress and Challenges during the Past 30 Years // Seismological Research Letters. — 2013. — Vol. 84, no. 2. — P. 250–250. — DOI: [10.1785/0220120193](https://doi.org/10.1785/0220120193).
- Shebalin P. N., Narteau C., Baranov S. V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. — 2020. — Vol. 222, no. 2. — P. 1264–1269. — DOI: [10.1093/gji/ggaa252](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252).
- 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. — Vol. 239. — P. 48–63. — DOI: [10.1016/j.pepi.2014.06.009](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009).
- Suarez G., Eck T. van, Giardini D., *et al.* The International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN): An Integrated System of Seismological Observatories // IEEE Systems Journal. — 2008. — Vol. 2, no. 3. — P. 431–438. — DOI: [10.1109/jsyst.2008.2003294](https://doi.org/10.1109/jsyst.2008.2003294).
- U.S. Geological Survey. Advanced National Seismic System—Current status, development opportunities, and priorities for 2017–2027. — 2017. — 32 p. — DOI: [10.3133/cir1429](https://doi.org/10.3133/cir1429).
- Vallée M., Charléty J., Ferreira A. M. G., *et al.* SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism and source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution: Wave deconvolution and earthquake parameters // Geophysical Journal International. — 2010. — Vol. 184, no. 1. — P. 338–358. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04836.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04836.x).
- Vorobieva I., Narteau C., Shebalin P., *et al.* Multiscale Mapping of Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2013. — Vol. 103, no. 4. — P. 2188–2202. — DOI: [10.1785/0120120132](https://doi.org/10.1785/0120120132).
- Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., *et al.* Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, no. 1. — P. 172. — DOI: [10.3390/app14010172](https://doi.org/10.3390/app14010172).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., *et al.* Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — DOI: [10.3389/feart.2022.820277](https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. — 2023a. — Vol. 13, no. 12. — P. 7084. — DOI: [10.3390/app13127084](https://doi.org/10.3390/app13127084).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog III: Gakkel Ridge, Knipovich Ridge, and Svalbard Archipelago // Applied Sciences. — 2023b. — Vol. 13, no. 22. — P. 12422. — DOI: [10.3390/app132212422](https://doi.org/10.3390/app132212422).
- Wadati K. Shallow and deep earthquakes // Geophysical Magazine. — 1928. — Vol. 1. — P. 162–202.
- Wadati K. Shallow and deep earthquakes, 3rd paper // Geophysical Magazine. — 1931. — Vol. 4. — P. 231–283.
- Wang Z. Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives // Pure and Applied Geophysics. — 2010. — Vol. 168, no. 1/2. — P. 11–25. — DOI: [10.1007/s00024-010-0148-3](https://doi.org/10.1007/s00024-010-0148-3).

- Weston J., Engdahl E. R., Harris J., *et al.* ISC-EHB: reconstruction of a robust earthquake data set // *Geophysical Journal International*. — 2018. — Vol. 214, no. 1. — P. 474–484. — DOI: [10.1093/gji/ggy155](https://doi.org/10.1093/gji/ggy155).
- Wiemer S. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2000. — Vol. 90, no. 4. — P. 859–869. — DOI: [10.1785/0119990114](https://doi.org/10.1785/0119990114).
- Woodhouse J. H., Deuss A. Theory and Observations - Earth's Free Oscillations // *Treatise on Geophysics*. — Elsevier, 2015. — P. 79–115. — DOI: [10.1016/B978-0-444-53802-4.00002-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00002-6).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2013. — Vol. 118, no. 6. — P. 2847–2864. — DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophysical Journal International*. — 2016. — Vol. 207, no. 1. — P. 608–634. — DOI: [10.1093/gji/ggw300](https://doi.org/10.1093/gji/ggw300).

# WORLD SEISMIC NETWORKS AND EARTHQUAKE CATALOGS

A. D. Gvishiani<sup>1,2</sup> , B. V. Dzeranov<sup>1,3,\*</sup> , A. A. Skorkina<sup>4</sup> , B. A. Dzeboev<sup>1,3</sup> 

<sup>1</sup>Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Schmidt Institute of the Physics of the Earth Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center RAS, Vladikavkaz, Russia

<sup>4</sup>Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*\*Correspondence to: Boris Dzeranov, b.dzeranov@gcras.ru

This paper is devoted to the review of currently functioning seismological agencies, seismic monitoring networks created, developed and supported by them, as well as earthquake catalogs produced. Particular attention is focused on international and national seismological centers and seismic networks. A historical insight about the first observations made by seismic networks completes the picture. The basic parameters of the main seismic networks and the principles of functioning for seismological centers are considered. The key characteristics of seismic catalogs that determine the criteria for their quality are discussed. The system-analytical approach to solving the urgent problem of creating the most complete and representative earthquake catalogs with a unified magnitude scale by integrating data from international, national and regional catalogs in the studied region is presented.

**Keywords:** seismic networks; seismological agencies; earthquake catalogs; representative magnitude; magnitude scale; catalog completeness, merging earthquake catalogs.

**Citation:** Gvishiani A. D., Dzeranov B. V., Skorkina A. A., Dzeboev B. A. (2024), World Seismic Networks and Earthquake Catalogs, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES1012, <https://doi.org/10.2205/2024es000901>

Received: 15 October 2023

Accepted: 15 January 2024

Published: 29 February 2024



© 2024. The Authors.

## References

- Abubakirov I. R., Gusev A. A., Guseva E. M., *et al.* Mass determination of moment magnitudes  $M_w$  and establishing the relationship between  $M_w$  and  $M_L$  for moderate and small Kamchatka earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2018. — Vol. 54, no. 1. — P. 33–47. — DOI: [10.1134/s1069351318010019](https://doi.org/10.1134/s1069351318010019).
- Agnew D. C. History of seismology // *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. — Elsevier, 2002. — P. 3–11. — DOI: [10.1016/S0074-6142\(02\)80203-0](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80203-0).
- Aki K., Richards P. G. *Quantitative Seismology*. — 2nd ed. — Sausalito, CA : University Science Books, 2002. — 723 p.
- Aoi S., Asano Y., Kunugi T., *et al.* MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano // *Earth, Planets and Space*. — 2020. — Vol. 72, no. 1. — DOI: [10.1186/s40623-020-01250-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01250-x).
- Arefiev S. S., Rogozhin E. A., Bykova V. V., *et al.* Deep structure of the Racha earthquake source zone from seismic tomography data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2006. — Vol. 42, no. 1. — P. 27–40. — DOI: [10.1134/s1069351306010034](https://doi.org/10.1134/s1069351306010034).
- Benz H. Building a National Seismic Monitoring Center: NEIC from 2000 to the Present // *Seismological Research Letters*. — 2017. — Vol. 88, 2B. — P. 457–461. — DOI: [10.1785/0220170034](https://doi.org/10.1785/0220170034).
- Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., *et al.* ObsPy: A Python Toolbox for Seismology // *Seismological Research Letters*. — 2010. — Vol. 81, no. 3. — P. 530–533. — DOI: [10.1785/gssrl.81.3.530](https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530).

- Cauzzi C., Bieńkowski J., Custódio S., *et al.* ORFEUS Services and Activities to Promote Observational Seismology in Europe and beyond // EGU General Assembly. — 2021. — DOI: [10.5194/egusphere-egu21-6119](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6119).
- Coyne J., Bobrov D., Bormann P., *et al.* CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2). — Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012. — DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch17](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch17).
- Dai G., An Y. China Earthquake Administration: Chinese Seismic Network // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. — 2020. — Vol. 54, no. 2. — P. 28–40. — DOI: [10.31905/XWIVRBRI](https://doi.org/10.31905/XWIVRBRI).
- Dewey J., Byerly P. The Early History of Seismometry (to 1900) // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1969. — Vol. 59, no. 1. — P. 183–287.
- Di Giacomo D., Harris J., Storchak D. A. Complementing regional moment magnitudes to GCMT: a perspective from the rebuilt International Seismological Centre Bulletin // Earth System Science Data. — 2021. — Vol. 13, no. 5. — P. 1957–1985. — DOI: [10.5194/essd-13-1957-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-1957-2021).
- Engdahl E. R., Di Giacomo D., Sakarya B., *et al.* ISC-EHB 1964–2016, an Improved Data Set for Studies of Earth Structure and Global Seismicity // Earth and Space Science. — 2020. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1029/2019EA000897](https://doi.org/10.1029/2019EA000897).
- Engdahl E. R., Villaseñor A. Global seismicity: 1900–1999 // International Handbook of Earthquake Engineering and Seismology. — Elsevier, 2002. — P. 665–690. — DOI: [10.1016/S0074-6142\(02\)80244-3](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80244-3).
- Golitsyn B. Lectures on seismometry. — St. Petersburg : Imperial Academy of Sciences, 1912. — 654 p.
- GS RAS. Earthquakes in Northern Eurasia. — 2023a.
- GS RAS. Earthquakes in Russia in 2021. — 2023b.
- Gutenberg B. Travel time curves at small distances, and wave velocities in southern California // Gerlands Beitrage zur Geophysik. — 1932. — Vol. 35. — P. 6–45.
- Gutenberg B. Magnitude determination for deep-focus earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1945. — Vol. 35, no. 3. — P. 117–130. — DOI: [10.1785/BSSA0350030117](https://doi.org/10.1785/BSSA0350030117).
- Gvishiani A. D., Dobrovolsky M. N., Dzeranov B. V., *et al.* Big Data in Geophysics and Other Earth Sciences // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2022a. — Vol. 58, no. 1. — P. 1–29. — DOI: [10.1134/s1069351322010037](https://doi.org/10.1134/s1069351322010037).
- Gvishiani A. D., Panchenko V. Y., Nikitina I. M. Big Data System Analysis for Geosciences // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2023. — Vol. 93, no. 6. — P. 518–525. — DOI: [10.31857/S0869587323060087](https://doi.org/10.31857/S0869587323060087).
- Gvishiani A. D., Vorobieva I. A., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. — 2022b. — Vol. 12, no. 10. — P. 5010. — DOI: [10.3390/app12105010](https://doi.org/10.3390/app12105010).
- Haslinger F., Basili R., Bossi R., *et al.* Coordinated and Interoperable Seismological Data and Product Services in Europe: the EPOS Thematic Core Service for Seismology // Annals of Geophysics. — 2022. — Vol. 65, no. 2. — P. DM213. — DOI: [10.4401/AG-8767](https://doi.org/10.4401/AG-8767).
- Havskov J., Alguacil G. Seismic networks // Modern Approaches in Geophysics. — Springer Netherlands, 2004. — P. 211–257. — DOI: [10.1007/978-1-4020-2969-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2969-1_8).
- International Seismological Centre. Searching the ISC-EHB Bulletin. — DOI: [10.31905/PY08W6S3](https://doi.org/10.31905/PY08W6S3). — URL: <https://www.isc.ac.uk/isc-ehb/search/>. <https://www.isc.ac.uk/isc-ehb/search/>.
- Kanamori H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. — 1977. — Vol. 82, no. 20. — P. 2981–2987. — DOI: [10.1029/JB082i020p02981](https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981).
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. — 1991. — Vol. 105, no. 2. — P. 429–465. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x).
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophysical Journal International. — 1995. — Vol. 122, no. 1. — P. 108–124. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x).
- Kisslinger C., Howell B. F. Seismology and physics of the Earth's interior in the US (1900–1960) // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part B. — San Diego : Academic Press, 2003.
- Kondorskaya N. V., Fedorova I. V. Seismic stations of the Unified Survey of Seismic Observation of the USSR (USSO) as of 01.01.1990. — Moscow : IPE RAS, 1996. — 36 p.
- Kotha S. R., Weatherill G., Bindi D., *et al.* Spatial Variability of Source and Attenuation Characteristics in Large Ground-Motion Datasets // EGU General Assembly. — 2020. — DOI: [10.5194/egusphere-egu2020-5187](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5187).
- Mignan A., Werner M. J., Wiemer S., *et al.* Bayesian Estimation of the Spatially Varying Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2011. — Vol. 101, no. 3. — P. 1371–1385. — DOI: [10.1785/0120100223](https://doi.org/10.1785/0120100223).
- Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. — Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 2012. — DOI: [10.5078/corssa-00180805](https://doi.org/10.5078/corssa-00180805).

- Minina E. V. Formation and development of seismological research in Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 350, no. 1. — P. 012009. — DOI: [10.1088/1755-1315/350/1/012009](https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012009).
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Asming V. E., *et al.* Seismicity of the Western Sector of the Russian Arctic // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2023. — Vol. 59, no. 2. — P. 209–241. — DOI: [10.1134/s106935132302009x](https://doi.org/10.1134/s106935132302009x).
- New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times through 1977 / ed. by N. V. Kondorskaya, N. V. Shebalin. — Translated, Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics, 1982. — 608 p.
- Oliver J., Murphy L. WWNSS: seismology's global network of observing stations // *Science*. — 1971. — Vol. 174. — P. 254–261.
- Ozawa S., Nishimura T., Suito H., *et al.* Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake // *Nature*. — 2011. — Vol. 475, no. 7356. — P. 373–376. — DOI: [10.1038/nature10227](https://doi.org/10.1038/nature10227).
- Rautian T. G., Khalturin V. I., Fujita K., *et al.* Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales // *Seismological Research Letters*. — 2007. — Vol. 78, no. 6. — P. 579–590. — DOI: [10.1785/gssrl.78.6.579](https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579).
- Richter C. F. An instrumental earthquake magnitude scale // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1935. — Vol. 25, no. 1. — P. 1–32. — DOI: [10.1785/BSSA0250010001](https://doi.org/10.1785/BSSA0250010001).
- Ringler A. T., Steim J., Wilson D. C., *et al.* Improvements in seismic resolution and current limitations in the Global Seismographic Network // *Geophysical Journal International*. — 2019. — Vol. 220, no. 1. — P. 508–521. — DOI: [10.1093/gji/ggz473](https://doi.org/10.1093/gji/ggz473).
- Roult G., Montagner J.-P., Romanowicz B., *et al.* The GEOSCOPE Program: Progress and Challenges during the Past 30 Years // *Seismological Research Letters*. — 2013. — Vol. 84, no. 2. — P. 250–250. — DOI: [10.1785/0220120193](https://doi.org/10.1785/0220120193).
- Shebalin P. N., Narteau C., Baranov S. V. Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. — 2020. — Vol. 222, no. 2. — P. 1264–1269. — DOI: [10.1093/gji/ggaa252](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252).
- 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. — Vol. 239. — P. 48–63. — DOI: [10.1016/j.pepi.2014.06.009](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009).
- Suarez G., Eck T. van, Giardini D., *et al.* The International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN): An Integrated System of Seismological Observatories // *IEEE Systems Journal*. — 2008. — Vol. 2, no. 3. — P. 431–438. — DOI: [10.1109/jsyst.2008.2003294](https://doi.org/10.1109/jsyst.2008.2003294).
- U.S. Geological Survey. Advanced National Seismic System—Current status, development opportunities, and priorities for 2017–2027. — 2017. — 32 p. — DOI: [10.3133/cir1429](https://doi.org/10.3133/cir1429).
- Vallée M., Charléty J., Ferreira A. M. G., *et al.* SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism and source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution: Wave deconvolution and earthquake parameters // *Geophysical Journal International*. — 2010. — Vol. 184, no. 1. — P. 338–358. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04836.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04836.x).
- Vorobieva I., Narteau C., Shebalin P., *et al.* Multiscale Mapping of Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2013. — Vol. 103, no. 4. — P. 2188–2202. — DOI: [10.1785/0120120132](https://doi.org/10.1785/0120120132).
- Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., *et al.* Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14, no. 1. — P. 172. — DOI: [10.3390/app14010172](https://doi.org/10.3390/app14010172).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Dzeboev B. A., *et al.* Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs // *Frontiers in Earth Science*. — 2022. — Vol. 10. — DOI: [10.3389/feart.2022.820277](https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences*. — 2023a. — Vol. 13, no. 12. — P. 7084. — DOI: [10.3390/app13127084](https://doi.org/10.3390/app13127084).
- Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., *et al.* Integrated Earthquake Catalog III: Gakkel Ridge, Knipovich Ridge, and Svalbard Archipelago // *Applied Sciences*. — 2023b. — Vol. 13, no. 22. — P. 12422. — DOI: [10.3390/app132212422](https://doi.org/10.3390/app132212422).
- Wadati K. Shallow and deep earthquakes // *Geophysical Magazine*. — 1928. — Vol. 1. — P. 162–202.
- Wadati K. Shallow and deep earthquakes, 3rd paper // *Geophysical Magazine*. — 1931. — Vol. 4. — P. 231–283.
- Wang Z. Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives // *Pure and Applied Geophysics*. — 2010. — Vol. 168, no. 1/2. — P. 11–25. — DOI: [10.1007/s00024-010-0148-3](https://doi.org/10.1007/s00024-010-0148-3).
- Weston J., Engdahl E. R., Harris J., *et al.* ISC-EHB: reconstruction of a robust earthquake data set // *Geophysical Journal International*. — 2018. — Vol. 214, no. 1. — P. 474–484. — DOI: [10.1093/gji/ggy155](https://doi.org/10.1093/gji/ggy155).

- Wiemer S. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2000. — Vol. 90, no. 4. — P. 859–869. — DOI: [10.1785/0119990114](https://doi.org/10.1785/0119990114).
- Woodhouse J. H., Deuss A. Theory and Observations - Earth's Free Oscillations // *Treatise on Geophysics*. — Elsevier, 2015. — P. 79–115. — DOI: [10.1016/B978-0-444-53802-4.00002-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00002-6).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2013. — Vol. 118, no. 6. — P. 2847–2864. — DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179).
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophysical Journal International*. — 2016. — Vol. 207, no. 1. — P. 608–634. — DOI: [10.1093/gji/ggw300](https://doi.org/10.1093/gji/ggw300).