

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 9 НОЯБРЯ 2002 Г. НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РУССКОЙ ПЛИТЫ (Республика Коми)

Н.Н. Носкова¹, А.Н. Морозов², Н.В. Ваганова³

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, Россия

²ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 249035, Калужская обл., Обнинск, просп. Ленина, 189, Россия

³ФИЦ Комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН,
163000, Архангельск, наб. Северной Двины, 23, Россия

Восточно-Европейская платформа (ВЕП) характеризуется относительно слабой сейсмичностью. Юг Республики Коми является наиболее сейсмически-активной территорией северо-востока ВЕП, здесь произошло одно из сильнейших землетрясений на Европейском Севере в XX в. — 7-балльное Сысольское землетрясение 1939 г. Множеством станций по всему миру 9 ноября 2002 г. было зафиксировано землетрясение в Прилузском районе республики. Однако оно не было тщательно изучено и не рассмотрено ни в одной статье. В данной работе проведен пересчет параметров землетрясения, обоснована его тектоническая природа, построен механизм очага и дана тектоническая позиция. В обработке задействованы 86 сейсмических фаз 58 станций с эпицентрными расстояниями от 5.9 до 57°, азимутальным окружением от 1.5 до 341.7°, максимальная азимутальная брешь — 70°. Получены следующие параметры гипоцентра: $t_0 = 06:47:17.9$ ч:мин:с, 59.93° N, 49.76° E, $R_{minor} = 7.7$ км, $R_{major} = 10.7$ км, $Az_{major} = 20^\circ$, $h = 16$ км, $M_S = 3.4$. Землетрясение является верхнекоровым и приурочено к зоне сочленения восточного склона Сысольского свода с западной прибортовой частью Кировско-Кажимского авлакогена Волго-Уральской антеклизы Русской плиты. Механизм очага определен как сбрососдвиговый, что соответствует новейшему полю напряжений данной территории. Параметры осей (value, azimuth, plunge): $T = 0.707, 90.0, 0$; $N = 0, 0, 39.792$; $P = -0.707, 180.0, 50.208$. Параметры плоскостей (strike, dip, slip): для 1-й плоскости $327, 57^\circ, -140^\circ$; для 2-й плоскости $213, 57^\circ, -40^\circ$. Регистрация сейсмических событий на северо-востоке Русской плиты свидетельствует, что платформенная территория не является сейсмически-пассивной. Проведенные исследования позволяют увязать характер современных сеймотектонических процессов с особенностями строения и состояния земной коры в пределах платформенной литосферы.

Землетрясение, слабая сейсмичность, магнитуда, бюллетень, механизм очага, Восточно-Европейская платформа.

THE 9 NOVEMBER 2002 EARTHQUAKE IN THE NORTHEAST OF THE RUSSIAN PLATE (Komi Republic)

N.N. Noskova, A.N. Morozov, and N.V. Vaganova

The East European Platform (EEP) is characterized by a rather weak seismicity. The south of the Komi Republic is the most seismically active territory in the northeast of the EEP. The 1939 Sysola earthquake (grade 7), one of the strongest earthquakes in the European north of the 20th century, occurred there. Many world's seismic stations recorded an earthquake in the Priluzsky region of the republic on 9 November 2002, but it was not thoroughly studied and is not considered in literature. In this work we recalculate the parameters of the earthquake hypocenter, substantiate its tectonic nature, construct its focal mechanism, and describe its tectonic position. For processing, we used data on 86 seismic phases from 58 stations with epicentral distances from 5.9 to 57°, azimuth angles from 1.5 to 341.7°, and the maximum azimuthal gap of 70°. The following parameters of the hypocenter were obtained: $t_0 = 06$ h 47 min 17.9 s, 59.93° N, 49.76° E, $R_{minor} = 7.7$ km, $R_{major} = 10.7$ km, $Az_{major} = 20^\circ$, $h = 16$ km, and $M_S = 3.4$. The earthquake is localized in the upper crust and is confined to the zone of the junction of the eastern slope of the Sysola arch and the western flank of the Kirov–Kazhim aulacogen of the Volga–Ural anteclise of the Russian Plate. We have established a strike-slip fault focal mechanism of the earthquake, which corresponds to the latest stress field of the region. The estimated axis parameters (value, azimuth, plunge) are as follows: $T = 0.707, 90.0, 0$; $N = 0, 0, 39.792$; and $P = -0.707, 180.0, 50.208$. The plane parameters (strike, dip, slip) are estimated at $327, 57^\circ, -140^\circ$ for the first plane and $213, 57^\circ, -40^\circ$ for the second plane. The recorded seismic events in the northeast of the Russian Plate indicate that the platform area is not seismically passive. The performed research shows that recent seismotectonic processes are related to the structure and state of the Earth's crust within the platform.

Earthquake, weak seismicity, magnitude, bulletin, focal mechanism, East European Platform

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Европейская платформа (ВЕП) характеризуется относительно слабой сейсмичностью и до недавнего времени основными источниками знаний о сейсмичности платформы были письменные свидетельства за исторический период. Однако высокий уровень урбанизации, наличие ответственных и экологически опасных объектов, крупных промышленных центров вызывают необходимость более внимательно отслеживать любые проявления сейсмических процессов на платформенных территориях. Редкие проявления тектонической активности делают каждое зарегистрированное землетрясение уникальным событием и требуют его тщательного изучения.

С развитием сетей инструментальных наблюдений на севере ВЕП при активном содействии Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) у исследователей появилась возможность оценивать проявления современной слабой сейсмичности платформы и использовать эти данные для последующих геолого-тектонических и геодинамических построений [Старовойт, 2005]. Значимость таких построений неоднократно указывал в своих работах д.г.-м.н. Ю.К. Щукин [2001, 2007], отмечая, в частности, что изученность проявлений тектонической активности платформы до сих пор носит фрагментарный характер и не исчерпывает всей совокупности явлений современной геодинамики платформы.

Юг Коми является наиболее сейсмически-активной территорией северо-востока ВЕП, здесь произошло одно из сильнейших землетрясений на Европейском Севере в XX в. 7-балльное Сысольское землетрясение 1939 г. [Никонов, Чепкунас, 2009], а также землетрясения 2008 с $M_L = 3.2$ [Носкова, 2019] и 2011 гг. с $M_L = 2.6$ [Носкова, Михайлова, 2017].

Сейсмическими станциями по всему миру 9 ноября 2002 г. в 06:47 (UTC) было зафиксировано землетрясение на юге Республики Коми с магнитудой M_S , по данным различных сейсмологических центров, от 3.4 до 3.9. Однако несмотря на то, что исследуемое землетрясение зарегистрировано представительной сетью станций, оно не было тщательно изучено и не рассмотрено ни в одной статье. Обычной практикой в сейсмологии являются работы по уточнению параметров очагов ранее зарегистрированных землетрясений, поскольку сведения, полученные в разных сейсмологических центрах и публикуемые в бюллетенях в оперативном режиме, основаны на данных лишь собственных станций и являются предварительными. Как правило, более детальная обработка событий происходит спустя некоторое время, когда появляются возможность привлечения записей сейсмических станций других сетей, уточненные скоростные модели и новые методические подходы.

Целью данной работы является пересчет параметров гипоцентра землетрясения, определение механизма его очага и тектонической позиции. Реализация поставленной цели предусматривала решение следующих задач: сбор волновых форм с записью землетрясения; их обработка с использованием единой скоростной модели, единого методического подхода и всех доступных в настоящее время исходных данных и бюллетеней российских и зарубежных сейсмических станций; сопоставление полученных координат с расчетами других сейсмологических служб.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ

В 2002 г. на территории Республики Коми сейсмические наблюдения станцией «Сыктывкар» (SYK) велись еще аналоговой аппаратурой РС-II с гальванометрической записью на базе короткопериодных сейсмоприемников СКМ-3М на фотобумагу. Работа аналоговой записи была остановлена 14 октября 2002 г., а с 2003 г. геофизическая обсерватория «Сыктывкар» была оснащена цифровой станцией SDAS, разработанной НПП «Геотех+» совместно с ФИЦ ЕГС РАН. Поэтому сейсмограммы ближайшей к эпицентру землетрясения станции «Сыктывкар» отсутствуют.

Нами были получены и проанализированы цифровые записи 22 станций российских и зарубежных сетей (рис. 1). Диапазон эпицентральных расстояний составил от 5.9 до 21.2°, азимутальный охват от 22 до 341°. Доступ к исходным цифровым данным зарубежных сетей осуществлялся через электронные ресурсы GEOFON [GEOFON..., 1993], IRIS [Incorporated...], NORSAR [Norwegian...].

Привлекался бюллетень землетрясения 9 ноября 2002 г. Международного сейсмологического центра ISC (Великобритания) [International...], из которого взяты вступления 37 станций. К ним добавлены фазы *P*- и *S*-волн сейсмических станций «Амдерма» Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН, «FINESS Array Site C1», «Moravsky Beroun», *S*-волна по станции «Арти», «Архангельск», «Пулково», «Сторожевое», «Кисловодск», «Курчатов», «Spitsbergen Array». На рисунке 2 показано расположение всех станций, участвующих в уточнении параметров гипоцентров. В таблице 1 представлен сейсмический бюллетень землетрясения 9 ноября. Всего задействовано 86 сейсмических фаз 58 станций с эпицентрными расстояниями от 5.9 (D_{\min}) до 57° (D_{\max}), азимутальным окружением от 1.5 до 341.7°, максимальная азимутальная брешь (Gap) — 70°. Следует отметить, что использование в обработке записей станции «Амдерма» КоФ ФИЦ ЕГС РАН позволило сократить азимутальную брешь на 13° по сравнению с бюллетенем ISC.

Предварительное определение параметров гипоцентра на основе исходных цифровых данных производилось в программном комплексе WSG [Красилов и др., 2006] методом минимизации невязок. Итоговое определение параметров гипоцентра производилось методом Generalized beamforming [Ringdal, Kvaerna, 1989] в усовершенствованном виде, реализованном в программе NAS (New Association System) [Фёдоров и др., 2018], которая производит ассоциацию и уточнение координат и времени в окрестности предварительно вычисленного гипоцентра. Программа выбирает круг большого радиуса (в данной работе используется радиус 250 км) вокруг исходной точки. В этом круге ищется более точная локация, покрывается перекрывающимися кругами меньших радиусов, формирующими сетку. Для каждого такого меньшего круга вычисляется рейтинговая функция $R(c, t)$, оценивающая гипотезу о том, что событие произошло в ячейке c в момент времени t . Сетка уменьшается несколько раз. Каждый раз из сетки исключается $\frac{3}{4}$ ячеек с наименьшими рейтингами, а каждая оставшаяся ячейка делится на 4 меньших. Рейтинги пересчитываются для этих уменьшенных ячеек.

Такой поиск выполняется для набора фиксированных глубин (в этой работе от 0 до 100 км с шагом 5 км). Окончательно за предварительную локацию события выбирается ячейка с максимальным рейтингом. Время t_0 , на котором рейтинговая функция достигла максимума, считается оценкой времени в очаге. Только те фазы, которые внесли ненулевые вклады в этот максимальный рейтинг, считаются

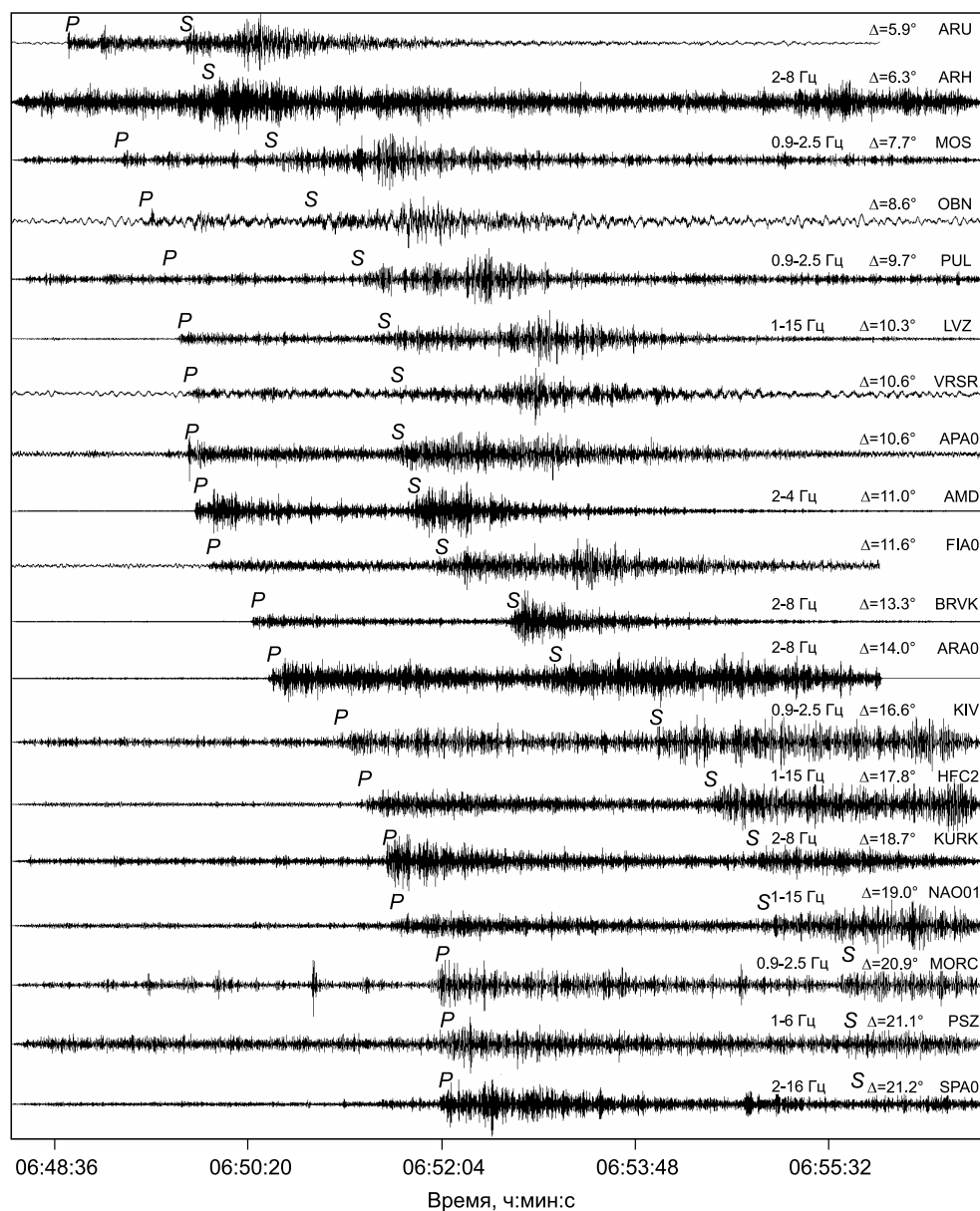


Рис. 1. Фрагменты записей вертикальной компоненты землетрясения 9 ноября 2002 г., расположенные по времени прихода первой фазы.

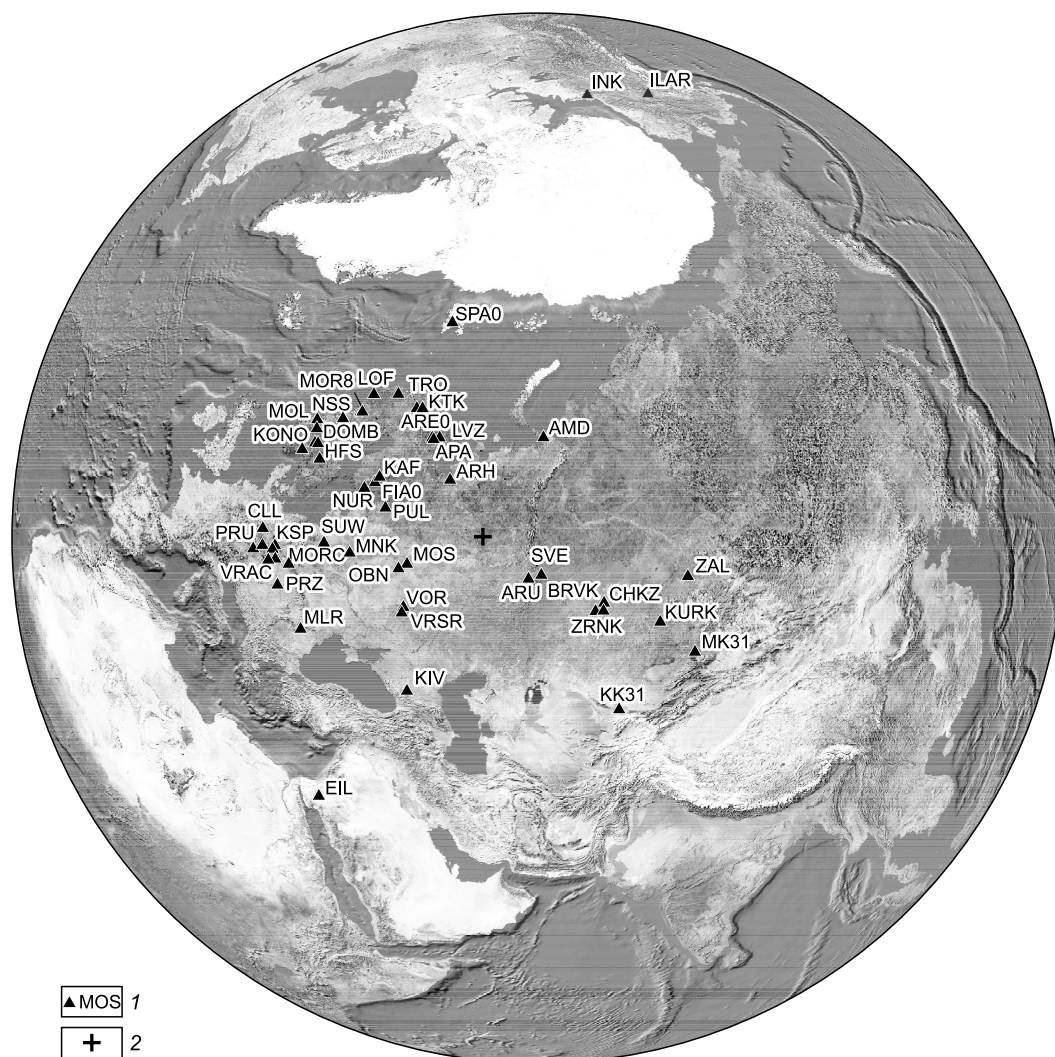


Рис. 2. Расположение сейсмостанций, участвующих в уточнении локации землетрясения 9 ноября 2002 г.

1 — сейсмическая станция, код; 2 — положение эпицентра, полученного в программе NAS.

ассоциированными с лоцируемым событием. Такой подход позволяет автоматически игнорировать фазы с реалистичными (ошибочными) временами вступления. Это очень важно при использовании времен вступлений сейсмических фаз, измеренных на «шумных» станциях и на станциях, удаленных на значительное расстояние от эпицентра, когда велика вероятность ошибочного определения времен вступлений.

На втором этапе локация уточняется с помощью минимизации невязки оценки времени в очаге по найденным таким образом временам и их весам, и строятся локация доверительной области (эллипс ошибок). Доверительная область вместо точки истинной локации возникает из-за того, что важные для локации величины известны неточно. Во-первых, времена приходов волн на станции измеряются с ошибками, интервал которых обозначим $(-\Delta t_{\text{прихода}}, +\Delta t_{\text{прихода}})$. Другими словами, будем считать, что ошибки измерения времен прихода с большой вероятностью (скажем 95 %) лежат в этом интервале. Во-вторых, скоростная модель, которой мы пользуемся для расчета времен пробега, также неточна. Предположим, что если кажущаяся скорость в некотором случае, согласно модели, равна v , то с той же большой вероятностью (95 %) истинная кажущаяся скорость лежит в интервале $[v - \Delta v, v + \Delta v]$.

Таким образом, для расчета доверительной области, помимо знания известных фаз и координат датчиков, необходимы оценки погрешностей скоростной модели Δv и измерения вступлений Δt для разных типов волн. В данном исследовании значения погрешностей скоростной модели были приняты равными 0.15 км/с, а значения погрешностей измерения вступлений — 0.3 с.

Таблица 1.

Бюллетень землетрясения 9 ноября 2002 г.

| Код | Международное название станции, страна | Широта | Долгота | Расстояние | Азимут | Время прихода | | Международный сейсмологический центр (ISC) | Данная работа |
|-------|---|---------|-----------|------------|--------|---------------|-------------|--|---------------|
| | | | | | | P-волна | S-волна | | |
| | | | | | | ч:м:с | | | |
| град. | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| AMD | Amderma, Russia | 69.7607 | 61.6782 | 11.0 | 22.1 | 06:49:51.30 | 06:51:49.71 | — | + |
| APA | Apatity, Russia | 67.5690 | 33.4050 | 10.4 | 323.3 | 06:49:44.70 | 06:51:37.50 | + | + |
| APA0 | Apatity Array Site A0, Russia | 67.6061 | 32.9923 | 10.6 | 323.3 | 06:49:46.55 | 06:51:39.87 | + | + |
| ARA0 | ARCESS Array Site A0, NORSAR, Norway | 69.5349 | 25.5059 | 13.9 | 323.4 | 06:50:30.47 | 06:52:57.69 | + | + |
| ARC2 | ARCESS Array Site C2, NORSAR, Norway | 69.5383 | 25.5228 | 13.9 | 323.4 | 06:50:30.93 | 06:52:58.40 | — | + |
| ARE0 | ARCESS Array Site E0, NORSAR, Norway | 69.5348 | 25.5056 | 13.9 | 323.4 | 06:50:30.90 | — | + | + |
| ARHR | Arkhangelsk, Russia | 64.5505 | 40.5148 | 6.3 | 321.0 | — | 06:49:58.02 | — | + |
| ARU | Arti, Russia | 56.4293 | 58.5615 | 5.8 | 123.2 | 06:48:43.10 | 06:49:45.84 | + | + |
| BGCA | Bogoin, Central African Republic | 5.1761 | 18.4242 | 57.1 | 216.7 | 06:57:19.10 | — | + | + |
| BRVK | Borovoye, Kazakhstan | 53.0581 | 70.2828 | 13.2 | 112.3 | 06:50:21.17 | 06:52:39.71 | + | + |
| CLL | Collm, Sachsen, Germany | 51.3076 | 13.0026 | 22.0 | 263.0 | 06:52:14.00 | 06:56:06.00 | + | + |
| DOMB | Dombas, Norway | 62.0423 | 9.0641 | 19.4 | 293.3 | 06:51:42.11 | — | + | + |
| DPC | Dobruska-Polom, Czech Republic | 50.3501 | 16.3221 | 20.9 | 257.4 | 06:52:04.10 | — | + | + |
| EIL | Elat, Israel | 29.6698 | 34.9511 | 31.5 | 204.5 | 06:53:41.05 | — | + | + |
| FIA0 | FINESS Array Site A0, Finland | 61.4436 | 26.0771 | 11.6 | 287.5 | 06:49:58.47 | 06:52:02.69 | + | + |
| FIC1 | FINESS Array Site C1, Finland | 61.4384 | 26.0596 | 11.6 | 287.5 | 06:49:58.59 | 06:52:03.36 | — | + |
| HFC2 | Hagfors New Array Site C2, Sweden | 60.1334 | 13.6945 | 17.7 | 286.3 | 06:51:20.20 | 06:54:28.47 | — | + |
| HFS | Hagfors, Sweden | 60.1334 | 13.6945 | 17.7 | 285.8 | 06:51:18.55 | 06:54:26.68 | + | + |
| ILAR | Eielson Array, Alaska, U.S.A. | 64.7713 | -146.8866 | 52.7 | 8.6 | 06:56:48.11 | — | + | + |
| INK | Inuvik, Canada | 68.3065 | -133.5254 | 50.0 | 1.5 | 06:56:25.92 | — | + | + |
| KAF | Kangasniemi, Finland | 62.1128 | 26.3061 | 11.5 | 290.2 | 06:49:57.30 | — | + | + |
| KEV | Kevo, Finland | 69.7553 | 27.0067 | 13.6 | 325.1 | 06:50:26.80 | — | + | + |
| KHC | Kasperske Hory, Czech Republic | 49.1309 | 13.5782 | 23.1 | 258.0 | 06:52:21.20 | — | + | + |
| KIV | Kislovodsk, Russia | 43.9553 | 42.6863 | 16.5 | 198.0 | 06:51:05.23 | 06:53:58.86 | + | + |
| KK31 | Karatay Array, Kazakhstan | 43.1034 | 70.5115 | 20.9 | 133.8 | 06:52:02.23 | — | + | + |
| KONO | Kongsberg, Norway | 59.6491 | 9.5982 | 19.8 | 286.2 | 06:51:41.21 | 06:55:32.76 | + | + |
| KSP | Ksiaz, Poland | 50.8428 | 16.2931 | 20.7 | 258.4 | 06:52:02.00 | — | + | + |
| KTK1 | Kautokeino, Norway | 69.0117 | 23.2371 | 14.4 | 319.6 | 06:50:35.18 | 06:53:11.91 | + | + |
| KURK | Kurchatov, Kazakhstan | 50.7154 | 78.6202 | 18.6 | 106.7 | 06:51:32.98 | 06:54:49.03 | + | + |
| LOF | Lofoten, Norway | 68.1310 | 13.5420 | 17.4 | 312.5 | 06:51:22.43 | — | + | + |
| LVZ | Lovozero, Russia | 67.8979 | 34.6514 | 10.3 | 326.8 | 06:49:43.03 | 06:51:33.51 | + | + |
| MK31 | Makanchi Array, Kazakhstan | 46.7937 | 82.2904 | 23.0 | 110.2 | 06:52:22.99 | — | + | + |
| MKAR | Makanchi Array Beam Reference Point, Kazakhstan | 46.7936 | 82.2903 | 23.0 | 110.2 | 06:52:21.57 | — | + | + |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|---|---------|---------|------|-------|-------------|-------------|---|----|
| MLR | Muntele Rosu, Romania | 45.4908 | 25.9450 | 20.1 | 234.5 | 06:51:51.08 | — | + | + |
| MNK | Minsk, Belarus | 54.5021 | 27.8833 | 12.9 | 254.0 | 06:50:19.00 | — | + | + |
| MOL | Molde, Norway | 62.5700 | 7.54800 | 20.0 | 295.3 | 06:51:49.95 | — | + | + |
| MOR8 | Moi Rana, Norway | 66.1713 | 14.4411 | 16.8 | 306.1 | 06:51:09.56 | — | + | + |
| MORC | Moravsky Beroun, Czech Republic | 49.7768 | 17.5425 | 20.7 | 255.2 | 06:52:01.22 | 06:55:41.37 | — | + |
| MOS | Moscow, Russia | 55.7383 | 37.6250 | 7.7 | 241.8 | 06:49:07.49 | 06:50:31.64 | + | + |
| NAO01 | NORSAR Array Site 01A01, Norway | 60.8442 | 10.8865 | 18.9 | 289.6 | 06:51:35.94 | 06:54:54.90 | + | + |
| NOA | NORSAR Array, Norway | 61.0397 | 11.2147 | 18.9 | 289.6 | 06:51:30.14 | 06:54:50.50 | + | + |
| NSS | Namsos, Norway | 64.5300 | 11.9670 | 17.8 | 300.5 | 06:51:21.94 | — | + | + |
| NUR | Nurmijarvi, Finland | 60.5090 | 24.6490 | 12.4 | 282.7 | 06:50:09.30 | — | + | + |
| OBN | Obninsk, Russia | 55.1138 | 36.5687 | 8.5 | 241.2 | 06:49:22.10 | 06:50:52.75 | + | + |
| OJC | Ojcow, Poland | 50.2195 | 19.7984 | 19.4 | 252.9 | 06:51:43.70 | 06:55:08.80 | + | + |
| PRU | Pruhonic, Czech Republic | 49.9883 | 14.5417 | 22.0 | 258.6 | 06:52:17.40 | — | + | + |
| PSZ | Piszkesteto, Hungary | 47.9184 | 19.8944 | 20.9 | 248.4 | 06:52:02.84 | 06:55:42.31 | + | + |
| PUL | Pulkovo, Russia | 59.7728 | 30.3222 | 9.7 | 277.3 | 06:49:32.49 | 06:51:17.84 | + | + |
| SPA0 | Spitsbergen Array Site A0, NORSAR, Norway | 78.1777 | 16.3700 | 21.0 | 341.7 | 06:52:02.86 | 06:55:46.21 | + | + |
| SUW | Suwalki, Poland | 54.0125 | 23.1808 | 15.5 | 258.6 | 06:50:53.03 | — | + | + |
| SVE | Sverdlovsk, Russia | 56.8271 | 60.6319 | 6.5 | 114.7 | 06:48:52.70 | — | + | + |
| TRO | Tromso, Norway | 69.6325 | 18.9281 | 16.0 | 319.4 | 06:50:59.08 | — | + | + |
| VOR | Voronezh, Russia | 51.7311 | 39.2000 | 10.1 | 219.3 | 06:49:42.00 | — | + | + |
| VRAC | Vranov, Czech Republic | 49.3082 | 16.5935 | 21.5 | 254.9 | 06:52:08.34 | — | + | + |
| VRSR | Storozhevoye, Russia | 51.2150 | 39.1900 | 10.5 | 218.7 | 06:49:45.18 | 06:51:39.01 | + | + |
| ZAL | Zalesovo, Russia | 53.9366 | 84.7981 | 19.7 | 92.4 | 06:51:46.17 | — | + | + |
| ZRNK | Zerenda, Kazakhstan | 52.9508 | 69.0041 | 12.7 | 115.3 | 06:50:14.28 | 06:52:27.52 | + | + |
| CHKZ | Chkalovo, Kazakhstan | 53.6761 | 70.6152 | 12.9 | 110.1 | 06:50:17.77 | 06:52:32.45 | + | + |

Программа NAS является частью системы NSDL (New System for Detection and Location), предназначенной для организации автоматического мониторинга сейсмической активности какого-либо региона с помощью произвольной сети сейсмостанций или отдельных сейсмостанций. Система успешно прошла апробацию в некоторых зарубежных и отечественных профильных научно-исследовательских организациях, в том числе в филиалах ФИЦ ЕГС РАН [Асминг и др., 2017, 2018]. Эффективность алгоритма расчета параметров гипоцентра в программе NAS была показана на примере локации двух ядерных взрывов 18.07.1985 г. и 06.09.1988 г., произведенных на севере европейской части России, и двух ядерных взрывов 02.11.1974 г. и 24.10.1990 г., произведенных на архипелаге Новая Земля [Morozov et al., 2018]. В задачах уточнения параметров очага описанный выше подобный подход применялся для землетрясений на севере Русской плиты ВЕП [Морозов и др., 2018], в Баренцево-Карском регионе [Morozov et al., 2018] и техногенных событий Печорского угольного бассейна [Носкова, Асминг, 2018].

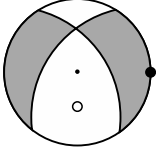
При вычислении параметров гипоцентров применялась скоростная модель для Восточно-Европейской платформы [Schueller et al., 1997], дополненный глубокими слоями модели АК-135 [Kennett et al., 1995]. Для определения значений локальной магнитуды M_L (MWA) использовался реализованный в программе WSG способ расчета, основанный на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции [Габсатарова, 2006]. Механизм очага для землетрясения 9 ноября 2002 г. определялся по знакам первых вступлений P -волн с помощью программы «FA2011», разработанной А.В. Ландером [Иванова и др., 2011].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки данных станций в программе WSG определены следующие предварительные параметры: $t_0 = 06:47:17$ ч:мин:с, 59.954 N, 49.698 E, глубина $h = 16$ км, $M_S = 3.4$. В NAS проведено итоговое уточнение при глубине 16 км и получено решение: $t_0 = 06:47:17.9$ ч:мин:с, 59.931° N, 49.762° E, параметры эллипса ошибок: $R_{minor} = 7.66$ км, $R_{major} = 10.74$ км, $Az_{major} = 20^\circ$.

Таблица 2.

Параметры механизма очага землетрясения 9 ноября 2002 г.

| t_0 , ч:мин:с | Оси главных напряжений | | | | | | Нодальные плоскости | | | | | | Диаграмма (Double Couple) |
|--------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|----|------|--------|----|------|---|
| | T | | N | | P | | NP_1 | | | NP_2 | | | |
| | PL | AZM | PL | AZM | PL | AZM | STK | DP | SLIP | STK | DP | SLIP | |
| 06:47:17 | 0 | 90 | 40 | 0 | 50 | 180 | 327 | 57 | -140 | 213 | 57 | -40 |  |

Примечание. T, N, P — оси напряжений: растяжения, промежуточного, сжатия соответственно; PL — угол погружения осей напряжений относительно горизонта, град.; AZM — азимут осей напряжений, град.; NP_1, NP_2 — нодальные плоскости; STK — азимут простирания нодальной плоскости, град.; DP — угол падения нодальной плоскости, град.; SLIP — угол скольжения нодальной плоскости, град.

В программе «FA2011» рассчитан механизм очага землетрясения по знакам первых вступлений продольных волн, которые определены по сейсмограммам 10 станций, из них на семи зарегистрированы волны разрежения (APA0, AMD, PR1R, PR2R, FIA0, FIC1, ARC2), на трех — волны сжатия (ARU, BRVK, VRSR). Записи станций «Романово» (PR1R) и «Добрянка» (PR2R) Горного института УрО РАН сохранились лишь в виде текстовых файлов (мкм/с), поэтому в расчете координат участия не принимали, но по ним было возможно взять направления первого движения. Получено вероятное решение механизма очага со сбрососдвиговым типом движения по обеим плоскостям (табл. 2). Параметры осей (value, azimuth, plunge) следующие: $T = 0.707, 90, 0$; $N = 0, 0, 40$; $P = -0.707, 180.0, 50$. Параметры плоскостей (strike, dip, slip): для 1-й плоскости 327, 57, -140°; для 2-й плоскости 213, 57, -40°.

По нашим расчетам землетрясение произошло в 190 км от г. Сыктывкар, в Прилузском районе Республики Коми, в 29 км южнее устья р. Седка правого притока р. Луза. В близлежащих населенных пунктах землетрясение ощущалось в виде несильных колебаний. Данный район не является горно-добывающим, здесь отсутствуют действующие промышленные карьеры. За весь период инструментальных наблюдений сейсмических событий техногенной природы на юге республики зафиксировано не было. К тому же механизм очага определен как сбрососдвиговый. Следовательно, можно сделать вывод, что событие является тектоническим.

Сведения о параметрах очага землетрясения 9 ноября, рассчитанных на основе данных с разным количеством сейсмических станций, имеются в 10 российских и зарубежных сейсмологических центрах (табл. 3). В ходе нашего исследования были рассчитаны параметры очага землетрясения на основе всех доступных в настоящее время исходных данных и бюллетеней российских и зарубежных сейсмических станций, а также с использованием единой скоростной модели и единого методического подхода. Всего было задействовано 86 времен первых вступлений сейсмических P - и S -волн, по данным 58 сейсмических станций с эпицентрными расстояниями от 5.9 до 57° и азимутальным окружением от 1.5 до 341.7°. Используемый алгоритм программы NAS исключает возможность применения в расчете параметров «ошибочных» времен вступлений. Таким образом, были созданы все условия для расчета параметров очага с наибольшей достоверностью. Подтверждение этому можно увидеть в распределении эпицентров по данным разных сейсмологических центров (рис. 3). В частности, в Службе срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН [Служба...] параметры были рассчитаны по пяти станциям и рас-

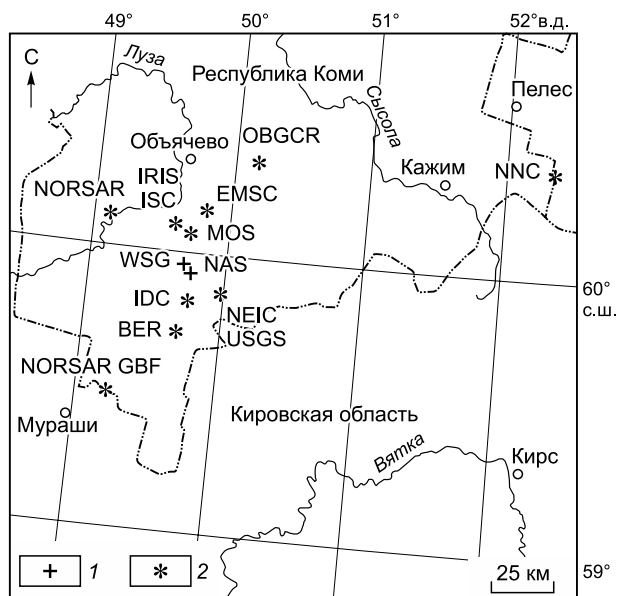


Рис. 3. Положение эпицентра землетрясения 9 ноября 2002 г. по данным разных сейсмологических центров:

1, 2 — инструментальный эпицентр из настоящей статьи и других сейсмологических служб соответственно.

Таблица 3.

**Основные параметры землетрясения 9 ноября 2002 г. в 06 ч 47 мин
по данным различных сейсмологических центров и служб**

| Агентство | t_0 ч : мин : с | Гипоцентр | | | Эллипс ошибок | | Магнитуда |
|---|----------------------|-----------|---------|----------|---------------|-------------|---------------|
| | | N, град | E, град | h , км | S_{major} | S_{minor} | |
| Настоящая статья | 06:47:17.9 | 59.93 | 49.76 | 16 | 10.7 | 7.7 | $M_S = 3.4/5$ |
| ЕГС РАН, Обнинск (OBGSR) http://www.ceme.gsras.ru/ | 06:47:15.3 | 60.35 | 50.17 | 40 | — | — | $m_b = 3.6/3$ |
| IRIS http://ds.iris.edu/ | 06:47:13 | 60.10 | 49.60 | 23.3 | — | — | $m_b = 4.1$ |
| EMSC http://www.webdc.eu | 06:47:12 | 60.16 | 49.82 | 2 | — | — | $m_b = 4.1$ |
| USGS http://www.webdc.eu | 06:47:13 | 59.87 | 49.98 | 10 | — | — | $m_b = 4.1$ |
| BER http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:12.8 | 59.72 | 49.69 | 16 | 0.4 | 0.2 | — |
| NEIC http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:13.9 | 59.87 | 49.97 | 10f* | 12.3 | 6.9 | $m_b = 4.1$ |
| MOS http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:14.1 | 60.07 | 49.72 | 33 | 11.7 | 8.6 | $m_b = 4.1$ |
| IDC http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:14.6 | 59.83 | 49.75 | 0f* | 20.5 | 14.4 | $m_b = 3.8$ |
| NNC http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:25.8 | 60.38 | 52.36 | — | 88.4 | 12.4 | — |
| ISC http://www.isc.ac.uk/ | 06:47:13.7 | 60.10 | 49.60 | 23 | 7.4 | 5.1 | $m_b = 3.8$ |
| NORSAR (reviewed regional bulletin November 2002) http://www.norsardata.no | 06:47:20.5 | 60.12 | 49.11 | 7 | 0.4 | 0.2 | 3.97/4 |
| NORSAR (GBF Bulletins – 2002) http://www.norsardata.no | 06:47:12 | 59.48 | 49.24 | — | — | — | 3.97/4 |

*f — фиксированная глубина.

хождение с эпицентром, вычисленном в NAS составляет 52 км. В ISC [International...] параметры эпицентра были рассчитаны с использованием чуть меньшего количества станций (56 станций вместо 58) и расхождение с эпицентром уже составило 20 км. Однако в отличие от параметров в ISC, параметры очага в нашей работе вычислены с помощью региональной скоростной модели и с большим азимутальным охватом и количеством времен вступлений сейсмических фаз.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ОЧАГА

Историческая и инструментальная сейсмичность вблизи эпицентральной зоны землетрясения 9 ноября иллюстрируется рис. 4. Сейсмические события северо-востока Русской плиты в тектоническом плане приурочены в основном к Кировско-Кажимскому авлакогену и прилегающим к нему сводам Волго-Уральской антеклизы Русской плиты. Землетрясение 9 ноября произошло в пределах Сысольского свода, который представляет собой крупное погребенное поднятие фундамента протяженностью с юга на север более 200 км, с запада на восток 125—150 км. Поверхность свода наклонена к западу от 1600 м (скв. Сысола-1 –1616 м) в восточной части, увеличиваясь до 2000 м к западу и юго-западу [Государственная..., 2016]. Отметки фундамента в эпицентральной области –1900 м соответствуют Прилузскому поднятию или Летниковскому выступу.

Восточный склон Сысольского свода ступенчато сочленяется с западной прибортовой частью Кировско-Кажимского авлакогена. С юга через Великорецкую седловину граничит с Котельничским сводом и образует с ним Котельничско-Сысольскую систему сводовых поднятий, которая разбита системой разрывных нарушений. С запада Сысольский свод глубинным разломом отделен от Котласского грабена входящего в состав Среднерусского авлакогена, маркирующего коллизионную шовную зону между Фенноскандией и Волго-Уралией [Bogdanova et al., 1996]. На северо-востоке склон свода круто погружается в область Вычегодского прогиба, граница с которым трассируется вдоль крупных разло-

ВЫВОДЫ

Авторами статьи для проведения пересчета основных параметров сейсмического события 9 ноября 2002 г. использовалась представительная выборка из 58 станций с эпицентрными расстояниями от 5.9 до 57°. Для 22 станций были собраны волновые формы с записью землетрясения. Полученное решение определено с большой достоверностью и согласуется с данными других сейсмологических служб. Существенно уточнена глубина гипоцентра, согласно которой событие является верхнекоровым. Обоснована тектоническая природа события. Механизм очага землетрясения вычислен нами как сбрососдвиговой, что соответствует новейшему полю напряжений данной территории. Проведенные исследования позволяют увязать характер современных сеймотектонических процессов с особенностями строения и состояния земной коры в пределах платформенной литосферы.

Авторы глубоко признательны коллегам из ФИЦ ЕГС РАН (города Обнинск, Апатиты, Воронеж и Пермь) за предоставленные записи сейсмических событий.

Работа выполнена в рамках госзаданий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № АААА-А17-117121270035-0, ФИЦ КИА УрО РАН АААА-А18-118012490072-7 и частично в рамках проекта РФФИ (19-05-00481).

ЛИТЕРАТУРА

Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В., Евтюгина З.А. Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Материалы XII Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» / Ред. А.А. Маловичко. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2017, с. 33—36.

Асминг В.Э., Гилёва Н.А., Карпинский В.В. Опыт внедрения системы NSDL в ФИЦ ЕГС РАН // Материалы XIII Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» / Ред. А.А. Маловичко. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2018, с. 30—34.

Габсатарова И.П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск, ГС РАН, 2006, с. 49—53.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Мезенская серия. Лист Р-39 (Сыктывкар). Объяснительная записка. СПб., Изд-во СПб. картфабрики ВСЕГЕИ, 2016, 478 с.

Жарков А.М. Строение и перспективы нефтегазоносности Мезенской синеклизы // Геология нефти и газа, 2005, № 1, с. 20—28.

Иванова Е.И., Ландер А.В., Токарев А.В., Чеброва А.Ю., Шевченко С.А. Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за период 1980–2007 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский. Обнинск, ГС РАН, 2011, с. 74—79.

Копп М.Л. Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника, 2012, № 6, с. 55—77.

Копп М.Л., Вержицкий В.Е., Колесниченко А.А., Тверитинова Т.Ю., Васильев Н.Ю., Корчагин В.А., Мострюков А.О., Иоффе А.И. Новейшее поле напряжений востока Русской плиты и Урала по макро- и мезоструктурным данным // Геотектоника, 2014, № 4, с. 23—43.

Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Обнинск, ГС РАН, 2006, с. 77—83.

Мальшев Н.А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов Европейского Севера России. Екатеринбург, УрО РАН, 2002, 270 с.

Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Михайлова Я.А. Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений // Физика Земли, № 2, 2018, с. 104–123, DOI: 10.1134/S1069351318020143.

Никонов А.А., Чепкунас Л.С. Сысольское землетрясение 13 января 1939 г. на Русской плите — уточнение параметров // Вопросы инженерной сейсмологии, 2009, т. 36, № 4, с. 25—41.

Носкова Н.Н. Землетрясения 22.09.2008 г. и 20.10.2009 г. на северо-востоке Русской плиты // Вест. ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019, №1 (289), с. 20—28. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-01-20-28.

Носкова Н.Н., Михайлова Р.С. Республика Коми и Кировская область // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2017, с. 229—238.

Носкова Н.Н., Асминг В.Э. Уточнение параметров ряда сейсмических событий, произошедших в Воркутинском районе Республики Коми в 1971—2016 гг. // Геофизический журнал, 2018, т. 19, № 4, с. 46—63, DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-4>.

Овчаренко А.В., Баландин Д.В. Оценка скоростей горизонтальных движений геодинамического полигона Кировской области. Екатеринбург, ИГФ УрО РАН, 2009, 22 с.

Оловянишников В.Г. Верхний докембрий Тимана и полуострова Канин. Екатеринбург, УрО РАН, 1998, 163 с.

Служба срочных донесений. URL: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/quake_stat.pl?sta=20021426&l=0 (дата обращения 04.05.2018).

Старовойт О.Е. Сейсмические наблюдения в России // Земля и Вселенная, 2005, № 2, с. 82—89.

Фёдоров А.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Прокудина А.В. Система автоматического мониторинга сейсмичности Европейской Арктики // Сейсмические приборы, 2018, т. 54, № 1, с. 29—39, DOI: [10.21455/si2018.1-3](https://doi.org/10.21455/si2018.1-3).

Щукин Ю.К. Глубинное строение и динамика земной коры Восточно-Европейской платформы в связи с проблемой ее сейсмичности // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году / Ред. О.Е. Старовойт. М., ГС РАН, 2001, с. 143—150.

Щукин Ю.К. Динамическая геология — основа системы наблюдений за природными процессами // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн.1. Землетрясения. Петрозаводск, Карельский НЦ РАН, 2007, с. 117—172.

Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbatshev R., Orlyuk M.I. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // Tectonophysics, 1996, v. 268, p. 1—21.

GEOFON Data Centre: GEOFON Seismic Network. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. Other/Seismic Network, 1993, <https://doi.org/10.14470/TR560404> Cited May 4, 2018.

Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS/IDA Seismic Network II. URL:<http://dx.doi.org/doi:10.7914/SN/II> Cited May 4, 2018.

International Seismological Centre. On-line Bulletin, 2020, <https://doi.org/10.31905/D808B830>. Cited May 4, 2018.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times // Geophys. J. Int., 1995, v. 122, № 1, p. 108—124, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>

Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Konechnaya Y.V., Evtyugina Z.A. The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // J. Seismol., 2018, v. 22, № 5, p. 1171—1209. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>.

Norwegian Seismic Array Network. <https://www.jordskjelv.no/> Cited May 4, 2018.

Ringdal F., Kvaerna T. A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring // Bull. Seismol. Soc. Am., 1989, v. 79, № 6, p. 1927—1940.

Schueller W., Morozov I.B., Smithson S.B. Crustal and uppermost mantle velocity structure of northern Eurasia along the profile Quartz // Bull. Seismol. Soc. Am., 1997, № 87, p. 414—426.

*Рекомендована к печати 10 октября 2019 г.
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию 18 мая 2018 г.,
после доработки — 29 декабря 2018 г.*