

**КАЛИНИНГРАДСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 21 сентября 2004 года с $M_w=4.6$
и 4.8, $I_0=6$ и 6–7 (запад России)**

И.П. Габсатарова, Л.С. Чепкунас, Е.А. Бабкова, Л.С. Малянова, М.И. Рыжикова

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, luba@gsras.ru

Уникальные землетрясения произошли на Восточно-Европейской платформе, на северо-западе России, в Калининградской области, на Самбийском п-ве, в районе с высоким уровнем урбанизации. Сильнейшее из них, зарегистрированное 21 сентября 2004 г. в 13^h32^m, имело магнитуду по максимальной оценке $M_w=4.8$ [1]. Ему предшествовал толчок в 11^h05^m с магнитудой $M_w=4.6$. Третий инструментально зарегистрированный толчок в 13^h36^m – наиболее слабый, с $MS\sim 3$ [2].

Территория Калининградской области считалась сейсмически безопасной, т.к., согласно карте общего сейсмического районирования ОСР-97 (А–С) [3], она относилась к пятибалльной зоне интенсивности сотрясений.

К моменту написания настоящей статьи в различных изданиях опубликован обширный ряд научных отечественных и зарубежных работ [4–33] с анализом информации, касающейся этих землетрясений. Часть работ свидетельствует о том, что до сих пор дискутируются вопросы о положении очагов землетрясений, полученных как по инструментальным, так и по макросейсмическим данным, и причины их расхождения. Во всяком случае об этом говорится в последних работах [21, 32, 34]. Поэтому, поставив целью представительно отразить инструментальные и макросейсмические данные о Калининградских землетрясениях по литературным источникам в формате ежегодника «Землетрясения Северной Евразии», ниже приведем дополнительные данные по инструментальной оценке параметров очагов.

Землетрясения 21 сентября в 11^h05^m и в 13^h32^m были зарегистрированы многими зарубежными станциями не только на Европейском континенте, но и в Северной Америке, и даже в Австралии (рис. 1 а–в) [2]. Слабое землетрясение в 13^h36^m зарегистрировано станциями лишь на региональных расстояниях ($\Delta < 2000$ км). Записи его хорошо видны на рис. 1 б: первые вступления Р-волн только на расстояниях до 500 км, а группа поверхностных волн – вплоть до $\Delta = 17^\circ$.

К моменту возникновения Калининградских землетрясений сейсмическая сеть ГС РАН на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) насчитывала семнадцать станций. Практически все они были цифровыми и только две («Печеры» и «Свердловск») – аналоговыми. В центре платформы работали станции «Москва», «Обнинск», «Печеры»; на северо-западе и севере – «Апатиты», «Ловозеро», «Пулково», «Архангельск», «Климовское», «Пермогорье», «Тамица»; в районе Воронежского кристаллического массива – «Воронеж», «Дивногорье», «Новохоперск», «Сторожевое»; на Урале – «Арты», «Свердловск», «Соликамск» (табл. 1).

Таблица 1. Сейсмические станции ГС РАН (в хронологии их открытия), действовавшие на территории ВЕП в 2004 г.

| № | Станция | | Год открытия | Координаты | | | Принадлежность | Тип АЦП и сейсмометра |
|---|------------------------------|-----|--------------------|--------------------|--------------------|----------|---|-----------------------|
| | Название | Код | | φ°, N | λ°, E | $h_y, м$ | | |
| 1 | Пулково | PUL | 09.12.1906 1998 | 59.773 | 30.324 | 65 | ГС РАН GEOPHON, Потсдам, Германия | Quanterra + STS-2 |
| 2 | Свердловск (Екатеринбург) | SVE | 21.10.1906 2005 | 56.827 | 60.637 | 275 | ГС РАН | SDAS + CM3-OC |
| 3 | Москва | MOS | 19.04.1936 2002 | 55.74 | 37.63 | 124 | ГС РАН | SDAS + СКД |

| № | Станция | | Год открытия | Координаты | | | Принадлежность | Тип АЦП и сейсмометра |
|----|--------------|------|--------------|--------------------|--------------------|----------|----------------------|-------------------------|
| | Название | Код | | φ°, N | λ°, E | $h_y, м$ | | |
| 4 | Апатиты | APA | 01.07.1956 | 67.569 | 33.405 | 182 | КФ ГС РАН | Guralp + RD-3 |
| | Апатиты ARAY | APA0 | 01.10.1992 | | | | | |
| 5 | Обнинск | | 11.01.1964 | 55.114 | 36.569 | 130 | ГС РАН | IRIS + STS-1 |
| | | | 1988 | | | | | |
| 6 | Арты | ARU | 1976 | 56.42 | 58.57 | 250 | ГС РАН | IRIS + STS-1 |
| | | | 1988 | | | | | |
| 7 | Ловозеро | LVZ | 02.12.1992 | 67.898 | 34.651 | 630 | ГС РАН | IRIS + STS-1 |
| 8 | Печеры | PEC | 20.07.1992 | 56.32 | 44.08 | 99 | ГС РАН | СКМ-3, СКД (аналоговая) |
| 9 | Воронеж | VOR | 1996 | 51.731 | 39.200 | 161 | ГС РАН, ВГУ | СМ-3 (аналоговая) |
| 10 | Дивногорье | VRD | 20.02.1998 | 50.966 | 39.293 | 94 | ГС РАН, ВГУ | SDAS + СМ3-КВ |
| 11 | Сторожевое | VRS | 07.08.1999 | 51.215 | 39.19 | 470 | ГС РАН, ВГУ | SDAS + СМ3-ОС |
| 12 | Соликамск | SOK | 1999 | 59.569 | 56.792 | | ГС РАН, ГИ УРО РАН | SDAS + СМ3-ОС |
| 13 | Архангельск | ARH | 06.09.2002 | 64.551 | 40.517 | 23 | ИЭПС УРО РАН | SDAS + СМ3-КВ |
| 14 | Новохоперск | VRH | 01.11.2003 | 51.203 | 41.721 | 98 | ГС РАН, ВГУ | SDAS + СМ3-КВ |
| 15 | Климовская | KLM | 2004 | 60.837 | 39.519 | 157 | ГС РАН, | SDAS + СМ3-ОС |
| | | | | | | | ИЭПС УРО РАН | SDAS + СМ3-КВ |
| 16 | Пермогорье | PRG | 27.11.2003 | 61.636 | 45.627 | 84 | ГС РАН, ИЭПС УРО РАН | SDAS + СМ3-КВ |
| 17 | Тамица | TMC | 28.11.2003 | 64.164 | 38.035 | 53 | ГС РАН | SDAS + СМ3-КВ |

Примечание. КФ ГС РАН – Кольский филиал ГС РАН; ИЭПС УРО РАН – Институт экологический проблем Севера; ГИ УРО РАН – Геологический институт УРО РАН.

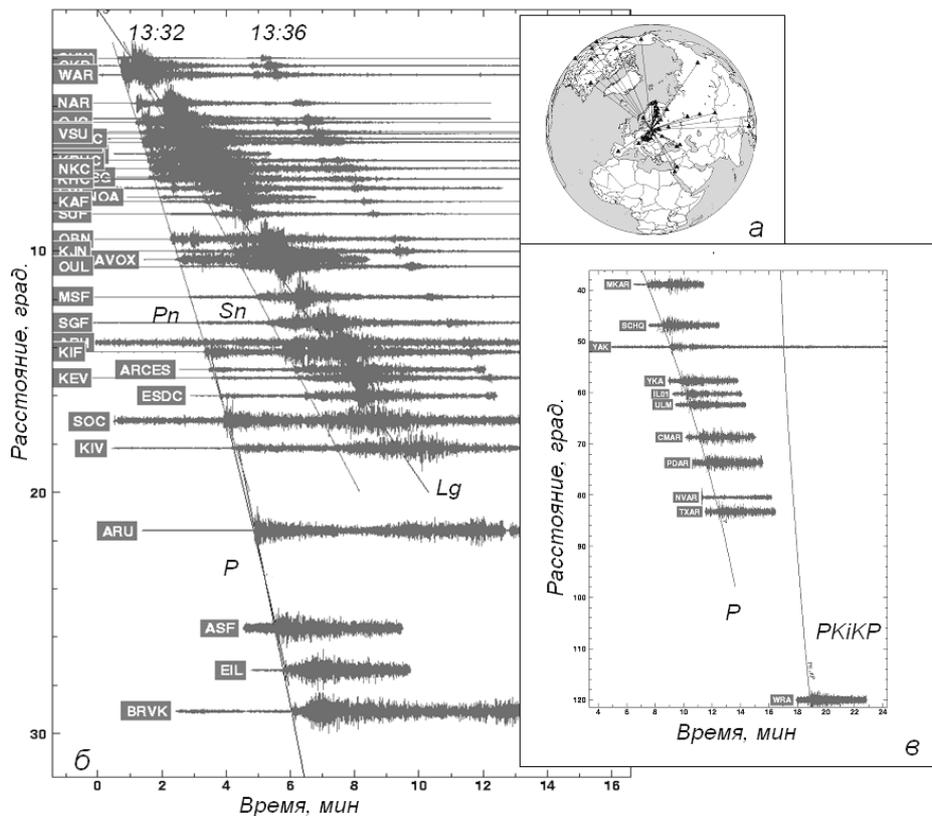


Рис. 1. Изображение фрагментов записи основного землетрясения в 13^h32^m и афтершока в 13^h36^m станциями, удаленными на различные расстояния

а – карта расположения всех станций; б – записи станций с $\Delta \leq 30^\circ$, с наложенным в графическом виде годографом IASPEI 91 [35] (с помощью программы Geotool [36]); в – записи станций с $\Delta = 40-120^\circ$.

Кроме того, на Урале, дополнительно к сети ГС РАН, действовали пять станций Пермской локальной сети (рис. 2), принадлежащей Горному институту УрО РАН, но они в локации гипоцентров Калининградских землетрясений не участвовали.

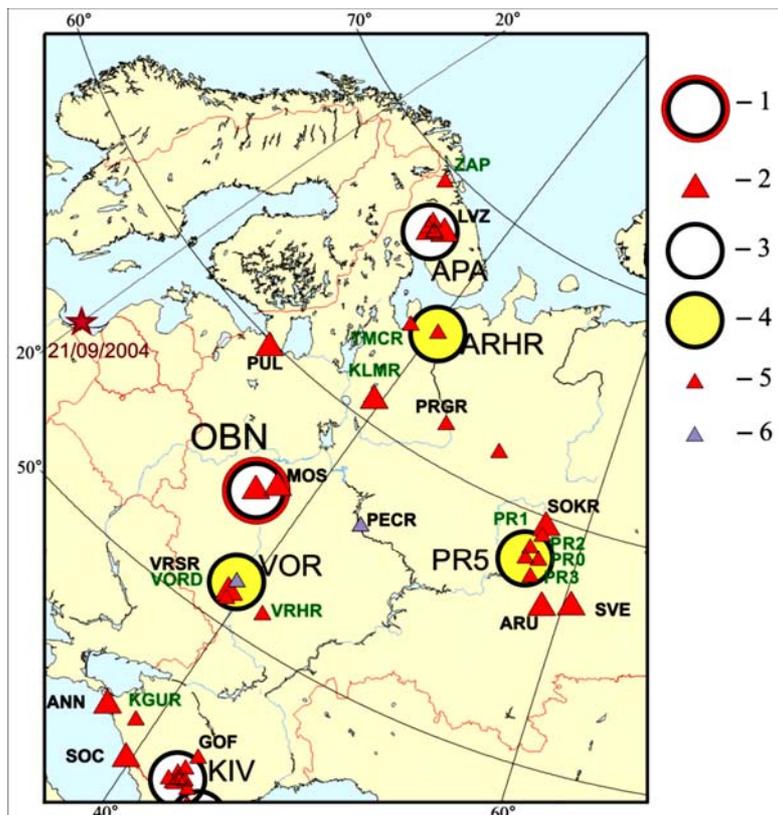


Рис. 2. Сеть сейсмических станций ГС РАН на Восточно-Европейской платформе и ее ближайшем окружении на период Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 г. (отмечены звездой)

1 – Информационно-обрабатывающий центр ИОЦ ГС РАН; 2 – телесеismicкая цифровая станция; 3, 4 – региональный и локальный информационно-обрабатывающий центр соответственно; 5, 6 – региональная станция, цифровая и аналоговая соответственно.

Параметры Калининградских землетрясений представлены в табл. 2, 3 по данным различных центров. Следует отметить, что к моменту написания статьи наиболее полным списком параметров гипоцентров, полученных по инструментальным данным в различных центрах, обладал Международный сейсмологический центр ISC (Англия, Ньюбери) [1]. Для первого толчка в 11^h05^m все варианты решений сведены в табл. 2, положение их показано на рис. 3, для второго в 13^h32^m – в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 2. Основные параметры Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. в 11^h05^m по данным различных центров из [1]

| Агентство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | Источник |
|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------|
| | | | φ° , N | $\delta\varphi^\circ$ | λ° , E | $\delta\lambda^\circ$ | h , км | δh , км | | |
| MOS | 11 05 02.00 | 1.04 | 54.843 | 0.03 | 20.024 | 0.08 | 10 f | | $MPSP=4.6/7$ | [37] |
| BJI | 11 04 59.0 | 1.9 | 55.76 | | 19.28 | | 3 | | $M_S=4.4, m_b=4.8$ | [1] |
| WAR | 11 05 01.6 | | 54.924 | | 20.120 | | 16 f | | | [1] |
| ZUR | 11 05 03 | | 54.858 | | 19.98 | | 15 | | $M_w=4.6/29$ | [1] |
| NEIC | 11 05 03.19 | 1.69 | 54.858 | 0.03 | 19.98 | 0.03 | 4.1 | 12.5 | $M_S=4.0/1, m_b=4.8/30$ | [1] |
| MED | 11 05 03.20 | 1.50 | 55.03 | 0.10 | 20.21 | 0.06 | 18 | 1.9 | $M_w=4.5/15$ | [1] |
| LDG | 11 05 03.50 | 1.35 | 54.7415 | 0.03 | 20.3364 | 0.05 | 10 | | $M_S=3.4/6, ML=5.2/22,$ | [1] |
| IDC | 11 05 04.03 | 1.45 | 54.8268 | 0.08 | 20.0959 | 0.05 | 0 f | | $M_S=3.4/5, m_b=4.8/8, ML=4.5/10$ | [1] |
| ЕНВ | 11 05 04.62 | 1.14 | 54.8320 | 0.3 | 20.0860 | 0.2 | 12.4 | 5.3 | | [1] |

| Агент-ство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | Источ-ник |
|------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|--------------|
| | | | φ° , N | $\delta\varphi^\circ$ | λ° , E | $\delta\lambda^\circ$ | h , км | δh , км | | |
| HEL | 11 05 04.80 | 0.50 | 54.774 | 0.01 | 20.04 | 0.01 | 10 f | | $ML=4.8$ | [1] |
| BGR | 11 05 07.05 | 0.54 | 54.659 | 0.12 | 19.893 | 0.06 | 10 f | | $ML=5.2/2$ | [1] |
| BER | 11 05 07.80 | 2.7 | 54.903 | 0.2 | 20.252 | 0.2 | 10 f | | $M_w=4.5, ML=5.1$ | [1] |
| NAO | 11 05 07.9 | 1.8 | 55.094 | 0.01 | 20.106 | 0.01 | 6.4 | | $ML=4.9$ | [1] |
| ORF | 11 05 08.7 | | 54.833 | | 19.711 | 0.05 | | | $m_b=4.1/8, ML=4.8$ | [1] |
| ISC | 11 05 01.3 | 1.5 | 54.8609 | 0.02 | 20.0705 | 0.01 | 10 f | | $M_s=3.8/8, m_b=4.7/43$ | [1] |
| ГС РАН | 11 05 04.9 | 0.5 | 54.838 | 0.02 | 20.129 | 0.02 | 21 20* | 4 | $M_s=4.1/25, MPSP=4.9/10, *h_{pp}$ | [2] |
| | 11 05 | | 54.91 ^M | 0.08 | 19.88 ^M | 0.02 | 15 ^M | 4 | | [13, 18, 19] |
| | 11 05 | | 54.87 ^M | | 20.14 ^M | | 13–17 | | | [38] из [33] |

Примечание. Коды агентств и названия соответствующих организаций и стран: ВЛ – Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Китай; NAO – Norwegian seismic Array (NORSAR), Норвегия; MED – Med-Net Regional Centroid – Moment Tensors INGV, Италия; ORF – Observatories and Research Facilities for European Seismology Data Center (ODC), Нидерланды; NEIC – National Earthquake Information Center, World Data Center A, USGS, США; MOS – Geophysical Institute-Russian Academy of Science, Россия; EHB – Data from the Catalogue of Engdahl, van der Hilst and Buland, <http://www.isc.ac.uk/EHB/index.html>; BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Германия; HEL – Institute of Seismology, University of Helsinki, Финляндия; IDC – International Data Centre of the CTBTO Preparatory Commission CTBT, Австрия; BER – Seismological Observatory, University of Bergen, Норвегия; WAR – Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Польша; LDG – Laboratoire de detection et de geophysique, Франция; ISC – International Seismological Centre, Англия. Знаками «M» и f отмечены макросейсмический эпицентр и фиксированная глубина соответственно.

Таблица 3. Основные параметры Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. в 13^h32^m по данным различных центров из [1]

| Агент-ство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | Источник |
|------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------|-------------------------------------|--------------|
| | | | φ° , N | $\delta\varphi^\circ$ | λ° , E | $\delta\lambda^\circ$ | h , км | δh , км | | |
| MOS | 13 32 28.30 | 2.0 | 54.896 | 0.05 | 20.185 | 0.05 | 10 f | | $MPSP=5.1/9$ | [37] |
| ВЛ | 13 32 27.70 | 1.6 | 55.03 | | 19.08 | | 29 | | $M_s=5.0, m_b=4.8$ | [1] |
| CSEM | 13 32 29.20 | | 54.77 | | 19.94 | | 10 | | $m_b=5.0$ | [1] |
| NIC | 13 32 29.20 | 0.5 | 54.77 | | 19.94 | | 10 | | | [1] |
| STR | 13 32 29.30 | | 54.74 | 0.0 | 20.19 | 0.0 | 10 f | | $ML=5.3$ | [1] |
| LDG | 13 32 29.30 | 0.13 | 54.747 | 0.03 | 20.195 | 0.03 | 10 f | | $M_s=3.5/6, ML=5.3/36$ | [1] |
| ZUR | 13 32 30 | | 54.841 | | 19.912 | | 15 f | | $M_w=4.7/31$ | [1] |
| IDC | 13 32 30.14 | 0.40 | 54.826 | 0.06 | 20.065 | 0.06 | 0 f | | $M_s=3.9/13, m_b=4.5/14, ML=4.9/11$ | [1] |
| HRVD | 13 32 30.80 | 0.60 | 54.79 | 0.05 | 20.11 | 0.05 | 20 | 3 | $M_w=4.7/40$ | [1] |
| MED | 13 32 30.80 | 0.40 | 54.83 | 0.04 | 20.060 | 0.04 | 20 | 1 | $M_w=4.7/19$ | [1] |
| NEIC | 13 32 30.81 | 0.17 | 54.841 | 0.02 | 19.912 | 0.02 | 10 f | | $m_b=4.9/52$ | [1] |
| WAR | 13 32 31.00 | | 54.876 | | 20.120 | | 20 f | | | [1] |
| HEL | 13 32 31.90 | 0.3 | 54.834 | 0.01 | 20.025 | 0.01 | 10 f | | | [1] |
| EHB | 13 32 32.27 | 1.07 | 54.838 | 0.2 | 20.029 | 0.2 | 20 f | | | [1] |
| BGR | 13 32 32.70 | 0.61 | 54.703 | 0.07 | 19.921 | 0.07 | 10 f | | $M_s=3.7/4, ML=5.4/3$ | [1] |
| BER | 13 32 33.70 | 3.9 | 54.84 | 0.12 | 20.161 | 0.12 | 10 f | | $M_w=4.8, M_s=3.4, ML=5.4$ | [1] |
| NAO | 13 32 34.10 | 3.80 | 55.047 | 0.02 | 20.080 | 0.02 | 10 | | $ML=5.4$ | [1] |
| ISC | 13 32 28.51 | 0.11 | 54.825 | 0.01 | 19.975 | 0.01 | 10 f | | $M_s=4.0/20, m_b=4.8/78$ | [1] |
| ГС РАН* | 13 32 31.05 | 0.4 | 54.862 | 0.02 | 20.153 | 0.02 | 18 24* | 3 | $M_s=4.3/31, MPSP=5.1/13, *h_{pp}$ | |
| | 13 32 | | 54.97 ^M | 0.03 | 20.13 ^M | 0.12 | 14 | 4 | | [13, 18, 19] |
| | | | 54.98 ^M | | 20.29 ^M | 0.25 | 15–19 | | | [38] из [33] |

Примечание. Коды агентств и названия соответствующих организаций и стран: ZUR – Zurich Moment Tensors, Swiss Seismological Service ETH, Швейцария; CSEM – European-Mediterranean Seismological Centre, Франция; NIC – Geological Survey Department, GSD, Кипр; STR – Institut de Physique du Globe, Universite Louis Pasteur, Strasbourg, Франция; HRVD – Department of Geological Sciences, Harvard University, Cambridge (Now GCMT), США; обозначение остальных центров см. в Примечании к табл. 2; * – решение ГС РАН публикуется впервые.

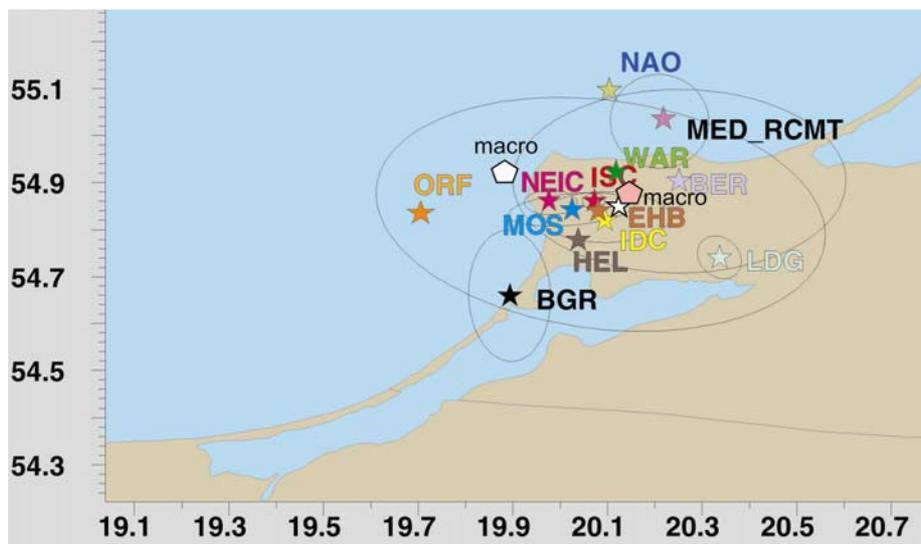


Рис. 3. Положение эпицентра землетрясения 21 сентября 2004 г. в 11^h05^m по данным различных центров из табл. 2, опубликованных в бюллетене ISC (белая звезда – по <http://www.isc.ac.uk/search/bulletin/index.html> [2].); белый и розовый пятиугольник – макросейсмический эпицентр по [13, 18, 19] и по [38] из [33] соответственно

Сопоставление данных, приведенных в табл. 2, 3 и на рис. 3, 4, свидетельствует о значительном разбросе результатов локации эпицентров, а также расхождении с их макросейсмическими определениями. Среди очевидных причин этого факта можно назвать:

- использование центрами различных сетей станций;
- отсутствие сейсмических станций вблизи эпицентральной зоны (ближайшая станция польской сети «Сувалки» (SUW) с $\Delta=220$ км);
- недостаточное окружение эпицентра станциями у ряда центров;
- использование различных методик (обобщенные годографы или местные скоростные разрезы), только *P*-вступления или *P* и вторичные фазы, только региональные данные, только телесейсмические данные, совместно и те, и другие.

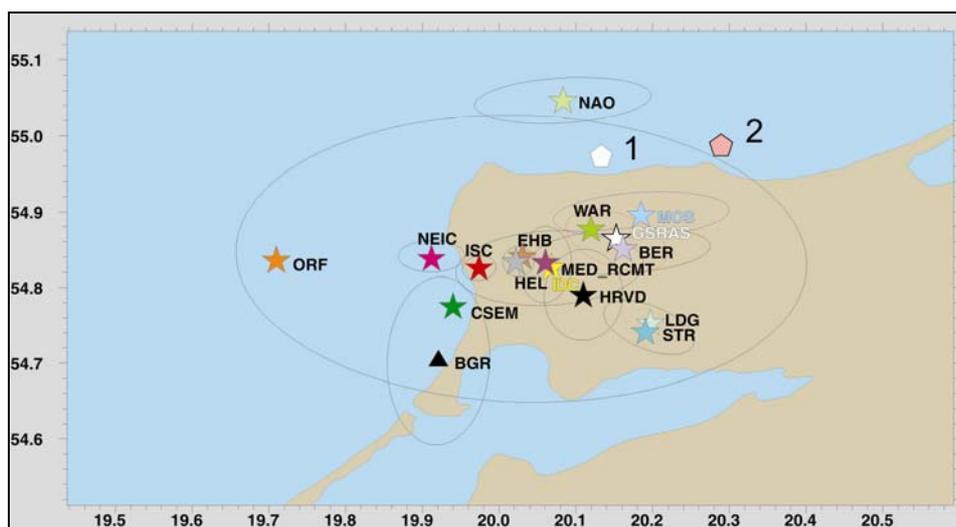


Рис. 4. Положение эпицентра землетрясения 21 сентября 2004 г. в 13^h32^m по данным различных центров из [1] и известные макросейсмические эпицентры из табл. 3. (<http://www.isc.ac.uk/search/bulletin/index.html>)

1 – положение макросейсмического эпицентра по [13, 18, 19]; 2 – положение макросейсмического эпицентра по [38], данные о котором заимствованы из [33]; звездой белого цвета показано положение нового варианта эпицентра по данным авторов статьи.

Но все эти причины можно в равной мере отнести, пожалуй, к подавляющему числу землетрясений, параметры которых определены таким числом центров и сетей. В то же время настоящее землетрясение имеет и специфические причины различий:

- несмотря на то, что землетрясения зарегистрированы значительным числом станций, большее их число находилось на региональных расстояниях $\Delta \leq 20^\circ$ (82 % станций для толчка в 11^h05^m и 71% – для 13^h32^m). Как было показано работами по кинематической калибровке станций международной сети [39], отклонения от годографа IASPEI-91 могут быть значительными;
- землетрясение в Калининградской области уникально тем, что оно произошло на платформенной территории, а не в традиционно сейсмичных районах, и к тому же на стыке древней Восточно-Европейской и более молодой Западно-Европейской платформ, разделенных зоной Торнквиста-Тейссере (ГТ) и имеющих свое, отличное от других, строение земной коры и верхней мантии. Подавляющее же число сейсмических станций расположены в сейсмоактивных регионах с другим строением и имеют гораздо большую плотность сети. Поэтому можно предположить, что используемые традиционные методики могут не принести здесь желаемого результата.

Попытаемся проанализировать результаты локации в бюллетене международного центра ISC, как заключительного этапа в получении параметров землетрясений, содержащего результаты обработки различных центров и определения моментов вступления сейсмических фаз. Ко времени составления бюллетеня за 2004 г. этот центр перешел на использование годографа АК135 [40].

Для первого толчка в 11^h05^m в нем использовалось для локации 473 фазы по 344 станциям, а, значит, не только *P*-вступления, как это происходит в NEIC и MOS [37]. Действительно, 116 фаз, интерпретируемых в центрах, являются поставщиками информации как *S*-, *Sn*-, так и *Sg*-фаз. Для определения глубины *h* и получения статистически более устойчивого решения этого параметра – это однозначно прогрессивный момент. Однако при использовании обобщенного годографа, построенного на материалах, полученных в сейсмоактивных зонах Земли, этот факт может привести к другим проблемам.

Подавляющее число станций в бюллетене ISC находилось на региональных расстояниях $\Delta \leq 2000$ км (рис. 5, 6), где, как было показано при проведении работ по кинематической калибровке сейсмических станций международной сети IMS, создаваемой для слежения за соблюдением ДВЗЯИ, наблюдаемые времена прихода региональных фаз, особенно в платформенных областях, имеют значительные отклонения от времен пробега этих фаз от годографа IASPEI-91. В ходе исследований был собран большой объем информации о временах вступлений сейсмических фаз на станциях от мирных ядерных взрывов на территории Северной Евразии, в том числе и на ВЕП. Эти работы были направлены на создание временных поправок к обобщенному годографу IASPEI-91 с учетом особенностей распространения волны от источника к станции и одновременно на формирование более точного, относительно применяемого на телесейсмических расстояниях, годографа сейсмических фаз для региональных расстояний для каждой сейсмоактивной зоны Северной Евразии, включая и территорию платформы. В результате проведенных исследований установлено [39], что для платформенных областей на расстояниях от источника $\Delta = 1500\text{--}2000$ км отклонения от годографа могут достигать $-8\text{--}10$ с для *Pn*-, и $-15\text{--}20$ с для *Sn*-волн. Для областей кайнозойской складчатости – от -2 до $+4$ с для *Pn*- и $-5\text{--}+5$ с для *Sn*-волн. Времена пробега волн *Pg*, характеризующих среднюю скорость в земной коре, по величинам отклонений от годографа IASPEI-91 делятся на две группы: 1 – для платформ; 2 – для палеозойских массивов и тектонически активных областей. Для первой группы характерны отклонения до $+3\text{--}5$ с на расстояниях $\Delta = 700\text{--}1000$ км. Времена пробега в тектонически активных областях практически совпадают с годографом IASPEI-91. Времена пробега волн *Lg* характеризуются большими разбросами даже в пределах однородных провинций. Были построены поправки SSSC станция-источник к годографу (Station-Source Specific Time Corrections) для станций, входящих в международную сеть, которые эффективно стали применяться при локации поверхностных очагов.

В работе польских сейсмологов [33] анализ инструментальных данных Калининградских землетрясений называется большой проблемой в первую очередь потому, что было «невозможно использовать простую скоростную модель, параметры которой трудно определяемы из-за

многочисленных неопределенностей, связанных с близостью зоны ТТ – границей между Восточной (докембрийской) и Западной (палеозойской) платформами. Известно, что обе платформы и зона ТТ характеризуются собственными скоростными моделями.

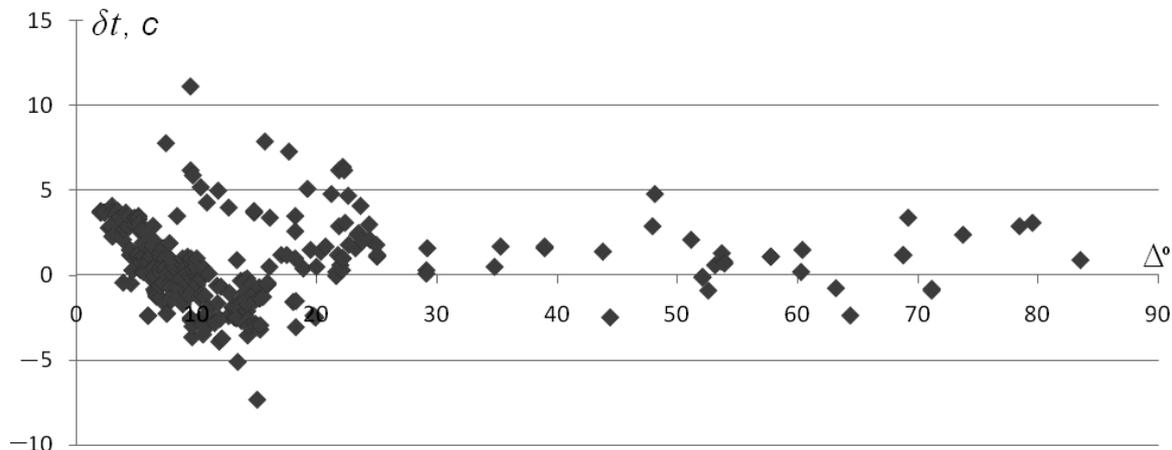


Рис. 5. Распределение значений временных невязок Pn/P -вступлений в зависимости от расстояния для землетрясения в 11^h05^m по [1]

Действительно, это хорошо видно по полученным временным невязкам δt продольной волны Pn относительно применяемого в ISC годографа АК135 (табл. 4–6). Для станций, лежащих восточнее зоны ТТ, устанавливаются положительные временные невязки δt от 2.8 до 4.1 с (табл. 4). На станциях западнее ТТ – значения невязок резко меняются и лежат в интервале от 0 до –1.1 с (табл. 5).

Таблица 4. Информация из бюллетеня ISC по станциям, лежащим восточнее линии для толчка в 11^h05^m

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i , ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|--------------------|------------------------|
| SUW | 2.01 | 113.8 | Pn | 11 05 39.46 | 3.8 |
| GKP | 2.31 | 227.5 | Pn | 11 05 43.7 | 3.7 |
| WAR | 2.69 | 167.4 | Pn | 11 05 48.2 | 2.8 |
| BSD | 2.98 | 277 | Pn | 11 05 51.9 | 2.3 |
| GOTU | 2.95 | 344.2 | Pn | 11 05 53.3 | 4.1 |
| BYXU | 2.98 | 326.1 | Pn | 11 05 53.27 | 3.7 |
| OSKU | 3.23 | 318 | Pn | 11 05 56.72 | 3.6 |
| VSTU | 3.43 | 326.4 | Pn | 11 05 59.79 | 3.8 |

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i , ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|--------------------|------------------------|
| IGN | 3.57 | 79.6 | Pn | 11 06 01.3 | 3.4 |
| EKSU | 3.81 | 317.5 | Pn | 11 06 04.46 | 3.1 |
| VIKU | 4.1 | 334.4 | Pn | 11 06 09.11 | 3.7 |
| NYNU | 4.31 | 345.6 | Pn | 11 06 11.97 | 3.5 |
| ESKU | 4.82 | 336.9 | Pn | 11 06 19.13 | 3.4 |
| NRTU | 4.89 | 351.4 | Pn | 11 06 19.84 | 3.1 |
| VSU | 5.15 | 42.8 | Pn | 11 06 23.87 | 3.5 |
| UPP | 5.18 | 346.2 | Pn | 11 06 23.98 | 3.1 |

Таблица 5. Информация из бюллетеня ISC по станциям, лежащим западнее линии ТТ, для первого толчка в 11^h05^m

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i , ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|--------------------|------------------------|
| KSP | 4.63 | 211.2 | Pn | 11 06 14.1 | 1.1 |
| OJC | 4.65 | 182.2 | Pn | 11 06 13.7 | 0.3 |
| DPC | 5.06 | 208.3 | Pn | 11 06 20.2 | 1.1 |

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i , ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|--------------------|------------------------|
| PVCC | 5.48 | 219.9 | Pn | 11 06 26.1 | 1.1 |
| CLL | 5.55 | 233 | Pn | 11 06 26.2 | 0.2 |

Обращает на себя внимание, что станции, расположенные на Карпатах, в Крыму и на Кавказе, имеют невязки также более 3 с, но со знаком минус (табл. 6).

Временные невязки по вступлениям вторичных фаз еще более различаются. На станциях, расположенных восточнее зоны ТТ, по вступлениям S_n -волн отмечаются положительные временные невязки от годографа АК135, лежащие в интервале от 0.8 до 7.2 с. Западные станции отличаются отрицательными значениями невязок в интервале δt от –1.0 до –6.0 с.

Несколько иная и более сложная ситуация складывается со вторым и наиболее сильным толчком этой группы землетрясений, произошедшим в 13^h32^m (табл. 3, рис. 3, 6).

Таблица 6. Информация из бюллетеня ISC по станциям, расположенных в орогенных зонах, для первого толчка в 11^h05^m

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|------------------|------------------------|
| KIS | 9.61 | 141.4 | P | 11 07 19.0 | -3.65 |
| SIM | 13.4 | 132 | P | 11 08 08.9 | -5.11 |

| Код станции | Δ° | AZM° | Фаза | t_i ч мин с | δt в [1], с |
|-------------|----------------|-------------|------|------------------|------------------------|
| ANN | 15.02 | 124.9 | P | 11 08 27.8 | -7.34 |
| KIV | 18.23 | 117.4 | P | 11 09 12.9 | -3.06 |

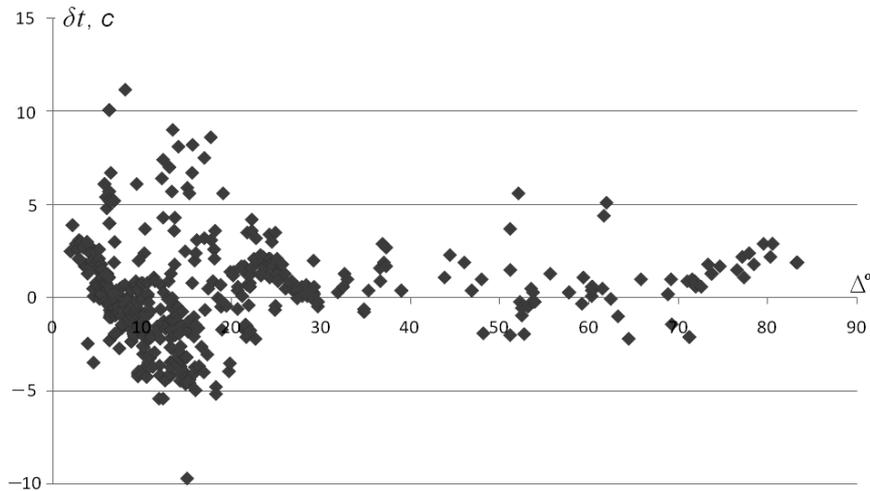


Рис. 6. Распределение значений δt временных невязок Pn/P -вступлений в зависимости от расстояния для землетрясения в 13^h32^m по [1]

В целом тенденция по невязкам сохраняется. Так же, как и в первом случае, отмечается не столь явное, но все же превышение числа положительных невязок на телесеизмических расстояниях. Для второго толчка невязки δt на станциях в азимуте $AZM=300-360^\circ$ и региональных расстояниях $\Delta \leq 20^\circ$ чуть ниже, примерно на $\delta t=0.6-1$ с, чем у первого, но также все невязки положительны и близки к $\delta t=3$ с. Однако на близких ($\Delta=5-20^\circ$) расстояниях число станций, участвующих в локации и расположенных в орогенных областях, значительно выше. Они имеют невязки $\delta t < 0$ (рис. 6). Это, вероятно, и вызвало различие в полученных параметрах гипоцентров первого и второго толчка. Действительно, сейсмические сети многих государств более плотны в высокосейсмичных орогенных территориях и менее плотны на слабосейсмичных платформенных территориях. Именно перекося числа данных в разных азимутах и сыграл свою роль в расхождении положений двух сильнейших толчков Калининградского землетрясения.

Схожесть записей первого и второго толчка отмечается в [2]. По мнению авторов [2], оба сильных Калининградских землетрясения в 11^h05^m и в 13^h32^m произошли в одной очаговой области. Однако в центрах NEIC и ISC были лоцированы два очага, разнесенные на расстояние примерно 20 км, особенно по анализу макросейсмических и инструментальных данных. Попытаемся привести объективные данные в пользу той или иной версии.

В [33] также отмечается, что записи первого и второго толчка на одних и тех же станциях польской сети очень схожи. Действительно, это видно на рис. 7, где представлены записи вертикальной компоненты станций «Сувалки» (SUW) и «Варшава» (WAR), фильтрованные в полосе частот $\Delta f=0.5-2.0$ Гц. Подобная схожесть установлена практически на записях всех исследуемых станций (рис. 8).

Анализ записей выборочных станций, находящихся в различных азимутах от эпицентра, также показывает, что существуют небольшие различия в разности прихода P (Pn)- и S (Sn)-волн от первого и второго толчка, которые лежат в пределах точности замера вторичной фазы при применении тех или иных полосовых частотных фильтров (± 1 с) (табл. 7). Это говорит в пользу близкого расположения двух очагов.

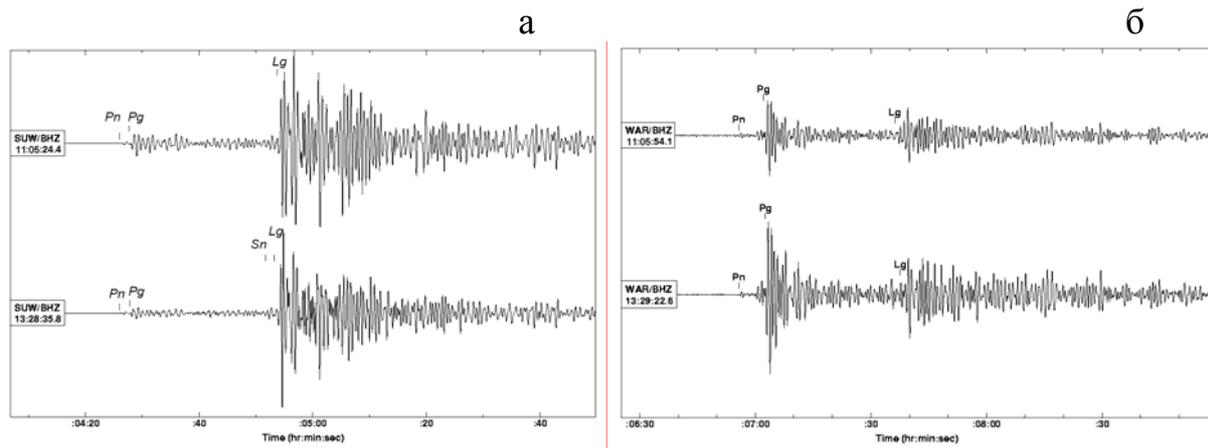


Рис. 7. Сравнение записей вертикальных компонент на станциях польской сети:

а – «Сувалки» (SUW) ($\Delta=1.98^\circ$); б – «Варшава» (WAR) ($\Delta=2.69^\circ$)

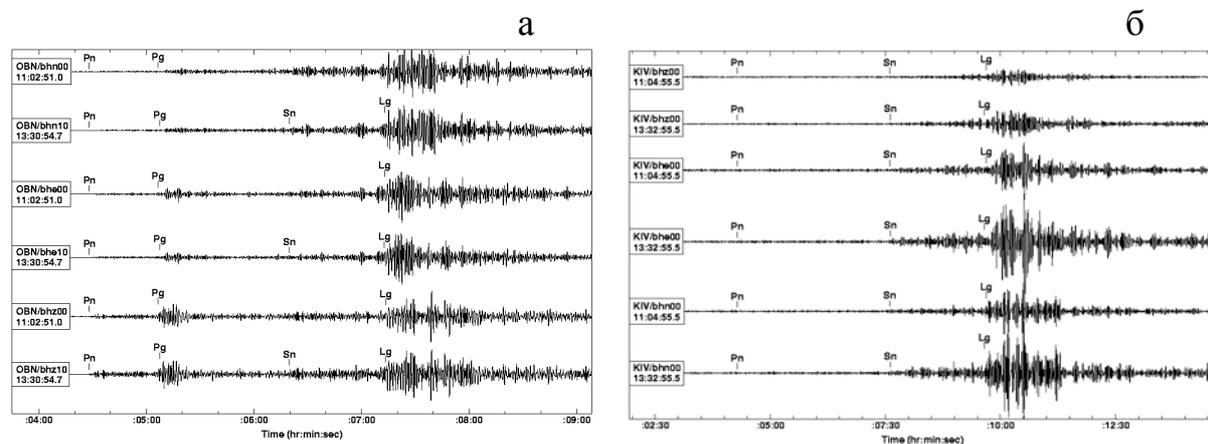


Рис. 8. Сравнение записей трех компонент на российских станциях:

а – «Обнинск» (OBN) ($\Delta=9.49^\circ$); б – «Кисловодск» (KIV) ($\Delta=18.23^\circ$)

Таблица 7. Сопоставление разности прихода времен прихода первой продольной и вторичных фаз на разных станциях для двух толчков Калининградских землетрясений

| Код станции | Δ° | AZM $^\circ$ | 11 ^h 05 ^m | | | 13 ^h 32 ^m | | |
|-------------|----------------|--------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| | | | t_{S-P}/t_{Pn-P} с | t_{Sg-tPg} с | t_{Sg-tPn} с | $t_{Sn-tPn}/S-P$ с | t_{Sg-tPg} с | t_{Sg-tPn} с |
| SUW | 2.01 | 113.8 | 26.53 | 26.876 | 28.81 | 26.56 | 26.8 | 28.46 |
| GKP | 2.31 | 227.5 | 29.1 | 32.97 | 36.47 | 28.8 | 32.68 | 36.3 |
| BSD | 2.98 | 277.0 | | | 45.8 | | | 45.6 |
| OSKU | 3.23 | 318.0 | 37.91 | | | 38.81 | | |
| ISAL | 3.54 | 75.9 | | | 55.67 | | | 55.09 |
| ARA0 | 14.93 | 7.4 | 158.80 | | | 159.0 | | |
| AKASG | 6.94 | 123.1 | 74.56 | | | 75.62 | | |

Таким образом, описанные выше исследования говорят в пользу того, что довольно значительные различия в положении гипоцентров первого и второго Калининградских землетрясений у ряда агентств связаны, скорее всего, с недостатками методики обработки, основанной на одной модели среды, без учета коррекций за особенность прохождения трассы в других зонах, с другой скоростной моделью и неравномерным распределением станций в этих зонах. Без решения этих методических вопросов отдать предпочтение тому или иному решению гипоцентра

не представляется возможным. Можно считать, что очаги двух сильнейших Калининградских землетрясений близки в пространстве.

Афтершоки. Из-за отсутствия близких станций информация об афтершоках чрезвычайно скудна. Отчетливо на записях ряда станций выделен один афтершок в $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$ (табл. 8).

Таблица 8. Параметры афтершока, зарегистрированного 21 сентября в $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$

| t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | n | $\delta\Delta^\circ$ | GAP |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------|--|-----|----------------------|-----|
| | | φ° , N | $\delta\varphi^\circ$ | λ° , E | $\delta\lambda^\circ$ | h , км | δh , км | | | | |
| 13 36 32.73 | 1.2 | 54.867 | 0.04 | 19.949 | 0.04 | 4 | 5 | $K_p=9.3$, $M(K_p)=3.0$ [2], по [19] – $M=2.2$, $I_0=4-5 (\pm 0.5)$ | 27 | 2–15 | 142 |

В то же время в [19] опубликованы сведения об ощутимости как минимум еще четырех толчков, произошедших 21 и 22 сентября. В соответствии с данными, приведенными в [25], они зарегистрированы в следующие моменты времени: 21 сентября в $19^{\text{h}}30^{\text{m}}(\pm 30^{\text{m}})$ с $M=2.3$ и в $21^{\text{h}}30^{\text{m}}(\pm 5^{\text{m}})$ с $M=2.5$; 22 сентября в $00^{\text{h}}00^{\text{m}}(\pm 2^{\text{h}})$ с $M=2.3$ и в $02^{\text{h}}00^{\text{m}}(\pm 2^{\text{h}})$ с $M=1.8$ (погрешность определения магнитуд равна $\delta M=\pm 0.5$). Располагая суточной записью вертикальной компоненты станции «Сувалки» за 21 сентября, сделана попытка поиска записи названных в [19, 25] афтершоков. В качестве инструмента выбрана спектрограмма, построение которой в разных временных масштабах позволяет выделить даже слабые следы довольно высокочастотных землетрясений (рис. 9). Отметим, что для записи станции «Сувалки» характерен довольно низкий уровень шума.

По нормированному на максимальную величину спектра мощности сигнала на рис. 9 видно, что и для землетрясения в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$, и следующего за ним толчка в $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$ характерна широкая спектральная полоса $\Delta f=0.5-9$ Гц.

Некое высокочастотное событие выделяется на спектрограмме в $13^{\text{h}}42^{\text{m}}$, которое при ближайшем рассмотрении записи на рис. 10 по виду поведения кодовой части волны, интерпретируемой предположительно как L_g , можно отнести к событиям «возможно, афтершок». По оценке амплитуды, которая меньше предыдущего землетрясения в $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$ примерно в 100 раз, оценена магнитуда, примерно равная $M=1.5-1.8$.

В нескольких местах на спектрограмме были выделены события в такой же широкой полосе частот на фрагменте от $12^{\text{h}}00^{\text{m}}$ до $12^{\text{h}}20^{\text{m}}$ (рис. 11 а, б). Однако при ближайшем рассмотрении только два из них отнесены к категории «возможно, афтершок» с $t_0=12^{\text{h}}02^{\text{m}}48.8^{\text{s}}$ с $M\sim 1.5$ (рис. 12) и $t_0=12^{\text{h}}14^{\text{m}}25^{\text{s}}$ с $M\sim 1.0$, остальные были отнесены к другим очагам.

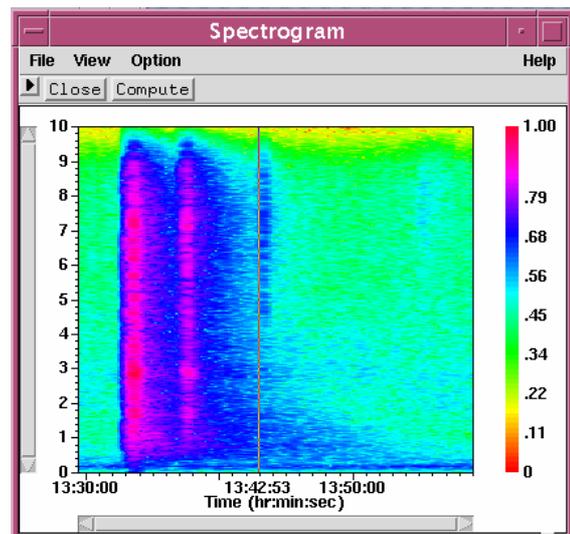


Рис. 9. Спектрограмма фрагмента записи временного интервала $13^{\text{h}}30^{\text{m}}-13^{\text{h}}58^{\text{m}}$ 21 сентября 2004 г.

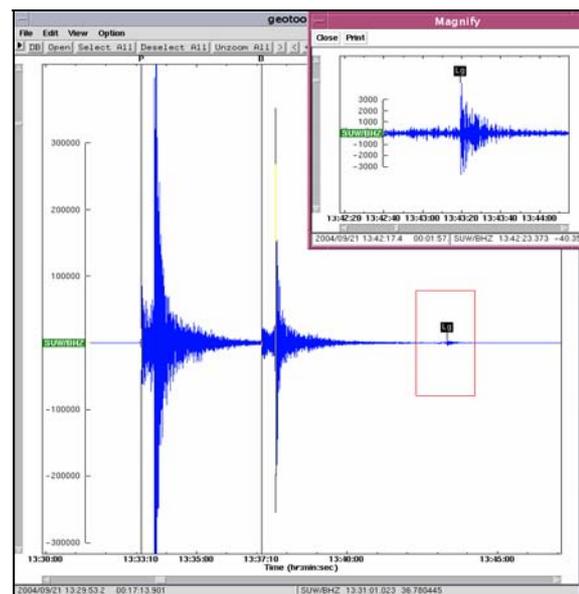


Рис. 10. Сопоставление записей событий в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$, $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$ и $13^{\text{h}}42^{\text{m}}$

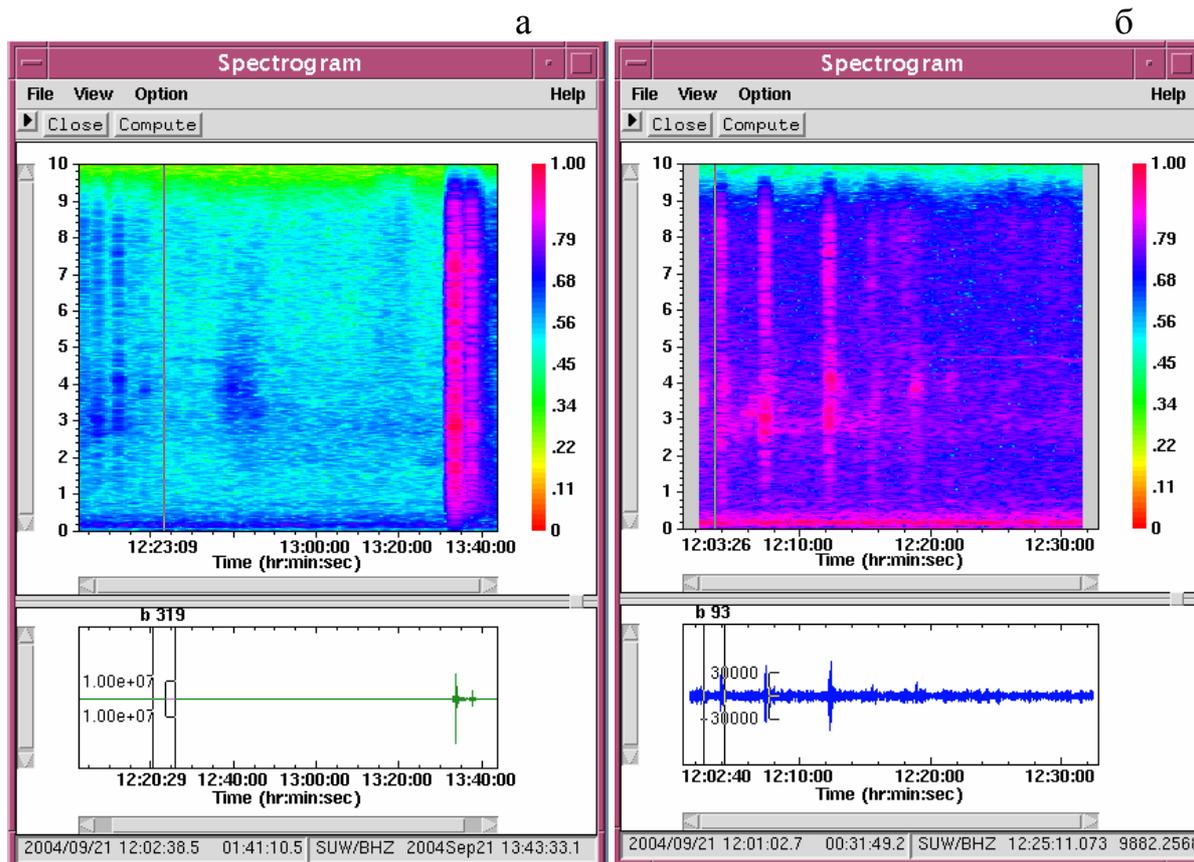


Рис. 11. Выделение слабых афтершоков на спектрограмме фрагмента записи вертикальной компоненты на станции «Сувалки» (SUW):

а – фрагмент 6385 с, временной интервал $12^{\text{h}}00^{\text{m}}-13^{\text{h}}50^{\text{m}}$ 21 сентября 2004 г., по которому скользит окно в 320 с, с наложением 290 с; б – фрагмент 1852 с, временной интервал $12^{\text{h}}00^{\text{m}}-12^{\text{h}}40^{\text{m}}$ 21 сентября 2004 г., по которому скользит окно в 93 с с наложением 83 с.

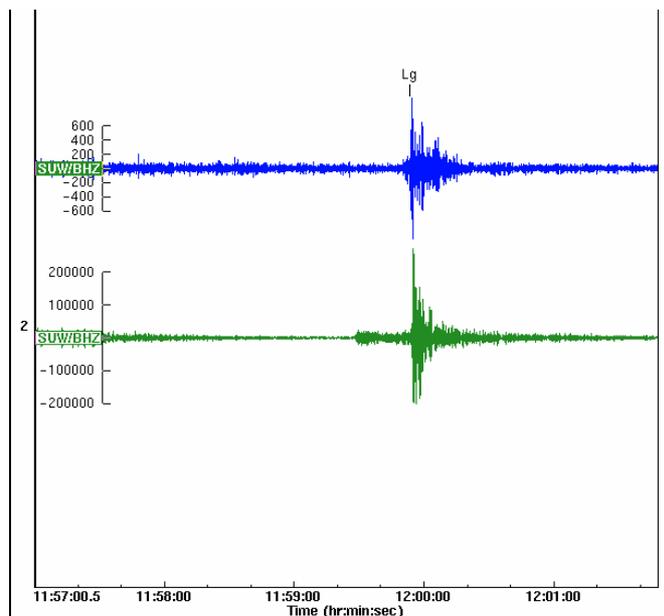


Рис. 12. След слабого события типа «возможно, афтершок» в $12^{\text{h}}02^{\text{m}}48.8^{\text{s}}$ с $M \sim 1.5$ (фильтрация в полосе $\Delta f = 3-9$ Гц) в сравнении с записью афтершока в $13^{\text{h}}36^{\text{m}}$

На спектрограмме отмечаются очень слабые следы широкого спектра в $19^{\text{h}}05^{\text{m}}$ и $19^{\text{h}}22^{\text{m}}$, возможно, это следы записи слабого афтершока в $19^{\text{h}}30^{\text{m}}(\pm 30^{\text{m}})$ по [19], примерно так же неуверенно выделяется след в $20^{\text{h}}47^{\text{m}}$ и $21^{\text{h}}50^{\text{m}}$. При фильтрации они видны чрезвычайно слабо.

В интервале от $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ до $12^{\text{h}}00^{\text{m}}$ выделить события типа «возможно, афтершок» на записях станции «Сувалки» не удалось.

Таким образом, по записям станции «Сувалки» удалось выделить еще два слабых события типа «возможно, афтершок» в $12^{\text{h}}02^{\text{m}}48.8^{\text{s}}$ с $M \sim 1.5$ и в $13^{\text{h}}42^{\text{m}}$ с $M = 1.5-1.8$. Возможности сети сейсмических станций в этом районе не позволяют выделять более слабые события.

Решение механизма очага землетрясения 21 сентября в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ получено в наст. ст. по методике [41], использующей знаки первых вступлений

P-волн (27 знаков «+», 17 – «-»), реализованной в программе FA [42]. Станции расположены в интервале эпицентральных расстояний $\Delta=2.3\text{--}39^\circ$ при неравномерном распределении по азимутам, в основном в первом и третьем секторах. В табл. 9 приведены параметры механизма очага землетрясения в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$. Следует заметить, что при получении механизма по [42] авторы испытывали трудности при выделении знаков первого вступления *P*-волн. Для первого толчка в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$, который несколько слабее, чем в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$, выделенные знаки первого движения были менее определены, чем для $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$. Для землетрясения $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ в [1] имеются также решения по методу тензора момента, рассчитанные в центрах ZUR и MED. Варианты трех решений механизма очага землетрясения в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ приведены в табл. 9, графические изображения в стереографической проекции (нижняя полусфера) показаны на рис. 13.

Таблица 9. Параметры механизма очага землетрясения 21 сентября 2004 г. в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$

| Агентство | Дата, д м | t_0 , ч мин с | h , км | Магнитуды | | | Оси главных напряжений | | | | | | Нодальные плоскости | | | | | |
|-------------------------|--------------|--------------------|-------------|-----------|-------|-----------|------------------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|---------------------|-------------|------------|-----------|-------------|-----|
| | | | | M_w | M_S | <i>T</i> | | <i>N</i> | | <i>P</i> | | <i>NP1</i> | | | <i>NP2</i> | | | |
| | | | | | | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> | |
| ГС РАН, <i>P</i> -волны | 21.09 | 11 05 04.9 | 20 | | | 4.1 | 9 | 231 | 78 | 92 | 8 | 323 | 7 | 78 | 1 | 277 | 89 | 168 |
| ZUR | 21.09 | 11 05 03 | 15 | 4.6 | | | 19 | 256 | 67 | 40 | 13 | 161 | 29 | 86 | 23 | 298 | 67 | 175 |
| MED | 21.09 | 11 05 03.20 | 18 | 4.5 | | | 1 | 256 | 51 | 347 | 39 | 166 | 308 | 63 | -151 | 204 | 64 | -31 |

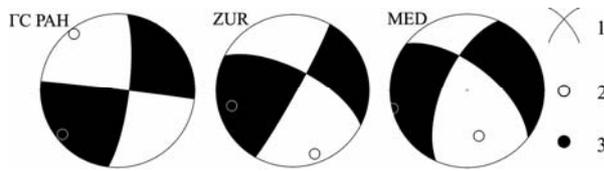


Рис. 13. Механизм очага землетрясения 21 сентября 2004 г. в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ по данным разных центров

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернена область волн сжатия.

Решения для землетрясения в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$, полученные по разным центрам, близки. По данным в ГС РАН, в случае *P*-волн обе нодальные плоскости имеют крутое ($DP=78^\circ$ и 89°) падение, движение по плоскости *NP1* близмеридионального простирания представлено левосторонним сдвигом, по плоскости *NP2* близширотного простирания – правосторонним сдвигом с вертикальной компонентой.

Параметры механизма очага землетрясения в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ приведены в табл. 10. В определении механизма очага Калининградского землетрясения в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ по знакам *P*-волн использовались данные на $n=51$ сейсмической станции, из них на 30-ти зарегистрирована волна сжатия (знаки «+»), на остальных – волна разрежения (знаки «-»). Интервал эпицентральных расстояний составлял $\Delta=1.96\text{--}52.5^\circ$. Станции расположены относительно очага во всех четырех квадрантах.

Таблица 10. Параметры механизма очага землетрясения 21 сентября 2004 г. в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$

| Агентство | Дата, д м | t_0 , ч мин с | h , км | Магнитуды | | | Оси главных напряжений | | | | | | Нодальные плоскости | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------------|-------------|-----------|-------|-----------|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|---------------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|
| | | | | M_w | M_S | M_{PSP} | <i>T</i> | | <i>N</i> | | <i>P</i> | | <i>NP1</i> | | | <i>NP2</i> | | |
| | | | | | | | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> |
| ГС РАН, <i>P</i> -волны, | 21.09 | 13 32 31.05 | 18 | | 4.3 | 5.1 | 8 | 233 | 78 | 2 | 9 | 141 | 186 | 89 | -12 | 277 | 78 | -179 |
| HRVD | 21.09 | 13 32 30.8 | 20.2 | 4.7 | | | 1 | 247 | 82 | 148 | 8 | 338 | 22 | 83 | -5 | 113 | 85 | -173 |
| ZUR | 21.09 | 13 32 30 | 15 | 4.7 | | | 21 | 253 | 64 | 33 | 15 | 157 | 26 | 86 | 26 | 294 | 64 | 176 |
| MED | 21.09 | 13 32 30.8 | 20.5 | 4.7 | | | 3 | 257 | 80 | 3 | 9 | 166 | 302 | 82 | -175 | 211 | 85 | -8 |

Как было отмечено в [2], имелись трудности выделения знаков первого вступления *P*-волны на записях станций, удаленных на региональные расстояния $\Delta < 20^\circ$. Знаки уточнялись, и в наст. ст. в табл. 10 приведено уточненное решение. Механизмы очага (в графическом виде, в стереографической проекции, нижняя полусфера), полученные по данным разных центров, показаны на рис. 14. Решения близки. Исследуемое землетрясение возникло в условиях, близких по величине сжимающих и растягивающих напряжений, оси которых ориентированы в юго-восточном и юго-западном направлениях соответственно. Обе нодальные плоскости имеют

крутое падение, тип движения по обеим плоскостям – сдвиг, левосторонний – по $NP1$, правосторонний – по $NP2$.

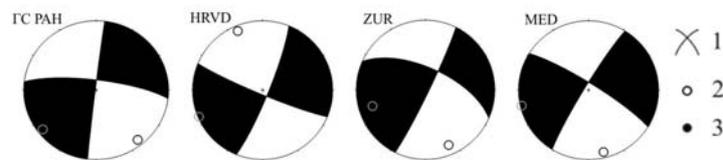


Рис. 14. Механизм очага землетрясения 21 сентября 2004 г. в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ по данным разных центров

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернена область волн сжатия.

В табл. 9 и на рис. 13 для землетрясения в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$, и в табл. 10 и на рис. 14 для землетрясения в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ показаны также решения, полученные в центрах ZUR, MED по методу тензора момента центроида [1].

Как показано в [43], тип механизма очага землетрясений в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ и в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ указывает на реализацию горизонтального сжатия, ориентированного с северо-запада на юго-восток в соответствии с региональным полем напряжений. Как известно, основная часть Фенноскандинавского щита находится в условиях доминирующего горизонтального сжатия с северо-запада на юго-восток, источником которого принято считать расширяющийся Срединно-Атлантический хребет. По [33], механизм очага обоих сильных землетрясений в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ и в $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ – правосторонний сдвиг вдоль направления, параллельного зоне Торнквиста-Тейссере.

Макросейсмические сведения для двух первых землетрясений 21 сентября 2004 г. в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ и $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ отмечены на весьма обширной территории, включающей Калининградскую область, прилегающие районы Белоруссии, Прибалтийских государств, северных районов Польши и юга Финляндии. Описанию макросейсмического эффекта от этих землетрясений посвящено немало публикаций [7–10, 12, 13, 16–21, 24–34]. Однако в большинстве из них отсутствуют списки населенных пунктов с указанием интенсивности сотрясений I .

По материалам работ [24–31], опубликованных в [44], для землетрясений 21 сентября 2004 г. в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ и $13^{\text{h}}32^{\text{m}}$ авторами наст. ст. составлены сводные таблицы (табл. 11, 12) с указанием балльности в конкретных пунктах по двум макросейсмическим шкалам: шкале сейсмической интенсивности MSK-64 [45] и Европейской макросейсмической шкале EMS-98 [46]. Поскольку для большинства пунктов в названных выше работах не приведены расстояния от макросейсмического эпицентра, они были вычислены по координатам соответствующих пунктов и эпицентров и добавлены в таблицы (табл. 11, 12). На их основе построены карты пунктов-баллов на географической карте (рис. 14 и 15). Затем на эти карты перенесены по координатам изосейсты с «генерализованной карты интенсивности сотрясений», заимствованные из работ [13, 24], в которых использована шкала EMS-98.

Таблица 11. Сводные макросейсмические данные из [44] о землетрясении 21 сентября 2004 г. в $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ с $M_w=4.6$ [1]

| № | Пункт | Δ , км | Источник | I , балл по шкале | | Страна | № | Пункт | Δ , км | Источник | I , балл по шкале | | Страна |
|-------------------|---------------|---------------|----------|---------------------|-------------|--------|------------------|--------------|---------------|----------|---------------------|-------------|--------|
| | | | | EMS-98 [46] | MSK-64 [45] | | | | | | EMS-98 [46] | MSK-64 [45] | |
| 6 баллов | | | | | | | 9 | Дворики | | [25] | 4 | 4.5 | Р |
| 1 | Светлогорск | 19 | [25] | 5–6 | 6 | Р | 4 балла | | | | | | |
| 2 | Янтарный | 25 | [25] | 6 | 6 | Р | 10 | Холмогоровка | 7 | [25] | 4 | 4 | Р |
| 5–6 баллов | | | | | | | 11 | Лесной | | [25] | 4 | 4 | Р |
| 3 | Кумачево | 7 | [25] | 5 | 5.5 | Р | 12 | Зеленоградск | 23 | [25] | 3–4 | 3–4 | Р |
| 4 | Красноторовка | 21 | [25] | 5 | 4–5.5 | Р | 13 | Рыбачий | 55 | [25] | 4 | 4 | Р |
| 5 баллов | | | | | | | 14 | Гдыня | 117 | [26] | 4 | | П |
| 5 | Калининград | 15 | [25] | | 5 | Р | 3–4 балла | | | | | | |
| 6 | Приморье | 19 | [25] | 5 | (5) | Р | 15 | Бранево | 53 | [26] | 3–4 | | П |
| 4–5 баллов | | | | | | | 16 | Йелгава | 299 | [28] | 3–4 | | ЛА |
| 7 | Колосовка | 2 | [25] | 4 | 4.5 | Р | 3 балла | | | | | | |
| 8 | Сувалки | 188 | [26] | 4–5 | | П | 17 | Алетус | | [27] | 3 | | ЛИ |
| | | | | | | | 18 | Лиепайя | 199 | [28] | 3 | | ЛА |

| № | Пункт | Δ, км | Источ- ник | I _i , балл по шкале | | Страна | № | Пункт | Δ, км | Источ- ник | I _i , балл по шкале | | Страна |
|----|----------------|----------|---------------|-----------------------------------|--------|--------|----|---------------------|----------|---------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | EMS-98 | MSK-64 | | | | | | EMS-98 | MSK-64 | |
| | | | | [46] | [45] | | | | | | [46] | [45] | |
| 19 | Морское | | [25] | 3 | 3 | Р | 33 | Воложин | 438 | [29] | 2 | Б | |
| 20 | Сапоцкин | 258 | [29] | | 3 | Б | 32 | Молодечно | 455 | [29] | 2 | Б | |
| 21 | Гродно | 265 | [29] | | 3 | Б | 33 | Минск | 475 | [29] | 2 | Б | |
| 22 | Красносельский | 300 | [29] | | 3 | Б | 34 | Пярну | 477 | [30] | 2 | Э | |
| 23 | Острина | 310 | [29] | | 3 | Б | 35 | Валга | 487 | [30] | 2 | Э | |
| 24 | Вороново | 335 | [29] | | 3 | Б | 36 | Тарту | 561 | [30] | 2 | Э | |
| 25 | Радунь | 360 | [29] | | 3 | Б | 37 | Таллинн | 583 | [30] | 2 | Э | |
| 26 | Лида | 363 | [29] | | 3 | Б | | <u>Не ощущалось</u> | | | | | |
| 27 | Ошмяны | 365 | [29] | | 3 | Б | 38 | Хаапсалу | 504 | [30] | | Э | |
| 28 | Ивьё | 390 | [29] | | 3 | Б | 39 | Вильянди | 514 | [30] | | Э | |
| | <u>2 балла</u> | | | | | | 40 | Вору | 537 | [30] | | Э | |
| 29 | Рига | 339 | [28] | 2 | | ЛА | 41 | Раквере | 626 | [30] | | Э | |
| 30 | Новогрудок | 397 | [29] | | 2 | Б | 42 | Йохви | 661 | [30] | | Э | |
| 31 | Курсааре | 407 | [30] | 2 | | Э | 43 | Санкт-Петербург | 830 | [30] | | Р | |
| 32 | Островец | 425 | [29] | | 2 | Б | | | | | | | |

Примечание. В последнем столбце табл. 11 и 12 буквами обозначены следующие страны: Р – Россия; П – Польша; ЛА – Латвия; ЛИ – Литва; Б – Беларусь; Э – Эстония; Ш – Швеция.

Таблица 12. Сводные макросейсмические данные из [45] о землетрясении 21 сентября 2004 г. в 13^h32^m с $M_w=4.8$ [1]

| № | Пункт | Δ, км | Источ- ник | I _i , балл по шкале | | Страна | № | Пункт | Δ, км | Источ- ник | I _i , балл по шкале | | Страна |
|----|-------------------|----------|---------------|-----------------------------------|--------|--------|----|------------------|----------|---------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | EMS-98 | MSK-64 | | | | | | EMS-98 | MSK-64 | |
| | | | | [46] | [45] | | | | | | [46] | [45] | |
| | <u>6 баллов</u> | | | | | | 22 | Гдыня | 117 | [26] | 4 | П | |
| 1 | Калининград | 15 | [25] | | 7–8 | Р | 23 | П-ов Хел | | [26] | 4 | П | |
| 2 | Светлогорск | 20 | [25] | 5–6 | 5.5–6 | Р | 24 | Алитус | 246 | [27] | 4 | ЛИ | |
| 3 | Приморье | 20 | [25] | 6 | 6 | Р | 25 | Плебанишки | 255 | [29] | | 4 | |
| 4 | Янтарный | 25 | [25] | 6 | 6 | Р | 26 | Перелом | 255 | [29] | | 4 | |
| | <u>5–6 баллов</u> | | | | | | 27 | Гродно | 265 | [29] | | 4 | |
| 5 | Кумачево | 8 | [25] | 5–6 | 5.5 | Р | 28 | Красносельский | 300 | [29] | | 4 | |
| 6 | Красноторовка | 22 | [25] | 5–6 | 5.5 | Р | 29 | Йелгава | 300 | [28] | 4 | ЛА | |
| 7 | Дворики | | [25] | 5 | 5.5 | Р | 30 | Мосты | 305 | [29] | | 4 | |
| | <u>5 баллов</u> | | | | | | 31 | Россь | 310 | [29] | | 4 | |
| 8 | Колосовка | 3 | [25] | 5 | 5 | Р | 32 | Вороново | 335 | [29] | | 4 | |
| 9 | Холмогоровка | 7 | [25] | 5 | 5 | Р | 33 | Лида | 363 | [29] | | 4 | |
| 10 | Зеленоградск | 24 | [25] | 5 | 5 | Р | 34 | Ошмяны | 365 | [29] | | 4 | |
| 11 | Лесной | | [25] | 5 | 5 | Р | 35 | Сморгонь | 395 | [29] | | 4 | |
| 12 | Бранево | 52 | [26] | 5 | | П | 36 | Новогрудок | 397 | [29] | | 4 | |
| 13 | Владиславово | | [26] | 5 | | П | 37 | Нарочь | 410 | [29] | | 4 | |
| 14 | Рыбачий | 55 | [25] | 4–5 | 5 | Р | 38 | Мядель | 415 | [29] | | 4 | |
| 15 | Ландскрона | 487 | [31] | | 5 | Ш | 39 | Браслав | 415 | [29] | | 4 | |
| | <u>4–5 баллов</u> | | | | | | 40 | Поставы | 420 | [29] | | 4 | |
| 16 | Клайпеда | 117 | [27] | 4–5 | | ЛИ | 41 | Островец | 425 | [29] | | 4 | |
| 17 | Паланга | 137 | [27] | 4–5 | | ЛИ | 42 | Вилейка | 425 | [29] | | 4 | |
| 18 | Кретинга | 137 | [27] | 4–5 | | ЛИ | 43 | Воложин | 438 | [29] | | 4 | |
| 19 | Сувалки | 187 | [26] | 4–5 | | П | 44 | Молодечно | 455 | [29] | | 4 | |
| 20 | Лиепайя | 199 | [28] | 4–5 | | ЛА | 45 | Аалборг | 693 | [24] | 4 | Д | |
| | <u>4 балла</u> | | | | | | | <u>3–4 балла</u> | | | | | |
| 21 | Гданьск | 116 | [26] | 4 | | П | 46 | Шауляй | 231 | [27] | 3–4 | ЛИ | |
| | | | | | | | 47 | Каунас | 234 | [27] | 3–4 | ЛИ | |
| | | | | | | | 48 | Рига | 339 | [28] | 3–4 | ЛА | |

| № | Пункт | Δ, км | Источ-ник | I, балл по шкале | | Страна | № | Пункт | Δ, км | Источ-ник | I, балл по шкале | | Страна |
|----|----------------|-------|-----------|------------------|-------------|--------|----|---------------------|-------|-----------|------------------|-------------|--------|
| | | | | EMS-98 [46] | MSK-64 [45] | | | | | | EMS-98 [46] | MSK-64 [45] | |
| 49 | Куресааре | 408 | [30] | | 3-4 | Э | 69 | Копыль | 485 | [29] | | 3 | Б |
| 50 | Пярну | 478 | [30] | | 3-4 | Э | 70 | Валга | 488 | [30] | 3 | | Э |
| 51 | Копенгаген | 499 | [24] | 3-4 | | Д | 71 | Хаапсалу | 505 | [30] | 3 | | Э |
| 52 | Стокгольм | 524 | [24] | 3-4 | | Ш | 72 | Вильянди | 515 | [30] | 3 | | Э |
| 53 | Тарту | 561 | [30] | | 3-4 | Э | 73 | Таллинн | 584 | [30] | 3 | | Э |
| | <u>3 балла</u> | | | | | | | 74 | Осло | 807 | [24] | 3 | Н |
| 54 | Паневежис | 279 | [27] | 3 | | ЛИ | | <u>2-3 балла</u> | | | | | |
| 55 | Вильнюс | 321 | [27] | 3 | | ЛИ | 75 | Санкт-Петербург | 831 | [30] | | 2-3 | Р |
| 56 | Волковыск | 325 | [29] | | 3 | Б | | <u>2 балла</u> | | | | | |
| 57 | Слоним | 385 | [29] | | 3 | Б | 46 | Береза | 395 | [29] | | 2 | Б |
| 58 | Ивацевичи | 405 | [29] | | 3 | Б | 77 | Ганцевичи | 455 | [29] | | 2 | Б |
| 59 | Барановичи | 415 | [29] | | 3 | Б | 78 | Пинск | 480 | [29] | | 2 | Б |
| 60 | Столбцы | 440 | [29] | | 3 | Б | 79 | Ивенак | 489 | [31] | 2 | | Г |
| 61 | Несвиж | 450 | [29] | | 3 | Б | 80 | Слуцк | 500 | [29] | | 2 | Б |
| 62 | Щарковщина | 455 | [29] | | 3 | Б | 81 | Вору | 538 | [30] | 2 | | Э |
| 63 | Плещеницы | 460 | [29] | | 3 | Б | 82 | Шверин | 590 | [31] | 2 | | Г |
| 64 | Клёцк | 460 | [29] | | 3 | Б | 83 | Раквере | 627 | [30] | 2 | | Э |
| 65 | Дзержинск | 460 | [29] | | 3 | Б | 84 | Хельсинки | 662 | [24] | 2 | | Ф |
| 66 | Минск | 475 | [29] | | 3 | Б | | <u>Не ощущалось</u> | | | | | |
| 67 | Глубокое | 475 | [29] | | 3 | Б | 85 | Йохви | 662 | [30] | 2 | | Э |
| 68 | Логойск | 485 | [29] | | 3 | Б | | | | | | | |

Примечание: В графе «страна» использованы условные обозначения: Р-Россия, Б- Беларусь, П-Польша, ЛИ – Литва, ЛА – Латвия, Э – Эстония, Ф – Финляндия, Г – Германия.

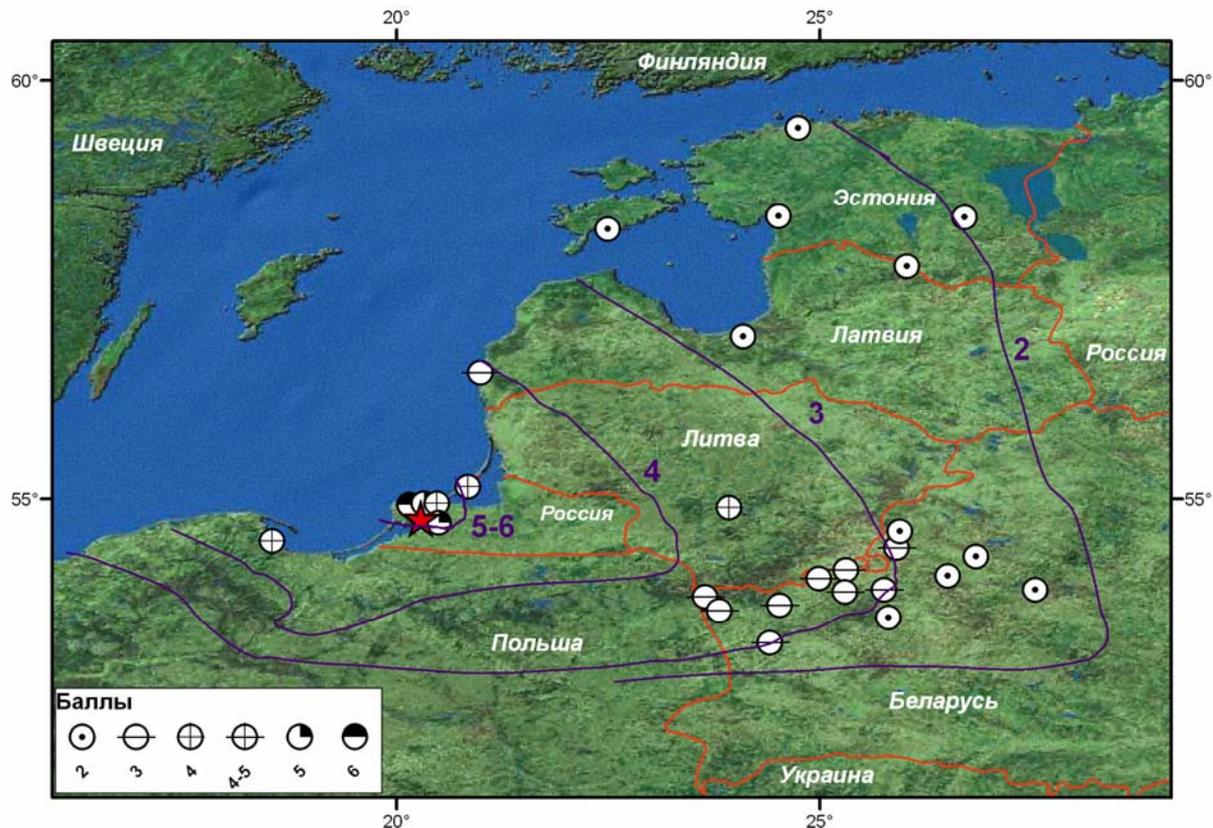


Рис. 15. Карта изосейст Калининградского-I землетрясения 21 сентября 2004 г. в 11^h05^m (изосейсты скопированы из [24])

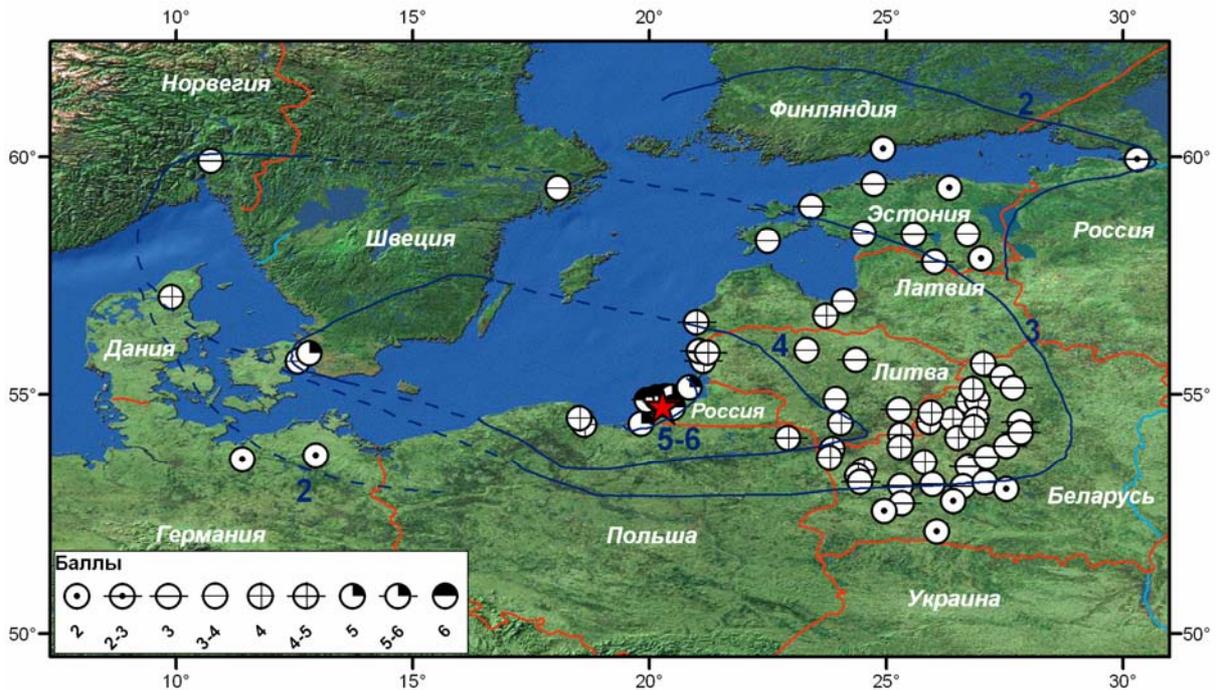


Рис. 16. Карта изосейст Калининградского-II землетрясения 21 сентября 2004 г. в 13^h32^m (изосейсты скопированы из [24])

В тектоническом плане Калининградские землетрясения произошли в пределах Балтийской синеклизы, являющейся одной из крупнейших структур второго порядка западной части Восточно-Европейской платформы [47, 48]. Согласно структурно-тектонической схеме Балтийской синеклизы [48,49], построенной по комплексу геолого-геофизических данных о современной структуре нижнепалеозойских отложений, внутри синеклизы и в ее окружении в качестве основных выделяют структурно-тектонические элементы, изображенные на рис. 17. Эти элементы разграничены разноранговыми (региональными и локальными) дизъюнктивами.

Таким образом, если руководствоваться положением эпицентров, полученных в ГС РАН, то землетрясения произошли на границе Гремячинского вала и Самбийского прогиба – структур Балтийской синеклизы Восточно-Европейской платформы.

Исторические сведения о сейсмичности исследуемой очаговой зоны немногочисленны. Ранее наиболее значительное землетрясение в этой зоне произошло 25.10.1976 г. с $M=4.7$ и интенсивностью в эпицентре $I_0=7$ баллов на Эстонском побережье около о. Осмуссаар (рис. 18), немного севернее Калининградских землетрясений 21.09.2004 г. Согласно [50, 51], оно вызвало на обширной территории Прибалтики и Финляндии сотрясения с интенсивностью $I=3-4$ балла. По данным А.Г. Аронова и Т.И. Ароновой [52], опубликовавших один из последних вариантов «Каталога исторических и инструментально зарегистрированных ощутимых землетрясений Белорусско-Прибалтийского региона», т.е. западной части Восточно-Европейской платформы, ранее наиболее значительные проявления ощутимых землетрясений (6–7, 7 баллов) были известны на территории государств Латвии и Эстонии. Положение эпицентров наиболее значительных землетрясений по данным [52] показано на рис. 18 совместно с эпицентрами Калининградских землетрясений 2004 г.

За последние годы данные о сейсмичности территории Калининградской области, имеющиеся в инструментальных каталогах, показали, что события, регистрируемые в прибрежной зоне, ближайшей к району события, скорее можно отнести к взрывам. Они имели магнитуды $m_b=3.4-3.7$ и происходили группами в определенные дни месяцев и в часы суток рабочего времени. В бюллетенях ISC за 1999–2002 гг. можно встретить события, близкие по координатам к очаговой зоне Калининградских землетрясений, отнесенных в HEL (Институт сейсмологии Хельсинского университета, Финляндия) к взрывам. За последние 30 лет только одно событие из области, ближайшей к эпицентральной зоне Калининградских землетрясений, можно, по-видимому, отнести к землетрясениям. Оно произошло 18.12.2002 г. примерно в 150 км северо-западнее зоны Калининградских землетрясений, в акватории Балтийского моря (рис 18) и имело $m_b=4.4$.

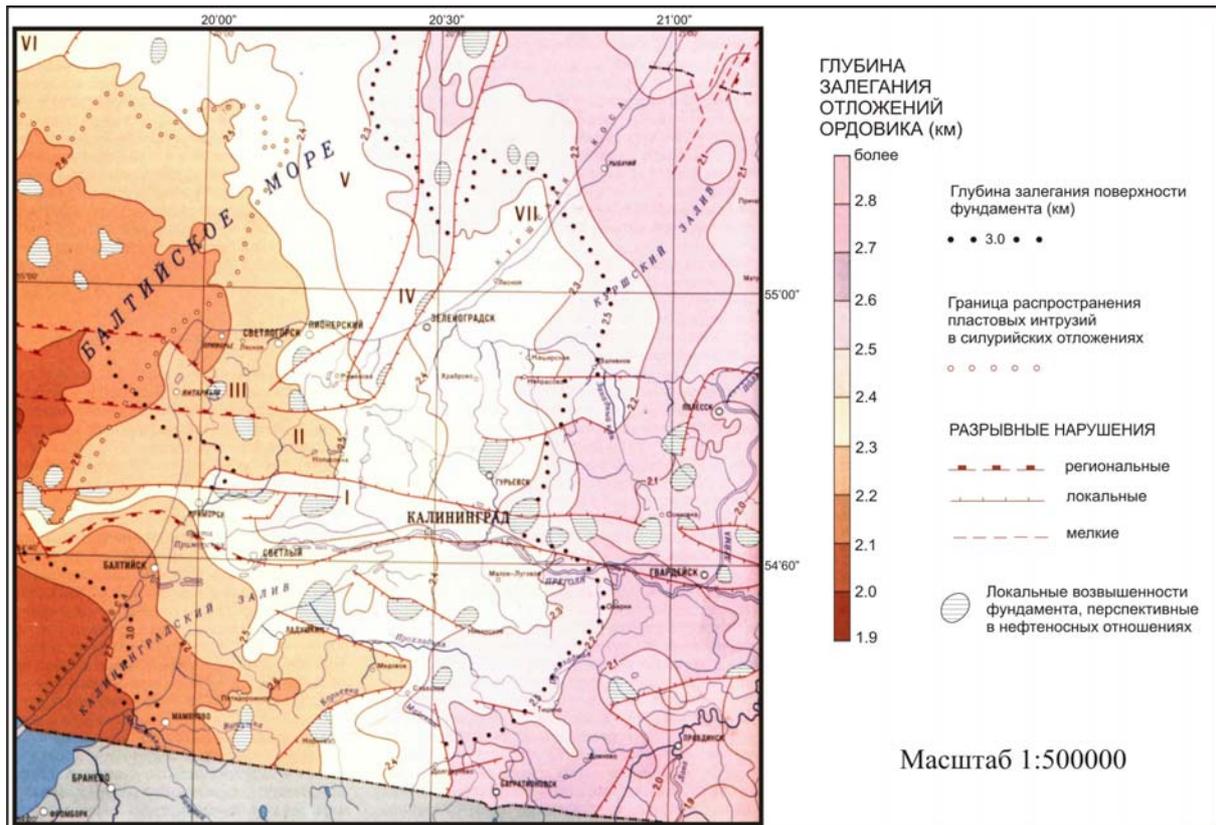


Рис. 17. Структурно-тектоническая схема:

I – Калининградский вал, II – Самбийский прогиб, III – Гремячинский вал, IV – Западно-Нидский вал, V – Северо-Самбийский прогиб, VI – Западно-Нидский прогиб, VII – Прегольская зона разломов [49] (цветом, согласно легенде, показана глубина залегания отложений ордовика в км; звездами показано положение двух Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 г. по данным ГС РАН)

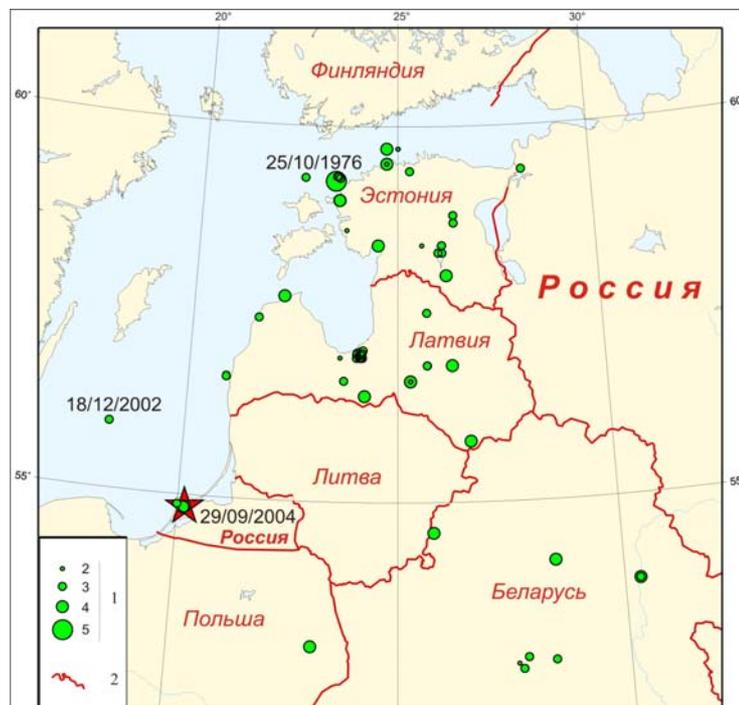


Рис. 18. Карта эпицентров землетрясений в пределах зоны осязимости Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 г. по [52]

1 – магнитуда землетрясения, 2 – государственная граница.

В [53] делается вывод, что только современный (после 2000 г.) уровень развития сейсмических сетей позволяет получить достаточно надежные данные для количественного анализа сейсмического режима Южной Прибалтики. А сведения об исторической сейсмичности настолько не полны, что могут быть использованы лишь для качественного анализа.

Современное развитие сейсмической сети в Калининградской области. В наблюдательной сейсмологии традиционно за сильным землетрясением следует открытие в этом районе сейсмической станции, а то и целой сети станций. Так было, например, после Ялтинского землетрясения 1927 г., после которого начала создаваться Крымская сеть станций. После Дагестанского землетрясения 1970 г. получила развитие сеть сейсмических станций в Дагестане и т. д. Не стала исключением и Калининградская область. Произошедшие Калининградские землетрясения имели резонанс и в развитии сети сейсмических наблюдений Геофизической службы РАН в этой, ранее считающейся практически асейсмичной области. Идею открытия здесь стационарной станции поддержала администрация области, региональный орган МЧС и ученые Калининграда. Следует заметить, что предварительное ознакомление с характером грунтов и уровнем сейсмических шумов не обнадеживало в плане нахождения на этой территории относительно «спокойного», т.е. с низким уровнем микросейсм, места. Однако 15 декабря 2005 г. ГС РАН, совместно с Калининградским университетом, было установлено в экспериментальном режиме широкополосное цифровое оборудование на территории учебной базы Калининградского университета в пригородах Светлогорска, примерно в 50 м от побережья. Оборудование размещено в подвальном помещении одного из строений учебной базы.

Новая станция «Калининград» (KLNР) ($\varphi=52.9526^\circ$, N ; $\lambda=20.1846^\circ$, E ; $h_y=6$ м) была открыта 15 декабря 2005 г. и оснащена комплектом отечественных современных широкополосных сейсмометров СМЗ-ОС, обеспечивающих регистрацию сейсмических волн в частотном диапазоне $f=0.02-10$ Гц. Регистрация сейсмических колебаний производится на магнитный носитель в цифровом виде. Станция имеет динамический диапазон регистрации более 120 дБ, что позволяет записывать колебания почвы при землетрясениях с магнитудами от $M=1-2$ до $M=7-8$ в зависимости от установленной чувствительности.

Записи этой станции находятся в архиве ГС РАН. Пример записи одного события типа «возможно взрыв» в 70 км от станции «Калининград» (в соседней с Калининградской областью Польше), произведенный 2 мая 2007 г. в 07^h08^m с $m_b=3.7$, дан на рис. 19.

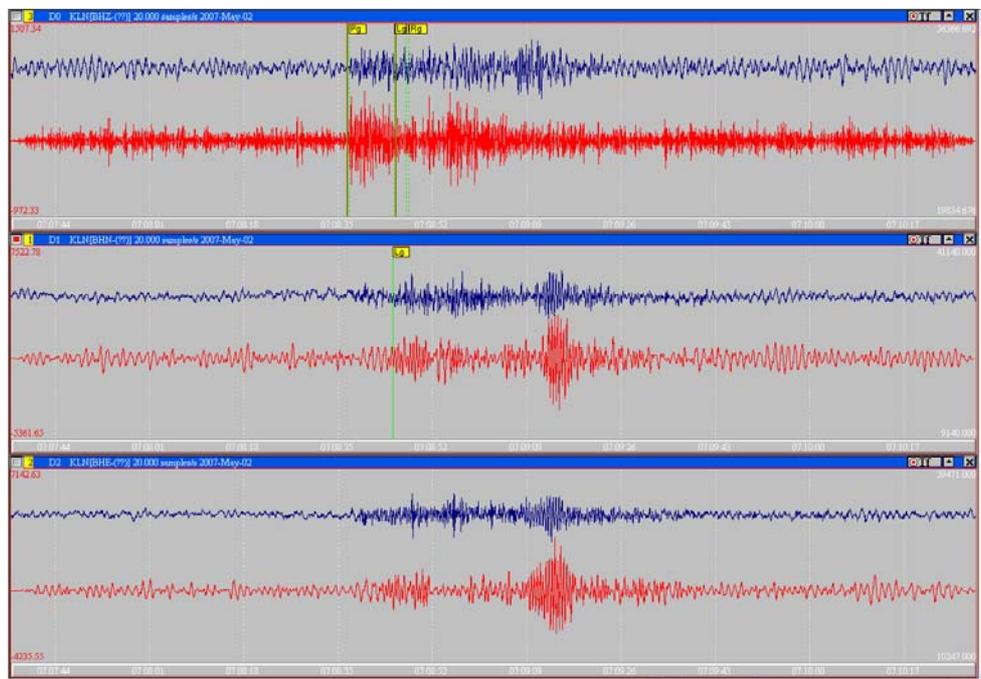


Рис. 19. Трехкомпонентная запись на станции «Калининград» сейсмического события 27 мая 2007 г. в 07^h08^m, произошедшего на территории Польши

Синим цветом показана исходная запись, красным – фильтрованная (верхняя запись на компоненте bhz в полосе частот $f=4-12$ Гц; в среднем и нижнем окне – горизонтальные компоненты bhe, bhx в полосе частот $f=0.8-4.5$ Гц).

Л и т е р а т у р а

1. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2004.** – Berkshire: ISC, 2006–2007.
2. **Маловичко А.А., Мехрюшев Д.Ю., Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Чепкунас Л.С.** О Калининградских землетрясениях 21 сентября 2004 г. и развитии сейсмического мониторинга в Калининградской области // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Первой Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2–6 октября 2006 г.– Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 89–97.
3. **Уломов В.И., Шумилина Л.С.** Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах. – М.: ИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
4. **Wiejacz P.** Preliminary investigation of the September 21, 2004 earthquakes of Kaliningrad Region, Russia // Acta Geophys. Pol. – 2004. – **52**. – P. 425–441.
5. **Jõeleht A.** (ed.) The Kaliningrad earthquake September 21, 2004 // Workshop materials. – Tartu: University of Tartu, 2005. – 52 p.
6. **Wiejacz P. and Dębski W.** Kaliningrad earthquakes of September 21, 2004 // The Kaliningrad earthquake September 21, 2004 workshop materials. – Tartu: Institute of Geology, University of Tartu, 2005. – P. 44–52.
7. **Gregersen S., Mäntyniemi P., Nikonov A.A., Aptikaev F.F., Aleshin A.S., Assinovskaya B.A., Pogrebchenko V.V., Guterch B., Nikulin V., Pacesa A., Wahlström R., Schweitzer J., Kulhánek O., Holmquist C., Heinloo O., Puura V.** Felt reports at large distances of the earthquakes in non-seismic Kaliningrad in West Russia // The Kaliningrad earthquake September 21, 2004 workshop materials. – Tartu: University of Tartu, 2005. – P. 11–13.
8. **Никонов А.А.** По следам Калининградского землетрясения // Природа. – 2005. – № 3. – С. 47–53.
9. **Aptikaev F.F., Nikonov A.A., Alyoshin A.S., Assinovskaya B.A., Pogrebchenko V.V., Erteleva O.O.** Kaliningrad earthquake of September 21, 2004, Damage // Proc. of 21 ECCE, T. 1. – Skopje-Ochrid: 2005.
10. **Никонов А.А., Аптикаев Ф.Ф., Алешин А.С., Ассиновская Б.А., Погребченко В.В.** Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года как модельное для Восточно-Европейской платформы // Геофизика XXI века: 2005. Доклады Седьмых чтений имени В.В. Федынского (3–5 марта 2005 г.). – М.: Научный мир, 2006. – С. 282–289.
11. **Никонов А.А.** О механизме очага Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. // Доклады РАН. – 2006. – **407**. – № 1. – С. 317–320.
12. **Никонов А.А.** Калининградское платформенное землетрясение 2004 г. – вопросы, решаемые и решения, ожидающие // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII Международной конференции, 18–23 сентября 2006 г. Т. 2. – Воронеж: ВГУ, 2006. – С. 21–22.
13. **Вьезач П., Никонов А.А., Грегерсен С., Аптикаев Ф.Ф., Алешин А.С., Погребченко В.В., Дебски В., Ассиновская Б.А., Гутерх Б., Пачеса А., Мантиниеми П., Никулин В.Г., Пуура В., Аронов А.Г., Аронова Т.И., Грюнталь Г., Хьюсби Е.С., Шляупа С.** Необычные землетрясения в Калининградской области России 21 сентября 2004 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Первой Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2–6 октября 2006 г.– Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 43–48.
14. **Б.А. Ассиновская, В.Л. Горшков, М.К. Овсов** О сейсмичности, сеймотектонике и сейсмической опасности в регионе Восточной Балтики // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Первой Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2–6 октября 2006 г.– Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 32–34.
15. **Габсатарова И.П., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С.** Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года / Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере. – Сыктывкар: Геопринт, 2005. – С. 58–60.
16. **Ассиновская Б.А., Гутерх Б., Пачеса А., Мантиниеми П., Никулин В.Г., Пуура В., Аронов А.Г., Аронова Т.И., Грюнталь Г., Хьюсби Е.С., Шляупа С.** Необычные землетрясения в Калининградской области России 21 сентября 2004 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Первой Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2–6 октября 2006 г.– Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 43–48.

17. **Aleshin A.S., Aptikaev F.F., Nikonov A.A., Pogrechenko V.V.** Discrepancy in location of macroseismically and instrumentally derived epicenters of Kaliningrad, September 21, 2004, earthquake – factual data and possible explanations // International workshop: Seismicity and seismological observations of Baltic Sea region and adjacent territories. Vilnius, 10–12 September, 2007. – Vilnius: Lithuania, 2007. – P. 5–7.
18. **Nikonov A.A.** Approach to parametrization of tectonic earthquakes within the Kaliningrad district, Russia, by macroseismic data // International workshop: Seismicity and seismological observations of Baltic Sea region and adjacent territories. Vilnius, 10–12 September, 2007. – Vilnius: Lithuania, 2007. – P. 57–59.
19. **Nikonov A.A., Pacesa A., Aptikaev F.F., Nikulin V.G., Puura V., Aronov A.G.** Kaliningrad, September 21, 2004, earthquake in the Eastern Baltic area – basic macroseismic maps for three main shocks // International workshop: Seismicity and seismological observations of Baltic Sea region and adjacent territories. Vilnius, 10–12 September, 2007. – Vilnius: Lithuania, 2007. – P. 60–62.
20. **Gregersen S., Wiejacz P., Debski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mäntyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., Grünthal G., Husebye E.S., Sliupa S.** The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004 // Phys. Earth Planet. Inter. – 2007. – **164**. – P. 63–74.
21. **Алешин А.С., Никонов А.А., Аптикаев Ф.Ф., Погребченко В.В.** О причинах расхождений в определении местоположения очага Калининградского землетрясения 24.09.2004 г. // Тезисы докладов Десятых чтений им. В.В. Федынского (27–29 февраля, 2008). – М.: Геон, 2008. – С. 6.
22. **Аронов А.Г., Сероглазов Р.Р., Аронов Г.А., Кулич О.Н.** Локализация эпицентров Калининградских землетрясений по данным сейсмической сети в ближней зоне // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 51–58.
23. **Маловичко А.А., Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Чепкунас Л.С., Бабкова Е.А.** Параметры Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 г. по результатам расширенного анализа инструментальных данных // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 58–68.
24. **Грегерсен С.** Региональное макросейсмическое поле // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 84–88.
25. **Ассиновская Б.А.** Северо-Западная часть Калининградской области. Куршская коса // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 88–97.
26. **Гутерх Б.** Макросейсмические данные о Калининградских землетрясениях, зарегистрированных в Польше 21 сентября 2004 года // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 97–99.
27. **Пачеса А.** Макросейсмическое исследование Калининградских землетрясений в Литве // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 99–104.
28. **Никулин В.Г.** Калининградские землетрясения 2004 года и их проявления на территории Латвии // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 104–109.
29. **Аронов А.Г., Сероглазов Р.Р., Аронова Т.И.** Макросейсмические эффекты на территории Беларуси от Калининградских землетрясений 21 сентября 2004 года // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 109–115.
30. **Ассиновская Б.А.** Проявление землетрясения на северо-востоке Балтийского региона (Эстония, Санкт-Петербург) // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 115–121.
31. **Мäntyniemi П., Грегерсен С.** Макросейсмические эффекты на территориях Скандинавии и Германии // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 121–123.
32. **Алешин А.С., Аптикаев Ф.Ф., Никонов А.А., Погребченко В.В.** О возможных причинах расхождений в определении местоположения эпицентров главных толчков Калининградского землетрясения 21.09.2004 г. // Геофизические исследования, ИФЗ РАН. – 2009. – **10**. – № 3. – С. 59–76.
33. **Вьежач П., Дебски В., Домански В., Кацор Д.** Изучение Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года инструментальными методами // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 45–50.
34. **Ассиновская Б.А.** Сравнительный анализ локализации по макросейсмическим и инструментальным данным некоторых землетрясений $M_w \sim 5$ Европы и Северной Америки // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 69–74.

35. **Kennet B.L.N. (ed.)** IASPEI-91 Seismological Tables // Research School of Earth Sciences Australian National University. – 1991.
36. **John Coyne, Karen Clark, Stephen Lloyd.** IDC Documentations Geotool Software User Tutorial. – 16 July 2003. – P. 59.
37. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2004 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2004–2005.
38. **Grünthal G., Stromeyer D., Wylegalla K., Kind R., Wahlström R., Yuan X., Bock G.** The M_w 3.1–4.7 earthquakes in the southern Baltic Sea and adjacent areas in 2000, 2001 and 2004 // J. Seismology. – 2008. – 12. – N 3. – P. 413–429.
39. **Кириченко В.В., Краев Ю.А.** Использование подземных ядерных взрывов, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне, для сейсмической калибровки центральной части Северной Евразии // Геофизика и проблемы нераспространения. Вып. 2. – Курчатова: НЯЦ РК, 2001. – С. 69–76.
40. **Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.** Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophys J. Int. – 1995. – 122. – P. 108–124.
41. **Желанкина Т.С., Кейлис-Борок В.И., Писаренко В.Ф., Пятацкий-Шапиро И.И.** Определение механизмов землетрясений на цифровой электронной вычислительной машине // Алгоритмы интерпретации сейсмических данных. (Вычисл. сейсмология; Вып. 5). – М.: Наука, 1971. – С. 3–27.
42. **Ландер А.В.** Описание и инструкция для пользователя комплекса программ FA (расчет и графическое представление механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн). – М.: Фонды автора, 2006. – 27 с.
43. **Ассинновская Б.А., Овсов М.К.** Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. Природа сейсмогенеза на западной окраине Восточно-Европейской платформы // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 25–33.
44. **Ассинновская Б.А., Кофф Г.Л., Котлов В.Ф. (авторы-составители).** Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года. (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, АНО НИИЦ «Геориск» РАЕН, Институт водных проблем РАЕН, РГУ им. Иммануила Канта.). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. – 170 с.
45. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
46. **Grunthal G. (ed.)**. European Macroseismic Scale 1998 // Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie (Luxembourg). – 1998. – 15.
47. **Щукин Ю.К., Шаров Н.В., Ассинновская Б.А.** Глубинное строение земной коры. Геодинамическая модель // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 25–33.
48. **Краснов Е.В.** Геологическое строение и развитие Балтийской синеклизы // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 11–19.
49. **Орленок В.В., Ефимов А.Н.** Тектоническая схема Балтийской синеклизы // Географический атлас Калининградской области. – Калининград: КГУ, ЦНИТ, 2002. – 39 с.
50. **Ананьин И.В., Булин Н.К., Клааманн Э.Р.** Осмусаарское (Эстонское) землетрясение 25 октября 1976 г. // Землетрясение в СССР в 1976 году. – М.: Наука, 1980. – С. 91–96.
51. **Никонов А.А.** Осмусаарское землетрясение 25 октября 1976 г.: макросейсмика, сейсмотектоника, механизм очага // Физика Земли. – 2002. – № 8. – С. 690–703.
52. **Аронов А.Г., Аронова Т.И.** Сейсмотектонические критерии долгосрочного прогноза Калининградских землетрясений // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 136–150.
53. **Лутиков А.И., Юнга С.Л., Кофф Г.Л., Гутерх Б.** Предпосылки уточнения исходной сейсмичности и детального сейсмического районирования Южной Прибалтики // Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 г. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. – С. 79–83.