

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ в 2016–2017 гг.

В.Г. Никулин

*Латвийский центр окружающей среды, геологии и метеорологии, Рига, Латвия,
valerijs.nikulins@lvgmc.lv, seismolat@gmail.com*

Аннотация. Представлена информация о сейсмическом мониторинге и его результатах в Восточно-Балтийском регионе за 2016–2017 гг. В течение указанного периода времени произошло несколько тектонических землетрясений, эпицентры которых расположены на севере и северо-западе Эстонии и в районе озера Вьртсъярв. Территория Эстонии и прилегающая акватория Балтийского моря по-прежнему являются наиболее сейсмоактивными частями Восточно-Балтийского региона. Обращает на себя внимание унаследованный характер сейсмичности, т.е. в районах современных землетрясений уже происходили землетрясения до инструментального периода. Другой особенностью нескольких землетрясений Восточно-Балтийского региона является приуроченность их к метеоритным кратерам, которые чаще всего в Восточно-Балтийском регионе констатированы именно в Эстонии и вблизи нее, в Балтийском море. По-прежнему основной объем сейсмической информации связан с техногенными взрывами в промышленных карьерах и в акватории Балтийского моря. Идентификация землетрясений небольших магнитуд остается актуальной проблемой.

Ключевые слова: Восточно-Балтийский регион, BAVSEN, Восточно-Европейская платформа, техногенные взрывы.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.19 **EDN:** ВУЈТКС

Для цитирования: Никулин В.Г. Сейсмичность Восточной Балтики в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 213–221. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.19. EDN: ВУЈТКС

Введение. В настоящем выпуске журнала «Землетрясения Северной Евразии» впервые представлен обзор сейсмичности территории «Восточная Балтика», которая ранее эпизодически рассматривалась в рамках обзоров по российской части Восточно-Европейской платформы и прилегающим территориям [1], а в данном выпуске представлена как часть (XV) региона «Восточно-Европейская платформа» (XV). Далее в статье эта территория упоминается как «Восточно-Балтийский регион», или «ВБР». Географически ВБР ($\varphi=53.9^{\circ}\text{N}$ – 59.7°N ; $\lambda=19.4^{\circ}\text{E}$ – 29.5°E), площадью около 396 тыс. км², охватывает территории Эстонии, Литвы, Калининградской области России, акватории Балтийского моря и Латвии, расположенной в центре ВБР.

Каковы основные предпосылки проведения сейсмического мониторинга в ВБР? Во-первых, на территории ВБР до инструментального периода (1302 – середина 60 годов XX века) и в инструментальный период происходили землетрясения с интенсивностью сотрясений в эпицентре до 6–7 баллов по шкале MSK-64. Во-вторых, геологическое строение ВБР характеризуется неблагоприятными грунтовыми условиями, что может способствовать усилению сотрясений вследствие резонансных эффектов. В-третьих, некоторые агломерации (Рига, Лиепая), объекты энергетики (Плявиньская ГЭС) и хранения углеводородов (Инчукалнское подземное хранилище газа) расположены в неблагоприятных геодинамических условиях. В-четвертых, районы действующих, строящейся АЭС, а также утилизации и захоронения радиоактивных отходов требуют комплексного контроля, включая сейсмический мониторинг. Такие объекты есть как внутри ВБР, так и вблизи него. Это действующие Белорусская и Ленинградская АЭС, временно законсервированная Балтийская АЭС, район утилизации радиоактивных отходов в Игналине (Литва), Балдоне (Латвия), демонтируемый научный реактор в Саласпилсе (Латвия), а также бывший центр обучения подводников атомных подводных лодок с двумя реакторами в Палдиски (Эстония). Кроме того, сейсмический мониторинг становится более актуальным для контроля за безопасностью трубопровода *Nord Stream*, расположенного в Балтийском море, от природных и техногенных сейсмических источников.

Геолого-тектоническая обстановка. С точки зрения геотектоники, ВБР охватывает территорию, расположенную на северо-западе древней (дорифейской) Восточно-Европейской плат-

формы (ВЕП). Северная граница ВБР расположена примерно в 1700 км от ближайшей дивергентной границы в Северной Атлантике, а южная граница ВБР расположена примерно в 1300–1500 км от конвергентной и трансформной границы в Средиземноморском регионе.

В пределах ВБР кристаллический фундамент представлен системой террейнов, геологических тел региональной протяженности, ограниченных разломами [2]. Террейны ориентированы в направлении юго-запад – северо-восток. Наиболее важные из них – Свекофенский домен (СД), Польско-Литовский террейн (ПЛТ), Средне-Литовская сутурная зона (СЛСЗ), Литовско-Белорусский террейн (ЛБТ), террейн Околово (ТО). Террейны ориентированы почти перпендикулярно к зоне Тейсейра-Торнквиста (*Teisseyre-Tornquist*), разделяющей докембрий ВЕП от фанерозойских отложений юго-западной Европы. Возраст протерозойского фундамента ВБР меняется от 1.4–1.65 до 2.0 млрд. лет. Мощность земной коры в пределах ВБР меняется от 35 до 60 км. В частности, в районе Рижского блока мощность земной коры достигает 57–59 км [3].

Основные структурные элементы осадочного чехла ВБР – Южный склон Балтийского щита, Балтийская синеклиза, Латвийская седловина, Мазурско-Белорусская антеклиза. Мощность осадочного чехла меняется с севера на юг от 150 (*Tahkuna-306*) до 2700 м (*Vladimirovo-1*) [4]. Основные комплексы осадочного чехла – Байкальский, Каледонский, Герцинский, Альпийский – дифференцированно развиты в ВБР. Верхняя часть осадочного чехла в центральной части ВБР (Латвия) представлена четвертичными отложениями (песок, гравий, морена, глина, торф, сапропель и др.) мощностью до 310 м, приуроченными к долинообразным врезам подчетвертичного рельефа [5]. В результате нескольких покровных оледенений, последующих периодов дегляциации и денудации произошел снос верхнего слоя осадочного чехла. В результате четвертичные отложения на значительной части территории ВБР расположены непосредственно на девонских отложениях.

Историческая сейсмичность и сейсмическая опасность. ВБР характеризуется очень низким уровнем сейсмичности. Согласно 8. Eurocode (Technical Committee CEN/TC, 2004), районы очень низкой сейсмичности характеризуются расчетным ускорением грунта типа А, менее 0.04 g (0.39 м/с²), или с учетом грунтового фактора – не выше, чем 0.05 g (0.49 м/с²). Сейсмическая опасность отдельных частей ВБР оценивалась в Латвии и Литве. В частности, для территории Латвии с вероятностью 10 % в течение 50 лет пиковое ускорение (*Peak Ground Acceleration* – PGA) на поверхности дочетвертичных отложений может достигать 10–13 см/с² [6]. Оценки PGA для всего ВБР показали вариации этого параметра от 0.13 g в районе Игналинской АЭС, 0.17 g на территории Латвии и в Калининградском регионе до 0.2 g в районе острова Осмуссаар (северная Эстония), с вероятностью превышения 10⁻⁴ [7].

Более высокая сейсмическая активность в ВБР приурочена к прибрежной части Балтийского моря. Здесь расположены эпицентры наиболее сильных исторических и современных землетрясений ВБР: севернее Самбийского полуострова в 1302 г., *I*=6–7 баллов [8]; в Ирбенском проливе в 1857 г., *I*=6 баллов [9]; вблизи острова Хапсалу в 1877 г., *I*=5 баллов [9]; в районе Нарва в 1881 г., *I*=6 баллов [9]; на острове Осмуссаар в 1976 г., *M*=4.7 [10]; в Калининградской области России в 2004 г., *M_w*=5.2 [11].

С точки зрения неотектонического строения (начиная с *Rupelian* (Oligocene-Quaternary), 35–37 млн. лет), в пределах Балтийской синеклизы, в акватории Балтийского моря, расположена система грабенов, состоящая из Гданьской депрессии на западе, Восточно-Готландского грабена в центре и Финского грабена на востоке [12]. Суммарные амплитуды вертикальных, неотектонических движений достигали 100–200 м. Юго-восточный край Гданьского грабена и восточный край Восточно-Готландского грабена характеризуются повышенным гори-зонтальным градиентом суммарных амплитуд неотектонических движений, 3.6 и 3.7 м/км соответственно [13]. Именно к этим участкам приурочены очаги землетрясений в 1976 г. на о. Осмуссаар (Эстония) и в 2004 г. в Калининградской области России.

Сеть сейсмических станций и аппаратурно-методический комплекс. На территории ВБР расположено восемь сейсмических станций, которые участвуют в работе международной сети сейсмического мониторинга *GEOFON* с центром в GFZ Potsdam. Для локации сейсмических событий в пределах ВБР используются также ближайшие к ВБР станции национальных сейсмических сетей Финляндии и Дании. Таким образом, всего 11 сейсмических станций могут быть использованы в рамках так называемой Балтийской виртуальной сейсмической сети *BAVSEN* (*Baltic Virtual Seismic Network*) (рис. 1).

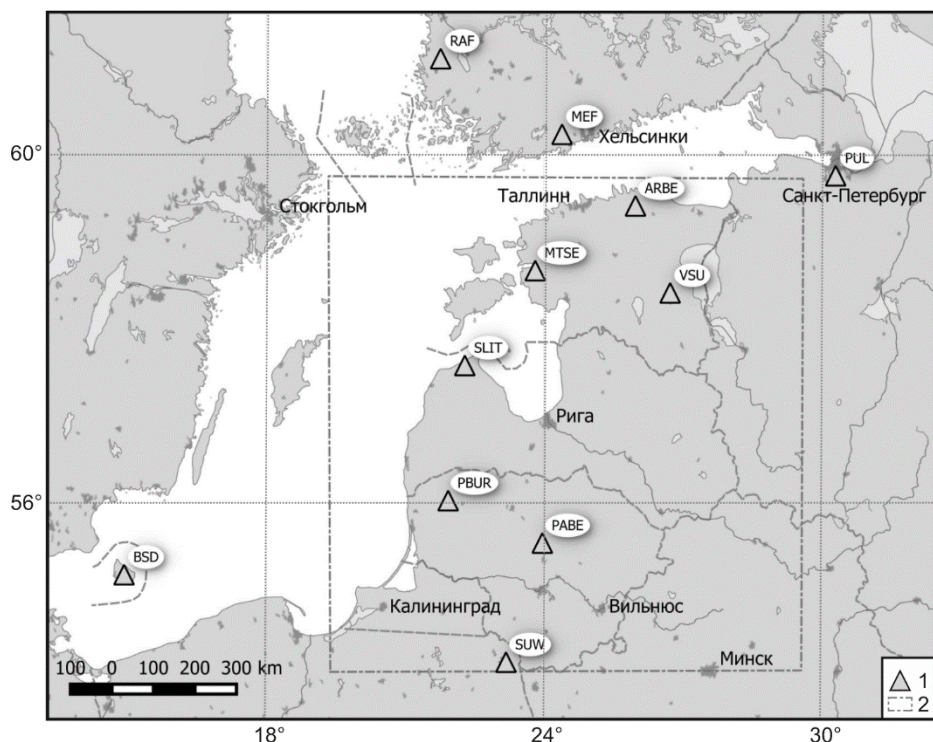


Рис. 1. Сейсмические станции Восточно-Балтийского региона, данные которых могут использоваться для Балтийской виртуальной сейсмической сети (BAVSEN)

Обозначения: 1 – сейсмические станции; 2 – контур Восточно-Балтийского региона.

Станции, участвующие в работе сети *GEOFON*, оснащены, как правило, стандартными аппаратно-программными средствами (АПС). Стандартное АПС, например, для станции *Slitere* (Латвия), включает: сенсоры STS-2, аналого-цифровой преобразователь *Earth Data 24 bit PS6*, программное обеспечение *SeisComp*, коммуникационный модуль, GPS антенну. Датчик *Streckeisen STS-2 Broadband Sensor* имеет три инерциальных маятника с угловой геометрией. В вертикальной плоскости оси маятников ориентированы под углом 54.7° относительно вертикальной оси. Частотный диапазон сенсоров – от 0.00833 до более чем 50 Гц. Большинство станций сети *GEOFON* имеют высокочастотные НН* (* – компоненты С-Ю, Z, В-З), широко-полосные ВН*, низкочастотные ЛН* и сверхнизкочастотные ВН* каналы. Сейсмологические данные в формате *miniSeed* посылаются от станций на сервер *GFZ Potsdam* через Internet.

Дополнительные программные средства обработки и анализа сейсмологических данных включают программный пакет *SEISAN* [14]. В частности, для локации гипоцентров сейсмических событий используется программа *Hypocenter* [15, 16]. Для локации региональных сейсмических событий используются три модели: *hel* – модель Института сейсмологии Хельсинского университета, *fen* – Фенноскандинавская (*Fennoscandian*) модель и собственная модель *baltic08*. Модель *baltic08* создана на основе результатов глубинного сейсмического зондирования вдоль геотраверса Советск – Рига – Кохтла-Ярве в 1986 г. [17]. Модели *fen* и *hel* более эффективны в случае, если сейсмические события происходят в Эстонии и прилегающей акватории Балтийского моря. Модель *baltic08* более эффективна для территории Латвии и прилегающей акватории Балтийского моря [18].

В большинстве случаев для локации региональных сейсмических событий в ВБР обычно используются 5–6 сейсмических станций: RAF, MEF, VSU, MTSE, SLIT, ARBE. Другие сейсмические станции либо имеют высокий уровень помех (PUL, SUW, PABE, PBUR), либо расположены на большом расстоянии от ВБР (например, BSD). Сейсмические станции, расположенные в Скандинавии (RAF, MEF и частично BSD), имеют значительно меньший уровень сейсмического шума, чем станции, расположенные на территории ВБР, то есть на западе Восточно-Европейской платформы.

Результаты. В 2016 и 2017 гг. на территории ВБР виртуальная сейсмическая сеть BAVSEN зарегистрировала три тектонических землетрясения (табл. 1). Землетрясение 12 ноября

2016 г. произошло в районе озера Выртсъярв, два землетрясения, 22 марта 2017 г. и 15 июля 2017 г., зарегистрированы на северном побережье Эстонии, вблизи Таллинна и на северо-западе, в проливе между островами Хийумаа и Вормси соответственно (рис. 2).

Таблица 1. Параметры землетрясений Восточно-Балтийского региона в 2016–2017 гг. по данным сети BAVSEN

Дата	Время	Широта	Долгота	Большая/малая полуось эллипса ошибок (км)	Глубина, км	Магнитуда <i>ML</i>
12.11.2016	02:49:51	58.30°	26.10°	5.7/2.8	1.1	2.4
22.03.2017	03:00:29	59.35°	24.40°	15.2/7.0	0	1.3
15.07.2017	08:01:49	59.05°	22.95°	4.5/3.0	17	2.5

Землетрясения на территории ВБР также были зарегистрированы сетью ISUH (Institute of Seismology of the University of Helsinki). Они показаны белыми кружками на рис. 2. Магнитуды этих землетрясений по данным ISUH меньше (1.8, 1.2, 2.1 – соответственно). Глубины гипоцентров также отличаются. По данным ISUH, они имеют значения 1.4, 4.0 и 12.2 км соответственно. Для локализации гипоцентров землетрясений ISUH использует значительно больше сейсмических станций. Качество записей на этих станциях, расположенных на Балтийском щите, значительно лучше.

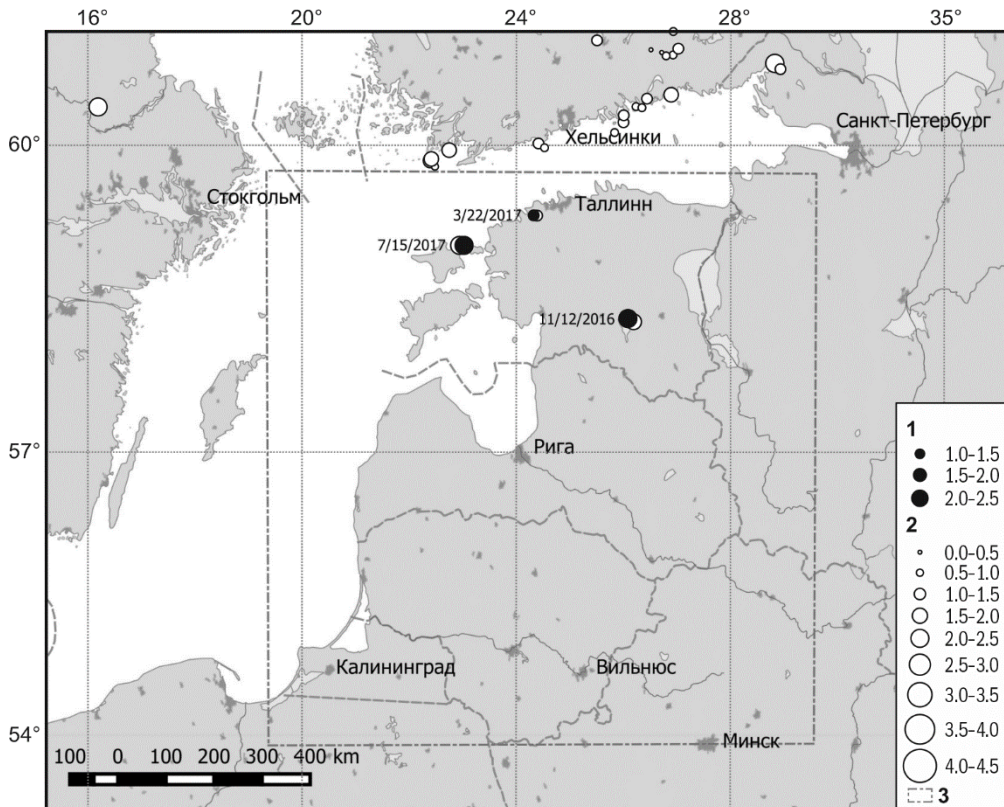


Рис. 2. Землетрясения Восточно-Балтийского региона в 2016–2017 гг., зарегистрированные сетями BAVSEN и ISUH

Обозначения: 1 – локальная магнитуда землетрясений по данным сети BAVSEN; 2 – локальная магнитуда землетрясений по данным сети ISUH; 3 – контур Восточно-Балтийского региона.

На сеймотектонической карте Эстонии (рис. 3) видно, что очаг землетрясения 12 ноября 2016 г. в районе озера Выртсъярв расположен вблизи эпицентра землетрясения 1987 г. с интенсивностью сотрясений 4 балла по шкале MSK-64 [19, 20]. Эпицентры обоих указанных землетрясений расположены недалеко от тектонического разлома, выявленного по геофизическим данным в кристаллическом фундаменте [21] и имеющего простирание с северо-запада на юго-восток.

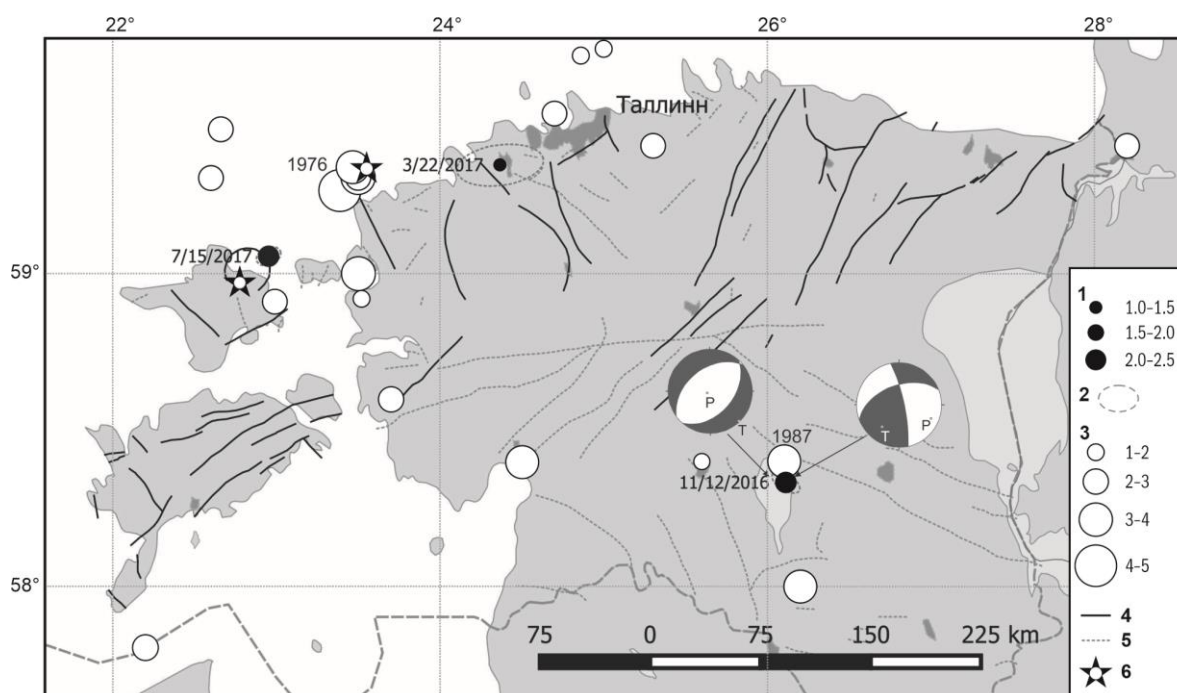


Рис. 3. Тектоника и сейсмичность Эстонии и прилегающей территории

Обозначения: 1 – локальные магнитуды землетрясений 2016–2017 гг.; 2 – эллипс ошибок определения эпицентров землетрясений 2016–2017 гг.; 3 – магнитуды исторических и современных землетрясений (1375–2015 гг.); 4 – тектонические разломы в коренных породах (Ордовик и Силур); 5 – тектонические разломы в кристаллическом фундаменте; 6 – импактные события. Механизмы очага: слева по данным [22], справа по данным [23].

Интересное свойство некоторых эстонских землетрясений – приуроченность нескольких эпицентров к импактным структурам, т.е. крупным ударным кратерам, возникшим в результате падения на Землю метеоритов. Астроблема – это актуальная тема для Восточно-Балтийского региона. Вблизи крупных ударных кратеров расположены очаги как землетрясения 15 июля 2017 г., произошедшего в рассматриваемый период, так и главного толчка 25.10.1976 г. и четырех его афтершоков в районе острова Осмуссаар. Макросейсмическая магнитуда главного толчка достигала 4.7, а магнитуда афтершоков – от 2.0 до 3.5 [10]. Все эпицентры землетрясений 1976 г. расположены вблизи импактной структуры диаметром около 7 км, северо-восточнее о. Осмуссаар. Эпицентр землетрясения 15 июля 2017 г. расположен на краю ударного кратера диаметром около 15 км.

Обсуждение и заключение. Несмотря на ограниченную статистику землетрясений с небольшими магнитудами, в последнее время (начиная с 2016 г.) предпринимаются попытки оценки механизма очагов землетрясений Восточно-Балтийского региона. В частности, благодаря близости станции VSU к очагу землетрясения 12 ноября 2016 г., а также удовлетворительной записи первых вступлений *P*-волн на станциях MEF, ARBE, MTSE и SLIT, механизм землетрясения был оценен [22] как сброс (*normal faulting*), со следующими параметрами в основной (индекс 1) и вспомогательной (индекс 2) нодальных плоскостях: $STR_1 = 41.6^\circ$, $DIP_1 = 45.3^\circ$, $RAKE_1 = -97.5^\circ$; $STR_2 = 232.2^\circ$, $DIP_2 = 45.2^\circ$, $RAKE_2 = -82.5^\circ$. Это позволило оценить параметры оси сжатия *P* и растяжения *T*: $P_{STR} = 47.5^\circ$, $P_{DIP} = -84.7^\circ$; $T_{STR} = 136.9^\circ$, $T_{DIP} = 0.1^\circ$. В этом случае предполагалась связь эпицентра землетрясения с Палдиско-Псковской тектонической зоной, которая простирается с северо-запада на юго-восток, рядом с северо-восточным побережьем озера Выртсъярв (рис. 3).

Другие оценки были сделаны сейсмологами Эстонии и Финляндии [23] на основании вышеуказанных сейсмических станций, а также, дополнительно, с помощью семи временных станций ISUH, расположенных на территории Эстонии. Это позволило оценить механизм очага землетрясения 12 ноября 2016 г. как левосторонний наклонный взбросо-сдвиг (*reverse left-lateral oblique*) со следующими параметрами в основной (индекс 1) и вспомогательной (индекс 2) нодальных плоскостях: $STR_1 = 348^\circ$, $DIP_1 = 80^\circ$, $RAKE_1 = 39^\circ$; $STR_2 = 251^\circ$, $DIP_2 = 52^\circ$, $RAKE_2 = 168^\circ$. Был получен азимут максимального горизонтального сжатия $P_{STR} = 114^\circ$. В этом случае предпочтение отдано решению для нодальной плоскости 1, поскольку азимут простираения этой плоскости близок к азимуту простираения разлома в кристаллическом фундаменте

(рис. 3), отождествляемого с Палдиско-Псковской тектонической зоной. Кроме того, параметры механизма очага землетрясения 12 ноября 2016 г. в районе озера Выртсъярв, по данным [23], близки к параметрам землетрясения 25.10.1976 г. вблизи острова Осмуссаар. В частности, азимут простирания для плоскости 1 Осмуссаарского землетрясения $STR_1 = 341^\circ$, а азимут оси сжатия – $P_{STR} = 114^\circ$. Механизм очага Осмуссаарского землетрясения был оценен в [24] как левосторонний сдвиг (*left-lateral strike-slip*). Азимут оси сжатия P для обоих землетрясений одинаков. Таким образом, решение механизма очага землетрясения 12 ноября 2016 г., полученное сейсмологами Эстонии и Финляндии, более обосновано. Кроме того, эти исследователи смогли оценить механизмы очагов и двух других рассматриваемых землетрясений [23].

Уровень сейсмической активности Восточно-Балтийского региона уменьшается с севера на юг. В частности, в 2016–2017 гг. тектонические землетрясения зарегистрированы только в северной части ВБР (рис. 2), т.е. на территории Эстонии и в прилегающей акватории Балтийского моря. Магнитуды землетрясений были небольшими. Оценка механизма очагов землетрясений ВБР с использованием сети BAVSEN возможна в случае, если хотя бы одна сейсмическая станция расположена недалеко от эпицентра землетрясения, а на других станциях удалось выделить вступления первых P -волн, как это имело место в случае землетрясения 12 ноября 2016 г. в районе озера Выртсъярв.

Проблема идентификации генезиса сейсмических событий по-прежнему актуальна для ВБР. В 2016–2017 гг. в ВБР с помощью сети BAVSEN было зарегистрировано и локализовано около 910 сейсмических событий, среди которых только три сейсмических события (0.3 %) были идентифицированы как тектонические землетрясения. Разумеется, координаты промышленных карьеров, в которых могут производиться взрывные работы, известны. Сейсмические события, которые расположены вблизи них и происходят в дневное, рабочее, время, могут быть идентифицированы как взрывы. Однако есть немало сейсмических событий, которые происходят в других местах ВБР и в Балтийском море в разное время суток. Идентифицировать генезис этих событий значительно сложнее. Проблема идентификации осложняется небольшими магнитудами сейсмических событий, редкой сетью сейсмических станций, повышенным фоном сейсмических помех на станциях, расположенных на южном склоне Балтийского щита (Эстония) и на Балтийской синеклизе (Латвия, Литва), т.е. на осадочном чехле в ВБР. Отражающие и преломляющие сейсмические границы осадочного чехла могут быть источниками сложных интерференционных явлений. В частности, один из главных отражающих горизонтов в ВБР – это поверхность ордовика, которая располагается на глубинах 800–2050 м [18]. В меньшей степени отражающие сейсмические свойства присущи поверхности силура и поверхности девона, которые фрагментарно прослеживаются в разрезах на территории ВБР. Все эти факторы значительно ухудшают возможность выделения первых вступлений P -волн.

В рамках поиска эффективных способов идентификации были использованы два метода: 1) амплитудные отношения A_P/A_S и 2) спектрально-временной анализ (СВАН) [25]. Амплитудные отношения показали некоторое различие между величинами A_P/A_S для землетрясения 12 ноября 2016 г. в районе озера Выртсъярв и для взрывов в северо-восточной части Эстонии. В частности, для землетрясения $A_P/A_S \leq 0.6$, тогда как для разных взрывов на одной и той же станции A_P/A_S меняется от 0.2 до 1–1.7. На спектрограммах СВАН не было найдено существенных различий между землетрясением 12 ноября 2016 г. и взрывами на северо-востоке Эстонии [25]. Таким образом, параметры A_P/A_S и СВАН однозначно не позволяют идентифицировать генезис сейсмических событий и поэтому их целесообразно использовать как вспомогательные методы совместно с другими критериями для идентификации природы сейсмических событий в ВБР. Дополнительно к указанным методам идентификации генезиса сейсмических событий был опробован метод инверсии волновых форм для решения обратной задачи по определению механизма очага землетрясения по методике Д. Малицкого [26]. В методе используются только прямые P - и S -волны. Этот метод может применяться в случае ограниченного количества станций, в регионах с низкой сейсмичностью. Опробование этой методики было сделано на примере литовского индуцированного землетрясения 12.06.2015 г. [27]. Используя два варианта с двумя или тремя станциями, был определен фокальный механизм землетрясения с магнитудой 2.6.

С точки зрения эффективности идентификации генезиса сейсмических событий, следует отметить метод *Automaija* [28], который применяет ISUH для автоматической классификации сейсмических событий. Этот метод основан на распределении энергии сейсмического сигнала входных волновых форм и предназначен для обнаружения сейсмических событий и различения природных и антропогенных событий. Он вычисляет предварительное время возникновения, ме-

стоположение и магнитуду для каждого события, анализирует вероятность того, что каждое событие будет землетрясением или взрывом, и определяет время для идентифицируемых сейсмических фаз. Метод *Automaija* классифицирует сейсмические данные по семи различным группам. Этот метод применяется на Балтийском щите, где осадочный чехол практически отсутствует и не является источником интерференции сейсмических волн, как это имеет место в условиях платформы, на территории ВБР.

Л и т е р а т у р а

1. Габсатарова И.П., Ассиновская Б.А., Баранов С.В., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И., Никулин В.Г., Носкова Н.Н., Петров С.И., Пивоваров С.П., Санина И.А. Сейсмичность Российской части Восточно-Европейской платформы и ближайшего окружения в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 182–191. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.17
2. Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Janik T., Guterh A., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. & EUROBRIDGE and POLONAISE Working groups. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton // European Lithosphere Dynamics. – 2006. – V. 32. – P. 599–625.
3. Анкудинов С.А., Брио Х.С., Садов А.С. Глубинное строение земной коры на территории республик Прибалтики по данным сейсморазведочных работ ГСЗ // Белорусский сейсмологический бюллетень. – 1991. – С. 111–117.
4. Paskevicius J. The Geology of the Baltic Republics. – 1997. – P. 387.
5. Брангулис А.П., Страуме Я.А., Бендруп Л.П., Биргер А.Я., Биркис А.П., Брио Х.С., Гаврилова А.В., Мейронс З.В., Юшкевичс В.В. Геология Латвийской ССР // Объяснительная записка к геологическим картам Латвийской ССР масштаба 1:500 000. – Зинатне, Рига, 1984. – С. 214.
6. Nikulin V. Assessment of the seismic hazard in Latvia. Version of 2007 year // Material Science and Applied Chemistry. – 2011. – V. 1, N 24. – P. 110–115.
7. Pacesa A., Sliupa S. Application of the probabilistic approach in assessment of the seismic hazard of the Baltic region // Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories. – 2007. – P. 60–70.
8. Nikonov A.A. Approach to parametrization of tectonic earthquakes within the Kaliningrad district, Russia, by macroseismic data // Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories. – 2007. – P. 57–59.
9. Боборыкин А.М., Авотиня И.Я., Емельянов А.П., Сильдвээ Х.Х. Каталог исторических землетрясений Белоруссии и Прибалтики // Сейсмологический бюллетень сейсмических станций «Минск» (Плещеницы) и «Нарочь» за 1984 г. – 1988. – С. 126–137.
10. Kondorskaya N.V., Nikonov A.A., Ananyin I.V., Dolgopopolov D.V., Korhonen H., Arhe K., Sildvee H.H. Osmussaar earthquake in the East Baltics of 1976. Recent seismological investigations in Europe // Proceeding of the XIX General Assembly of the European Seismological Commission. – 1988. – P. 376–387.
11. Gregersen S., Wiejacz P., Debski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mantyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., Grunthal G., Husebye E.S., Sliupa S. The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2007. – N 164. – P. 63–74.
12. Garetsky R., Levkov E., Schwab G., Karabanov A., Aizberg R., Garbar D., Kockel F., Ludwig A.O., Lukke-Andersen H., Ostaficzuk S., Palienko V., Sim L., Sliupa A., Sokolowski J., Stackebrandt W. Main neogeodynamic features of the Baltic Sea depression and adjacent areas // Technika poszukiwan geologicznych. Geosynoptyka i geotermia. – 1999. – V. 1, N 195. – P. 17–27.
13. Nikulin V.G. Regional features of seismotectonics and deformation of Earth crust of the Baltic region // Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories. – 2007. – P. 63–65.
14. Havskov J., Ottemöller L. SeisAn Earthquake Analysis Software // Seismological Research Letters. – 1999. V. 70, N 5. – P. 532–534. doi: 10.1785/gssrl.70.5.532
15. Lienert B.R.E., Berg E., Frazer L.N. Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1986. – V. 76, N 3. – P. 771–783.
16. Lienert B.R.E., Havskov J.A computer program for locating earthquakes both locally and globally // Seismological Research Letters. – 1995. – V. 66, N 5. – P. 26–36. doi: 10.1785/gssrl.66.5.26
17. Садов А.С., Пензина В.Н. Изучение глубинного строения земной коры (региональные сейсморазведочные работы ГСЗ) по геотраверсу г. Советск – г. Рига – г. Кохтла-Ярве // Отчет ПГО «Севзапгеология» Калининградская комплексная геофизическая экспедиция. – 1986. – Т. 1. – С. 208.
18. Nikulins, V. Seismological Monitoring in Latvia // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. – 2020. – V. 54, N I. – P. 50–66. doi: 10.31905/BKETRT2R

19. Sildvee H. Maavärin Võrtsjärve all (An earthquake under Lake Võrtsjärve) // Eesti Loodus. – 1988. – N 1. – P. 26–31. (In Estonian, summary in English).
20. Nikonov A.A., Sildvee H. Historical earthquake in Estonia and their seismotectonic position // Geophysica. – 1991. – V. 27, N 1–2. – P. 79–93.
21. Побул Э.А., Силдвее Х.Х. О блоковом строении кристаллического фундамента Эстонии // Современные движения территории Прибалтики. – Тарту, 1975. – С. 64–73.
22. Nikulins V., Assinovskaya B. Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004 // Baltica. – 2018. – V. 31, N 1. – P. 35–48.
23. Soosalu H., Uski M., Komminaho K., Veski A. Recent intraplate seismicity in Estonia, east European platform // Seismological Research Letters. – 2022. – V. 93, N 3. – P. 1800–1811. doi: 10.1785/0220210277
24. Slunga R. Source mechanism of a Baltic earthquake inferred from surface-wave recordings // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1979. – N 69. – P. 1931–1964.
25. Nikulins V. Seismicity of the East Baltic region and application-oriented methods in the conditions of low seismicity // LU Akademiskais apgads. – 2017. – 291 p.
26. Малицкий Д.В., Муйла О.О., Павлова А.Ю., Грицай О.Д., Коваль Ю.П., Обідина О.О. Вогнище землетрусу: моделювання, визначення параметрів і використання // Геоінформатика. – 2016. – № 1(57). – С. 66–78.
27. Малицкий Д., Нікулін В. Механізм вогнища литовського землетрусу 12.06.2015 року ($t_0=08:18:26.4$; 55.52°N , 21.40°E ; $h=0.9$ км; $M_L=2.6$) на основі інверсії хвильових форм // Вісник of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology. – 2021. – V. 3, N 94. – P. 46–52.
28. Veikkolainen T., Kortstrom J., Vuorinen T., Salmenpara I., Luhta T., Mantyniemi P., Hillers G., Tiira T. The Finnish National seismic Network: Toward Fully Automated Analysis of Low-Magnitude Seismic Events // Seismological Research Letters. – 2021. – V. 92, N 3. – P. 1581–1591

SEISMICITY of the EASTERN BALTIC in 2016–2017

V.G. Nikulin

*Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, Riga, Latvia,
valerijs.nikulins@lvgmc.lv, seismolat@gmail.com*

Abstract. Information on seismic monitoring in the East Baltic region for 2016–2017 is presented. During this period of time, several tectonic earthquakes occurred, the epicenters of which are located in the north and northwest of Estonia and in the area of Lake Võrtsjärve. The territory of Estonia and the adjacent waters of the Baltic Sea are still the most seismically active parts of the East Baltic region. Attention is drawn to the inherited nature of seismicity, i.e. in the areas of modern earthquakes, earthquakes had already occurred before the instrumental period. Another feature of several earthquakes in the East Baltic region is their association with meteorite craters, which are most often found in the East Baltic region in Estonia and near it, in the Baltic Sea. As before, the bulk of seismic information is associated with man-made explosions in industrial quarries and in the Baltic Sea. The identification of earthquakes of small magnitude remains an urgent problem.

Key words: East Baltic region, BAVSEN, East European platform, industrial explosions.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.19 **EDN:** BYJTKS

For citation: Nikulin, V.G. (2022). [Seismicity of the Eastern Baltic in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 213–221. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.19. EDN: BYJTKS

R e f e r e n c e s

1. Gabsatarova, I.P., Assinovskaya, B.A., Baranov, S.V., Karpinsky, V.V., Konechnaya, Ya.V., Munirova, L.M., Nadezhka, L.I., Nikulin, V.G., Noskova N.N., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., & Sanina, I.A. (2021). [Seismicity of the Russian part of the East European platform and its immediate environment in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 182–191. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.17
2. Bogdanova, S., Gorbatshev, R., Grad, M., Janik, T., Guterh, A., Kozlovskaya, E., Motuza, G., Skridlaite, G., Starostenko, V., Taran, L., & EUROBRIDGE and POLONAISE Working groups. (2006). EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. *European Lithosphere Dynamics*, 32, 599–625.
3. Ankudinov, S.A., Brio, H.S., & Sadv, A.S. (1991). Deep structure of the earth's crust on the territory of the Baltic republics according to the data of seismic surveys of the GSZ. *Belarusian Seismological Bulletin*, 111–117.
4. Paskevicius, J. (1997). The Geology of the Baltic Republics. *Vilnius Lietuvos Geologijos Tarnyba*, 387 p.
5. Brangulis, A.P., Straume, J.A., Bendrup, L.P., Birger, A.Ya., Birkis, A.P., Brio, H.S., Gavrilova, A.V.,

- Meyrons, Z.V., & Yushkevichs, V.V. (1984). [Geology of the Latvian SSR]. *Ob'yasnitel'naya zapiska k geologicheskim kartam Latvijas SSR masshtaba 1:500 000* [Explanatory note to the geological maps of the Latvian SSR, scale 1:500000]. Riga, Latvia: Zinatne Publ., 214 p.
6. Nikulin, V. (2011). Assessment of the seismic hazard in Latvia. Version of 2007 year. *Material Science and Applied Chemistry*, 1(24), 110–115.
 7. Pacesa, A., & Sliupa, S. (2007). Application of the probabilistic approach in assessment of the seismic hazard of the Baltic region. *Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories*, 60–70.
 8. Nikonov, A.A. (2007). Approach to parametrization of tectonic earthquakes within the Kaliningrad district, Russia, by macroseismic data. *Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories*, 57–59.
 9. Boborykin, A.M., Avotinya, I.Ya., Emelyanov, A.P., & Sildvee, Kh.Kh. (1988). Catalog of historical earthquakes in Belarus and the Baltic states. *Seismological bulletin of seismic stations "Minsk" (Pleshchenitsy) and "Naroch" for 1984–1988*, 126–137.
 10. Kondorskaya, N.V., Nikonov, A.A., Ananyin, I.V., Dolgoplov, D.V., Korhonen, H., Arhe, K., & Sildvee, H.H. (1988). Osmussaar earthquake in the East Baltics of 1976. *Recent seismological investigations in Europe. Proceeding of the XIX General Assembly of the European Seismological Commission*, 376–387.
 11. Gregersen, S., Wiejacz, P., Debski, W., Domanski, B., Assinovskaya, B., Guterch, B., Mantyniemi, P., Nikulin, V.G., Pacesa, A., Puura, V., Aronov, A.G., Aronova, T.I., Grunthal, G., Husebye, E.S., & Sliupa, S. (2007). The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 164, 63–74.
 12. Garetsky, R., Levkov, E., Schwab, G., Karabanov, A., Aizberg, R., Garbar, D., Kockel, F., Ludwig, A.O., Lukke-Andersen, H., Ostaficzuk, S., Palienco, V., Sim, L., Sliupa, A., Sokolowski, J., & Stackebrandt, W. (1999). Main neogeodynamic features of the Baltic Sea depression and adjacent areas. *Technika Poszukiwań Geologicznych*, 1(195), 17–27.
 13. Nikulin, V.G. (2007). Regional features of seismotectonics and deformation of Earth crust of the Baltic region. *Seismicity and seismological observations of the Baltic Sea region and adjacent territories*, 63–65.
 14. Havskov, J., & Ottemöller, L. (1999). SeisAn Earthquake Analysis Software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532–534. doi: 10.1785/gssrl.70.5.532
 15. Lienert, B.R.E., Berg, E., & Frazer, L.N. (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(3), 771–783.
 16. Lienert, B.R.E., & Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66(5), 26–36. doi: 10.1785/gssrl.66.5.26
 17. Sadov, A.S., & Penzina, V.N. (1986). Study of the deep structure of the earth's crust (regional seismic surveys of the DSS) along the geotraverse of Sovetsk – Riga – Kohla-Jarve. *Report of PGO "Sevzapgeologiya" Kaliningrad integrated geophysical expedition*, 1, 208 p.
 18. Nikulins, V. (2020). Seismological Monitoring in Latvia. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, 54(I), 50–66. doi: 10.31905/BKETRT2R
 19. Sildvee, H. (1988). Maavärin Võrtsjärve all (An earthquake under Lake Võrtsjärve). *Eesti Loodus*, 1, 26–31. (In Estonian, summary in English).
 20. Nikonov, A.A., & Sildvee, H. (1991). Historical earthquake in Estonia and their seismotectonic position. *Geophysica*, 27(1–2), 79–93.
 21. Pobul, E.A., & Sildvee, H.H. (1975). On the block structure of the Estonian crystalline basement. *Modern movements of the territory of the Baltic. Tartu*, 64–73.
 22. Nikulins, V., & Assinovskaya, B. (2018). Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004. *Baltica*, 31(1), 35–48.
 23. Soosalu, H., Uski, M., Komminaho, K., & Veski, A. (2022). Recent intraplate seismicity in Estonia, east European platform. *Seismological Research Letters*, 93(3), 1800–1811. doi: 10.1785/0220210277
 24. Slunga, R. (1979). Source mechanism of a Baltic earthquake inferred from surface-wave recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69, 1931–1964.
 25. Nikulins, V. (2017). Seismicity of the East Baltic region and application-oriented methods in the conditions of low seismicity. *LU Akademiškais apgads*, 291 p.
 26. Malitsky, D.V., Muyla, O.O., Pavlova, A.Y., Gritsay, O.D., Koval, Y.P., & Obidina, O.O. (2016). Earthquake focus: modeling, determination of parameters and use. *Geoinformatika*, 1(57), 66–78.
 27. Malysky, D., & Nikulin, V. (2021). The mechanism of the Lithuanian earthquake on June 12, 2015 ($t_0=08:18:26.4; 55.52' N, 21.40' E; h=0.9 km; M_L=2.6$) based on the inversion of waveforms. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(94), 46–52.
 28. Veikkolainen, T., Kortstrom, J., Vuorinen, T., Salmenpara, I., Luhta, T., Mantyniemi, P., Hillers, G., & Tiira, T. (2021). The Finnish National seismic Network: Toward Fully Automated Analysis of Low-Magnitude Seismic Events. *Seismological Research Letters*, 92(3), 1581–1591.