

УДК 550.34

Современные сейсмологические исследования в Латвии с 2008 по 2019 г. и перспективы их развития

© 2020 г. В.Г. Никулин

Латвийский центр окружающей среды, геологии и метеорологии, г. Рига, Латвия

Аннотация. На территории Латвии сейсмологический мониторинг с 2006 года выполняется станцией "Slitere", которая входит в международную сеть GEOFON с центром в GFZ Potsdam. Использование других станций сети GEOFON и некоторых станций национальных сетей Финляндии и Эстонии позволяет осуществлять мониторинг всего Восточно-Балтийского региона (ВБР), включающего Эстонию, Латвию, Литву, Калининградскую область России и прилегающую акваторию Балтийского моря ($\varphi=53.9-59.7^{\circ}\text{N}$; $\lambda=19.4-29.6^{\circ}\text{E}$). Толчком к развитию сейсмологического мониторинга послужили Калининградские землетрясения 2004 г. с $M_w=5.0$ и 5.2 . Основным объектом исследований, кроме тектонических землетрясений, является техногенная сейсмичность, которая преобладает в Латвии и ВБР. В результате сейсмического мониторинга ВБР за период с 2008 по 2019 г. было локализовано восемь тектонических землетрясений, главным образом на территории Эстонии, и более 5640 техногенных сейсмических событий. Общее количество сейсмических событий, локализованных сетью BAVSEN, достигает 13328, включая 1146 телесеизмических событий. Актуальность сейсмологического мониторинга возрастает в связи с неблагоприятными геодинамическими условиями в районе расположения некоторых крупных энергетических, транспортных объектов и агломераций, что требует изучения сейсмического режима территорий вокруг этих объектов. Основные проблемы сейсмического мониторинга ВБР связаны с идентификацией относительно слабых сейсмических событий, редкой сетью сейсмических станций, неблагоприятными сейсмогеологическими условиями осадочного чехла и низкой активностью тектонических землетрясений ВБР. Отсутствие перспективных методов распознавания генезиса сейсмических событий ставит эту проблему в ряд первоочередных. Перспективы сейсмологических исследований в Латвии связаны с изучением сейсмогеологических свойств грунтов, сейсмическим микрорайонированием, мониторингом гидротехнических сооружений, а также с возможностью создания Национального центра данных, в рамках которого сейсмологический мониторинг может стать одним из основных методов для распознавания природы радионуклидных аномалий ВБР.

Ключевые слова: Восточно-Балтийский регион, LEGMC, BAVSEN, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, дискриминант.

Для цитирования: Никулин В.Г. Современные сейсмологические исследования в Латвии с 2008 по 2019 г. и перспективы их развития // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.03>

Введение

Территория Латвии не относится к сейсмически активным районам. Результаты, полученные в международных проектах GSHAP [Grunthal et al., 1999; Ulomov, 1999], и собственные результаты сейсмического районирования [Safronovs, Nikulins, 1999; Nikulin, 2011] показывают, что Латвия и весь Восточно-Балтийский регион (ВБР), включающий Эстонию, Латвию, Литву, Калининградскую область России и прилегающую акваторию Балтийского моря ($\varphi=53.9-59.7^{\circ}\text{N}$; $\lambda=19.4-29.6^{\circ}\text{E}$), относится к территориям с очень низкой сейсмичностью. Согласно

Eurocode 8 [LVS EN 1998-1, 2005], для таких территорий ускорение на скальных грунтах типа А не превышает $39 \text{ см}/\text{с}^2$ (0.04 g) или, с учётом грунтового фактора, не более $49 \text{ см}/\text{с}^2$ (0.05 g). Как показали последние исследования по оценке сейсмической опасности Латвии, максимальный уровень сотрясений скальных грунтов, отнесённых к поверхности девонских отложений, с вероятностью 10 % может превысить $10-13 \text{ см}/\text{с}^2$ в течение 50 лет [Nikulin, 2011]. Однако, с учётом сейсмогеологических условий, ускорение на поверхности четвертичных отложений может быть существенно больше. Причиной усиления сейсмических колебаний на поверхности земли

является существенная разность в сейсмических жёсткостях между четвертичными отложениями и подстилающими их девонскими отложениями, распространёнными на большей части территории Латвии. Во время главного толчка Калининградского землетрясения с максимальной магнитудой $M_w=5.2$ [Gregersen et al., 2007], сотрясения достигали VI–VII баллов по шкале MSK-64 [Nikonov et al., 2005]. Вероятно, эту магнитуду можно принять за максимально возможную для всего ВБР, поскольку регион характеризуется похожими грунтовыми условиями. Во многом это обусловлено гляциоизостатическим фактором в течение, по крайней мере, плейстоцена и голоцена, когда ВБР «пережил» последнюю ледниковую эпоху (110 тыс. лет тому назад – 11.7 тыс. лет тому назад). В настоящее время гляциоизостатический фактор значительно утратил свой вклад в процесс тектогенеза.

Поскольку для ВБР крайне мало современной сейсмической статистики, значительный вклад в оценку сейсмической опасности вносят исторические землетрясения. Поэтому они заслуживают особого внимания и требуют тщательной проверки как их достоверности, так и оценки уровня сотрясений. В частности, длительное время считалось, что существенный вклад в оценку сейсмической опасности вносили сейсмические явления декабря 1908 г., которые проявились на значительной территории ВБР. Впервые они были констатированы профессором В. Doss [Doss, 1910] как подземные толчки, землетрясения. Однако профессор А.А. Никонов [Никонов, 1995; 1996; 2010] неоднократно указывал на их морозобойный характер и, следовательно, нетектоническую природу. Позже морозобойный характер этих явлений (cryoseisms) нашёл дополнительные подтверждения, основанные на метеорологических данных станций «Морской дом» (Рига) и «Двинск» (Даугавпилс) [Nikulins, 2017].

С практической точки зрения, сейсмологические наблюдения важны для Латвии и ВБР, поскольку некоторые объекты энергетической (Плявиньская ГЭС, закрытая Игналинская АЭС) и транспортной инфраструктуры (проект "Rail Baltica"), некоторые крупные агломерации (Рига) расположены в районах с признаками геодинамической активности [Nikulins, 2019b], а также в связи с продолжающимся введением в строй двух АЭС – в Калининградской области России и в Северной Беларуси.

Толчком к развитию сейсмологического мониторинга стали именно Калининградские землетрясения 21 сентября 2004 года. В 2006 г. на северо-западе Латвии была установлена станция

"Slitere", которая вошла в международную сеть GEOFON с центром в GFZ Potsdam. С 2008 г. появилась возможность использовать другие станции Балтийского региона, создать Балтийскую виртуальную сейсмическую сеть BAVSEN (Baltic Virtual Seismic Network) для локализации сейсмических событий в ВБР и определения их параметров. В данной работе представлен обзор результатов исследований за 12 лет (2008–2019 гг.), показаны основные проблемы сейсмического мониторинга и перспективы использования сейсмологических исследований в ВБР.

Методы и материалы

В настоящее время в рамках BAVSEN (рис. 1) используется собственная станция "Slitere" (SLIT), а также ряд станций сети GEOFON, либо станций национальных сетей стран Балтийского региона, в частности, станции Финляндии (MEF, RAF), Эстонии (VSU, MTSE, ARBE), Литвы (PABE, PBUR), Польши (SUW) и Дании (BSD). Важное значение при локализации сейсмических событий ВБР играют станции Финляндии, поскольку они расположены на кристаллическом фундаменте Фенноскандинавского щита, т.е. в очень благоприятных геологических условиях. Однако доступность станций Финляндии меняется с течением времени. Поэтому, если в начале создания сети BAVSEN использовались широкополосные каналы ВН*, то затем пришлось перейти на высокочастотные каналы НН*. Количество станций, принимающих участие в локализации сейсмических событий ВБР, также менялось в связи с тем, что некоторые станции прекращали регистрацию (SRPE – Эстония), либо прекращалась доступность этих станций с сервера GFZ Potsdam (PUL – Россия).

Для локализации региональных сейсмических событий ВБР главным образом использовались станции Финляндии (MEF, RAF), Эстонии (VSU, MTSE, ARBE) и Латвии (SLIT). Значительно реже использовались станции Литвы (PABE, PBUR). Практически не использовались станции Польши (SUW) и Дании (BSD). В 2019 г. ограничена доступность финской станции RAF.

Для локализации телесеизмических событий с магнитудами, как правило, больше 5.5–6.0, использовалось большинство станций, включая станции PABE, PBUR, BSD и SUW. Как будет показано далее, локализация телесеизмических событий имела и практическое значение, в частности, для распознавания ядерных взрывов с помощью региональной сейсмической сети.

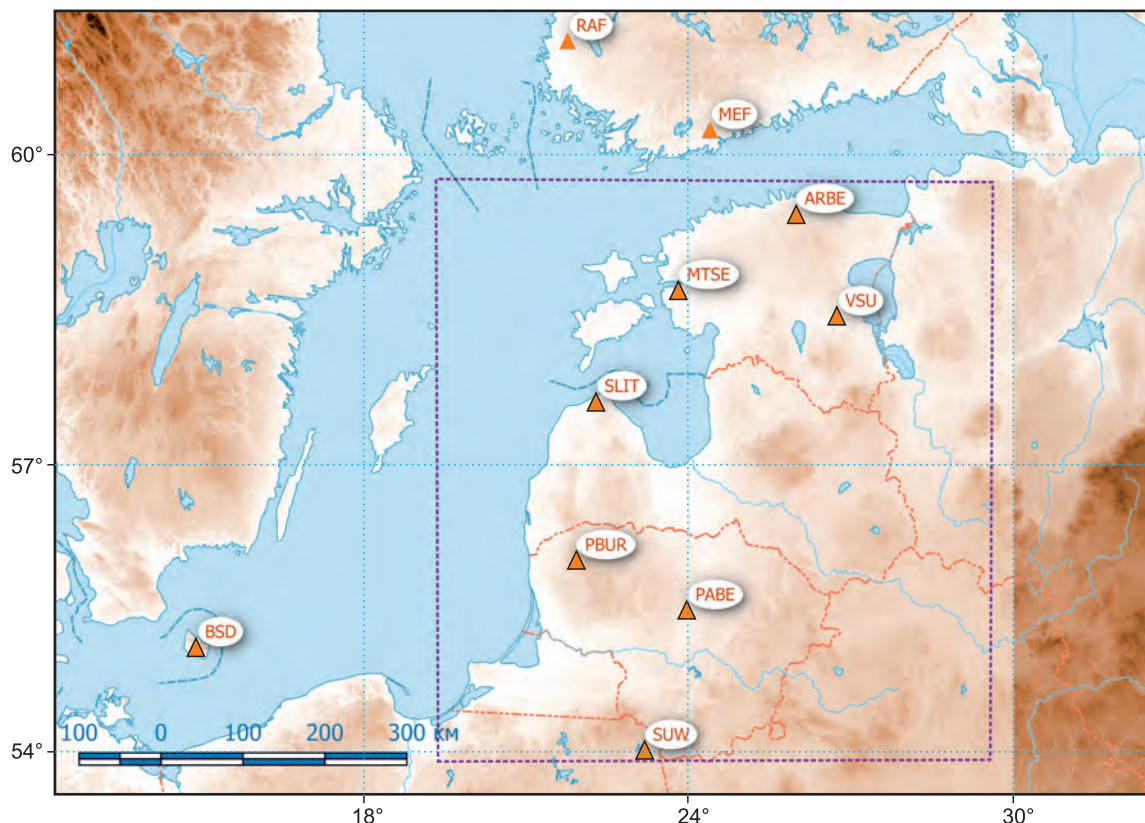


Рис. 1. Балтийская виртуальная сейсмическая сеть BAVSEN.

Треугольники – сейсмические станции, пунктирная линия – границы Восточно-Балтийского региона

Станция "Slitere", так же, как и другие станции сети GEOFON, оснащена типовой сейсмической аппаратурой, которая состоит из следующих основных элементов: сенсоров STS-2, аналого-цифрового преобразователя PS6 Earth Data 24, программно-коммуникационного блока SeisComp, GPS-антенны. SeisComp – это сейсмологическое программное обеспечение для сбора, обработки, распространения и интерактивного анализа данных. Первая версия SeisComp была разработана для сети GEOFON и далее усовершенствована в рамках проекта MEREDIAN под руководством GEOFON/GFZ Potsdam и ORFEUS. Принципиальная схема типового оборудования станции сети GEOFON представлена на рис. 2.

Широкополосный сенсор Streckeisen STS-2 имеет три инерциальных маятника с угловой геометрией. В вертикальной плоскости оси маятников ориентированы под углом 54.7° относительно вертикальной оси. В горизонтальной плоскости оси маятников ориентированы примерно под углом 120° друг от друга. Генераторная константа имеет величину 1500 ± 15 В·с/м. Частотный диапазон – от 0.00833 до более чем 50 Гц. На большинстве станций сети GEOFON используются

высокочастотные НН*, широкополосные ВН*, низкочастотные ЛН* и сверх низкочастотные VH* каналы. До декабря 2015 г. для обработки использовались широкополосные каналы ВН*, а затем начали использоваться высокочастотные каналы НН*. Для региональных событий такие каналы более оптимальны, но, с другой стороны, НН* каналы начали использоваться после того, как для некоторых станций каналы ВН* стали недоступны.

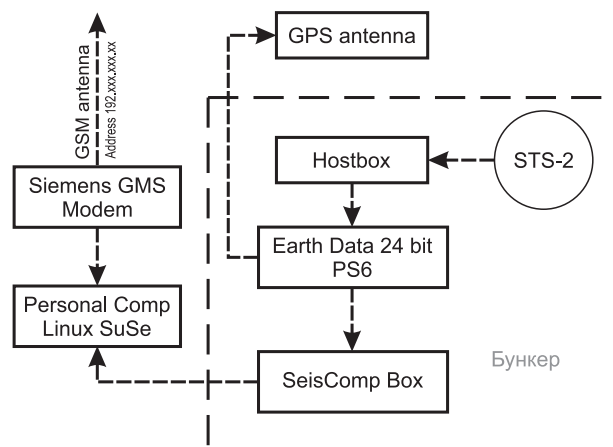


Рис. 2. Схема типового оборудования сейсмической станции сети GEOFON

С сейсмических станций через Интернет информация в формате MiniSeed поступает на сервер GFZ Potsdam, а с сейсмической станции "Slitere" – также в центр обработки LEGMC (Латвийский центр окружающей среды, геологии и метеорологии) (рис. 3). Поскольку для локализации сейсмических событий необходимы несколько станций, то информация загружается с сервера GFZ Potsdam. К сожалению, количество станций Балтийского региона и доступность данных, привлекаемых к обработке, периодически уменьшается.

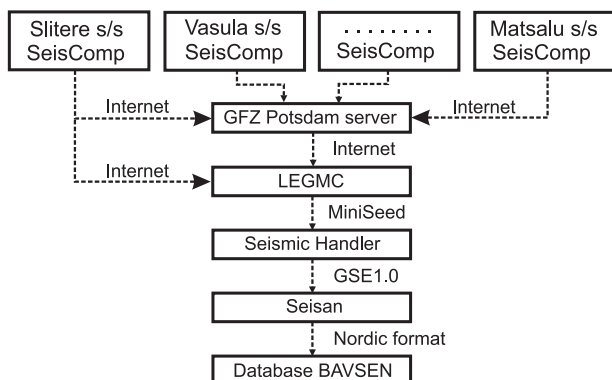


Рис. 3. Поток сейсмологической информации, форматы данных и этапы обработки

На следующем этапе происходит выборка сейсмических событий в формате GSE1.0 с помощью программы "Seismic Handler". После этого исходная информация обрабатывается в среде программы "Seisan". Программа "Seisan" создана в Университете Бергена и развита совместными усилиями Bergen University, British Geological Survey и Geological Survey of Denmark and Greenland. "Seisan" представляет собой систему сейсмического анализа и состоит из набора программ и базы данных. Использование различных критериев выборки в базе данных позволяет формировать различные наборы данных для последующей работы с ними.

Для гипоцентральной локации используется модифицированная версия программы "Hypocenter" [Lienert et al., 1986; Lienert, Havskov, 1995]. Главная модификация связана с возможностью использовать большее количество фаз сейсмических волн, локализовывать телесеismicкие события и использовать формат Nordic непосредственно от базы данных. Для региональных сейсмических событий используются четыре модели скоростей сейсмических волн: *iasp91*; модель Института сейсмологии Университета Хельсинки (Helsinki model – *hel*); фенноскандинавская модель (Fennoscandian model

– *fen*); собственная модель (*baltic08*). Собственная региональная модель скорости *baltic08* создана на основе результатов глубинного сейсмического зондирования по геотраверсу Советск–Рига–Кохтла-Ярве [Садов, Пензина, 1986]. Модель *baltic08* состоит из пяти слоёв со следующими глубинами залегания подошвы слоя: осадочный ($h_1=1.0$ км), гранитно-метаморфический ($h_2=20.0$ км), диорит-гранулитовый ($h_3=42.0$ км), базит-гранулитовый ($h_4=57.0$ км), габбро-периодит-пироксеновый ($h_5=70.0$ км).

Результаты и обсуждение

В этом разделе представлены результаты локализации региональных сейсмических событий сетью BAVSEN. Обсуждаются вопросы качества локализации сейсмических событий, идентификации природы сейсмических событий, использование мониторинга телесеismicких событий для идентификации ядерных взрывов.

1. Региональный сейсмологический мониторинг ВБР

Сейсмический мониторинг осуществляется для всего ВБР, поскольку тектонические землетрясения, подобные Калининградским землетрясениям 2004 г. с максимальной магнитудой 5.2, могут вызвать повреждения на расстояниях более 200 км, как это произошло на территории некоторых населённых пунктов Латвии [Nikulín, 2005; Никулин, 2008]. Поэтому знание сейсмической активности в удалённых зонах возникновения очагов землетрясений, даже за пределами Латвии, имеет важное практическое значение. Сейсмологический мониторинг ВБР включает локализацию и исследование тектонических землетрясений и техногенных сейсмических событий.

1.1. Тектонические землетрясения ВБР

За инструментальный период наблюдений с 2008 по 2019 г. ВБР ($\varphi=53.9-59.7^\circ\text{N}$; $\lambda=19.4-29.6^\circ\text{E}$) наблюдалась низкая природная сейсмическая активность, вызванная тектоническими землетрясениями. В таблице представлены результаты сравнения локализации землетрясений по данным BAVSEN и UHIS.

Сейсмические события в ВБР локализуются также двумя Скандинавскими сетями сейсмологических наблюдений – NORSAR (Норвегия) и UHIS (Финляндия). Зона ответственности UHIS на территории ВБР простирается примерно до широты 57.5° . UHIS систематически обновляет информацию о землетрясениях в Северной Европе на своей Интернет-странице

Таблица. Сравнение результатов локализации инструментально зарегистрированных тектонических землетрясений ВБР ($\varphi=53.9-59.7^\circ\text{N}$; $\lambda=19.4-29.6^\circ\text{E}$) с 2008 по 2019 г. по данным BAVSEN и UHIS

№	Дата, дд.мм.гггг	Время, чч.мм.сс.с	φ , °N	λ , °E	h , км	ML	Район	Агентство
1	04.02.2013	20:17:53.5	58.931	23.544	3.7	1.6	Западная Эстония	LEGMC
		20:17:54.2	58.921	23.522	4.4	1.0	Ridala, Западная Эстония, ощутимое	UHIS
2	12.11.2016	02:49:51.8	58.334	26.113	2.4	2.4	Эстония, район озера Выртсъярв	LEGMC
		02:49:52.8	58.304	26.193	1.4	1.8	Эстония	UHIS
3	22.03.2017	03:00:28.1	59.339	24.366	0	1.3	Северная Эстония	LEGMC
		03:00:27.5	59.340	24.356	4	1.2	Keila, Северная Эстония	UHIS
4	15.07.2017	08:01:49.2	59.054	22.952	17.0	2.5	Северо-западное побережье Эстонии	LEGMC
		08:01:50.5	59.047	22.956	12.2	2.1	Niiumaa, северо-западное побережье Эстонии	UHIS
5	04.03.2018	01:21:43.3	58.929	23.676	10.9	2.1	Западная Эстония	LEGMC
		01:21:44.6	58.922	23.682	5	1.7	Naapsalu, Западная Эстония, ощутимое	UHIS
6	27.03.2018	06:50:30.7	59.720	21.893	0	2.0	Балтийское море	LEGMC
		06:50:29.4	59.695	21.913	5	1.6	Балтийское море, Финляндия	UHIS
7	13.06.2018	10:59:58.8	58.763	23.803	4.2	1.6	Западная Эстония	LEGMC
		10:59:58.3	58.692	23.893	4	1.0	Западная Эстония	UHIS
8	26.03.2019	01:02:27.8	59.671	22.400	5.6	1.9	Финляндия	LEGMC
		01:02:28.9	59.653	22.366	5.0	1.5	Kemionsaari, Финляндия	UHIS

(http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog_northeurope.html), имеет наиболее полноценный и компетентный каталог всех сейсмических событий, включая землетрясения на территории ВБР (<http://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/pdfbul.html>), идентифицирует тип сейсмических событий. NORSAR использует главным образом сейсмические группы (seismic array), публикует предварительный, непроверенный и полностью автоматический бюллетень сейсмических событий GBF (Generalized Beamforming), а также региональный рецензируемый бюллетень RRB (Regional Reviewed Bulletins). Последний содержит сейсмические события, подтвержденные, как правило, не менее, чем тремя сейсмическими группами. В RRB-бюллетене магнитудный порог обычно выше 2.0, поэтому в нём очень мало сейсмических событий ВБР.

На рис. 4 представлена карта распределения инструментально зарегистрированных тектонических землетрясений ВБР с 2008 по 2019 г. по данным LEGMC и UHIS.

Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что локальные магнитуды землетрясений по данным LEGMC на 0.4–0.6 единиц больше локальных магнитуд по данным UHIS, приня-

тым за эталонные. Вероятно, это связано с тем, что на станциях, расположенных в ВБР, имеет место резонансное усиление осадочного чехла и особенно его верхней части – четвертичных отложений.

Количество сейсмических станций и фаз сейсмических волн, которые UHIS использовало для локализации землетрясений, соответственно, в 3.4 и 3.7 раз превышает это количество у BAVSEN. Кроме того, сейсмическая брешь – GAP для UHIS меньше, чем для BAVSEN примерно на 60°. К сожалению, возможности BAVSEN с редкой сетью сейсмических станций существенно ограничены.

1.2. Техногенная сейсмичность ВБР

В Латвии и ВБР наблюдается довольно высокая техногенная сейсмичность, обусловленная взрывами в промышленных карьерах и в акватории Балтийского моря. На территории Латвии и Восточно-Балтийского региона расположено около 50 промышленных карьеров, включая несколько шахт на территории Эстонии [Nikulins, 2017]. Взрывной метод используется в промышленных карьерах и шахтах, где добываются горючий сланец, доломит, известняк и гипс.

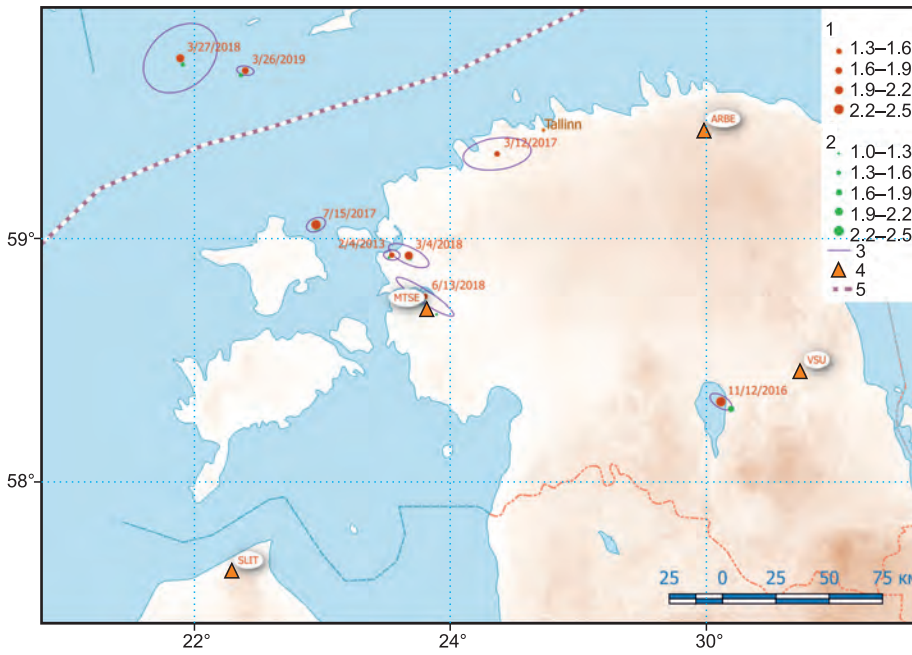


Рис. 4. Сравнение локализации эпицентров землетрясений Восточно-Балтийского региона по данным BAVSEN и UHIS за период с 2008 по 2019 г.

1 – локальные магнитуды по данным BAVSEN;
 2 – локальные магнитуды по данным UHIS;
 3 – эллипс ошибок для данных BAVSEN;
 4 – сеть BAVSEN;
 5 – газопровод «Северный поток»

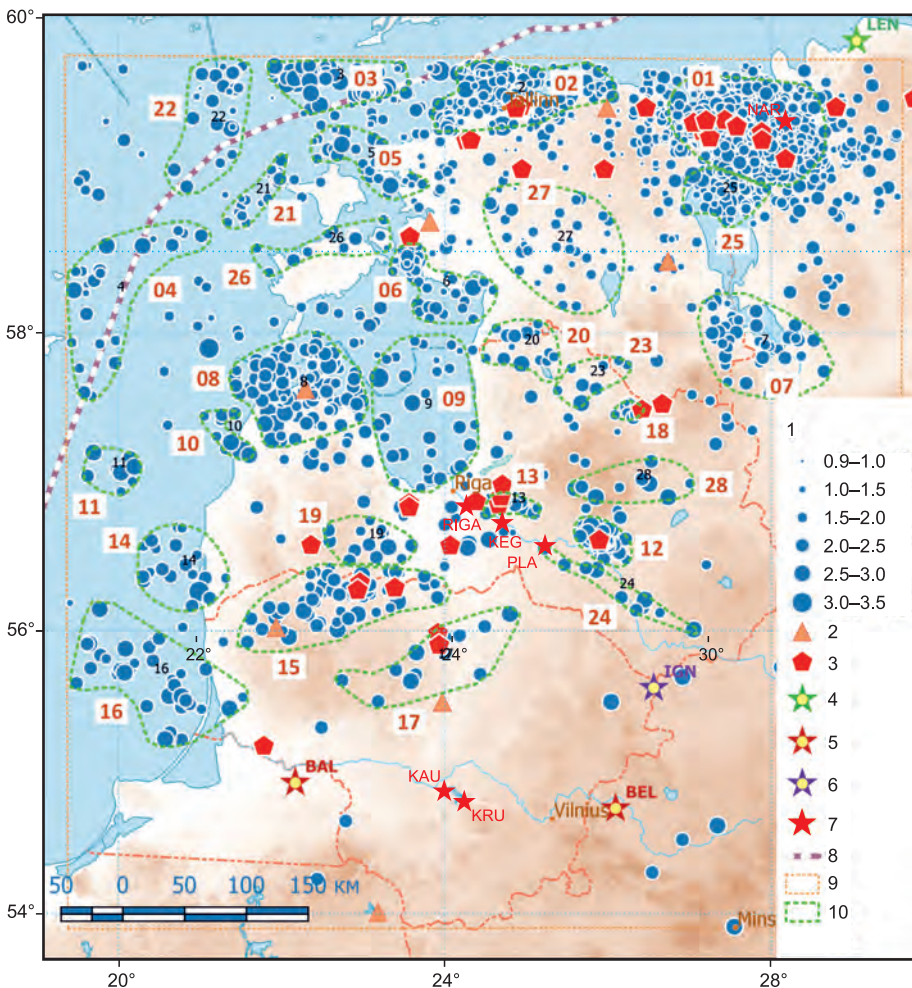


Рис. 5. Техногенная сейсмичность Восточно-Балтийского региона.

1 – локальная магнитуда техногенных сейсмических событий (взрывов);
 2 – станции сети BAVSEN;
 3 – промышленные карьеры, в которых применяется технология взрывания пластов;
 4 – действующие АЭС;
 5 – строящиеся АЭС;
 6 – закрытые АЭС;
 7 – ГЭС;
 8 – газопровод «Северный поток»;
 9 – граница Восточно-Балтийского региона;
 10 – граница зон концентрации эпицентров сейсмических событий (ЗКЭСС)

Активность техногенных источников существенно различна. В Латвии и в остальной части ВБР в целом активность уменьшилась в связи с продолжающимся экономическим кризисом. По-прежнему идёт активная разработка горючего сланца на северо-востоке Эстонии, в районах Mustanina, Sillamae, Kivioli, Audu-Liiva. В Латвии продолжает стабильно функционировать только карьер "Aiviekste", в котором добывают доломит. Взрывы в других карьерах Латвии и Литвы проводятся редко. Карта распределения инструментально зарегистрированных сейсмических событий ВБР с 2008 по 2019 г. представлена на рис. 5.

Тектонические землетрясения, указанные в таблице, исключены из рассмотрения. В течение этого периода в ВБР было локализовано 5644 сейсмических события. Общее количество региональных сейсмических событий, локализованных сетью BAVSEN, достигает 12232. Кроме того, за указанный период наблюдений было локализовано 1096 телесеизмических событий.

Подавляющее количество региональных сейсмических событий ВБР связано с техногенными сейсмическими источниками. Это наглядно видно из суточного распределения сейсмических событий (рис. 6). Большинство сейсмических событий (96–97 %) происходит в дневное, рабочее время. Даже те сейсмические события, которые произошли до начала (<6 ч) или после конца (>17 ч) рабочего дня, также могли быть связаны с техногенными источниками, включая морские взрывы. Морские взрывы могут происходить в любое время суток, в любой день недели. Они связаны с техническими, геофизическими работами на море, операциями по уничтожению морских мин Второй, и даже Первой мировых войн, военно-морскими учениями.

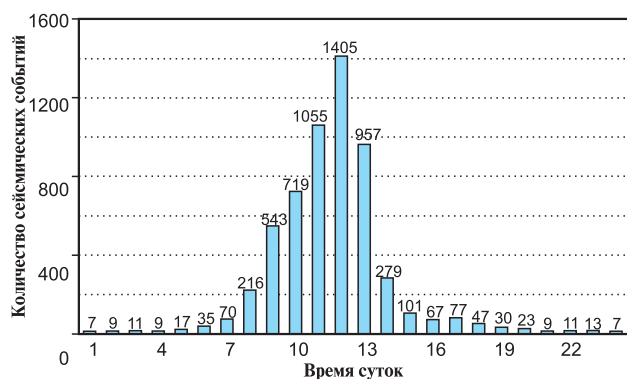


Рис. 6. Суточное распределение сейсмических событий в Восточно-Балтийском регионе ($\varphi=53.9-59.7^{\circ}\text{N}$; $\lambda=19.4-29.6^{\circ}\text{E}$)

Зоны концентрации эпицентров сейсмических событий (ЗКЭСС), показанные на рис. 5, выделены достаточно условно. При локализации сейсмического события может произойти отклонение эпицентра сейсмического события от его реального положения. Разброс эпицентров сейсмических событий происходит из-за неоптимальной скоростной модели. Тем не менее, ряд сейсмических событий достаточно хорошо концентрируются вокруг реальных эпицентров (ЗКЭСС № 3, 7, 11, 12, 14, 16 и др.). Для ЗКЭСС № 1 замечен значительный разброс эпицентров взрывов. В этом районе действует не менее 11 карьеров и шахт по добыче горючего сланца, и взрывы рассредоточены между ними. Со стороны Чудского озера к ЗКЭСС № 1 примыкает ЗКЭСС № 25, которая выделена как самостоятельный сейсмический источник, вероятно имеющий техногенный характер. Три ЗКЭСС (№ 3, 4, 22) расположены вблизи трассы «Северный поток». ЗКЭСС № 8 расположена в Ирбенском проливе, и с большой вероятностью этот источник связан с морскими взрывами. ЗКЭСС № 7 расположена в районе Псковского озера. Ряд источников ЗКЭСС, очевидно, связан с промышленными карьерами (ЗКЭСС № 12 – с "Aiviekste", ЗКЭСС № 15 – с "Menciai", "Karpenai" и "Skaitgirys", ЗКЭСС № 17 – с "Petrasijunai II" и "Klovainiai"). Сложнее идентифицировать ЗКЭСС, расположенные в Балтийском море или в оффшорной зоне. Это относится к ЗКЭСС № 5, 6, 11, 14, 16.

Особого внимания заслуживает сейсмическое событие, зарегистрированное и локализованное сетью BAVSEN 12 июня 2015 г. (08:18:26 GMT). Эпицентр этого события располагался в Юго-Западной Литве, недалеко от Куршского залива ($\varphi=55.52^{\circ}\text{N}$; $\lambda=21.42^{\circ}\text{E}$). Оценка основных параметров дала следующие результаты: $ML=2.6$, $h=0.9$ км. В этом районе Литвы нет промышленных карьеров, однако есть тектонический узел, образованный Гаргждайским и Южно-Шилальским разломами. Кроме того, эпицентр расположен недалеко от Клайпедско-Вильнюсской сутуры и геотермальной аномалии (геотермический градиент $4^{\circ}\text{C}/100$ м). Разработка геотермальных ресурсов из отложений кембрия – нижнего девона, началась в 2000 году. Количество тепловых насосов возросло до 5500, а их общая мощность достигла максимальной величины – 76.6 МВт. На основании всего комплекса признаков был сделан вывод об индуцированном характере этого сейсмического события, обусловленного разработкой геотермальных ресурсов [Nikulins, Assinovskaya, 2018].

Совершенно очевидно, что для ВБР очень актуальна проблема распознавания природы сейсмических событий. Существенным фактором, который затрудняет распознавание, является геологическое строение. Отражающие и преломляющие сейсмические границы осадочного чехла способствуют возникновению сложной интерференционной, волновой картины. Основным опорным отражающим горизонтом является поверхность ордовика, залегающего на глубинах 800–2050 м [Садов, Пензина, 1986] и прослеживающегося на большей части территории ВБР. В меньшей степени отражающие свойства присущи поверхности силура и, тем более, девона, фрагментарно прослеживающегося в разрезах. Из-за наличия в осадочном чехле многочисленных отражающих границ, вступления сейсмических волн от региональных сейсмических событий, особенно вступление первой P -волны, ослабляются, и поэтому их сложно выделять на сейсмограммах. Вступление первой P -волны для региональных сейсмических событий часто определяется по станциям сети BAVSEN, расположенным на Скандинавском щите (MEF и RAF). На станциях же, расположенных в ВБР, первое вступление P -волны выделить значительно сложнее, а иногда практически невозможно. Многие методы идентификации природы сейсмических событий основаны именно на первых P -волнах. Дополнительным фактором, усложняющим идентификацию генезиса сейсмических событий, является небольшая магнитуда, обычно не превышающая 2.5–2.6.

Спектральные характеристики, отношение P/S волн, спектрально-временной анализ (СВАН) не являются надёжными дискриминантами для определения генезиса региональных сейсмических событий ВБР, расположенном на северо-западе ВЕП. Можно отметить более высокочастотный характер спектров взрывов на северо-востоке Эстонии по сравнению со спектром землетрясения 12 ноября 2016 г. (02:49:53) в районе озера Выртсъярв в Эстонии [Nikulins, 2017]. Однако из-за низкой сейсмической активности нет достаточного количества волновых форм землетрясений для сопоставления спектральных характеристик и обнаружения надёжного дискриминанта. Нет значимых спектральных различий этого землетрясения и индуцированного землетрясения 12 июня 2015 г. (08:18:26). С точки зрения идентификации сейсмических событий разного генезиса, амплитудные отношения P - и S -волн для разных полосовых фильтров дают несколько лучший резуль-

тат. В частности, это относится к вышеупомянутому землетрясению 12 ноября 2016 г. и взрывам на северо-востоке Эстонии. Для этого землетрясения отношение P/S не превышает 0.6 (интервал от 0.05 до 0.6) в частотном диапазоне от 4 до 16 Гц. Для взрывов на северо-востоке Эстонии отношение P/S находилось в интервале от 0.2 до 1.8. Однако для морских сейсмических событий критерий амплитудного отношения P/S волн – не удовлетворительный [Nikulins, 2017]. Спектрально-временной анализ (СВАН) пока не позволил рассматривать его как надёжный дискриминант между взрывами и землетрясениями из-за недостаточного объёма волновых форм, а также из-за сложности выделения первого вступления P -волны на многих станциях ВБР. Незначительный объём исследований параметра сложности (complexity) в ВБР [Nikulins, 2017], с точки зрения дискриминанта между землетрясениями и взрывами, также не позволил однозначно оценить его эффективность.

Качество применяемых сейсмических моделей для ВБР было проверено на взрывах в карьере "Aiviekste" (Латвия), расположенном на западе Латвийской синеклизы. Эти взрывы были точно идентифицированы по времени возникновения в соответствии с данными горнодобывающей компании. Для анализа были использованы 60 взрывов за период с 2013 по 2019 год. Для них были известны массы взрывчатых веществ в тротиловом эквиваленте, которые изменялись от 3.2 до 6.3 т. Поскольку основной задачей производства взрывов было разрыхление пластов доломита, применялась схема взрывания с задержкой между ступенями до нескольких десятков миллисекунд [Nikulins, 2017]. 76.7 % всех взрывов в карьере "Aiviekste" было локализовано сетью BAVSEN с использованием модели *baltic08* (рис. 7). Ошибка определения координат карьера (ООКК) была значительно меньше (от 0.55 до 55.8 км), чем для других моделей. В 16.7 % случаев взрывы были лучше локализованы с использованием модели *fen*, а ООКК изменялась от 10.9 до 439 км. Стандартное отклонение по данным сети BAVSEN значительно меньше ($\delta_{\text{BAVSEN}}=10.8$ км) стандартного отклонения по данным сети NORSAR ($\delta_{\text{NORSAR}}=93.8$ км).

Модель сейсмических скоростей *baltic08* является более оптимальной при локализации сейсмических событий в центральной части ВБР, и, в частности, на территории Латвии. В других случаях, например, при локализации взрывов на северо-востоке Эстонии, более оптимальной является модель *fen*.

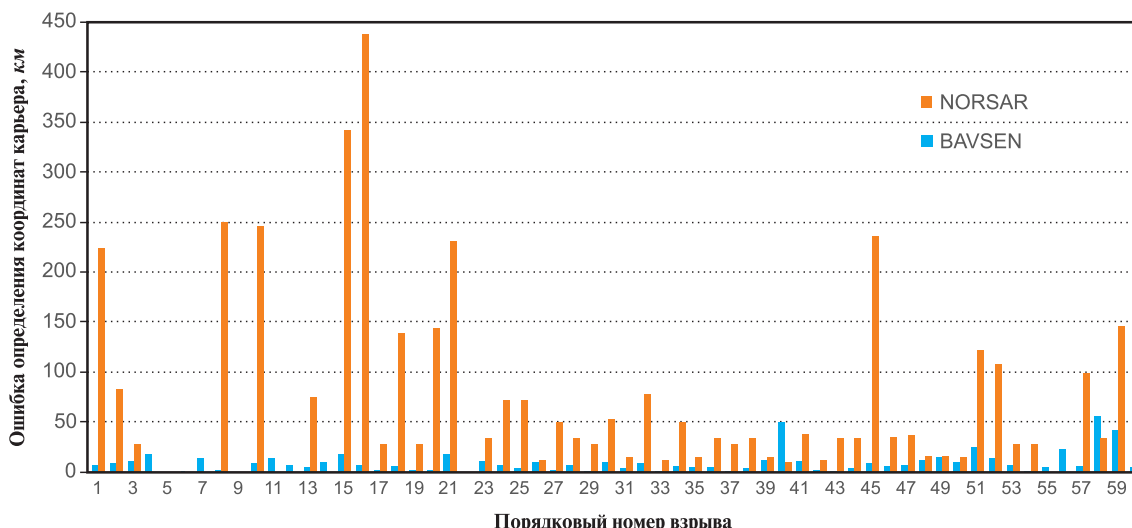


Рис. 7. Сравнение точности локализации эпицентров взрывов в карьере "Aiviekste" (Латвия) сетями сейсмологических наблюдений BAVSEN и NORSAR

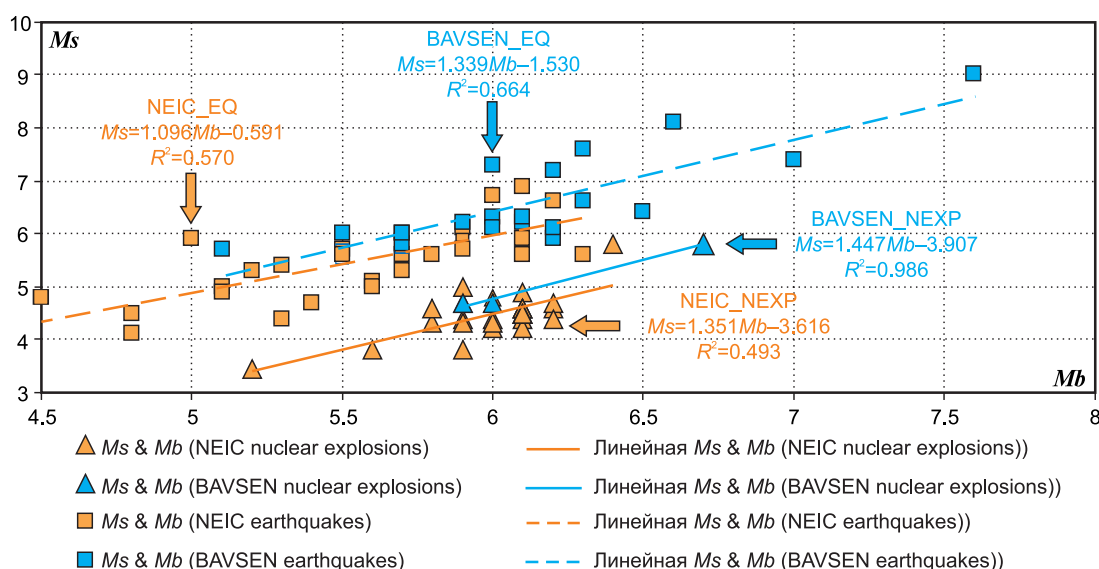


Рис. 8. Корреляция между магнитудами M_s и m_b для телесейсмических землетрясений и ядерных взрывов по данным сейсмических сетей BAVSEN и ASN

2. Мониторинг телесейсмических событий

Главной задачей сейсмического мониторинга с использованием сети BAVSEN является исследование региональной сейсмической активности. Вместе с тем, региональная сеть BAVSEN позволяет локализовать и телесейсмические события. За период наблюдений с 2008 по 2019 г. было локализовано 1146 телесейсмических событий – главным образом сильных землетрясений с магнитудой больше 5.5–6.0. Среди этих телесейсмических событий были и ядерные взрывы, произведённые в Северной Корее. С помощью удалённой региональной сейсмической сети была выполнена идентификация ядерных взрывов [Nikulins, 2019a]. Использовался критерий отношения разных типов магнитуд (рис. 8),

а именно, отношения магнитуды по поверхностным волнам к магнитуде по объёмным волнам M_s/m_b .

Результаты идентификации ядерных взрывов по данным сети BAVSEN сравнивались с аналогичными результатами, полученными с помощью Асуанской сейсмической сети [Kebeasy et al., 1998]. Количество ядерных взрывов, зарегистрированных сетью BAVSEN для 12-летнего периода, было ограничено. С 2006 по 2017 г. мощность корейских ядерных взрывов возрастала постепенно. Поэтому только для трёх последних взрывов удалось определить соответствующие магнитуды. В соответствии с результатами обоих исследований, линейные регрессии для землетрясений и взрывов весьма близки.

Заключение

Современные сейсмологические исследования, выполненные в Латвии в течение 2008–2019 гг., позволили локализовать в ВБР с помощью Балтийской виртуальной сейсмической сети как немногочисленные тектонические землетрясения, так и техногенные события в промышленных карьерах и в акватории Балтийского моря, имеющие массовый характер. Оптимальность скоростной модели для центральной части ВБР основана на калиброванных взрывах в карьере "Aiviekste". Для большей части Эстонии более оптимальна модель *Fennoscandian*. Основной проблемой сейсмического мониторинга в ВБР является идентификация генезиса сейсмических событий. В настоящее время нет эффективных критериев для решения этой проблемы. Проблема идентификации сейсмических событий обусловлена неблагоприятными сейсмогеологическими условиями осадочного чехла, ограниченным количеством сейсмических станций сети BAVSEN, слабой природной, сейсмической активностью и низкими магнитудами сейсмических событий. Получены корреляционные зависимости между магнитудами M_s и m_b , которые позволили идентифицировать ядерные взрывы в Северной Корее на основе данных удалённой региональной сейсмической сети BAVSEN.

Перспективы развития сейсмологических исследований в ВБР могут быть связаны с решением следующих задач: 1 – накопление в базе данных волновых форм землетрясений и взрывов ВБР; 2 – поиск оптимальных дискриминантов, включая амплитудные отношения P/S , спектральные отношения, СВАН, сложность (complexity) и другие методы для идентификации генезиса слабых сейсмических событий ($M_L < 2.5$) ВБР; 3 – оптимизация скоростной модели среды для ВБР на основе сбора данных о калиброванных сейсмических источниках; 4 – исследование динамических свойств грунтов, влияющих на интенсивность колебаний, на основе метода отношения горизонтальных и вертикальных спектров HVSR (метод Накамуры); 5 – комплексный мониторинг крупных инженерно-технических (Плявиньской ГЭС и др.), экологически опасных объектов и агломераций (Рига и др.); 6 – сейсмическое микрорайонирование агломераций, территорий, предназначенных для проектирования и строительства сложных инженерно-технических, экологически опасных объектов и транспортных коммуникаций (проект Rail Baltica); 7 – создание Национального центра данных для максимального

использования ресурсов СТВТО (International Monitoring System и International Data Centre) с целью контроля радиационной обстановки на территории ВБР.

Литература

- Никонов А.А.* Морозобойные сотрясения как особый класс сейсмических явлений (по материалам Восточно-Европейской платформы) // *Физика Земли*. – 2010. – № 3. – С. 79–96.
- Никонов А.А.* Нетектонические землетрясения Восточно-Европейской платформы // *Природа*. – 1995. – № 10. – С. 26–38.
- Никонов А.А.* Проблема выделения нетектонических землетрясений на Восточно-Европейской платформе в оценке сейсмической опасности // *Недра Поволжья и Прикаспия*. – 1996. – № 13. – С. 42–49.
- Никулин В.Г.* Калининградские землетрясения 2004 года и их проявления на территории Латвии // *Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года*. – СПб.: ГАО РАН, АНО «Геориск» РАЕН, ИВП РАН, РГУ им. Иммануила Канта, 2008. – С. 104–109.
- Садов А.С., Пензина В.Н.* Изучение глубинного строения земной коры (региональные сейсморазведочные работы ГСЗ) по геотраверсу г. Советск – г. Рига – г. Кохтла-Ярве // *Отчёт Калининградской комплексной геофизической экспедиции*. 1 т. – Рига: ПГО «Севзапгеология», 1986. – 208 с.
- Doss B.* Die Erdstöße in der Ostseeprovinzen im Dezember 1908 und Anfang 1909 // *Korrespondenzblatt des Naturforschenden-Vereins zu Riga*. – 1910. – LIII. – P. 73–107.
- 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.
- Grunthal G., et al.* Seismic hazard assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3 // *Annals of Geophysics*. – 1999. – V. 42, N 6. – P. 999–1011.
- Kebeasy R.M., Hussein A.I., Dahy S.A.* Discrimination between natural earthquakes and nuclear explosions using the Aswan Seismic Network // *Annals of Geophysics*. – 1998. – V. 41, N 2. – P. 127–140.
- Lienert B.R.E., Berg E., Frazer L.N.* Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1986. – № 76. – С. 771–783.

- Lienert B.R.E., Havskov J.* A computer program for locating earthquakes both locally and globally // *Seis. Res. Lett.* – 1995. – N 66. – P. 26–36.
- LVS EN 1998-1. Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules – Seismic action and rules for buildings // European Committee for Standardization. – 2005. – 229 p.
- Nikonov A.A., Aptikaev F.F., Aleshin A.S., Assinovskaya B.A., Pogrebchenko V.V., Ponomareva O.N.* Kaliningrad earthquake of September 21, 2004, macroseismic data for near and mesoseismal zones // *Kaliningrad earthquake September 21, 2004. Workshop Materials.* – 2005. – P. 26–29.
- Nikulins V.* Assessment of the seismic hazard in Latvia. Version of 2007 year // *Scientific Journal of Riga Technical University. Material Science and Applied Chemistry.* – 2011. – Ser. 1, N 24. – P. 110–115.
- Nikulins V.* Estimations of seismic effects in Latvia from the Kaliningrad earthquake of September 21, 2004 // *Kaliningrad earthquake September 21, 2004.* – Tartu: Institute of Geology, University of Tartu, Geological Survey of Estonia, 2005. – P. 30–31.
- Nikulins V.* Detection of Nuclear Explosions by Remote Regional Seismic Network // *SnT 2019 Book of abstracts.* – Vienna, Austria: CTBTO, 2019a. – P. 77.
- Nikulins V.* Geodynamics hazard factors of Latvia: Experimental data and computational analysis // *Baltic Journal of Modern Computing.* – 2019b. – V. 7, N 1. – P. 151–170.
- Nikulins V.* Seismicity of the East Baltic region and application-oriented methods in the conditions of low seismicity. – Riga: LU Akademiskais apgads, 2017. – 291 p.
- Nikulins V., Assinovskaya B.* Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004 // *Baltica.* – 2018. – V. 42, N 1. – P. 35–48.
- Safronovs O.N., Nikulins V.G.* Latvijas visparīga seismiska rajonesana // *Latvijas geologijas vestis.* – 1999. – N 6. – P. 30–35. (латв.).
- Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annals of Geophysics.* – 1999. – V. 42, N 6. – P. 1023–1038.

Сведения об авторе

Никелин Валерий Георгиевич, д-р геологии, сейсмолог Латвийского центра окружающей среды, геологии и метеорологии, г. Рига, Латвия. E-mail: valerijs.nikulins@lvgmc.lv

Modern seismological surveys in Latvia from 2008 to 2019 and prospects for their development

© 2020 V.G. Nikulins

LEGMC, Riga, Latvia

Abstract In Latvia, seismological monitoring has been carried out at Slitere station since 2006. Slitere station is part of the GEOFON international network, with its center at GFZ Potsdam. The use of other stations of the GEOFON network and some stations of national networks of Finland and Estonia allows monitoring the entire East Baltic Region (VBR), including Estonia, Latvia, Lithuania, the Kaliningrad Region of Russia and the adjacent part of Baltic Sea (Lat=53.9°N - 59.7°N; Lon=19.4°E - 29.6°E). The impetus for the development of seismological monitoring was the Kaliningrad earthquakes of 2004 with Mw 5.0 and 5.2. The main object of research, in addition to tectonic earthquakes, is man-made seismicity, which prevails in Latvia and in EBR. Because of seismic monitoring for the period from 2008 to 2019, 8 tectonic earthquakes were localized, as well as more than 5640 man-made seismic events. The total number of seismic events localized by the BAVSEN network is 13328, including 1146 teleseismic events. The relevance of seismological monitoring is increasing due to unfavorable geodynamic conditions in the area where some large energy, transport facilities and agglomerations are located, which requires a study of the seismic regime of the territories around these objects. The main problems of EBR seismic monitoring are associated with the identification of relatively weak seismic events, with a rare network of seismic stations, adverse seismic and geological conditions of the sedimentary cover and low activity of EBR tectonic earthquakes. The lack of promising methods for recognizing the genesis of seismic events puts this problem in first place. The prospects for seismological research in Latvia are related to the study of the seismic and geological properties of grounds, seismic micro zoning, monitoring of hydraulic structures, as well as the possibility of creating a National Data Center, within which seismological monitoring can become one of the main methods for radiation safety of EBR.

Keywords East Baltic region, LEGMC, BAVSEN, seismological monitoring, technogenic seismicity, discriminant.

For citation Nikulins, V.G. (2020). [Modern seismological surveys in Latvia from 2008 to 2019 and prospects for their development]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 27-39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.03>

References

- Doss, B. (1910). Die Erdstöße in der Ostseeprovinzen im Dezember 1908 und Anfang 1909. *Korrespondenzblatt des Naturforscher-Vereins zu Riga, LIII*, 73-107.
- 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.
- Grunthal, G., et al. (1999). Seismic hazard assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3. *Annals of Geophysics*, 42(6), 999-1011.
- Kebeasy, R.M., Hussein, A.I., & Dahy, S.A. (1998). Discrimination between natural earthquakes and nuclear explosions using the Aswan Seismic Network. *Annals of Geophysics*, 41(2), 127-140.
- Lienert, B.R.E. & Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66, 26-36.
- 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, 771-783.
- LVS EN 1998-1. (2005). Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules – Seismic action and rules for buildings. *European Committee for Standardization*, 229 p.
- Nikonov, A.A. (1995). [East European Platform's Non-Tectonic Earthquakes]. *Priroda* [Nature], 10, 26-38. (In Russ.).
- Nikonov, A.A. (1996). [The problem of the allocation of non-tectonic earthquakes on the East European platform in the assessment of seismic hazard]. *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija* [Volga and Pricaspian Region Resources], 13, 42-49. (In Russ.).
- Nikonov, A.A. (2010). Frost quakes as a particular class of seismic events: observations within the East-European Platform. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 46(3), 257-273.
- Nikonov, A.A., Aptikaev, F.F., Aleshin, A.S., Assinovskaya, B.A., Pogrebchenko, V.V., & Ponomareva,

- O.N. (2005). Kaliningrad earthquake of September 21, 2004, macroseismic data for near and mesoseismal zones. In *Kaliningrad earthquake September 21, 2004* (pp. 26-29). Workshop Materials.
- Nikulin, V. (2005). Estimations of seismic effects in Latvia from the Kaliningrad earthquake of September 21, 2004. In *Kaliningrad earthquake September 21, 2004* (pp. 30-31). Tartu, Estonia: Institute of Geology, University of Tartu, Geological Survey of Estonia.
- Nikulin, V. (2011). Assessment of the seismic hazard in Latvia. Version of 2007 year. *Scientific Journal of Riga Technical University. Material Science and Applied Chemistry*, 1(24), 110-115.
- Nikulin, V.G. (2008). [2004 Kaliningrad earthquakes and their manifestations in Latvian territory]. In *Kaliningradskoe zemletrjasenie 21 sentjabrja 2004 goda* [Kaliningrad earthquake September 21, 2004] (pp. 104-109). SPb., Russia: GAO RAS, ANO "Georisk" RANS, IWP RAS, RSU named after Immanuel Kant Publ. (In Russ.).
- Nikulins, V. (2017). *Seismicity of the East Baltic region and application-oriented methods in the conditions of low seismicity*. Riga, Latvia: LU Akademiskais apgads, 291 p.
- Nikulins, V. (2019a). Detection of Nuclear Explosions by Remote Regional Seismic Network. In *SnT 2019 Book of abstracts* (p. 77). Vienna, Austria: CTBTO.
- Nikulins, V. (2019b). Geodynamics hazard factors of Latvia: Experimental data and computational analysis. *Baltic Journal of Modern Computing*, 7(1), 151-170.
- Nikulins, V., & Assinovskaya, B. (2018). Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004. *Baltica*, 42(1), 35-48.
- Sadov, A.S., & Penzina, V.N. (1986). [Study of the deep structure of the Earth's crust (regional seismic exploration works by DSS) on the Sovetsk - Riga - Kohtla-Järve geotraverse]. In *Otchet Kaliningradskoi kompleksnoi geofizicheskoj ekspeditsii. t. 1* [Report of the Kaliningrad integrated geophysical expedition, V. 1]. Riga, Latvia: PGO "Sevzapgeologija" Kaliningradskaja kompleksnaja geofizicheskaja ekspedicija, 208 p. (In Russ.).
- Safronovs, O.N., & Nikulins, V.G. (1999). [General seismic zoning of Latvia]. *Latvijas geologijas vestis* [News of Latvian Geology], 6, 30-35. (In Latvian).
- Ulomov, V.I. (1999). Seismic hazard of Northern Eurasia. *Annals of Geophysics*, 42(6), 1023-1038.

Information about author

Nikulins Valerijs, Dr., seismologist of the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre (LEGMC), Riga, Latvia. E-mail: valerijs.nikulins@lvgmc.lv