

СЕЙСМИЧНОСТЬ УРАЛА и ЗАПАДНОЙ СИБИРИ в 2016–2017 гг.

Ф.Г. Верхоланцев¹, И.В. Голубева¹, Р.А. Дягилев², Т.В. Злобина³

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, *sombra@mail.ru*,

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, *dra@gsras.ru*,

³ГИ УрО РАН, г. Пермь, *tati.verkholantseva@gmail.com*

Аннотация. В статье приведены сведения о действующей сети сейсмических станций на территории Урала и Западной Сибири, методике обработки данных, дан краткий анализ сейсмической активности в регионе в 2016–2017 гг. Показаны регистрационные возможности региональной сети на всей представленной территории. Отмечено, что 84 % зарегистрированных сетью событий приходится на технологические взрывы на горнодобывающих предприятиях, 99 событий имеют отношение к природной или природно-техногенной сейсмичности. Для наиболее сильных событий последней группы приведены варианты определений очаговых параметров, полученные другими агентствами.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмическая сеть, магнитуда, сейсмический режим, горно-тектонический удар, землетрясение, взрыв, Главный Уральский Надвиг.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20 **EDN:** CFBNRE

Для цитирования: Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 222–234. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20. EDN: CFBNRE

Введение. Объединенный регион «Урал и Западная Сибирь» охватывает огромную площадь континентальной части консолидированной Евразийской литосферной плиты. В пределах исследуемой территории в ее состав входят весьма разнородные в тектоническом плане блоки земной коры, характеризующиеся различным строением, историей развития и возрастом кратонизации (рис. 1). Большую часть региона занимают платформенные территории, что отражается в особенностях сейсмического режима. На востоке это Сибирская платформа с добайкальским фундаментом преимущественно блокового строения, сведения о сейсмичности которой крайне скудны, в центре – более молодая Западно-Сибирская плита с гетерогенным палеозойским фундаментом. Несмотря на то, что в мезозойское время фундамент Западно-Сибирской плиты был подвергнут рифтогенезу, данная тектоническая структура также слабосейсмична [1]. На западе региона – Восточно-Европейская платформа с добайкальским фундаментом, представленная Волго-Уральской антеклизой, состоящей из архейских блоков, сцементированных архейскими подвижными поясами. Структура антеклизы осложнена авлакогенами, в пределах которых известны ощутимые, в том числе инструментально зафиксированные, землетрясения [2, 3].

Наиболее интересной как с тектонической, так и с сейсмологической точки зрения, является та часть на западе исследуемого региона, где расположены практически все сейсмические станции. Это Уральские горы, представляющие собой четко выраженную субмеридиональную линейную складчатую систему, разделяющую древнюю Восточно-Европейскую и более молодую Западно-Сибирскую платформы. Согласно современным представлениям, Урал является покровно-складчатым сооружением, в строении которого, кроме автохтонных, участвуют аллохтонные структуры, присутствуют элементы рифтогенных, обдуктивных и субдуктивных структур и комплексов. В соответствии с этим, строение Урала рассматривается как результат сочетания процессов растяжения и сжатия литосферы, сопровождавшихся крупными горизонтальными и вертикальными перемещениями и взаимодействием ее отдельных сегментов. В настоящее время считается бесспорным приоритет горизонтальных перемещений вещественных комплексов, что привело к созданию чешуйчато-надвиговой модели строения Уральского подвижного пояса взамен ранее существовавшей складчато-блоковой [4]. В целом Урал достаточно четко подразделяется на ряд продольных мегазон, прослеживающихся почти на всем протяжении Уральского складчатого пояса и различающихся как рельефом поверхности, так и глубинным строением. Западной границей Урала является Предуральский краевой прогиб – зона контакта складчатых сооружений с Восточно-Европейской платформой. Одной из важнейших тектонических структур подвижного пояса Урала является Главный Уральский надвиг, протягивающийся

вдоль всего Уральского хребта [5]. С тектонической точки зрения он представляет собой надвиг, по которому острово-дужные и подстилающие их океанические комплексы надвинуты на континентальную кору. Несмотря на палеозойское заложение, современный Уральский ороген является в значительной мере неотектонической структурой. Амплитуды новейших тектонических поднятий оцениваются в 200–400 м. [4]. Вместе с тем, границы неотектонических блоков совпадают с региональными разломами палеозойских структур, омоложенных неотектоникой и являющихся естественными границами геоморфологических зон [5].

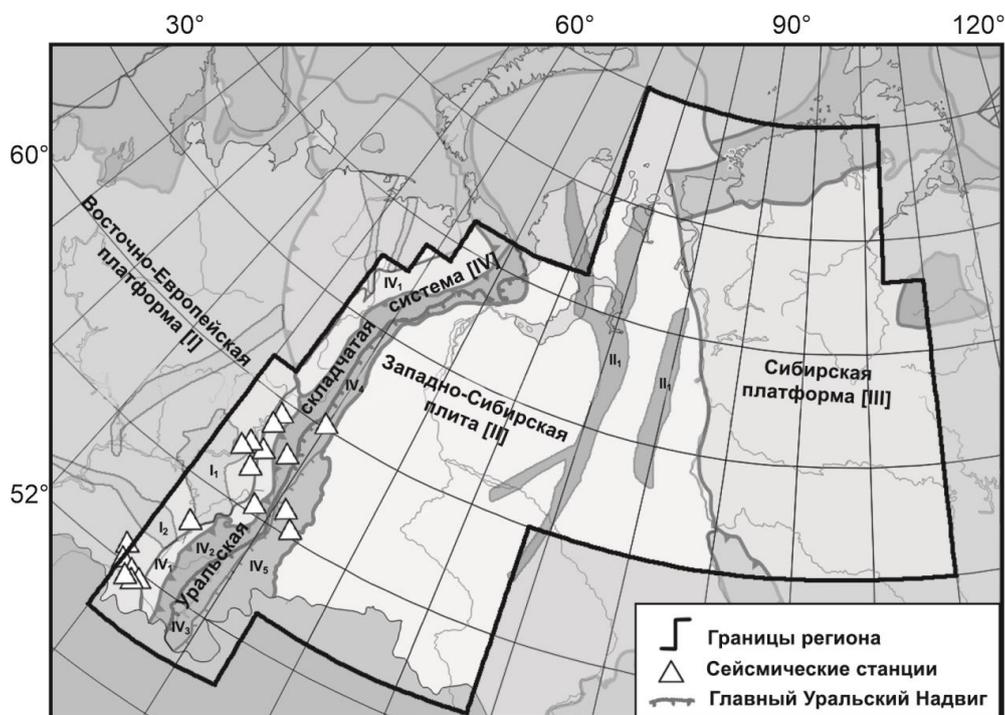


Рис. 1. Тектоническое районирование региона исследований и сейсмические станции

I–IV – тектонические структуры первого порядка; I₁ – Камско-Бельский авлакоген, I₂ – Серноводско-Абдулинский авлакоген; II – рифтовая система Западно-Сибирской плиты; IV₁ – Предуральский краевой прогиб; IV₂ – западная внешняя мегазона, IV₃ – Магнитогорская мегазона, IV₄ – Тагильская мегазона, IV₅ – Восточно-Уральская мегазона.

Сейсмичность Урала имеет весьма разнообразное происхождение. Природные землетрясения, обусловленные сложным геологическим строением и современными движениями земной коры, помимо тектонических, представлены также обвальными (оползневыми и карстовыми) и импактными событиями. Развитая горнодобывающая промышленность Уральского региона вносит свой вклад в сейсмический поток. Сигналы от техногенных источников – промышленных взрывов, горных и горно-тектонические ударов (ГТУ), обвалов и т.д. – превалируют по количеству над природными. Помимо этого, разделение сейсмических событий на природные и техногенные имеет известные сложности [6]. Несмотря на то, что положение горнодобывающих предприятий хорошо известно, их приуроченность к основным тектоническим структурам Урала затрудняет однозначное определение природы событий. Уральская региональная сейсмологическая сеть, развивающаяся с 1999 г. сначала в пределах Пермского края [7], а затем на территории Свердловской области и Республики Башкортостан, позволяет регистрировать и дифференцировать природу событий [8, 9] не только в пределах Урала и Европейской части России, но и на части территории Западной Сибири.

Сеть сейсмических станций. В 2016–2017 гг. конфигурация региональной сети не претерпела значительных изменений по сравнению с 2015 годом. В связи со сложностью поддержания инфраструктуры была закрыта сейсмическая группа «Екимята» – однокомпонентные вертикальные сейсмометры, располагавшиеся на окружностях радиусами 150 и 300 метров, были демонтированы, а центральная точка преобразована в региональную сейсмическую станцию «Екимята» с сохранением кода PR6R. Здесь в декабре 2017 г. вместо 16-битного регистратора SDAS был установлен современный 24-битный регистратор «Ермак-5» [10]. Частота регистрации в непрерывном

режиме была повышена с 20 до 40 Гц. Триггерный режим с частотой дискретизации 100 Гц выключен. Комплект из трех короткопериодных сейсмометров CM-3KB был заменен на трехкомпонентный короткопериодный (собственная частота 1 Гц) сейсмометр Sercel L-4C-3D [11].

На сейсмической станции «Кунгур» (PR3R) также вместо устаревшего регистратора SDAS был установлен регистратор «Ермак-5». Частота регистрации осталась прежней – 40 Гц. Исчерпывающие сведения о сейсмических станциях региональной сети и их аппаратном оснащении приведены в приложении к настоящему выпуску журнала [Прил. 1].

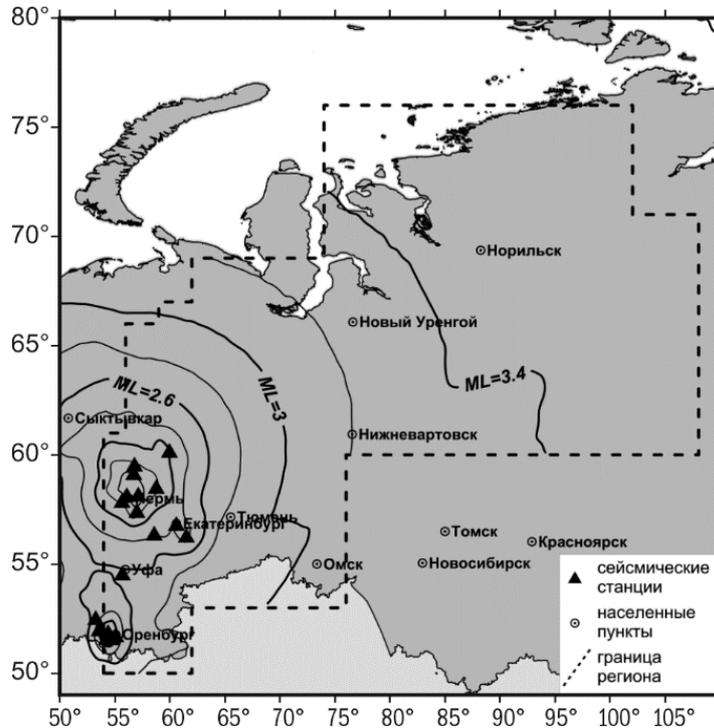


Рис. 2. Карта магнитудной представительности ML_{\min} регистрации сейсмических событий Уральской сетью в 2016–2017 гг.

Действующая сеть станций обеспечивает уверенную регистрацию сейсмических событий на большей части Пермского края с $ML \geq 2.0$, в Свердловской области – с $ML \geq 2.4$, в республике Башкортостан – с $ML \geq 2.6$, в Челябинской и Оренбургской областях – с $ML \geq 2.8$, в Тюменской и Курганской областях – с $ML \geq 3.2$, на остальной территории – с $ML \geq 3.6$ (рис. 2).

Методика обработки цифровых записей землетрясений не изменилась [12]. С большинства станций передача данных в обрабатывающий центр происходит непрерывно, в режиме, близком к реальному времени. В качестве динамической характеристики сейсмических волн использовалась максимальная амплитуда колебаний на горизонтальных компонентах движения в симуляции сейсмографа Вуда-Андерсона для оценки локальной магнитуды. В регионе принята своя магнитудная шкала ML , учитывающая закономерности распространения сейсмических волн для территории Среднего Урала и прилегающих территорий [13]. Кинематические параметры определяются на основе годографа IASPEI [14]. В предыдущие годы для расчета сейсмической энергии E в Дж использовалось корреляционное уравнение связи между магнитудой и энергией Х. Канамори с соавторами [15]:

$$\lg E = 1.96ML + 2.05. \tag{1}$$

С 2016 г. при обработке цифровых записей, помимо расчета магнитуды, также стал производиться расчет класса по Раутиан [16] с использованием алгоритма, реализованного в программном комплексе WSG [17]. На рис. 3 представлена эмпирическая зависимость между магнитудой ML и классом по Раутиан K_R для условий Урала:

$$\lg E = 1.74ML + 3.68. \tag{2}$$

При установлении зависимости (2) выборка составляла порядка 2000 событий. Пунктирной линией дана зависимость (1) по Канамори [15].

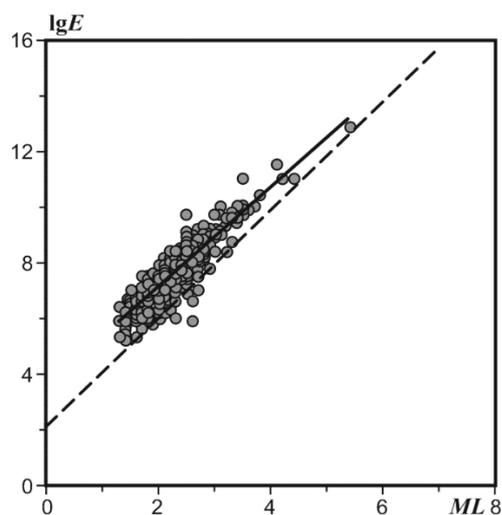


Рис. 3. Зависимость между магнитудой ML и классом по Раутиан для сейсмических событий, регистрируемых Уральской региональной сейсмологической сетью. Пунктирной линией показана зависимость по Канамори [15]

Как видно из рисунка, для условий Урала зависимость между энергией сейсмических событий и магнитудой несколько отличается от зависимости, предложенной Канамори:

$$\lg E = 1.74ML + 3.68. \quad (2)$$

Согласно этим данным, оценки класса, полученные ранее по соотношению (1) Канамори, будут ниже реальных на величину 1.3–0.6 в диапазоне магнитуд 1.5–5.0 соответственно. В дальнейшем данный факт стоит учитывать при формировании сводного каталога землетрясений, включающего данные до 2016 года.

Для сравнительного анализа результатов региональной локализации сейсмических событий привлекались данные других сейсмологических центров [18–20].

Сейсмичность территории. В общей сложности сейсмическими станциями региона за 2016–2017 гг. было зарегистрировано 633 сейсмических события, для которых определены все необходимые параметры. Большинство из них (534) приходится на долю массовых и технологических взрывов, проводимых на горнодобывающих предприятиях Пермского края, Свердловской, Челябинской областей и Республики Башкортостан.

Остальные 99 сейсмических событий разделены на три основных типа: тектоническое землетрясение, возможно землетрясение и горно-тектонический удар. Как видно из рис. 4 а, на долю природных землетрясений приходится только 4 % от всех зарегистрированных событий, однако, несмотря на то, что в количественном отношении взрывы преобладают, их доля в суммарной выделенной сейсмической энергии в 2016–2017 гг. составляет порядка 50 %.

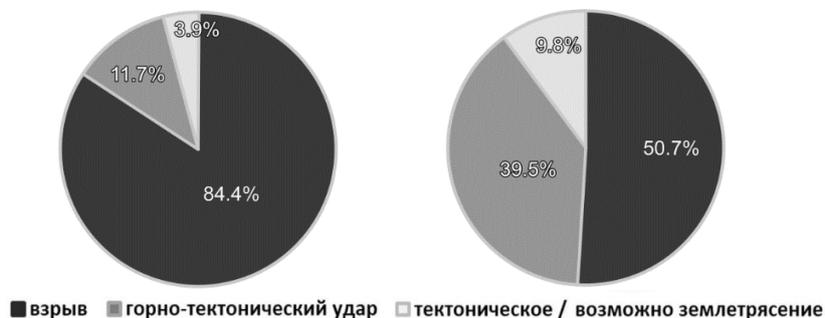


Рис. 4 а. Распределение сейсмических событий по типам

Рис. 4 б. Распределение сейсмических событий по энергии

Взрывы. Отработка месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых на территории региона проводится как открытым, так и подземным способом. На долю открытого способа разработки (карьеры и разрезы) приходится порядка 80 % от общего количества действующих горнодобывающих предприятий. Наиболее крупные массовые взрывы производят Асбестовский, Высокогорский и Качканарский горно-обогатительные комбинаты (ГОК), расположенные на территории Свердловской области. Величины зарядов достигают ста и более тонн взрывчатых веществ (ВВ).

Организации, осуществляющие взрывные работы на территории Пермского края, регулярно предоставляют информацию о параметрах производимых ими взрывов. С предприятий других регионов поступает неполная информация, поэтому интерпретация ведется, исходя из близости горнодобывающих предприятий и согласно известным критериям распознавания волновых форм [8].

На территории Пермского края в 2016–2017 гг. при проведении промышленных взрывов максимальная масса ВВ не превышала 31 тонны. Для взрывов с $ML \geq 1.5$, регистрируемых не менее чем тремя станциями, традиционно определяются параметры очагов. В региональный каталог взрывов включены 534 события, для которых удалось определить все необходимые параметры. На рис. 5 представлено распределение взрывов по месяцам года.

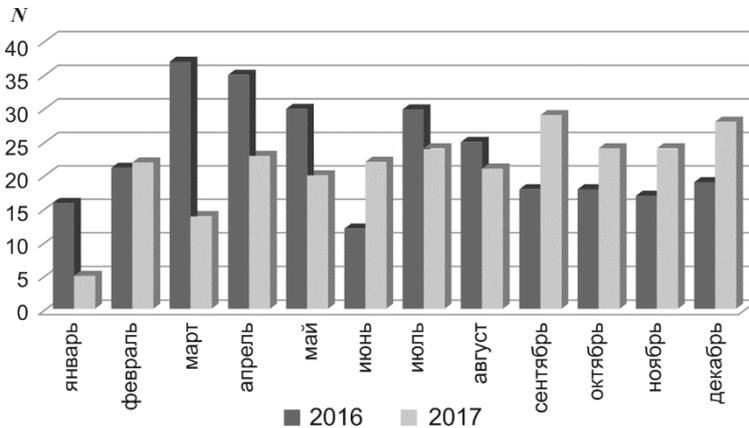


Рис. 5. Распределение числа взрывов по месяцам в 2016–2017 г.

Как видно из рис. 5, за представленный период распределение количества взрывов по месяцам в течение года варьирует не сильно. Наибольшее число взрывов было зарегистрировано в марте и апреле 2016 г. ($N=37$ и $N=35$). Диапазон магнитуд составил $1.6 \leq ML \leq 3.3$.

На рис. 6 представлены сейсмограммы одного из наиболее крупных промышленных взрывов с $ML=2.8$, произведенного 11 апреля 2017 г. в 11^h55^m на карьере ПАО «Ураласбест» (Баженовское месторождение хризотил-асбеста). Суммарная выделенная сейсмическая энергия всех взрывов составила $E_{\Sigma}=2.39 \cdot 10^9$ Дж.

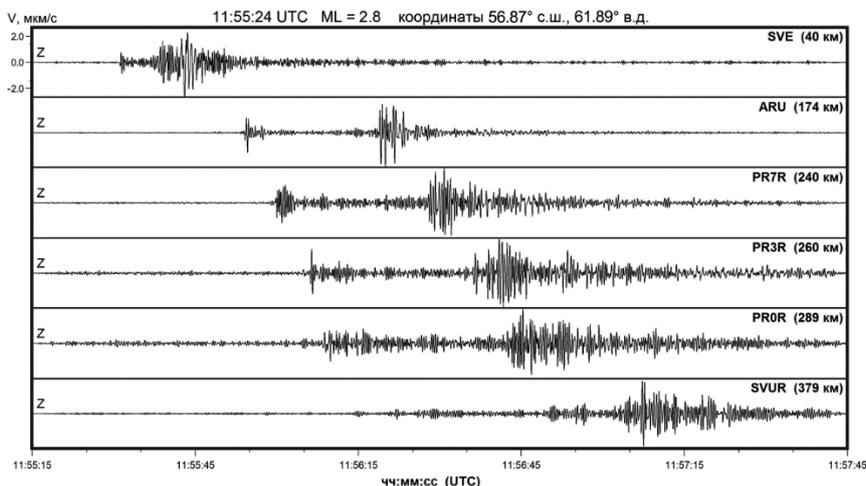


Рис. 6. Сейсмограммы взрыва 11 апреля 2017 г. с $ML=2.8$, произведенного ПАО «Ураласбест»

Горно-тектонические удары (ГТУ). Значительную часть – 12 % от общего количества зарегистрированных событий – составляют горные и горно-тектонические удары. На исследуемой территории почти все они регистрируются на двух горнодобывающих предприятиях – ОАО «СУБР», разрабатывающий Североуральское бокситовое месторождение, и ОАО «Высокогорский ГОК», разрабатывающий Тагильскую группу железорудных месторождений.

В пределах шахтных полей ОАО «СУБР» за два года было зарегистрировано 54 таких события с магнитудами в диапазоне $1.6 \leq ML \leq 3.2$, для которых удалось определить параметры очага (Прил. 2). Остальные ГТУ были зарегистрированы одной сейсмической станцией «Северо-

уральск» (SVUR), расположенной непосредственно в горных выработках шахты «Красная шапочка». Одним из наиболее сильных стал горно-тектонический удар на шахте «Кальинская» 21 ноября 2017 г. в 03^h59^m с $ML=3.1$, $I_0=4$ (рис. 7).

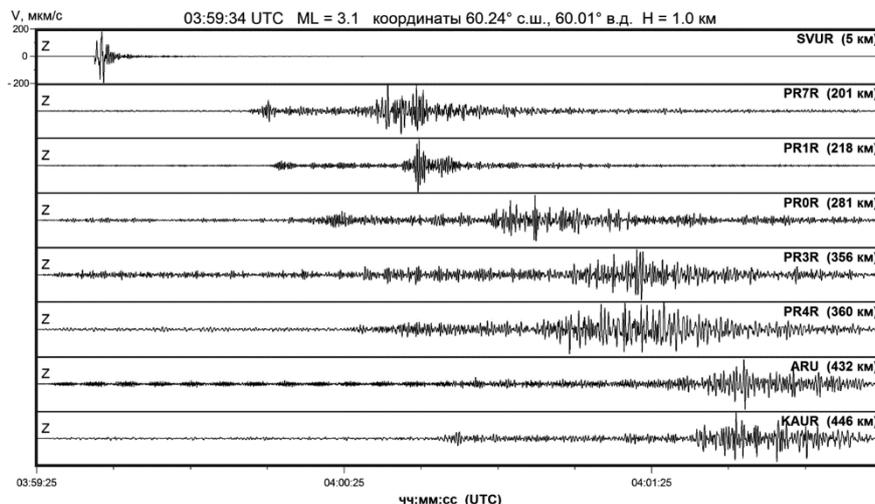


Рис. 7. Сейсмограммы горно-тектонического удара, произошедшего на шахте «Кальинская» (ОАО «СУБР») 21 ноября 2017 г. в 03^h59^m

Сотрудниками ФИЦ ЕГС РАН при участии службы прогнозирования и предотвращения горных ударов (СППГУ) ОАО «СУБР» был выполнен сбор макросейсмических сведений по данному событию. Оно ощущалось с интенсивностью 4 балла по шкале MSK-64 в пос. Калья, 3 балла в г. Североуральске и в пос. Черемуховский [Прил. 3, 4]. Еще один ощутимый горно-тектонический удар произошел 9 ноября 2016 г. в 04^h15^m также на шахте «Кальинская», имел магнитуду $ML=2.8$, интенсивность $I_0=4$ балла (MSK-64). Событие ощущалось с интенсивностью 4 балла по шкале MSK-64 в поселке Калья, 3 балла в г. Североуральске и в пос. Черемуховский [Прил. 3, 4].

На шахтах Высокогорского ГОКа (г. Нижний Тагил) за 2016–2017 гг. было зарегистрировано 19 горно-тектонических ударов с $1.5 \leq ML \leq 3.3$ [Прил. 2], самый сильный из которых, произошедший на шахте «Естюнинская» 4 июня 2017 г. в 17^h45^m с $ML=3.3$, $I_0=3$ (рис. 8), был зарегистрирован всеми сейсмостанциями региона. Данное сейсмическое событие сопровождалось ощутимым сотрясением массива горных пород в шахте. Разрушений не отмечено. Макросейсмическая интенсивность в районе шахты «Естюнинская» составила 3 балла (MSK-64). Также получены сведения о его ощутимости в пос. Евстюниха – 3 балла (MSK-64) [Прил. 3, 4].

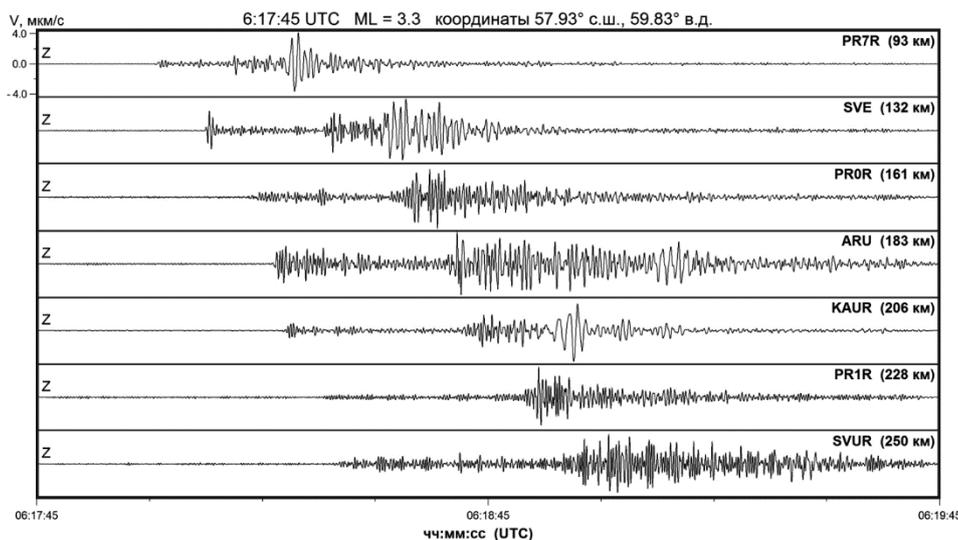


Рис. 8. Сейсмограммы горно-тектонического удара, произошедшего на шахте «Естюнинская» (ОАО «Высокогорский ГОК») 4 июня 2017 г. в 06^h17^m

Для параметров очага имеются альтернативные варианты решений, полученные другими агентствами (табл. 1).

Таблица 1. Разные решения параметров горно-тектонического удара на шахте «Естюнинская» ОАО «Высокогорский ГОК» 4 июня 2017 г. по данным Уральской региональной сети (MIRAS) в сопоставлении с определениями других агентств

| Агентство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | Магнитуда/количество станций |
|-----------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|----------|------------------------------------|
| | | | φ° , N | λ° , E | h , км | |
| MIRAS | 06 17 46 | – | 57.94 | 59.82 | 0f | $ML=3.3\pm 0.2/5$ |
| IDC | 06 17 47 | 1.9 | 57.08 | 59.27 | 0f | $mb=2.9\pm 0.3/1, ML=3.1\pm 0.3/4$ |
| NNC | 06 17 53 | 1.6 | 57.59 | 60.46 | 19.6 | $mb=3.8, m_{pv}=3.5$ |

Примечание. MIRAS – ГИ УрО РАН, Пермь, Россия; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, Vienna, Austria [18]; NNC (KNDC) – National Nuclear Centre, Almaty, Kazakhstan [20]; f – фиксированная глубина.

Нехарактерный для регистрации на региональных расстояниях горно-тектонический удар был зафиксирован рядом с г. Коркино (Челябинская область) 21 октября 2016 г. в 09^h17^m с $ML=2.5$. Эпицентр данного события находится в районе самого глубокого (более 500 м) в Евразии Коркинского угольного разреза. С конца 2012 г. и до его закрытия в конце 2017 г. в пределах разреза работала система локального сейсмологического мониторинга устойчивости Восточного борта карьера. В 2016 г. обработкой данных, полученных этой системой, занимались сотрудники ГИ УрО РАН. Данное событие присутствует в каталоге локальных событий Коркинского угольного разреза. Макросейсмических проявлений событие не имело.

Суммарная сейсмическая энергия всех ГТУ составила $E_{\Sigma}=8.19\cdot 10^9$ Дж за 2016 г. и $E_{\Sigma}=9.92\cdot 10^9$ Дж за 2017 год. Их техногенная природа не подвергается сомнению.

Землетрясения. В Пермском крае продолжается развитие сейсмического процесса в Добрянском районе (район д. Таборы). За два года здесь было зарегистрировано 11 землетрясений с магнитудами $1.5 \leq ML \leq 2.4$ (рис. 9).

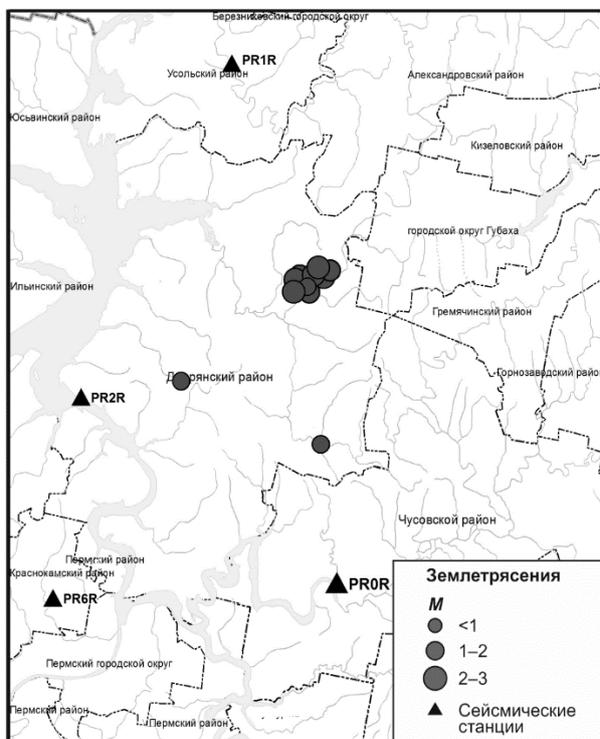


Рис. 9. Карта эпицентров сейсмических событий в пределах Пермского края за 2016–2017 гг.

Сейсмические события в данном районе фиксируются с 2002 г., то есть фактически с начала регионального сейсмологического мониторинга, когда действовало ограниченное количество станций. В период до 2010 г. регистрировались очень слабые события с магнитудами ML от -0.4 до 1.1 , чаще всего их фиксировала одна (PR2R), реже две станции (PR1R, PR2R), поэтому природу событий достоверно определить не удавалось. К 2010 г. с одной стороны выросло количество станций Уральской региональной сейсмологической сети, с другой стороны, магнитуды регистрируемых событий стали выше ($1.3 \leq ML \leq 2.5$) и появилась возможность более точно определять положение эпицентров по трем и более станциям. На текущий момент удалось определить необходимые параметры для 31 события. В исторический период в данном районе было зафиксировано два ощутимых (4–5 баллов MSK-64) события, которые вошли в «Новый каталог...» [21]. Некоторыми исследователями они интерпретированы как карстово-обвальные, без приведения достаточных обоснований, исходя из

«общих геологических предпосылок» [22, 23]. Наличие новых инструментальных данных о сейсмических событиях в данном районе позволяет начать работу по уточнению их природы. Кроме того, сам характер проявления такой «роевой» сейсмической активности необычен для Урала и требует дополнительного изучения.

Одно событие отнесено нами к категории «возможно землетрясение». Оно произошло 10 марта 2017 г. в 20^h03^m в Лысьвенском районе в 8 км от поселка Кын и имело магнитуду $ML=1.7$. Событие зарегистрировано ближайшими станциями на расстояниях до 160 км. Эпицентр его находится вдали от горнодобывающих объектов а очаг, скорее всего, является слабым тектоническим землетрясением, характерным для платформенных территорий. Более мелкие события в Пермском крае фиксируются одной, реже двумя станциями, они остаются в архивах записей и заносятся в каталог регионального обрабатывающего центра. В данной работе они не представлены.

Сопоставимое с Пермским краем количество событий было зарегистрировано в пределах Свердловской области, они были отнесены к категории «возможно землетрясение».

В районе г. Карпинска было зарегистрировано два события с $ML=2.0$ и 2.8 . Наиболее крупное из них произошло 23 июля 2016 г. в 01^h41^m. Относительная близость событий к затопленному Карпинскому угольному разрезу не дает возможности полностью исключить их техногенную природу.

Три события были зарегистрированы в районе пос. Рудничный (Краснотурьинский городской округ), самое сильное произошло 15 марта 2016 г. в 17^h38^m с $ML=2.4$. Географически данные события расположены также достаточно близко к Карпинскому угольному разрезу, особенно если принимать во внимание возможные ошибки локации до 10 км.

Одно событие произошло в районе г. Кушвы 13 марта 2016 г. в 02^h17^m, $ML=2.7$. По историческим данным [21] в 1847 году здесь было ощутимое землетрясение с $M=4.8$. С тектонической точки зрения оба события приурочены к ГУР и с большой вероятностью являются природными.

Два события с магнитудами $ML=2.1$ и $ML=2.6$ зарегистрированы в районе горы Можольховка. Интересен тот факт, что они произошли в один день 3 января 2016 г. с интервалом в два часа в 13^h48^m ($ML=2.6$) и 15^h45^m ($ML=2.0$). При этом между ними отмечено еще одно, более слабое событие с $ML=1.6$, записанное только двумя станциями – «Романово» (PR1R) и «Североуральск» (SVUR), в связи с чем оно в каталог не попало. Оба события с большой вероятностью являются тектоническими, их эпицентры расположены рядом с ГУР.

Горнодобывающих объектов рядом с тремя описанными событиями нет, волновые формы и все расчетные параметры свойственны для тектонических землетрясений. Данных о макросейсмических проявлениях у всех вышеописанных землетрясений нет.

11 марта 2017 г. в 03^h12^m было зарегистрировано событие с $ML=2.6$ в районе горы Качканар. Данных о макросейсмических проявлениях нет. Эпицентр данного события находится фактически там же (эпицентральное расстояние менее 2 км), где расположен эпицентр одного из сильнейших за инструментальный период Качканарского землетрясения, произошедшего 29.03.2010 г. в 13^h48^m, $ML=3.9$, $I_0=5$ [24]. С учетом того, что 04.04.2010 г. в 17^h59^m в этом же районе было зарегистрировано еще одно микроземлетрясение с магнитудой $ML=2.0$, которое в силу своей пространственно-временной близости к Качканарскому было признано его единственным афтершоком, можно говорить о том, что в данном районе начинает проявляться новая сейсмически активная зона.

В пределах Республики Башкортостан (далее – РБ) в исследуемый период зарегистрировано три землетрясения. Самым крупным из них стало событие с эпицентром на восточной границе Башкортостана около пос. Кутуево, которое произошло 3 апреля 2016 г. в 04^h53^m. Магнитуда землетрясения, рассчитанная по полученным записям, составила $ML=3.3$. В тектоническом плане для Уральского складчатого пояса данное землетрясение ассоциируется с зоной влияния Главного Уральского разлома. Сейсмограммы землетрясения представлены на рис. 10. Два землетрясения зарегистрированы 24 января 2016 г. в 05^h27^m и 25 марта 2016 г. в 15^h47^m с магнитудами $ML=2.6$ и $ML=2.1$ соответственно. Их эпицентры расположены в центральной (платформенной) части РБ и связаны с разломно-блоковой структурой Волго-Уральской антеклизы кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы – вероятнее всего, с выделяемой по геофизическим данным границей между Южно-Татарским сводом и Благовещенской впадиной.

В Кировской области 6 апреля в 05^h27^m в Верхнекамском районе вблизи поселка Светлополянск было зарегистрировано одно землетрясение с $ML=2.5$. В тектоническом отношении это землетрясение приурочено к Коми-Пермяцкому своду.

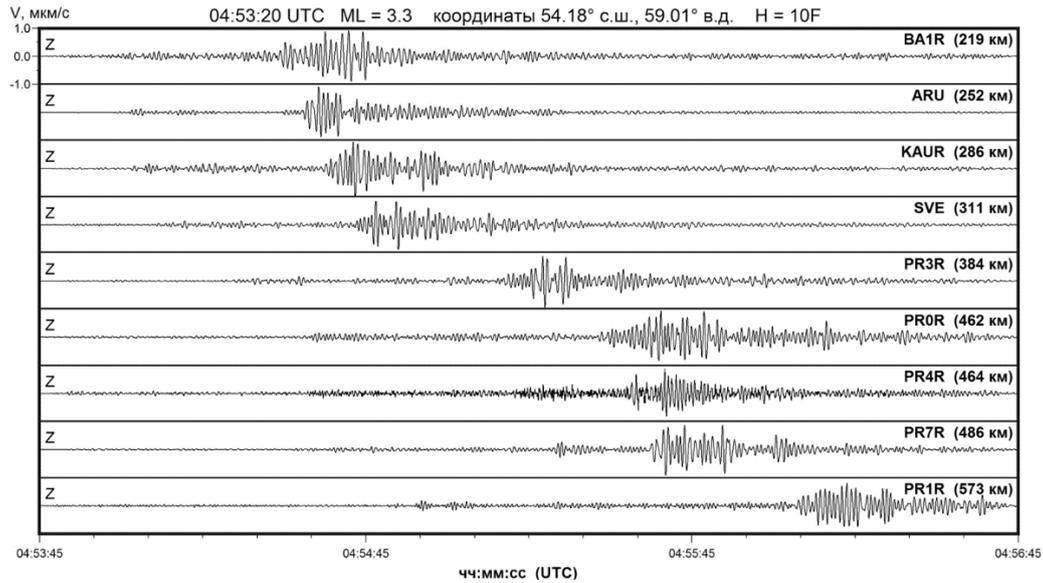


Рис. 10. Сейсмограммы тектонического землетрясения, произошедшего 3 апреля 2016 г. в 04^h53^m в восточной части Республики Башкортостан

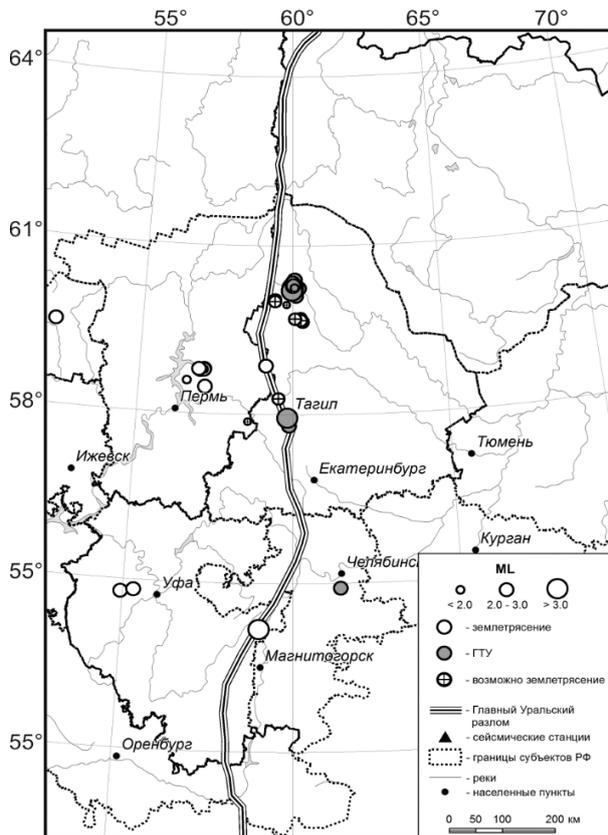


Рис. 11. Карта эпицентров сейсмических событий Урала и Западной Сибири в 2016–2017 гг.

Сведения о параметрах всех землетрясений, зарегистрированных в 2016–2017 гг. в регионе Урал и Западная Сибирь, приведены в Приложении 2 к данной работе, карта их эпицентров представлена на рис. 11.

Итоговое распределение событий разных типов по магнитудам ML и суммарное распределение сейсмической энергии ΣE на территории исследуемого региона представлено отдельно для 2016 г. (табл. 2) и 2017 г. (табл. 3). Энергия событий рассчитывалась по формуле (2).

Подводя итоги, рассмотрим параметры сейсмичности в 2016–2017 гг. в сравнении с ежегодными значениями N и ΣE , начиная с 2006 г. (рис. 11). Вследствие того, что в данной статье представлена новая зависимость между энергией и магнитудой (2), значения энергии за предыдущие периоды (2006–2015 гг.) были пересчитаны.

Таблица 2. Распределение числа сейсмических событий N за 2016 г. в различных интервалах магнитуд ML и суммарная выделявшаяся сейсмическая энергия ΣE , Дж

| Тип события | ML | | | | | N_{Σ} | ΣE , Дж |
|---|-------|---------|---------|---------|---------|--------------|----------------------|
| | 0–1.0 | 1.1–2.0 | 2.1–3.0 | 3.1–4.0 | 4.1–5.0 | | |
| Тектоническое, индуцированное, возможно землетрясение | – | 3 | 11 | 1 | – | 15 | $4.1 \cdot 10^9$ |
| ГТУ | – | 16 | 28 | 1 | – | 45 | $8.19 \cdot 10^9$ |
| взрывы | – | 160 | 118 | – | – | 278 | $7.93 \cdot 10^9$ |
| Всего | – | 179 | 157 | 2 | – | 338 | $2.02 \cdot 10^{10}$ |

Таблица 3. Распределение числа сейсмических событий N за 2017 г. в различных интервалах магнитуд ML и суммарная выделившаяся сейсмическая энергия ΣE , Дж

| Тип события | ML | | | | | N_{Σ} | ΣE , Дж |
|---|-------|---------|---------|---------|---------|--------------|----------------------|
| | 0–1.0 | 1.1–2.0 | 2.1–3.0 | 3.1–4.0 | 4.1–5.0 | | |
| Тектоническое, индуцированное, возможно землетрясение | – | 5 | 5 | – | – | 10 | $3.31 \cdot 10^8$ |
| ГТУ | – | 8 | 18 | 3 | – | 29 | $9.92 \cdot 10^9$ |
| взрывы | – | 132 | 123 | 1 | – | 256 | $1.50 \cdot 10^{10}$ |
| Всего | – | 145 | 146 | 4 | – | 295 | $2.53 \cdot 10^{10}$ |

Обновленные данные по сейсмическому потоку представлены на рис. 12 а (землетрясения) и 12 б (горно-тектонические удары). Как видно из рис. 12 а, для землетрясений сейсмический поток сильно меняется год от года, и эти изменения связаны, прежде всего, с реализацией крупных землетрясений, таких, как например, Среднеуральское 18.10.2015 г., $ML=4.7$ [25].

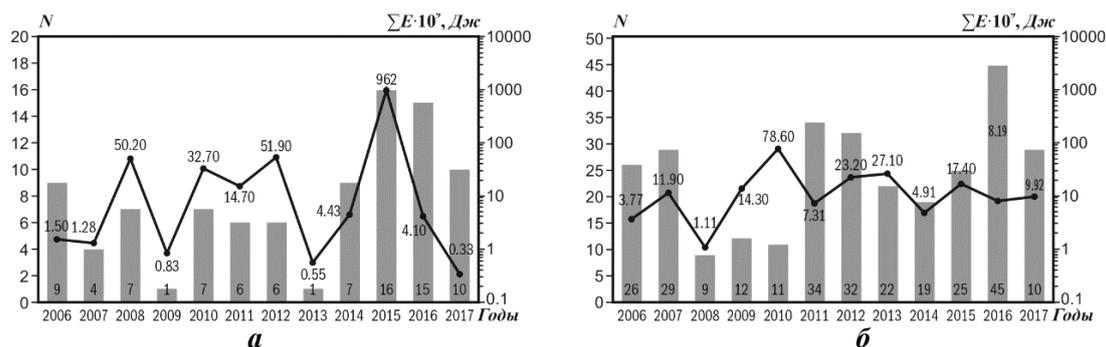


Рис. 12. Сводные данные о годовом количестве и суммарной энергии землетрясений (а) и горно-тектонических ударов (б) за 2006–2017 гг.

Для горно-тектонических ударов можно сказать, что сейсмический поток в целом постоянный. Провал в 2008 г. явным образом коррелирует с экономическим кризисом, а пик в 2010 г. связан с крупным горно-тектоническим ударом 13.02.2010 г., $ML=4.1$. Это был крупнейший ГТУ, зарегистрированный за весь период наблюдений Уральской сейсмологической сетью. В дальнейшем магнитуда ГТУ не превышала $ML=3.6$.

Заключение. В целом можно отметить, что в период 2016–2017 гг. сейсмический режим в пределах исследуемого региона был спокойным, крупных и уникальных событий как природного, так и техногенного характера не зарегистрировано. Все ранее выделенные сейсмически активные зоны подтверждаются новыми сейсмическими событиями, преобладающая природа которых в их пределах сохраняется.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00823).

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Бахтиярова Г.М., Белевская М.А., Варлашова Ю.В., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Гусева Н.С., Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Нестеренко М.Ю., Пойгина С.Г., Старикович Е.Н.

Электронное приложение App15_Ural_West_Siberia_2016–2017 (<http://www.gsras.ru/zse/app-25.html>): 1 – Сейсмические станции региона Урал и Западная Сибирь в 2016–2017 гг.; 2 – Сводный каталог землетрясений, горных и горно-тектонических ударов на территории Урала и Западной Сибири в 2016–2017 гг.; 3 – Макро-сейсмический эффект землетрясений, ощутимых в населенных пунктах Урала в 2016–2017 гг.; 4 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях сейсмических событий Урала в 2016–2017 гг.

Л и т е р а т у р а

1. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Под ред. В.И. Уломова, Н.С. Медведевой. (2022). [Site]. – URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf>

2. Verkholantsev F.G., Golubeva I.V. On seismic activity in the South-East part of Russian plate in accordance with instrumental data in 2011–2012 // Book of abstracts 33rd General Assembly of European Seismological Commission. – Moscow-Obninsk, 2012.
3. Noskova N.N. The Earthquake of September 16, 2020 in the Kirov–Kazhim Aulacogen // Seismic Instruments. – 2021. – V. 57, N 3. – P. 360–367. doi: 10.3103/S0747923921030105
4. Водолазская В.П., Тетерин И.П., Кириллов В.А., Лукьянова Л.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-40. – Пермь. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 497 с. +6 вкл.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 492 с. +6 вкл.
6. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина, А.А. Маловичко. – М.: ГЕОС, 2013. – 384 с.
7. Четырёхуровневая система сейсмического мониторинга на территории Среднего Урала / А. А. Маловичко, Р. А. Дягилев, Д. А. Маловичко [и др.] // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 8–17. – EDN SAVLKJ.
8. Дягилев Р.А., Голубева И.В. Оценка эффективности критерия распознавания сейсмических событий A_s/A_p для станций Уральского региона с применением статистических подходов // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы международной конференции. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 78–80.
9. Верхованцев Ф.Г., Дягилев Р.А., Голубева И.В., Гусева Н.С. Землетрясение 20 мая 2014 г. $M_L=2.8$, $I_0=4-5$ в центральной части Республики Башкортостан // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 317–322. doi: 10.355540/1818-6254.2020.23.32
10. Butyrin P.G., Verkholantsev F.G., Verkholantsev A.V., Shulakov D.Y. Digital Seismic Logger “Ermak-5”. Experience of Development and Implementation // Seismic Instruments. – 2019. – V. 55, N 2. – P. 117–128. doi: 10.3103/S0747923919020051
11. Analog Seismic Sensors. Sercel, 2010. (2022). [Site]. – URL: [ftp://ftp.sercel.com/pdf/brochures/Analog Seismic Sensors Specifications.pdf](ftp://ftp.sercel.com/pdf/brochures/Analog%20Seismic%20Sensors%20Specifications.pdf)
12. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Верхованцев А.В. Пермский край 2000–2005 гг. // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 269–289.
13. Дягилев Р.А. Шкала M_L для Среднего Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 118–122.
14. Kennett, B.L.N. IASPEI 1991 Seismological Tables // Bibliotech. – Canberra, Australia, 1991. – 167 p.
15. Kanamori H., Mori J., Hauksson E., Heaton T.H., Hutton L.K., Jones L.M. Determination of Earthquake Energy Release and M_L using TERRASCOPE // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1993. – V.83, N 2. – P. 330–346.
16. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K -class system and its relationship to magnitude scales // Seismological Research Letters. – 2007. – V. 78, N 6. – P. 579–590.
17. Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
18. International Data Centre. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2022). [Site]. – URL: <https://www.ctbto.org/verification-regime/the-international-data-centre>
19. International Seismological Centre. (2022). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
20. National Nuclear Centre. (NNC). (2022). [Site]. – URL: <http://www.kndc.kz/index.php/ru>
21. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.

22. Godzikovskaya A.A., Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P. Regional earthquake catalogues of Russia // *Seismic Instruments*. – 2010. – V. 46, N 1. – P. 86–99. doi: 10.3103/S074792391001010X
23. Сюзев П. «Пермские губернские ведомости», неофициальная часть. – 1911. – № 60.
24. Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В. Качканарское землетрясение 29 марта 2010 г. с $K_p=12.1$, $M_w=4.4$, $I_0=5$ (Средний Урал) // *Землетрясения Северной Евразии*, 2010 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 336–346.
25. Верхоланцев Ф.Г., Габсатарова И.П., Гусева Н.С., Дягилев Р.А. Среднеуральское землетрясение 18 октября 2015 г. $ML=4.7$, $I_0=6$ баллов // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 314–323. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.30

SEISMICITY of the URALS and WESTERN SIBERIA in 2016–2017
F.G. Verkholtantsev¹, I.V. Golubeva¹, R.A. Dyagilev², T.V. Zlobina³

¹*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Perm, sombra@mail.ru,*

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, dra@gstras.ru,*

³*Mining Institute, Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, tati.verkholtantseva@gmail.com*

Abstract. The article summarizes information about seismic network in the Urals and Western Siberia region, describes processing technique, presents short analysis of seismic activity for 2016–2017. Seismic network capability is shown for whole territory under control. It was found that about 84 % of registered events are explosions in mines and open pits, 89 events are natural or induced ones. For the strongest induced events, variants of source parameters obtained by different agencies are shown.

Key words: seismicity, seismic network, magnitude, seismic regime, rockburst, earthquake, explosion, Main Ural Fault.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20. EDN: CFBNRE

For citation: Verkholtantsev, F.G., Golubeva, I.V., Dyagilev, R.A., & Zlobina, T.V. (2022). [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 222–234. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.20. EDN: CFBNRE

References

1. Ulomov, V.I., & Medvedeva, N.S. (2019). *Spetsializirovannyi katalog zemletryasenyi dlya zadach obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for the tasks of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. (2022). Retrieved from <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf> (In Russ.).
2. Verkholtantsev, F.G., & Golubeva, I.V. (2012). On seismic activity in the South-East part of Russian plate in accordance with instrumental data in 2011–2012. *Book of abstracts 33rd General Assembly of European Seismological Commission*. Moscow-Obninsk, Russia.
3. Noskova, N.N. (2021). The Earthquake of September 16, 2020 in the Kirov–Kazhim Aulacogen. *Seismic Instruments*, 57(3), 360–367. doi: 10.3103/S0747923921030105
4. Vodolazskaya, V.P., Teterin, I.P., Kirillov, V.A., Luk'yanova, L. et al. (2015). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Ural'skaya. List O-40. Perm'. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Ural series. Sheet O-40. Perm. Explanatory letter]. Saint Petersburg, Russia: Kartfabrika VSEGEI Publ., 497 p. (In Russ.).
5. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Ural'skaya. List O-41. Ekaterinburg. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Ural series. Sheet O-41. Ekaterinburg. Explanatory letter]. (2011). Saint Petersburg, Russia: Kartfabrika VSEGEI Publ., 492 p. (In Russ.).
6. Adushkin, V.V., & Malovichko, A.A. (2013). *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropeyskoy chasti Rossii* [Explosions and earthquakes in the European part of Russia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 384 p. (In Russ.).
7. Malovichko, A.A., Dyagilev, R.A., Malovichko, D.A., Shulakov, D.Yu., Butyrin, P.G., & Verkholtantsev, F.G. (2011.). Four-level system of seismic monitoring in the territory of Middle Urals. *Geofizika*, no. 5, pp. 8–17. (In Russ.)

8. Dyagilev, R.A., & Golubeva, I.V. (2008). [Estimation of efficiency of As/Ap discriminator of seismic events for Ural region using statistical approaches]. In *Seismichnost' Severnoi Evrazii. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii* [Seismicity of the Northern Eurasia. Proceedings of international conference] (pp. 78–80). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
9. Verkholtantsev, F.G., Dyagilev, R.A., Golubeva, I.V., & Guseva, N.S. (2020). [Earthquake on May 20, 2014, $ML=2.8$, $I_0=4-5$ in central part of Bashkortostan republic]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 317–322. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.32
10. Butyrin, P.G., Verkholtantsev, F.G., Verkholtantsev, A.V., & Shulakov, D.Y. (2019). Digital Seismic Logger “Ermak-5”. Experience of Development and Implementation. *Seismic Instruments*, 55(2), 117–128. doi: 10.3103/S0747923919020051
11. Analog Seismic Sensors. Sercel, 2010. (2022). Retrieved from [ftp://ftp.sercel.com/pdf/brochures/Analog Seismic Sensors Specifications.pdf](ftp://ftp.sercel.com/pdf/brochures/Analog%20Seismic%20Sensors%20Specifications.pdf)
12. Malovichko, A.A., Malovichko, D.A., Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., Golubeva, I.V., & Verkholtantsev, A.V. (2011). [Perm region 2000–2005]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2005 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2005] (pp. 269–289). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
13. Dyagilev, R.A. (2015). [ML scale for the Middle Urals]. In *Materialy X Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the X International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 118–122). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Kennett, B.L.N. (1991). *IASPEI 1991 Seismological Tables*. Bibliotech, Canberra, Australia, 167 p.
15. Kanamori, H., Mori, J., Hauksson, E., Heaton, T.H., Hutton, L.K., & Jones, L.M. (1993). Determination of Earthquake Energy Release and M_L using TERRAscope. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), 330–346.
16. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., & Kendall A.D. (2007). Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6), 579–590.
17. Krasilov, S.A., Kolomiets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of the processing of digital seismic data using the WSG software package. Modern methods for processing and interpreting seismological data]. In *Materialy I Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the I International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 77–83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
18. International Data Centre. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2022). Retrieved from <https://www.ctbto.org/verification-regime/the-international-data-centre>
19. International Seismological Centre. (2022). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
20. National Nuclear Centre. (NNC). (2022). Retrieved from <http://www.kndc.kz/index.php/ru>
21. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (1977). [New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
22. Godzikovskaya, A.A., Sergeeva, N.A., & Zabarinskaya, L.P. (2010). Regional earthquake catalogues of Russia. *Seismic Instruments*, 46(1), 86–99. doi: 10.3103/S074792391001010X
23. Suzev, P. (1911). «*Permskiye gubernskiyе vedomsti*», *neofitsial'naya chast'*, № 60 [«Perm Provincial journal», unofficial part, Vol. 60]. (In Russ.).
24. Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., & Golubeva, I.V. (2016). [Kachkanar earthquake on March 29, 2010 with $K_R=12.1$, $M_w=4.4$, $I_0=5$ (Middle Ural)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2010 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2010] (pp. 336–346). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
25. Verkholtantsev, F.G., Gabsatarova, I.P., Guseva, N.S., & Dyagilev, R.A. (2021). [Middle Ural earthquake on October 18, 2015, $ML=4.7$, $I_0=6$]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 314–323. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.30