УДК 550.348.098.64 (470.53+470.531)

СЕЙСМИЧНОСТЬ УРАЛА и ЗАПАДНОЙ СИБИРИ в 2020 году Ф.Г. Верхоланцев¹, <u>И.В. Голубева</u>¹, Р.А. Дягилев², Т.В. Злобина³

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, sombra@mail.ru ²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, dra@gsras.ru ³Горный институт УрО РАН, г. Пермь, tati.verkholantseva@gmail.com

Аннотация. В работе представлены данные о действующей на территории Урала и Западной Сибири сети сейсмических станций, регистрационных возможностях сети для всей исследуемой территории, методике обработки данных и сейсмической активности региона в 2020 году. Показано, что из 403 зарегистрированных событий 84 % приходится на технологические взрывы на горнодобывающих предприятиях, 29 событий имеют отношение к природной, а 36 – к природно-техногенной сейсмичности. Для наиболее сильных событий последней группы приведены варианты очаговых параметров, полученные разными агентствами.

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

Для цитирования: Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024.– Вып. 27 (2020). – С. 205–222. DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.19 EDN: IXPMMM

Введение. Регион «Урал и Западная Сибирь» охватывает значительную часть Евразийской литосферной плиты. Границы региона и крупные тектонические элементы показаны на рис. 1.



Рис. 1. Сейсмические станции и тектоническое районирование региона исследований

I–IV – тектонические структуры первого порядка; I₁ – Камско-Бельский авлакоген, I₂ – Серноводско-Абдулинский авлакоген; II₁ – рифтовая система Западно-Сибирской плиты; IV₁ – Предуральский краевой прогиб; IV₂ – западная внешняя мегазона, IV₃ – Магнитогорская мегазона, IV₄ – Тагильская мегазона, IV₅ – Восточно-Уральская мегазона.

Большую часть региона занимают платформенные территории, чем обусловлена их низкая сейсмическая активность. На западе исследуемый регион включает восточный край Восточно-Европейской платформы (ВЕП) с добайкальским фундаментом, представленной Волго-Уральской антеклизой, состоящей из архейских блоков. Здесь известны ощутимые как исторические [1], так и инструментально зарегистрированные землетрясения, приуроченные к авлакогенам [2, 3]. В центре региона располагается молодая Западно-Сибирская Плита (ЗСП) с гетерогенным палеозойским фундаментом, характеризующаяся слабой рассеянной сейсмичностью, а на востоке – Сибирская платформа с добайкальским фундаментом блокового строения, сведения о сейсмичности которой довольно скудны [4, 5]. Уральские горы, представляющие собой субмеридиональную складчатую систему, разделяют ВЕП и ЗСП. По современным представлениям, Урал является покровно-складчатым сооружением сложного геологического строения, прошедшим полный цикл геодинамического развития [6]. Подробный тектонический обзор исследуемой территории представлен нами в работе [7].

Сейсмичность Урала имеет весьма разнообразное происхождение. Наибольший вклад (по числу событий) в поток сейсмических событий вносит развитая горнодобывающая промышленность, с которой связаны технологические и массовые взрывы на рудниках и карьерах, горнотектонические удары (ГТУ) в шахтах. Природные землетрясения, обусловленные сложным геологическим строением и современными движениями земной коры, представлены тектоническими, а также оползневыми и карстовыми, и даже импактными событиями. Хотя местоположение горнодобывающих предприятий известно, все они приурочены к основным тектоническим структурам Урала, что затрудняет однозначную идентификацию природы событий. Кроме того, разделение сейсмических событий на природные и техногенные в принципе имеет известные сложности [8]. Действующая в исследуемом регионе Уральская региональная сейсмологическая сеть начала развиваться в 1999 г. и охватила непрерывным инструментальным сейсмологическим мониторингом сначала территорию Пермского края [9], затем Свердловской области, Республики Башкортостан и Челябинской области. В настоящее время сеть состоит из 18 цифровых станций [Прил. 1], что позволяет регистрировать события и идентифицировать их природу [10, 11] не только в пределах Урала и востока Европейской России, но и на территории Западной Сибири.

Сеть сейсмических станций. В 2020 г. в конфигурации региональной сейсмологической сети произошли изменения. 30 июля 2020 г. в Челябинской области была открыта новая стационарная сейсмическая станция «Катав-Ивановск» (рис. 2 а). Станция размещена в с. Верх-Катавка, расположенном в 20 км на юго-восток от эпицентра Катав-Ивановского землетрясения 04.09.2018 г. [12]. На станции установлен велосиметр Nanometrics Trillium Compact PH 20s [13], размещенный в скважине на глубине 1.5 м на верхней границе скальных пород.



Рис. 2 а. Общий вид сейсмической станции «Катав-Ивановск» (KAIR)

Рис. 2 б. Скважина под установку датчика сейсмической станции «Катав-Ивановск» (KAIR)

На станции применена новая безбункерная конструкция сейсмопавильона в виде герметичной снизу винтовой сваи (рис. 2 б), позволяющая в несколько раз сократить стоимость и время мероприятий по установке. Дно сваи залито небольшим количеством цементного раствора, образующего после застывания идеальную горизонтальную площадку. Глубина погружения датчика ниже границы промерзания обеспечивает не только стабильные температурные условия эксплуатации в любое время года, но и существенное снижение уровня поверхностных шумов (рис. 3). Для записи сейсмических сигналов используется регистратор Nanometrics Centaur-3 [14], ведущий непрерывную запись по трем каналам с частотой 100 Гц.



Рис. 3. Уровень микросейсмического шума в месте установки сейсмической станции «Катав-Ивановск», осреднение за сутки 18 ноября 2020 г. (среда)

Передача данных осуществляется в реальном времени в региональный обрабатывающий центр (РИОЦ), г. Пермь, с использованием выделенного оптического интернет-канала. В качестве резервного канала для передачи данных установлен GSM-модем. Сбор данных осуществляется с использованием программного обеспечения SeisComp3. Станция зарегистрирована в Международном сейсмологическом центре (ISC) с кодом KAIR [15]. В табл. 1 приведены сведения о положении сейсмической станции «Катав-Ивановск» и установленном оборудовании.

Таблица 1. Данные о сейсмической станции «Катав-Ивановск»

Сейсмическая станция		Координаты, высота над уровнем моря			Открыта	Сведения	Тип оборудования (датчик,	
название	код	φ, °N	λ, °Ε	ћ, м		отрунтах	регистратор, частота оцифровки	
«Катав- Ивановск»	KAIR	54.6181	58.2826	510	30.07.2020	песчаник мощ- ностью >2 м	Trillium Compact PH 20s, Centaur-3, 100 Γμ	

Открытие данной стационарной сейсмической станции позволило понизить магнитудный порог представительной регистрации в пределах Южного Урала до *ML*≥2.2 (рис. 6).

На сейсмической станции «Власы» (PR4R) в 2020 г. произведен перенос бункера для размещения сейсмометров. Перенос обусловлен необходимостью снижения уровня фоновых сейсмических помех, возросших в связи с расширением поселка, и оптимизации издержек по частому ремонту длинных кабельных линий связи (рис. 4). Новый уровень микросейсмического шума в месте установки сейсмометров в сравнении с прежним показан на рис. 5.



Рис. 4. Схема переноса оборудования сейсмической станции «Власы». Прежнее – «PR4R», и новое – «PR41R» положение бункера

Поскольку положение сейсмометров станции PR4R было изменено в пространстве относительно предыдущего более чем на 300 метров, в Международном сейсмологическом центре (ISC) был обновлен код станции на PR41R [16]. Состав оборудования и название – «Власы» остались прежними [Прил. 1].



Рис. 5. Спектры мощности смещений микросейсмического шума для прежнего (PR4R) и нового (PR41R) положения бункера сейсмической станций «Власы»

Исчерпывающие сведения о сейсмических станциях региональной сети и их аппаратурном оснащении приведены в приложении к настоящему выпуску журнала [Прил. 1]. Действующая сеть станций обеспечивает уверенную регистрацию сейсмических событий на большей части Пермского края с $ML \ge 2.0$, в Свердловской области, Республике Башкортостан и Челябинской области с $ML \ge 2.4$, в Оренбургской области с $ML \ge 2.6$, в Тюменской и Курганской областях с $ML \ge 3.0$, а на остальной территории – с $ML \ge 3.4$ (рис. 6).



Рис. 6. Карта магнитудной представительности *ML*_{min} регистрации сейсмических событий Уральской сетью в 2020 г.

Методика обработки данных. Большинство сейсмических станций передают данные в РИОЦ непрерывно в режиме, близком к реальному времени. Для оценки локальной магнитуды *ML* используется максимальная амплитуда колебаний на горизонтальных компонентах записи в симуляции сейсмографа Вуда-Андерсона. Принятая магнитудная шкала ML разработана с учетом региональных особенностей распространения сейсмических волн, выявленных ранее для Среднего Урала и прилегающих территорий [17]. Кинематические параметры определяются на основе годографа IASPEI [18]. Кроме расчета локальной магнитуды, начиная с 2016 г. производится определение энергетического класса K_P по шкале Т.Г. Раутиан [19] с использованием алгоритма, реализованного в программном комплексе WSG. Для энергетических оценок событий, зарегистрированных до 2016 г., используется полученная для условий Урала [20] зависимость между энергией сейсмических событий и магнитудой:

$$\lg E = 1.74 \cdot ML + 3.68.$$
 (1)

Для сравнительного анализа результатов локации сейсмических событий региональной сетью привлекаются данные других сейсмологических центров [21-23].

Оценка интенсивности проявления ощутимых сейсмических событий – землетрясений и горно-тектонических ударов – производится в регионе в соответствии со Шкалой Сейсмической Интенсивности 2017 г. (ШСЙ-2017) [24]. Данная шкала позволяет получать более объективные по сравнению с MSK-64 оценки интенсивности сотрясений в населенных пунктах по ошушениям людей, реакции предметов и повреждениям зданий. При этом ШСИ-2017 обратно совместима с MSK-64.

Сейсмичность территории. Сейсмической сетью региона в 2020 г. было зарегистрировано 403 сейсмических события и определены их необходимые параметры. На долю массовых и технологических взрывов, проводимых на горнодобывающих предприятиях Пермского края, Свердловской, Челябинской областей и Республики Башкортостан, приходится большая часть зарегистрированных событий – 338. К категории «тектоническое землетрясение» и «возможно индуцированное землетрясение» отнесено 29 событий. 36 сейсмических событий являются горно-тектоническими ударами на шахтах Североуральского бокситового месторождения (АО «СУБР»). На других горнодобывающих предприятиях исследуемой территории в 2020 г. горно-тектонических ударов зарегистрировано не было.

Как видно из рис. 7 а. на долю природных землетрясений приходится чуть более 7 % от числа всех зарегистрированных событий, при этом их доля в суммарной выделенной сейсмической энергии составила более 31 % (рис. 7 б). Горно-тектонические удары за рассматриваемый период превалируют над природными землетрясениями как в количественном отношении (почти 9 % от общего числа событий), так и в части суммарной выделенной энергии – более 46 %. В то же время на взрывы приходится всего 22 % от общей выделенной сейсмической энергии, несмотря на то, что в количественном отношении они доминируют среди всех зарегистрированных событий – почти 84 %.





Рис. 7 б. Процентное соотношение выделившейся энергии сейсмических событий разных типов

Взрывы. В 2020 г. продолжалось активное промышленное освоение природных ресурсов исследуемого региона. Отработка месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых производится как открытым, так и подземным способом. Карьерами и разрезами (открытый способ) разрабатывается порядка 80 % от общего количества эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых. По имеющимся данным, наиболее крупные массовые взрывы производят на территории Свердловской области – Асбестовский, Высокогорский и Качканарский горно-обогатительные комбинаты (ГОК) с величиной заряда 100 *m* взрывчатых веществ (ВВ) и более, на территории Пермского края максимальная масса ВВ не превышает 50 *m*.

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 [10]. Для взрывов с $ML \ge 1.5$, регистрируемых не менее чем тремя станциями, традиционно определяются магнитуда и координаты эпицентра. В региональный каталог взрывов включены 338 событий, для которых удалось определить данные параметры. Диапазон зарегистрированных магнитуд составил $1.3 \le ML \le 2.9$. На рис. 8 показано распределение числа взрывов по месяцам в 2020 году.



Рис. 8. Распределение числа взрывов по месяцам в 2020 г.

Согласно рис. 8, за представленный на нем период времени распределение количества взрывов по месяцам достаточно стабильно. Наибольшее число взрывов (N=35) было произведено в марте. Интересно, что также на март приходилось наибольшее количество взрывов как в 2019 г. (N=40), так и в 2018 г. (N=52) [20].

На рис. 9 представлены сейсмограммы массового взрыва, произведенного 8 марта 2020 г. в $03^{h}00^{m}$ на шахте «Южная» ОАО «Высокогорский ГОК» (Гороблагодатское железорудное месторождение), его магнитуда составила ML=2.8, масса ВВ 136 тонн. Суммарная выделенная сейсмическая энергия всех взрывов за 2020 г. составила $E_{\Sigma}=9.59 \cdot 10^{9} \ Дж$.



Рис. 9. Сейсмограммы массового взрыва (136 тонн ВВ) с *ML*=2.8, произведенного ОАО «Высокогорский ГОК» 8 марта 2020 г.

Горно-тектонические удары (ГТУ) за анализируемый период составляют чуть менее 9 % от общего числа зарегистрированных событий. В 2020 г. все зарегистрированные на региональных расстояниях ГТУ произошли на шахтах АО «СУБР», разрабатывающего Североуральское бокситовое месторождение. Всего были определены параметры 36 ГТУ с магнитудами в диапазоне $1.8 \le ML \le 3.5$ [Прил. 2]. Остальные ГТУ были зарегистрированы только сейсмической станцией «Североуральск» (SVUR), расположенной непосредственно в горных выработках шахты «Красная шапочка». Одним из наиболее сильных стал горно-тектонический удар на шахте «Ново-Кальинская» 29 апреля 2020 г. в $01^{h}55^{m}$ с ML=3.5 (рис. 10). Для основных параметров данного ГТУ имеются альтернативные варианты решений, полученные другими агентствами (табл. 2). Сведений о макросейсмических проявлениях данного ГТУ нет.

Таблица 2. Разные решения параметров горно-тектонического удара 29 апреля 2020 г. на шахте «Ново-Кальинская» ОАО «СУБР» по данным Уральской региональной сети (MIRAS) в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	t ₀ , ч мин с	$\delta t_0, c$	Гипоцентр $\phi^{\circ}, N \lambda^{\circ}, E h, \kappa M$		р <i>h, км</i>	Магнитуда/количество станций	Ссылка
MIRAS	01 55 07	_	60.25	60.08	1f	$ML=3.5\pm0.2/6, K_{\rm P}=10.0$	[Прил. 2]
ISC	01 55 07	1.39	60.31	60.15	6.9	$mb=3.4\pm0.2/4$	[21]
IDC	01 55 07	0.89	60.32	60.18	0f	mb=3.1±0.1/5, ML=3.1±0.1/9	[22]
NNC	01 55 14	7.35	64.01	4.01 59.25 0		$mb=3.7/2, K_{\rm P}=8.9$	[23]

Примечание: MIRAS – ГИ УрО РАН, Пермь, Россия; ISC – International Seismological Centre, Thatcham, United Kingdom [21]; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, Vienna, Austria [22]; NNC (KNDC) – National Nuclear Centre, Almaty, Kazakhstan [23]; f – фиксированная глубина.



Рис. 10. Сейсмограммы горно-тектонического удара, произошедшего на шахте «Ново-Кальинская» (АО «СУБР») 29 апреля 2020 г. в 01^h55^m

Также следует отметить горно-тектонический удар 30 апреля в $08^{h}50^{m}$ с ML=3.4 в поле шахты «Кальинская». Данный ГТУ сопровождался разрушениями горных выработок, пострадали четыре шахтера. Суммарная сейсмическая энергия всех ГТУ за 2020 г. составила $E_{\Sigma}=2.00\cdot10^{10}$ Дж. Их техногенная природа не подвергается сомнению.

Землетрясения. В Пермском крае в 2020 г. было зарегистрировано 21 землетрясение. Почти все они (20 событий) произошли в пределах сейсмически активной зоны «Таборы» – района д. Таборы Добрянского муниципального округа Пермского края [9]. На рис. 11 представлено распределение по времени землетрясений данной зоны за период с 2006 по 2020 год. Видно, что в начале 2020 г. продолжился резкий рост сейсмической активности, отмеченный в предыдущей работе [20], начиная с апреля 2019 года. В итоге в 2020 г. количество событий снизилось до 20 против 28 в 2019 г., при этом выросла общая выделенная сейсмическая энергия – E_{Σ} =1.27·10⁹ Дж против E_{Σ} =1.03·10⁹ Дж в 2019 году.



Рис. 11. Временная динамика развития сейсмического процесса в сейсмически активной зоне «Таборы» в период 2006–2020 гг.:

а) кумулятивные графики числа событий *ΣN* и энергии *ΣE* землетрясений в зависимости от времени;
б) гистограммы годового количества событий *N* и выделенной энергии *E*;
в) распределение событий по магнитуде *ML* во времени

Рост выделенной сейсмической энергии обусловлен тем, что в 2020 г. впервые за весь период инструментального сейсмологического мониторинга в данной зоне было зарегистрировано два события с магнитудой, близкой к ML=3.0: 14 февраля в 11^h38^m с ML=2.9 (рис. 12) и 13 марта в 22^h44^m Е с ML=2.8.



Рис. 12. Сейсмограммы тектонического землетрясения, произошедшего вблизи д. Таборы (Добрянский городской округ, Пермский край) 14 февраля 2020 г. в 11^h38^m

В пределах Пермского края с 2002 г. по 2020 г. событие с магнитудой *ML*=2.8 было зарегистрировано лишь однажды – это Нытвенское землетрясение 16.12.2008 г. в 17^h04^m [25]. Таким образом, событие 14 февраля в 11^h38^m с *ML*=2.9 в пределах сейсмически активной зоны «Таборы» стало сильнейшим на территории Пермского края с начала регионального сейсмологического мониторинга. К настоящему времени нет достоверного объяснения такой необычной для Урала «роевой» сейсмической активности в районе д. Таборы, сконцентрированной в узкой локальной зоне, вытянутой в субширотном направлении на 30 км (рис. 13).



Рис. 13. Эпицентры сейсмических событий в активной зоне «Таборы» за период с 2006 г. по 2020 г.

В летние периоды 2019 и 2020 гг. специалистами «ГИ УрО РАН» (MIRAS) непосредственно в активной зоне «Таборы» выполнялись локальные полевые сейсмические наблюдения с использованием автономных станций. Результаты локального сейсмологического мониторинга обрабатывались в том числе совместно с данными наблюдений Уральской региональной сети. Эти работы позволили уточнить положение эпицентров и, в первую очередь, глубину событий. Полученные результаты однозначно свидетельствуют в пользу тектонической природы землетрясений. Достоверно определенные глубины гипоцентров составляют от 3 до 6 км, при этом ошибка определения глубины по локальным данным не превышает ±0.3 км. Это ниже подошвы осадочного чехла и соответствует породам кристаллического фундамента ВЕП в данном районе. С тектонической точки зрения эпицентры событий расположены в Косьвинско-Чусовской седловине Предуральского краевого прогиба [26]. Вместе с тем, согласно тектонической схеме [26], в данном районе отсутствуют тектонические структуры – разломы, надвиги и т.д., сброс напряжений на которых приводил бы к реализации такого количества сейсмических событий. Таким образом, как уже было указано выше, вопрос генезиса такого уникального для Урала сейсмического процесса и определения порождающих его активных тектонических структур требует дополнительных исследований.

Еще одно землетрясение было зарегистрировано в районе п. Верхний Лух, также в пределах Добрянского городского округа Пермского края. Оно произошло 21 декабря 2020 г. в $16^{h}43^{m}$ с ML=1.9. Волновые формы события соответствуют тектоническим землетрясениям, а положение его эпицентра находится вне активной зоны «Таборы» и представляет собой пример слабой рассеянной сейсмичности, характерной для платформенных территорий.

В эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения в 2020 г. произошли четыре землетрясения. Самое сильное из них (рис. 14) было зарегистрировано 22 июля 2020 г. в $12^{h}10^{m}$. Оно имело магнитуду ML=3.5, макросейсмические проявления отсутствуют. В табл. 3 для основных параметров данного землетрясения приведены (для сравнения) альтернативные варианты решения, полученные другими агентствами.



Рис. 14. Сейсмограммы тектонического землетрясения, произошедшего в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения (г. Катав-Ивановск, Челябинская область) 22 июля 2020 г. в 12^h10^m

Таблица 3. Разные решения параметров землетрясения 22 июля 2020 г. вблизи г. Катав-Ивановска по данным Уральской региональной сети (MIRAS) в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	$t_0,$	δt_0 ,	Гипоцентр		rp	Магнитуда/количество станций	Ссылка	
	ч мин с	C	φ ⁻ , N	λ^{-}, E	п, км			
MIRAS	12 10 40	-	54.75	5557.63 Of $ML=3.5\pm$		$ML=3.5\pm0.2/10, K_{\rm P}=9.7$	[Прил. 2]	
ISC	12 10 37	1.44	54.71	57.57	2.6	$mb=3.5\pm0.1/3$	[21]	
IDC	12 10 40	0.90	54.81	57.45	0f	mb=3.4±0.1/4, ML=3.1±0.2/6	[22]	
NNC	12 10 42	5.26	54.68	60.82	4	$mb=3.5/2, K_{\rm P}=8.2$	[23]	

Как было показано нами ранее [12], афтершоковый процесс в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения завершился к сентябрю 2019 года. Землетрясение 22 июля 2020 г. в $12^{h}10^{m}$ произошло через одиннадцать месяцев после последнего афтершока, и его следует рассматривать как самостоятельное. Вместе с тем, данное (достаточно сильное) землетрясение по-казывает, что сейсмическая зона в районе Катав-Ивановска продолжает оставаться активной, а следующие за ним три события меньшей магнитуды – 28 июля 2020 г. в $14^{h}01^{m}$ с ML=2.2, 21 августа 2020 г. в $09^{h}40^{m}$ в ML=1.7 и 29 октября 2020 г. в $10^{h}47^{m}$ с ML=1.8 – можно рассматривать уже афтершоками данного события.

В пределах Свердловской области в 2020 г. было зарегистрировано два сейсмические события тектонической природы. Оба произошли в районе г. Карпинска – 1 февраля 2020 г. в $03^{h}32^{m}$ с ML=2.4 и 28 ноября 2020 г. в $10^{h}16^{m}$ с ML=2.2. Волновые формы событий соответствуют тектоническим землетрясениям, однако их эпицентры совпадают с положением затопленного Карпинского угольного разреза, в связи с чем эти события, возможно, имеют индуцированный характер и обусловлены процессом затопления разреза. Сведения о макросейсмических проявлениях этих землетрясений отсутствуют.

В пределах Кировской области Уральской региональной сетью в исследуемый период было зарегистрировано одно землетрясение вблизи г. Слободской, которое произошло 16 сентября 2020 г. в $01^{h}04^{m}$. Магнитуда землетрясения, рассчитанная по полученным записям, составила ML=2.8. С тектонической точки зрения землетрясение приурочено к восточному борту Кировско-Кажимского авлакогена Волго-Уральской антеклизы ВЕП. Более подробные сведения по этому событию представлены в статье настоящего выпуска журнала, где рассмотрена сейсмичность Российской части Восточно-Европейской платформы [27].

Одно землетрясение было зарегистрировано в пределах Ханты-Мансийского округа (Югра) на территории Западно-Сибирской плиты. Оно произошло 21 февраля 2020 г. в $20^{h}58^{m}$ на расстоянии порядка 55 км на северо-восток от г. Ханты-Мансийска и имело магнитуду ML=3.5 (Ms=3.6). Кроме станций Уральской региональной сети, оно было зафиксировано (в том числе на расстояниях свыше 1000 км) станциями ФИЦ ЕГС РАН на ВЕП и п-ове Ямал, а также станциями Казахстанской сети ИГИ НЯЦ Республики Казахстан (рис. 15). Несмотря на хорошее окружение и качественные сейсмограммы, из рисунка видно, что ближайшая станция «Северо-уральск» (SVUR) находится на расстоянии свыше 500 км от эпицентра. Учитывая это, а также тот факт, что региональная скоростная модель для Западной Сибири отсутствует и при расчетах используется стандартный годограф IASPEI-91, следует понимать, что ошибка определения положения эпицентра может составлять несколько десятков километров.

V, мкм/с	20:58	:22 (UTC) ML:	=3.4 Н=10 км	координаты 6	1.352° с.ш., 6	9.827° в.д.
1.0-Z (0.7-1.4	Γų) bide ar manufastili	Millicharthan and a second second				SVUR (551 км
-1.0-	A REAL PROPERTY OF A REAL PROPER	Man de la company and an				
Z (0.7-1.4	I Гц)	ويقتق أوأروته أأووا والعاقر ورواع ورجيع فروان	with a farmer to the standard of			PR7R (691 км
		a nation de la caracteriter de la composition de la composition de la composition de la composition de la compo				
N (0.7-1.4	1 Гц)	والعرازة ألفأ فالمتحدث وتستحد والخد	ihailata data data data data data data data			SVE (728 км
	1	and a construction of the state	lle se de la production de la construction de la construction de la construction de la construction de la const			
Z (0.7-1.4	Гц)	Allochate and a second state	-	40 in 1945 and 1		PR1R (761 км
		A langed as the second s	hit was a second s			
Z (0.7-1.4	Гц)	and the second	And a high state of the state o			PR0R (792 км
		and the second	A. I			
Z (0.7-1.4	Гц)					PR3R (846 км
			and the second second second			
Z (0.7-1.4	Гц)	فالمطالب ومالا ومعاقر أقداه وأحمار المتحمي والمست	والاستحداد ومعادية والمتعاولة والمتعادية والتقار	ويستعد والمحافظ والم		PR6R (847 км
		and a state of the	and the first of the second of the	***		
Z (0.7-1.4	Гц)		halain déhin karaktarahasan mana	da de la future de la filie		ARTI (859 км
		a second s	heinen Hillinis kan te staan servere			
Z (0.7-1.4	Гц)	معأدي التراخ المتحداد الاحسي فاستحد	المرجعا الأوجع فالفاق المرجان والأوجر بمناجع وم		1	PR4R (883 км
		and the second	a selati da ta an sin se se se se			
Z (0.7-1.4	Гц)	والمستعدية فأوالم ومحمد فاستعاده والم	وأعذباه والملأو أزأأ والأرفاق وبالتواري وسميته	ilden ätskille en in anter attek anter an		BORK (925 км
		and the state of t	ober die Alfikielie das meers an oor	and a stand and a stand as a stand		
Z (0.7-1.4	- Гц)	and a second	الانوابيا استخنابه ويستعيده			BVNN (1020 км
		and a state of the second s	eter de la constante de la desta de la	And the stand of the stand of the		
Z (0.7-1.4	Гц)	والمالة الالمانة الترجيح ومستعملهم ومحدو	ومليطأة الطواري أفأه فالمحدوثة وروافية وا	an isa salahili na salahili ku	ด้างกันไปได้เราะที่ไม่ไปได้เราะดู เกมเล	KURK (1302 км
		indikkokilikuus seesestiini	an a al fairean la ann an ann an an an an an an an an an	<mark>dilikki h</mark> ari kilonita na tilada kata kini hana	and the second of the second o	lafustaduran off. a construction of the
2.50.00	21.00.30	21.02.00	21.03.30	21.05.00	21.06.30	21.08.00
0.59.00	21.00.30	21.02.00	21.03.30	21.05.00	21.00.30	21.00.00
			YY:MM:CC (010)		

Рис. 15. Сейсмограммы землетрясения, произошедшего вблизи г. Ханты-Мансийска 21 февраля 2020 г. в 20^h58^m

Для основных параметров данного землетрясения имеются варианты решения, полученные другими агентствами, они приведены в табл. 4.

Таблица 4. Разные решения параметров землетрясения 21 февраля 2020 г. вблизи г. Ханты-Мансийска по данным Уральской региональной сети (MIRAS) в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	<i>t</i> ₀ ,	δt_0 ,	Гипоцентр			Магнитуда/количество станций	Ссылка
Анспіство	ч мин с	С	φ°, N	λ°, Ε	h, км	2 · · · · · ·	
MIRAS	20 58 22	_	61.35	69.83	10f	$ML=3.4\pm0.2/7, MS=3.7/7, K_P=11.0$	[Прил. 2]
OBGSR	20 58 23	1.60	61.49	69.27	12	$MS=3.5, K_{\rm P}=11.0$	[28]
ISC	20 58 22	0.83	61.32	69.64	10f	mb=3.4±0.2/5, MS=3.6±0.1/7	[21]
IDC	20 58 21	1.01	61.43	69.23	0f	<i>mb</i> =3.8±0.2/5, <i>ML</i> =3.5±0.1/9, <i>MS</i> =3.5±0.1/12	[22]
NNC	20 58 28	1.30	61.33	69.64	38	$mb=4.0, K_{\rm P}=10.2$	[23]

Ранее, в 2013 и 2014 гг., относительно близко к очагу данного землетрясения было зарегистрировано два события сопоставимой магнитуды (табл. 5).

Таблица 5. Сводная таблица параметров землетрясений вблизи г. Ханты-Мансийска за период 2013–2020 гг. по данным Уральской региональной сети (MIRAS)

Дата	t ₀ , ч мин с	Г	ипоцент	p	Магнитула/количество станций	
		φ°, N	λ°, Ε	h, км		
22.03.2013	01 05 37	61.35	68.79	10f	ML=4.0±0.2/3, MS=4.4/3	
17.06.2014	16 21 33	61.17	69.20	10f	ML=2.8/2, MS=2.9/2	
21.02.2020	20 58 22	61.35	69.83	10f	$ML=3.4\pm0.2/7, MS=3.7/7, K_P=11.0$	

Поскольку очаги всех представленных событий расположены в пределах Приобского нефтегазоносного района Фроловской нефтегазоносной области Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [29], в работе [30] было высказано предположение, что события имеют индуцированную природу и связаны с разработкой Приобского нефтяного месторождения.

Приобское нефтяное месторождение, открытое в 1982 г., относится к уникальным: геологические запасы – более 5 млрд. тонн нефти, извлекаемые – порядка 2.5 млрд. тонн, эксплуатация началась в 1988 г. [31]. Основные запасы нефти (более 90 %) сосредоточены в низкопроницаемых коллекторах, в связи с чем с самого начала эксплуатации месторождения применяются специальные методы повышения нефтеотдачи, такие как технология одновременно-раздельной эксплуатации скважин [32] и гидроразрыв пласта [33]. Известно, что интенсивное воздействие на месторождения при добыче углеводородов приводит к возникновению индуцированной сейсмичности. При этом эпицентры событий приурочены непосредственно к отрабатываемому месторождению. [34, 35].



Рис. 16. Положение эпицентров землетрясений и контур нефтяной залежи Приобского месторождения

На рис. 16 представлено положение эпицентров землетрясений и контура нефтяной залежи Приобского месторождения, согласно [29]. Как видно из рисунка, разброс локации для события 21 февраля 2020 г. по данным различных агентств достаточно большой (до 90 км). Даже принимая во внимание ошибки локации, положение эпицентра можно ассоциировать с Приобским месторождением только по данным определений MIRAS и ISC. Что касается событий 2013 и 2014 гг., их эпицентры расположены слишком далеко от Приобского месторождения. Таким образом, по имеющимся на текущий момент данным, интерпретация природы события 21 февраля как индуцированного представляется по меньшей мере дискуссионной. Для однозначного определения его природы необходимо проведение дополнительных исследований, а также установка сейсмических станций непосредственно в пределах Западной Сибири, что позволит более точно определять положение эпицентров возможных (в будущем) землетрясений и более обоснованно подходить к определению их природы.

Сведения о параметрах всех землетрясений, зарегистрированных в 2020 г. в регионе «Урал и Западная Сибирь», приведены в Прил. 2 к данной работе, карта их эпицентров представлена на рис. 17.



Рис. 17. Карта эпицентров сейсмических событий Урала и Западной Сибири в 2020 г.

Распределение на территории исследуемого региона в 2020 г. количества N событий разных типов по магнитудам ML и их суммарная сейсмическая энергия ΣE представлены в табл. 6.

Подводя итоги, рассмотрим параметры сейсмичности Урала и Западной Сибири в 2020 г. N и ΣE в сравнении с ежегодными значениями, начиная с 2006 г. (рис. 18). Данные по взрывам представлены начиная с 2007 г., с того времени, когда их стали помещать в региональный каталог по таким же критериям, как и другие события – локация не менее, чем по трем станциям. До этого момента учитывались взрывы, зарегистрированные одной или двумя станциями, в том случае, если о них были данные от организаций, производящих взрывные работы.

Таблица 6. Распределение числа сейсмических событий *N* за 2020 г. в различных интервалах магнитуд *ML* и суммарная выделившаяся сейсмическая энергия Σ*E*, *Дж*

T		ML	λī		
ГИП СООБТИЯ	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	IVΣ	$\Sigma E, \mathcal{A} \mathcal{H}$
Тектоническое, возможно индуцированное	17	10	2	29	1.36E+10
ГТУ	4	28	4	36	2.00E+10
Взрывы	167	171	0	338	9.59E+09
Всего	188	209	6	403	4.32E+10

Как видно из рис. 18 а, для землетрясений сейсмический поток сильно меняется год от года, и эти изменения связаны, прежде всего, с реализацией крупных землетрясений, таких как Среднеуральское 18.10.2015 г. с *ML*=4.7 и Катав-Ивановское 04.09.2018 г. с *ML*=5.4.



Рис. 18. Сводные данные о годовом количестве и суммарной энергии землетрясений (а), горно-тектонических ударов (б) за 2006–2020 гг. и взрывов (в) за 2007–2019 гг.

Если рассматривать горно-тектонические удары (рис. 18 б), сейсмический поток в целом имеет постоянный уровень. Снижение 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 сильнейший ГТУ за весь период наблюдений Уральской региональной сейсмологической сетью. В дальнейшем магнитуда регистрируемых ГТУ не превышала ML=3.6. Что касается взрывов (рис. 18 в), видно, что в количественном отношении взрывы превалируют над другими типами регистрируемых событий, но в энергетическом плане они сопоставимы с ГТУ.

Заключение. По сравнению с 2018–2019 гг., для региона в целом 2020 г. в сейсмическом отношении был спокойным. Все ранее выделенные сейсмически активные зоны подтверждены новыми сейсмическими событиями, преобладающая природа которых в их пределах сохраняется. Крупных и уникальных событий как природного, так и техногенного характера не зарегистрировано. Продолжилась отмеченная ранее активизация сейсмического процесса в зоне «Таборы». Здесь сейсмический процесс требует дальнейших исследований с целью установления природы и динамики развития необычного для данного района роевого проявления сейсмичности. В Ханты-Мансийском автономном округе зарегистрировано еще одно (третье по счету) за инструментальный период наблюдений землетрясение. Интерпретация природы данной группы событий также требует дополнительных исследований.

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».

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

Электронное приложение App15_Ural_West_Siberia_2020 (http://www.gsras.ru/zse/app-27.html): 1 – Сейсмические станции региона Урал и Западная Сибирь в 2020 г.; 2 – Каталог землетрясений, горных и горно-тектонических ударов на территории Урала и Западной Сибири в 2020 году.

Литература

- 1. Носкова Н.Н., Верхоланцев Ф.Г., Дягилев Р.А. Вятское землетрясение 13 августа 1897 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51, № 2. С. 5–19. DOI: https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-1. EDN: XPEAVE
- 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: https://doi.org/10.3103/S0747923921030105
- 4. Годзиковская А.А., Прибылова Н.Е. Сейсмические события Европейской части бывш. СССР, Урала и Западной Сибири // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 2. С. 5–22.
- 5. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Под ред. В.И. Уломова, Н.С. Медведевой. (2024). [Site]. – URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf
- 6. Пучков В.Н. Важнейшие закономерные и индивидуальные черты геологической эволюции Урала и сопредельных территорий. // Литосфера. 2001. № 1. С. 15–31.
- 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: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.20 EDN: CFBNRE
- 8. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина, А.А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.
- Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Верхоланцев А.В. Пермский край 2000–2005 гг. // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 269–289.
- Дягилев Р.А., Голубева И.В. Оценка эффективности критерия распознавания сейсмических событий As/Ap для станций Уральского региона с применением статистических подходов // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы международной конференции. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 78–80.
- Верхоланцев Ф.Г., Дягилев Р.А., Голубева И.В., Гусева Н.С. Землетрясение 20 мая 2014 г. ML=2.8, I₀=4–5 в центральной части Республики Башкортостан // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 317–322. DOI: https://doi.org/10.355540/1818-6254.2020.23.32
- Верхоланцев Ф.Г., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Варлашова Ю.В. Катав-Ивановское землетрясение 4 сентября 2018 г. С *ML*=5.4, *Mb*=5.5, *I*₀=6.4 балла // Землетрясения Северной Евразии. 2023. Вып. 26 (2018–2019 гг.). С. 323–339. DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.29 EDN: FALSTN
- 13. Trillium Compact Vault Seismometer. Nanometrics Inc. (2024). [Site]. URL: https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Data%20Sheets/trillium_compact.pdf
- 14. Centaur An All-In-One High-Fidelity Networking Digital Recorder. Nanometrics Inc. (2024). [Site]. URL: https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Data%20Sheets/Centaur_Data_Sheet.pdf?hsLang=en-ca
- 15. International Registry of Seismograph Stations (IR). ISC & WDC. (2024). [Site]. URL: http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/stations?stacode=KAIR
- 16. International Registry of Seismograph Stations (IR). ISC & WDC. (2024). [Site]. URL: http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/stations?stacode=PR41R
- 17. Дягилев Р.А. Шкала *ML* для Среднего Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 118–122.
- 18. Kennett, B.L.N. IASPEI 1991 Seismological Tables // Bibliotech. Canberra, Australia, 1991. 167 p.
- 19. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). М.: ИФЗ АН СССР, 1960. С. 75–114.
- Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 225– 238. DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.19 EDN: UCPMTP
- 21. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. https://doi.org/10.31905/D808B830
- 22. International Data Centre. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2024). [Site]. URL: https://www.ctbto.org/verification-regime/the-international-data-centre

- 23. National Nuclear Centre. (NNC). (2024). [Site]. URL: http://www.kndc.kz/index.php/ru
- 24. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Введ. 2017-07-19. М.: Стандартинформ, 2017. 28 с.
- Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Верхоланцева Т.В., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 248– 253.
- 26. Водолазская В.П., Тетерин И.П., Кириллов В.А., Лукьянова Л.И., Петров Г.А., Стефановский В.В., Морозов Г.Г., Жданов А.В., Жиганов А.В., Стряпунина Е.В., Еськин А.Г., Петрова Т.А., Вербицкий И.В., Вербицкая Н.В. 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.
- Носкова Н.Н., Габсатарова И.П., Баранов С.В., Ваганова Н.В., Зуева И.А., Ковалева И.С., Конечная Я.В., Карпинская О.В., Лебедев А.А., Мещерякова В.А., Бакунович Л.И., Морозов А.Н., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И., Петров С.И., Пивоваров С.П. Сейсмичность Российской части Восточно-Европейская платформы и ближайшего окружения в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 189–197 DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.17 EDN: HVJCFV
- 28. Габсатарова И.П., Асминг С.В., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мехрюшев Д.Ю., Надёжка Л.И., Нестеренко М.Ю., Носкова Н.Н., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2020 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 25–33.
- Денисов В.А., Зылева Л.И., Ковригина Е.К., Козырев В.Е. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист P-42 – Ханты-Мансийск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 343 с. + 12 вкл.
- 30. Габсатарова И.П. Регистрация землетрясений в 2013 и 2020 годах в районе проведения гидроразрывов пласта в Ханты-Мансийской нефтегазоносной провинции // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы VI Международной конференции (г. Москва, 21–24 июня 2022 г.). – М.: ИДГ РАН, 2022. – С. 123.
- 31. Багаутдинов А.К., Барков С.Л., Белевич Г.К., Бочаров В.А., Бриллиант Л.С., Гавура А.В., Гавура В.Е., Гузеев В.В., Джавадян А.А., Долгих М.Е., Закирова Р.А., Курамшин Р.М., Лапидус В.З., Лещенко В.Е., Мангазаев В.П., Медведев Н.Я., Мухарский Э.Д., Праведников Н.К., Ровенская А.С., Сафронов В.И., Юрьев А.Н., Янин А.Н. Геология и разработка крупнейших и уникальных нефтяных и нефтегазовых месторождений России. Том 2. М.: ВНИИОЭНГ, 1996. 352 с.
- Барышников А.В., Поляков Д.Б., Шаймарданов Р.Ф. Внедрение и совершенствование технологии одновременно-раздельной эксплуатации скважин на Южной лицензионной территории Приобского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2010. № 5. С. 121–123.
- 33. Янин А.Н., Янин К.Е., Черевко М.А. Ретроспективный анализ системного применения гидроразрыва пластов на Приобском месторождении (ЮЛТ) // Территория Нефтегаз. 2014. № 9. С. 48–57.
- 34. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
- Weingarten M., Ge S., Godt J.W., Bekins B.A., Rubinstein J.L. High-rate injection is associated with the increase in US mid-continent seismicity // Science. – 2015. – V. 348, N 6241. – P. 1336–1340. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aab1345

SEISMICITY of the URALS and WESTERN SIBERIA in 2020 F.G. Verkholantsev¹, I.V. Golubeva¹, R.A. Dyagilev², T.V. Zlobina³

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Perm, sombra@mail.ru ²Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, dra@gsras.ru ³Mining Institute, Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, tati.verkholantseva@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 2020. 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, 29 events are natural and 36 are 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.

For citation: Verkholantsev, F.G., <u>Golubeva, I.V.</u>, Dyagilev, R.A., & Zlobina, T.V. (2024). [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 205–222. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.19 EDN: IXPMMM

References

- 1. Noskova, N.N., Verkholantsev, F.G., & Dyagilev, R.A. (2024). Vyatka earthquake of August 13, 1897. Seismic Instruments, 51(2), 5–19. DOI: https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-1. EDN: XPEAVE
- 2. Verkholantsev, 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: https://doi.org/10.3103/S0747923921030105
- 4. Godzikovskaya, A.A., & Pribylova, N.E. (2014). [Seismic events in the European part of the former. USSR, Urals and Western Siberia]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii* [Seismic Instruments], *41*(2), 5–22. (In Russ.).
- Ulomov, V.I., & Medvedeva, N.S. (2019). Spetsializirovannyy katalog zemletryaseniy 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]. (2024). Retrieved from http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-%D0%A1%D0%9A%D0%97.pdf (In Russ.).
- 6. Puchkov, V.N. (2001). [The most important natural and individual features of the geological evolution of the Urals and adjacent territories]. *Litosfera* [Lithosphere], *1*, 15–31. (In Russ.).
- Verkholantsev, 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: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.20 EDN: CFBNRE
- 8. 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.).
- Malovichko, A.A., Malovichko, D.A., Dyagilev, R.A., Verkholantsev, F.G., Golubeva, I.V., & Verkholantsev, A.V. (2011). [Perm region 2000–2005]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2005 godu* [Earth-quakes in Northern Eurasia, 2005] (pp. 269–289). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- 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.).
- Verkholantsev, 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: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.32
- Verkholantsev, F.G., Dyagilev, R.A., Shulakov, D.Yu., & Varlashova, Yu.V. (2023). [September 4, 2018 Katav-Ivanovsk earthquake with *ML*=5.4, *mb*=5.5, *I*₀=6.4]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 323–339. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.29 EDN: FALSTN
- 13. Trillium Compact Vault Seismometer. Nanometrics Inc. (2024). Retrieved from https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Data%20Sheets/trillium_compact.pdf
- 14. Centaur An All-In-One High-Fidelity Networking Digital Recorder. Nanometrics Inc. (2024). Retrieved from https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Data%20Sheets/Centaur_Data_Sheet.pdf?hsLang=en-ca
- 15. International Registry of Seismograph Stations (IR). ISC & WDC. (2024). Retrieved from http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/stations?stacode=KAIR
- 16. International Registry of Seismograph Stations (IR). ISC & WDC. (2024). Retrieved from http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/stations?stacode=PR41R
- 17. 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.).
- 18. Kennett, B.L.N. (1991). IASPEI 1991 Seismological Tables. Bibliotech, Canberra, Australia, 167 p.
- Rautian, T.G. (1960). [Energy of earthquakes]. In Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti (Trudy IFZ AN SSSR, № 9(176)) [Methods of Detail Study of Seismicity] (pp. 75–114). Moscow, Russia: Inst. Fiz. Zemli Akad. Nauk SSSR Publ. (In Russ.).

- Verkholantsev, F.G., Golubeva, I.V., Dyagilev, R.A., & Zlobina, T.V. (2023). [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2018–2019]. Zemletriaseniia Severnoi Evrazii [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 225–238. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.19 EDN: UCPMTP
- 21. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. Retrieved from https://doi.org/10.31905/D808B830
- 22. International Data Centre. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2024). Retrieved from https://www.ctbto.org/verification-regime/the-international-data-centre
- 23. National Nuclear Centre. (NNC). (2024). Retrieved from http://www.kndc.kz/index.php/ru
- 24. GOST R 57546-2017. (2017). [Earthquakes. Seismic Intensity Scale]. Moscow, Russia: Standardinform Publ., 28 p. (In Russ.).
- Malovichko, A.A., Dyagilev, R.A., Malovichko, D.A., Verkholantseva, T.V., Verkholantsev, F.G., & Golubeva, I.V. (2014). [Ural]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2008 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 248–253). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Vodolazskaya, V.P., Teterin, I.P., Kirillov, V.A., Luk'yanova, L.I., Petrov, G.A., Stefanovskij, V.V., Morozov, G.G., Zhdanov, A.V., Zhiganov, A.V., Stryapunina, E.V., Es'kin, A.G., Petrova, T.A., Verbickij, I.V., & Verbickaya, N.V. (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.).
- Noskova, N.N., Gabsatarova, I.P., Baranov, S.V., Vaganova, N.V., Zueva, I.A., Kovaleva, I.S., Konechnaya, Ya.V., Karpinskaya, O.V., Lebedev, A.A., Meshcheryakova, V.A., Bakunovich, L.I., Morozov, A.N., Munirova, L.M., Nadezhka, L.I., Petrov, S.I., & Pivovarov, S.P. (2024). [Seismicity of the Russian part of East European platform and adjacent territories in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], *27*(2020), 189–197. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.17 EDN: HVJCFV
- Gabsatarova, I.P., Asming, V.E., Verkholantsev, F.G., Golubeva, I.V., Diaghilev, R.A., Karpinsky, V.V., Konechnaya, Ya.V., Mekhryushev, D.Yu., Nadezhka, L.I., Nesterenko, M.Yu., Noskova, N.N., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., Poigina, S.G., & Sanina, I.A. (2022). [Results of seismic monitoring of various regions of Russia. East European Platform, Urals and Western Siberia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia, 2020] (pp. 25–33). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Denisov, V.A., Zyleva, L.I., Kovrigina, E.K., Kozyrev, V.E. et al. (2011). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List R-42 – Khanty-Mansiysk. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). West Siberian series. Sheet R-42 – Khanty-Mansiysk. Explanatory letter]. Saint Petersburg, Russia: Kartfabrika VSEGEI Publ., 343 p. + 12 incl. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P. (2022). [Registration of earthquakes in 2013 and 2020 in the area of hydraulic fracturing in the Khanty-Mansi oil and gas province]. *Triggernyye effekty v geosistemakh* [Trigger effects in geosystems]. Moscow, Russia.: IDG RAS Publ., 123 p. (In Russ.).
- 31. Bagautdinov, A.K., Barkov, S.L., Belevich, G.K., Bocharov, V.A., Brilliant, L.S., Gavura, A.V., Gavura, V.E., Guzeev, V.V., Dzhavadyan, A.A., Dolgih, M.E., Zakirova, R.A., Kuramshin, R.M., Lapidus, V.Z., Leshchenko, V.E., Mangazaev, V.P., Medvedev, N.Ya., Muharskij, E.D., Pravednikov, N.K., Rovenskaya, A.S., Safronov, V.I., Yur'ev, A.N., & Yanin, A.N. (1996). *Geologiya i razrabotka krupnejshih i unikal'nyh neftyanyh i neftegazovyh mestorozhdenij Rossii. T. 2.* [Geology and development of the largest and unique oil and oil and gas fields in Russia. V. 2]. Moscow, Russia: VNIIOENG Publ., 352 p. (In Russ.).
- 32. Baryshnikov, A.V., Polyakov, D.B., & Shajmardanov, R.F. (2020). [Introduction and improvement of technology for simultaneous-separate operation of wells in the Southern licensed territory of the Priobskoye field]. *Neftyanoye khozyaystvo* [Oil industry], *5*, 121–123. (In Russ.).
- Yanin, A.N., Yanin, K.E., & Cherevko, M.A. (2014). [Retrospective analysis of the systemic application of hydraulic fracturing at the Priobskoye field (YULT)]. *Territoriya Neftegaz* [Oil and Gas Territory], 9, 48– 57. (In Russ.).
- 34. Adushkin, V.V., & Turuntaev, S.B. (2015). *Tekhnogennaya seysmichnost' indutsirovannaya i triggernaya* [Technogenic seismicity – induced and triggered]. Moscow, Russia: IDG RAS Publ., 364 p. (In Russ.).
- Weingarten, M., Ge, S., Godt, J.W., Bekins, B.A., & Rubinstein, J.L. (2015). High-rate injection is associated with the increase in US mid-continent seismicity. *Science*, 348(6241), 1336–1340. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aab1345