

УДК 550.34.063, 550.34.06.013.24

## Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b=5.4$ (Урал)

© 2020 г. Р.А. Дягилев<sup>1</sup>, Ф.Г. Верхованцев<sup>2</sup>, Ю.В. Варлашова<sup>3</sup>, Д.Ю. Шулаков<sup>3</sup>,  
И.П. Габсатарова<sup>1</sup>, А.Г. Епифанский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; <sup>2</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, Россия;

<sup>3</sup>«ГИ УрО РАН», г. Пермь, Россия

**Аннотация.** Обобщены инструментальные и макросейсмические данные, полученные в районе Катав-Ивановского землетрясения, произошедшего 4 сентября 2018 г. в Челябинской области. Землетрясение стало самым сильным инструментально зафиксированным сейсмическим событием на Урале ( $m_b=5.4$ ) и в то же время самым ощутимым на территории России в 2018 г. ( $I_0=6$  баллов). Уникальность данному событию придавал тот факт, что после него впервые для Урала был зафиксирован афтершоковый процесс, активная стадия которого продолжалась более одного года. Как и основной толчок, некоторые афтершоки имели значительный макросейсмический эффект. В работе приводятся результаты исследований, позволивших в условиях недостатка ближних станций с использованием метода относительной локации определить точные координаты эпицентра. Новые подходы обработки дали также возможность оценить глубину очага через функцию согласования фазовых спектров. Наконец, значительный объём макросейсмических данных лёг в основу карты макросейсмических проявлений.

**Ключевые слова:** землетрясение, интенсивность, афтершок, Южный Урал, относительная локация, временная сейсмическая станция, функция согласования фазовых спектров, макросейсмическое поле.

**Для цитирования:** Дягилев Р.А., Верхованцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г.,  $m_b=5.4$  (Урал) // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 2. — С. 7–20. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>

### Введение

Землетрясение в районе г. Катав-Ивановска Челябинской области, произошедшее 4 сентября 2018 г., стало неожиданным и необычным природным явлением для Южного Урала. Сам факт, что событие произошло в сейсмически спокойном регионе, где по данным ОСР [Уломов, Шумилина, 1999] сотрясения с интенсивностью 6 баллов (а именно такой макросейсмический эффект был зарегистрирован в эпицентре) ожидаются только по карте С (период повторяемости сотрясений равен 5000 лет), говорит о том, что сейсмический потенциал для данной территории, вероятно, недооценён. Отчасти для этого имеются объективные причины, главная из них — это редкая сейсмическая сеть, которая не только ранее, но и на современном этапе не позволяет видеть многие слабые землетрясения, которые могли бы достоверно свидетельствовать об активности зон ВОЗ Южного Урала. Очень мало

первичной информации о макросейсмических проявлениях. Ощутимые сейсмические события на Южном Урале происходили неоднократно, и сведения о них в последние годы тщательно собирались, но редкий характер землетрясений и их слабая интенсивность не давали основы для серьёзного анализа. Наконец, практически отсутствуют данные о механизмах очагов, что не позволяет уверенно идентифицировать сейсмоактивные структуры в условиях сложного геологического строения региона.

Целью данной работы является восполнение отмеченного выше недостатка информации о сейсмичности на Южном Урале. Катав-Ивановское землетрясение в этом отношении имело взрывной характер, поскольку вместе с афтершоками оно способствовало получению огромного объёма информации за сравнительно короткий промежуток времени. Вследствие развёртывания сети временных станций при детальном обследовании эпицентральной зоны

за год было зарегистрировано более 1.2 тыс. землетрясений, из которых около 30% обработано по данным минимум трёх станций. Собраны макросейсмические данные о главном толчке и трёх сильнейших его афтершоках. Значительная магнитуда землетрясения позволила привлечь данные десятков телесейсмических станций для определения глубины и механизма очага.

### Историческая сейсмичность территории

Катав-Ивановское землетрясение 2018 г. входит в тройку сильнейших ( $MS \geq 5.0$ ) землетрясений, известных на Урале. В силу того, что первые два произошли довольно давно (1798 г. – Пермь-Кунгур, 1914 г. – Билимбай), первичные сведения о них, собранные и представленные подробно в [Годзиковская, 2016], состоят преимущественно из макросейсмических описаний. Исключительно по ним определены параметры очага события 1798 г. (табл. 1). Несколько лучше дело обстоит с Билимбаевским землетрясением 1914 г., которое произошло уже в период инструментальных наблюдений. Есть даже запись землетрясения сейсмостанцией «Екатеринбург», удалённой от эпицентра на 81 км. Последние исследования, привлекающие записи сейсмических станций мира, существовавших в то время в Российской империи и других странах, позволили определить эпицентр Билимбаевского землетрясения инструментально с использованием современных подходов локации [Маловичко и др., 2020].

Имеющиеся данные говорят о том, что очаг Катав-Ивановского землетрясения расположен далеко от событий 1798 и 1914 гг., что не даёт достаточно оснований рассматривать их в контексте принадлежности к одной и той же зоне ВОЗ. В то же время его возникновение даёт статистические оценки периода повторяемости событий Урала с магнитудой  $MS=5.0-5.5$ , который составляет 110 лет.

Рассматривая исторические землетрясения более локально, можно отметить некото-

рые особенности, которые ранее не озвучивались.

В табл. 2 представлены сведения о двух десятках достоверных сейсмических событий, произошедших в радиусе 150 км от эпицентра. Каталог до 2002 г. составлен по данным, представленным в [Годзиковская, 2016], в последующий интервал времени – по данным Уральской сейсмологической сети [Маловичко и др., 2011, 2012; Сейсмологический...]. В каталоге ясность по природе явления существует для одного обвального события 1879 г., нескольких горно-тектонических ударов (ГТУ), имевших место на Южноуральском бокситовом руднике (ЮУБР) и на Учалинском карьере, а также для всех инструментально зафиксированных событий после 2002 года. Последние считаются тектоническими событиями в силу особенностей волновых форм, характерных для природных землетрясений [Дягилев, Голубева, 2008]. Неопределённость остается, главным образом, для исторических событий, по которым имеющиеся сведения не дают чётких оснований отнести их к тому или иному типу.

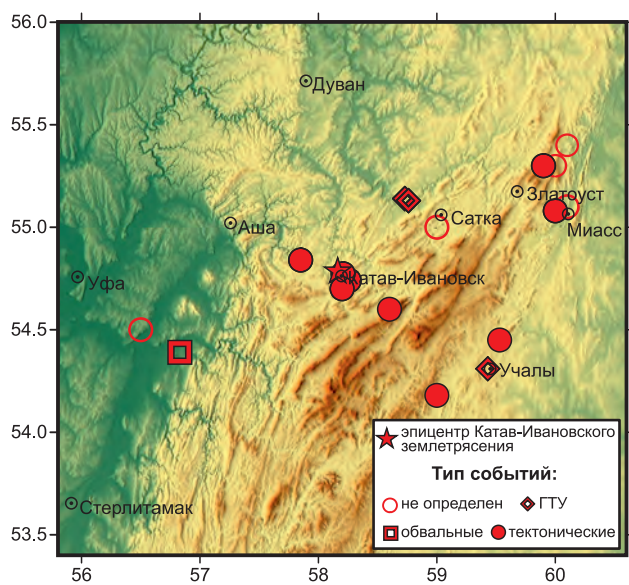
Проведя анализ характера реализации тектонических землетрясений и событий неопределённой природы в пространстве (рис. 1) и времени (рис. 2), удалось установить, что в каталоге присутствуют, по крайней мере, две группы парных событий (№ 14–15 и № 17–18 в табл. 2), которые можно рассматривать как главный удар и его афтершок. Временной интервал между такими событиями составляет несколько минут, а эпицентры расположены рядом друг с другом (удаление около 27 км для обеих пар). С несколько большим временным интервалом (менее трёх месяцев) можно отметить также пару событий № 1–2, дистанцированных друг от друга примерно на 13 км. К слову, горно-тектонические удары на ЮУБР, которые по сути являются мелкофокусными тектоническими землетрясениями, индуцированными подземной разработкой месторождения, тоже происходили сериями (№ 7–8–9 и № 10–11).

Таблица 1. Параметры сильнейших исторических землетрясений Урала

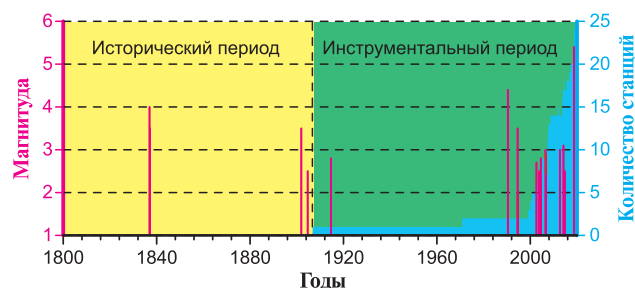
Дата, дд.мм.гггг	Время, чч:мм:сс	Гипоцентр			$MS$	$I_0$ (MSK-64)	Источник
		$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E	$h$ , км			
23.05.1798	00:30:00±1ч	57.9±1.0	56.8±1.0	26 (17–40)	5.3±0.5	6±1	[Годзиковская, 2016]
17.08.1914	04:57:01	56.8	59.4	26	5.0	6	[Годзиковская, 2016]
	04:56:59.2	57.00±0.38	59.67±0.43	6 (0–53)	–	–	[Маловичко и др., 2020]

**Таблица 2.** Каталог исторических сейсмических событий с эпицентрами в радиусе 150 км от Катав-Ивановского землетрясения

№	Дата и время, дд.мм.гггг чч:мм:сс	Гипоцентр			Магнитуда	$I_0$ (MSK-64)	Район	Тип очага
		φ, °N	λ, °E	h, км				
1	12.12.1836 20:00	55.30	60.00	—	$Mms=4.0$	3–4	Златоуст–Кыштым	не определен
2	01.03.1837	55.40	60.10	—	$Mms=3.5$	4	Златоуст–Кыштым–Миасс	не определен
3	14.01.1879 05:00	54.50	56.50	0.1	$Mms=0.0$	3	д. Бейсово	обвальное
4	08.12.1901 11:00:00	55.10	60.10	—	$Mms=3.5$	5	г. Миасс	не определен
5	02.09.1904 02:20:00	54.50	56.50	—	$Mms=2.5$	3	с. Ерош	не определен
6	29.08.1914 06:00:00	55.00	59.00	—	$Mms=2.8$	5	г. Сатка	не определен
7	28.05.1990 00:35:13	55.14	58.73	0.4	$MLH=2.6$		ЮУБР	ГТУ
8	28.05.1990 00:35:50	55.14	58.73	0.4	$MLH=4.2$	5	ЮУБР	ГТУ
9	28.05.1990 02:41:27	55.14	58.73	0.4	$MLH=4.4$	5–6	ЮУБР	ГТУ
10	28.07.1994 19:06:22	55.13	58.76	0.2	$MLH=2.0$	3	ЮУБР	ГТУ
11	28.07.1994 19:11:31	55.13	56.76	0.2	$MLH=3.5$	4	ЮУБР	ГТУ
12	18.08.2002 15:23:18	55.08	60.00	—	$MLH=2.7$	4	г. Златоуст	
13	15.10.2003 11:21:28	55.30	59.90	5f	$ML=2.5$		г. Златоуст	
14	07.07.2004 00:31:24	54.60	58.60	33	$ML=2.3$		г. Катав-Ивановск	
15	07.07.2004 00:46:51	54.74	58.26	22	$ML=2.8$		г. Катав-Ивановск	
16	04.07.2006 20:29:41	54.77	58.21	3	$ML=3.0$	3–4	г. Катав-Ивановск	
17	10.02.2006 05:37:59	54.84	57.85	5f	$ML=2.9$		г. Катав-Ивановск	
18	02.10.2006 05:45:55	54.70	58.20	5f	$ML=2.4$		г. Катав-Ивановск	
19	05.09.2012 20:11:03	54.31	59.43	1	$ML=3.0$	4	г. Учалы	ГТУ
20	17.03.2014 23:00:35	54.18	59.00	5f	$ML=3.1$		с. Уральск	
21	01.11.2014 11:13:10	54.45	59.53	5f	$ML=2.5$		г. Учалы	

**Рис. 1.** Карта эпицентров исторических землетрясений в районе исследований

Сам факт, что они возникают в условиях сравнительно небольшой глубины разработки, говорит о существовании особых внешних условий, благоприятствующих накоплению в массиве напряжений, которые достаточны для реализации

**Рис. 2.** Динамика проявления во времени исторических землетрясений в районе исследований

ощутимых землетрясений. Даже последний ГТУ на Учалинском карьере (№ 19), несмотря на отсутствие сведений в каталоге, имел несколько десятков афтершоков, которые ощущались рабочими в течение первых суток [Дягилев и др., 2018]. В сопоставлении временной динамики с графиком, характеризующим развитие сети сейсмологических наблюдений в регионе (рис. 2), становится ясно, что фактически мы имеем в распоряжении информацию только о наиболее сильных событиях из данного района. Простое увеличение числа станций после 2000 г.

позволило обнаруживать землетрясения с магнитудой  $\geq 2.3$  намного чаще, чем ранее. Все данные о более ранних событиях, очевидно, обрывочны и дошли до нас только по причине большой магнитуды и близости очагов к населённым пунктам, где могли сохраниться свидетельства о них.

Таким образом, в районе очага Катав-Ивановского землетрясения на протяжении всего доступного для изучения временного интервала отмечается устойчивая тенденция к группированию землетрясений. Вероятно, это является характерной особенностью данной зоны, и реализация землетрясения в 2018 г. в виде главного толчка и серии афтершоков стала по факту всего лишь самой представительной группой среди множества других, имевших место ранее.

### Инструментальные данные о главном ударе и афтершоках

Территория Челябинской области, где произошло Катав-Ивановское землетрясение, является районом с низкой плотностью сейсмических станций. Наиболее редкая сеть имеет место как раз на Южном Урале. В первые дни после землетрясения в радиусе 30 км от эпицентра была развёрнута сеть временных станций, которая начала работу с 6 сентября 2018 года. Такие дополнительные инструментальные наблюдения проводятся каждый раз после каждого ощутимого землетрясения в его эпицентральной зоне начиная с 2010 года. Их целью является регистрация возможных афтершоков и уточнение по ним местоположения очаговой зоны. До 2018 г. подобные попытки были безуспешными, так как ни одно ощутимое землетрясение не сопровождалось афтершоками. Событие в Катав-Ивановске стало исключением в этом ряду. Это позволило более детально взглянуть на сейсмический процесс в очаговой зоне и, опираясь на данные об афтершоках, определить параметры землетрясения намного точнее, чем это позволяет сделать стационарная сейсмическая сеть.

Несмотря на то, что временная сеть функционировала не всегда и время от времени меняла свою конфигурацию, всего удалось зафиксировать и обработать более 1.2 тыс. сейсмических событий. Их временная динамика представлена на рис. 3, а пространственное положение тех, которые были зафиксированы минимум тремя станциями, показано на рис. 4. Каталог афтершоков неоднороден. В первые сутки после землетрясения имеются сведения только о наиболее сильных событиях ( $M_L \geq 2$ ), которые регистрировались станциями региональной сети. С появ-

лением временных станций появилась возможность фиксировать слабые афтершоки, начиная с магнитуды  $-0.8$ . Поскольку временная сеть неоднократно оптимизировалась, на большей части представленного временного интервала имеются наиболее полные сведения только об афтершоках с магнитудой более 1.

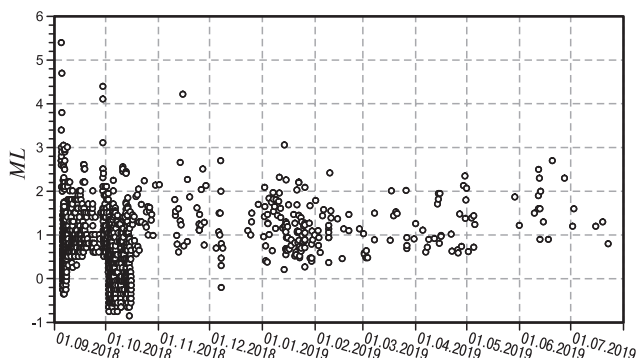


Рис. 3. Временная динамика афтершоков Катав-Ивановского землетрясения

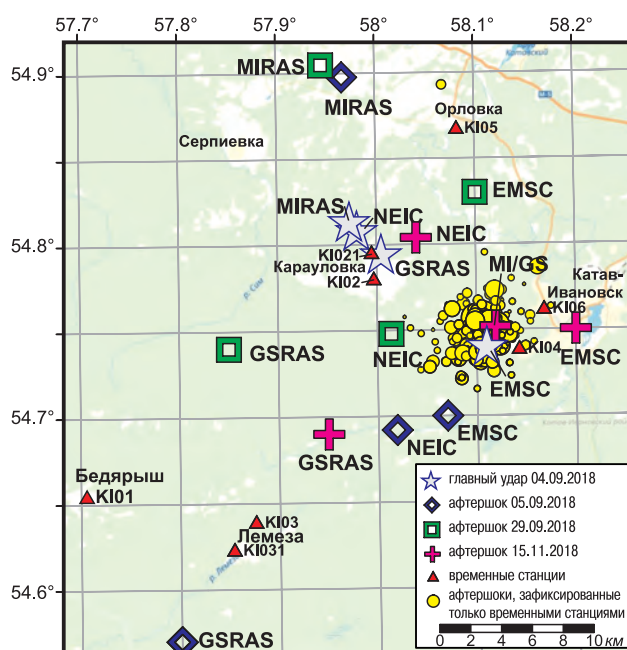


Рис. 4. Сравнение решений различных агентств для Катав-Ивановского землетрясения и трёх его сильнейших афтершоков

Если принимать во внимание данные только стационарных станций, то расстояние до ближайших трёх («Уфа», «Арти» и «Стерлитамак») составляет от 155 до 180 км, поэтому традиционными подходами полноценную трёхмерную локацию главного события выполнить сложно. В силу того, что магнитуда очага более 5, для землетрясения имеется большое количество записей на телесеизмических расстояниях. Расчёт, выполненный по данным телесеизмических

станций и региональной сети (всего 57 станций), указывает на положение очага в районе северной окраины пос. Карауловка (рис. 4). Для главного удара и трёх сильнейших афтершоков ( $M \geq 4$ ) имеются также данные о решениях, полученных другими агентствами (табл. 3).

Сравнивая пространственное положение всех четырёх эпицентров (рис. 4), можно заметить, что их координаты отличаются существенно. Ввиду отсутствия ближних станций все агентства, используя традиционные методы локации, дали местоположение одних и тех же очагов с разбросом до первых десятков километров. Практически все решения (за исключением решения EMSC для 04.09.2018 г.) располагаются в пространстве довольно далеко от облака афтершоков, выявленного локальной сетью временных станций, и потому указывающего на истинное положение очаговой зоны. Учитывая, что решения EMSC для остальных событий также далеки от облака афтершоков, попадание решения для главного удара в центр облака, скорее всего, является случайным. Фактически из всех вариантов, приведённых в табл. 3, самым точным считается только одно решение, которое было получено для афтершока 15 ноября 2018 г. (в табл. 3 и на рис. 4 отмечено как MI/GS) с использованием данных четырёх временных станций. Для него надёжно определены не только координаты эпицентра, но и глубина (стандартное отклонение координат гипоцентра не превышает 0.4 км).

Для остальных трёх событий, произошедших до момента установки локальной сети временных станций, а также в период её перестройки, таких данных нет.

Тем не менее, в данных обстоятельствах имеется возможность реализовать подход, который позволяет найти более точные решения, которые, по различным оценкам [Gibowicz, Kijko, 1994], будут в 3–5 раз точнее традиционных. Ввиду того, что все четыре события имели магнитуду более 4, они были зафиксированы многими телесейсмическими станциями. Для одного из них имеется достаточно точное определение гипоцентра, это даёт основание к применению метода относительной локации для уточнения координат остальных событий, используя записи стационарной сети станций.

Метод относительной локации [Gibowicz, Kijko, 1994; Mendecki, 1997] хорош тем, что для его применения не нужно детально знать скоростную модель на пути распространения волн от источника до приёмника. Достаточно иметь примерное представление о скоростях в районе самого гипоцентра. Все расчёты строятся на положении, что если известны параметры очага мастер-события ( $x_0, y_0, z_0, t_0$ ) и измерены времена прихода волн из этого очага на разные станции ( $t_{Ri}$ ), то для события-соседа, произошедшего спустя интервал времени  $dt_0$ , невязки измеренных времён вступлений аналогичных волн на тех же станциях ( $t_i$ ) будут обусловлены, главным образом,

**Таблица 3.** Решения параметров Катав-Ивановского землетрясения и трёх его афтершоков

Агентство	Дата, дд.мм.гггг	$t_0$ , чч:мм:сс.сс	Гипоцентр						Магнитуда
			$\varphi$ , °N	$\delta\varphi$ , °	$\lambda$ , °E	$\delta\lambda$ , °	$h$ , км	$\delta h$ , км	
GSRAS	04.09.2018	22:58:18.99	54.793	0.065	58.002	0.113	9.5	7.2	$m_b=5.4$ , $MS=4.8$
	05.09.2018	07:27:15.00	54.57	0.10	57.80	0.17	10f	–	$m_b=4.7$
	29.09.2018	09:06:46.00	54.74	0.10	57.85	0.17	10f	–	$m_b=4.4$
	15.11.2018	07:48:22.00	54.69	0.10	57.95	0.17	10f	–	$m_b=4.4$
MIRAS	04.09.2018	22:58:20.68	54.812	–	57.974	–	10f	–	$ML=5.4$
	05.09.2018	07:27:20.46	54.898	–	57.967	–	10f	–	$ML=3.8$
	29.09.2018	09:06:52.20	54.905	–	57.946	–	10f	–	$ML=4.1$
MI/GS	15.11.2018	07:48:24.00	54.752	0.004	58.119	0.007	3.15	0.30	$ML=4.2$ , $m_b=4.4$
EMSC [EMSC]	04.09.2018	22:58:18.70	54.74	0.027	58.11	0.034	10f	–	$m_b=5.4$
	05.09.2018	07:27:16.10	54.70	–	58.07	–	10f	–	$m_b=4.2$
	29.09.2018	09:06:48.50	54.83	0.086	58.10	0.086	10f	–	$m_b=4.5$
	15.11.2018	07:48:24.10	54.75	0.084	58.20	0.084	10	–	$m_b=4.4$
NEIC [USGS]	04.09.2018	22:58:19.65	54.808	0.046	57.978	0.080	10	1.7	$m_b=5.5$ , $M_{ww}=5$
	05.09.2018	07:27:16.63	54.692	0.044	58.019	0.077	10	2.0	$m_b=4.2$
	29.09.2018	09:06:48.96	54.748	0.042	58.014	0.073	10	2.0	$m_b=4.4$
	15.11.2018	07:48:24.59	54.804	0.032	58.04	0.055	10	2.0	$m_b=4.4$

Примечание: MIRAS – «ГИ УрО РАН», Пермь, Россия; GSRAS – ФИЦ ЕГС РАН, Обнинск, Россия; MI/GS – совместная сеть локальных станций «ГИ УрО РАН» и ФИЦ ЕГС РАН; EMSC – The European-Mediterranean Seismological Centre; NEIC – National Earthquake Information Center, США; f – фиксированная глубина.

пространственным сдвигом  $(dx_0, dy_0, dz_0)$  события-соседа относительно мастер-события:

$$t_i - t_{Ri} = dt_0 + \frac{\partial T_i}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial T_i}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial T_i}{\partial z_0} dz_0, \quad (1)$$

где  $\frac{\partial T_i}{\partial x_0}$ ,  $\frac{\partial T_i}{\partial y_0}$ ,  $\frac{\partial T_i}{\partial z_0}$  – частные производные функции медленности (величина обратная скорости) в окрестности мастер-события.

В представленном выше виде метод относительной локации даёт наилучшие результаты, когда станции равномерно окружают очаг в трёхмерном пространстве. В текущей ситуации сеть стационарных станций является скорее двухмерной, поэтому точного решения для глубины ожидать не приходится. В дальнейших расчётах использовался модифицированный вариант метода, в котором глубина не является неизвестной переменной и зафиксирована на уровне мастер-события ( $dz_0=0$ ).

На рис. 5 представлена картина распределения абсолютных ошибок горизонтальной локации, рассчитанных при решении задачи относительной локации в 2D-варианте для виртуальных очагов, располагающихся по равномерной сетке в окрестности мастер-события ( $\pm 10$  км). Поскольку на результаты моделирования поля ошибок влияет пространственная конфигурация сейсмической сети, в расчёте были использованы только реальные станции, по которым имеются данные. Считалось, что времена вступлений на каждой станции определены с ошибкой, равной шагу квантования цифровой записи (0.025 с). На рис. 5 можно видеть, что в области размерами  $3 \times 3$  км, в которую попадают почти все афтершоки, ошибка относительной локации в плане не превышает 0.2 км, а при приближении соседнего события к мастер-событию ошибка локации стремится к нулю. Что примечательно, модифицированный метод относительной локации мало чувствителен к глубине события-соседа и позволяет сохранить ошибку горизонтальной локации в пределах тех же 0.2 км до глубины 10 км.

Чтобы привести расчётную модель ещё ближе к реальности, будем считать, что времена прихода волн на станции определены грубо и могут меняться в интервале  $[t_{Ri} - \sigma_i; t_{Ri} + \sigma_i]$ . Далее, задавая их с неким шагом квантования методом Монте Карло для каждой станции, можно получить решение задачи относительной локации в виде облака точек возможного положения события-соседа. Центральная точка такого облака будет являться наиболее вероятным положением очага.

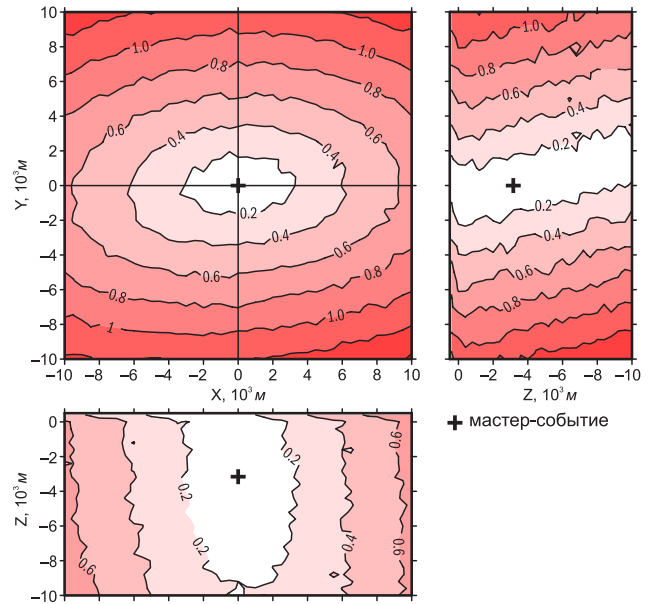
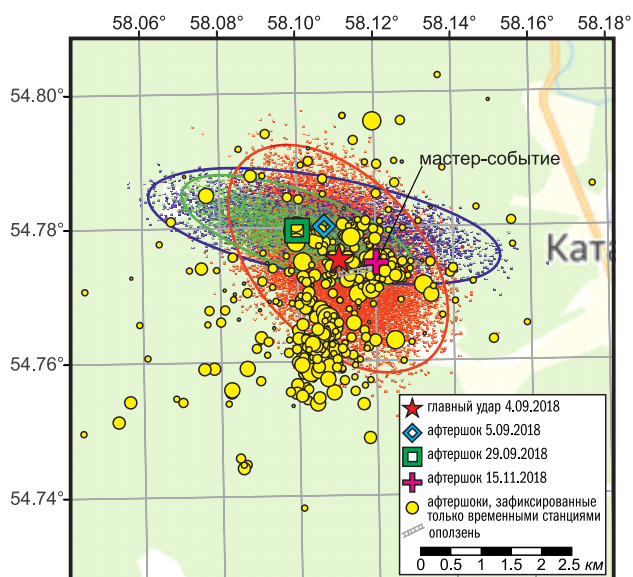


Рис. 5. Моделирование поля ошибок относительной локации в плане при различных положениях события-соседа относительно мастер-события

Как уже отмечалось выше, при практической реализации относительной локации важно, чтобы времена вступлений на одних и тех же станциях были определены для одинаковых волн. Для снижения возможной ошибки, связанной с неточной идентификацией первых вступлений по близким фазам ( $Pg$ ,  $Pn$ ), был использован тот факт, что волновые формы событий из одной области очень похожи. Таким образом, применение простой взаимной корреляции парных записей, пропущенных через полосовой фильтр, позволяет уверенно идентифицировать одни и те же фазы [Thorbjarnardottir, Peachmann, 1987; Spottiswoode, Milev, 1998].

Решения модифицированным методом относительной локации, полученные для очага Катав-Ивановского землетрясения и двух его сильнейших афтершоков, представлены на рис. 6. Новые решения намного ближе к реальной очаговой зоне, положение которой указывают афтершоки. Полученный при относительной локации разброс точек возможного положения эпицентров показывает, что за счёт неточного определения времён фаз ошибка локации стала сопоставима с размером самого облака афтершоков. Уточнённые параметры эпицентров для всех трёх проблемных очагов представлены в табл. 4.

В целях получения более точных оценок по глубине очага был применён способ, опирающийся на расчёт функции согласования фазовых спектров первых вступлений [Елифанский и др., 2018],

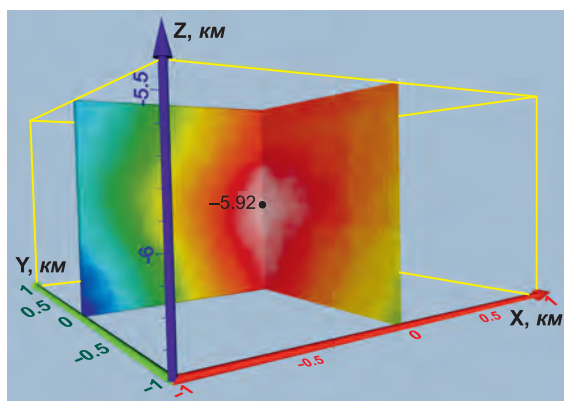


**Рис. 6.** Взаимное расположение афтершоков и главного удара, определённого с помощью относительной локации

**Таблица 4.** Решения параметров Катав-Ивановского землетрясения и двух его афтершоков методом относительной локации

Дата, дд.мм.гггг	Эпицентр		Эллипс ошибок		
	$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E	$a$ , км	$b$ , км	$A_z$ , °
04.09.2018	54.75234	58.10952	2.25	1.35	137
05.09.2018	54.75736	58.10580	2.95	0.82	101
29.09.2018	54.75674	58.09893	2.00	0.65	110

позволяющий для мелкофокусных землетрясений различать глубинные фазы, скрытые за первыми вступлениями продольных волн. Функция согласования, построенная в окрестности эпицентра Катав-Ивановского землетрясения на момент его возникновения по данным 36 станций, представлена на рис. 7. Функция имеет хорошо различимый максимум,



**Рис. 7.** Вид функции согласования фазовых спектров в окрестности очаговой зоны




отличающийся от фоновых значений в области радиусом около 1 км. Максимум расположен на отметке  $Z=-5.92$  км. Принимая во внимание, что при построении функции уровень земной поверхности был принят за нулевую отметку, глубина очага получается  $5.9 \pm 1$  км.

Механизм очага землетрясения рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн на 42 станциях, из них на 20 станциях зарегистрированы волны сжатия (знаки плюс), на 22 станциях – разрежения (знаки минус). Станции расположены в интервале эпицентральных расстояний  $1.5-94.6^\circ$  и в азимутальном створе  $A_z=12-355^\circ$ . Данные о механизме в сравнении с решениями других агентств приведены в табл. 5. Нодальная плоскость  $NP1$  соответствует правостороннему сдвигу с элементами взброса, плоскость  $NP2$  соответствует левостороннему взбросо-сдвигу. Принимая во внимание ориентацию облака афтершоков, наиболее вероятным вариантом подвижки видится плоскость  $NP2$ . Это же решение хорошо согласуется с тектонической обстановкой района. Направление напряжения в очаге практически совпадает с напряжениями, полученными альтернативными методами в районе [Тевелев и др., 2019], а разрыв по плоскости  $NP2$  совпадает по простиранию и характеру подвижки с разрывами Бакало-Саткинской зоны разломов.

### Макросейсмические данные

Землетрясение в Катав-Ивановске имело значительный макросейсмический эффект. Большинство макросейсмических сведений было собрано в первые дни после события в результате выезда специалистов в ближайшие к эпицентру населённые пункты. Также сбор данных проводился посредством анкетирования населения через Интернет [Сейсмологический ...]. Ввиду обширности географии опроса (радиус зоны осязимости землетрясения составил 200–300 км), частично анкеты заполнялись специалистами на основе данных от пользователей соцсетей. В частности, последний способ позволил набрать представительные данные о сотрясениях в ближайших региональных центрах: Челябинске, Уфе, Екатеринбурге и Перми. Систематизация макросейсмических данных велась согласно шкале ШСИ-2017, которая, будучи полностью совместимой с MSK-64, отличается большим формализмом, что позволяет получать более объективные оценки сейсмической интенсивности в населённых пунктах [ГОСТ Р 57546–2017].

Таблица 5. Механизм очага Катав-Ивановского землетрясения по данным различных агентств

Оси главных напряжений			Нодальные плоскости		Механизм	Агентство
<i>T</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>NP1</i>	<i>NP2</i>		
<i>PL</i> : 29 <i>AZ</i> : 249	<i>PL</i> : 21 <i>AZ</i> : 147	<i>PL</i> : 27 <i>AZ</i> : 53	<i>STK</i> : 285 <i>DIP</i> : 54 <i>SLIP</i> : 173	<i>STK</i> : 19 <i>DIP</i> : 85 <i>SLIP</i> : 37		GSRAS
<i>PL</i> : 48 <i>AZ</i> : 234	<i>PL</i> : 6 <i>AZ</i> : 137	<i>PL</i> : 42 <i>AZ</i> : 42	<i>STK</i> : 264 <i>DIP</i> : 53 <i>SLIP</i> : 146	<i>STK</i> : 16 <i>DIP</i> : 64 <i>SLIP</i> : 42		USGS [USGS]
<i>PL</i> : 83 <i>AZ</i> : 304	<i>PL</i> : 6 <i>AZ</i> : 153	<i>PL</i> : 4 <i>AZ</i> : 62	<i>STK</i> : 247 <i>DIP</i> : 39 <i>SLIP</i> : 96	<i>STK</i> : 60 <i>DIP</i> : 52 <i>SLIP</i> : 85		GFZ [Helmholtz-Centre Potsdam]

Всего для главного события собраны 233 анкеты по 55 населённым пунктам. Более 60 афтершоков также сопровождалось ощутимым макросейсмическим эффектом, однако эти данные в работе не рассматриваются. Анализ проводился преимущественно по трём категориям-сенсорам – люди, предметы быта, здания, – хотя в эпицентре также имели место некоторые изменения в окружающей среде.

Самые сильные сотрясения (до 6 баллов), согласно собранным данным, наблюдались в зоне радиусом 30 км от эпицентра, куда попали три города (Катав-Ивановск, Усть-Катав и Юрюзаны) и несколько небольших населённых пунктов (д. Карауловка, пос. Орловка, с. Верх-Катавка, пос. Анновка, с. Серпиевка, д. Лемеза, пос. Кропачево, д. Бедарыш). Поскольку событие произошло ночью, здесь люди (категории Л0, Л1 и Л2) просыпались, испытывали сильный испуг, иногда выбегали на улицу. В предметах быта (категории П1, П2 и П3) практически повсеместно отмечалась сильная реакция (раскачивание, смещение, падение), иногда такая же реакция была для предметов категории П4. Также отмечены единичные случаи сильной и слабой реакции с предметами категории П5.

Наибольшее число повреждений зданий отмечено в г. Катав-Ивановске и пос. Орловка, так как они ближе всех расположены к очагу. Все пострадавшие здания (повреждения степени 1 и 4) имеют класс сейсмостойкости С7. Сильнее всего пострадало здание городской больницы г. Катав-Ивановска (рис. 8), где отмечены сквозные трещины в перегородках, секущие трещины в несущих стенах, выпадение крупных кусков штукатурки. После происшествия состояние здания сменилось с работоспособного до ограниченно-работоспособного, из-за

чего деятельность учреждения пришлось временно приостановить. Всего в городе официально зарегистрировано 454 случая повреждения частных домов с общим ущербом на сумму около 4.5 млн. руб. В основном повреждениям оказалась подвержена внутренняя отделка помещений, хотя иногда отмечались трещины в фундаменте, а в отдельных случаях – развалившиеся печи и кирпичные трубы. В других ближайших к очагу населённых пунктах отмечены единичные случаи повреждений 1-й степени.

В районе эпицентра рельеф – горный с уклонами до 10°, перепады высот – до первых сотен метров. Территория залесена, грунты на поверхности глинистые обводнённые. Вероятно, именно сильные сотрясения стали причиной возникновения оползня на восточном склоне горы Песчаная. Оползень располагается практически над очагом и был замечен в лесу местными жителями 25 сентября 2018 г., когда вязкий обводнённый грунт вместе с растущими на нём деревьями стал медленно сползать вниз по склону с уклоном 5°. В самой интенсивной фазе движения грязевой поток шириной от 10 до 30 м перемещался со скоростью около 1 м/с. В итоге большой объём грунта сместился примерно на 0.5 км в направлении восток–северо-восток (положение оползня в плане показано на рис. 6). На месте потока образовалась чаша (рис. 9) глубиной до 3–5 м, на дне которой вскрылся ручей, питающийся от множества подземных источников. Весь объём вынесенного грунта (около 5 тыс. м<sup>3</sup>) остановился на склоне ниже, не дойдя до его основания, образовав нагромождения высотой до 3 м. Наличие такого оползня по классификации ШСИ-2017 подтверждает интенсивность сотрясений в эпицентре до 6 баллов.





**Рис. 8.** Повреждения зданий в г. Катав-Ивановске: а – секущие трещины в несущих стенах здания городской больницы; б – выпадение крупных кусков штукатурки в здании городской больницы; в – разрушение печи и дымохода в частном доме



**Рис. 9.** Чаша, образовавшаяся после схода оползня в районе эпицентра

После сбора макросейсмические сведения были территориально сгруппированы и обработаны в строгом соответствии со шкалой ШСИ-2017. Результатом обобщения разновесовой реакции различных категорий-сенсоров стали оценки сейсмической интенсивности с величинами стандартных отклонений в каждом населённом пункте. Данные оценки послужили основой для построения карты макросейсмического поля, которая представлена на рис. 10.

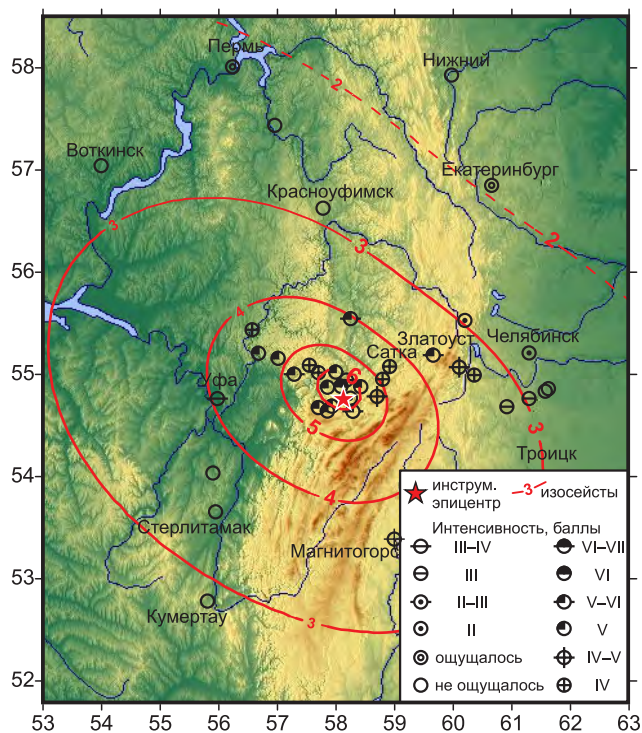


Рис. 10. Карта макросейсмического поля Катав-Ивановского землетрясения

Изосейсты на карте (рис. 10) построены с использованием подхода, изложенного в работе [Кульчицкий, 2014] и позволяющего учесть азимутальную неоднородность распространения макросейсмического эффекта. При аппроксимации поля методом максимального правдоподобия использовалось уравнение макросейсмического поля Шебалина-Блейка в сочетании с тригонометрическим полиномом 2-го порядка. Как было показано ранее в работах [Дягилев и др., 2016; Гусева, Дягилев, 2017], такой способ построения изосейст позволяет получать генерализованное представление макросейсмического поля в условиях низкой пространственной представительности исходных данных, что особенно актуально в малозаселённых районах Урала. Максимум макросейсмического поля (6.4 балла) расположен в пос. Орловка, что в 14 км севернее инструментального эпицентра. Координаты

макросейсмического эпицентра: 54.877°N, 58.110°E. В табл. 6 приведены параметры полученного уравнения макросейсмического поля с учётом азимутальной неоднородности вида:

$$I = 1.5M + \left( b + \sum_{k=1}^n [B_{sk} \sin(k\alpha) + B_{ck} \cos(k\alpha)] \right) \times \lg R + c, \quad (2)$$

где  $M$  – магнитуда,  $R$  – гипоцентрально расстояние,  $\alpha$  – азимут распространения,  $n$  – порядок тригонометрического полинома.

Таблица 6. Параметры уравнения макросейсмического поля с учётом азимутальной неоднородности

b	c	$B_{s1}$	$B_{c1}$	$B_{s2}$	$B_{c2}$
-3.19	3.00	-0.148	-0.143	-0.117	-0.0484

Стандартное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей поверхности составляет 1.1 балла.

### Заключение

Катав-Ивановское землетрясение стало самым сильным инструментально зафиксированным землетрясением на Урале ( $m_b=5.4$ ) и в то же время самым ощутимым на территории России в 2018 г. ( $I_0=6$  баллов по ШСИ-2017). Уникальность данному событию придаёт тот факт, что после него впервые для Урала был зафиксирован мощный афтершоковый процесс, активная стадия которого продолжалась более одного года. Анализ исторической сейсмичности показал, что данный район является сейсмически активным уже продолжительное время. По крайней мере пять землетрясений, в том числе с макросейсмикой, отмечались практически в том же самом месте в 2004 и 2006 гг. Что характерно, имеющиеся данные свидетельствуют о предрасположенности многих тектонических очагов Южного Урала сопровождаться афтершоками, а само Катав-Ивановское землетрясение стало самым продуктивным из них.

Применение традиционных подходов к обработке первичных данных дало приблизительные параметры очага и двух сильных его афтершоков, которые пространственно плохо согласовывались с сейсмичностью, регистрируемой после установки в эпицентре сети временных станций. Использование модифицированного метода относительной локации и способа согласования фазовых спектров позволило уточнить положение гипоцентров проблемных очагов и снизить ошибку определения координат в несколько раз.

Расчёты параметров механизма очага в совокупности с ориентацией поля афтершоков говорят о предпочтительном варианте подвижки в виде левостороннего взбросо-сдвига с субмеридиональным простиранием.

Макросейсмический эффект главного удара проанализирован в терминах шкалы ШСИ-2017. В результате такого анализа построена карта макросейсмического поля с учётом азимутальной неоднородности распространения макросейсмического эффекта. Полученное поле свидетельствует о преобладании распространения сотрясений в северо-западном направлении.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность за содействие в размещении временных сейсмических станций Первому заместителю Главы Катав-Ивановского муниципального района – руководителю аппарата Администрации Захарову Алексею Александровичу.

**Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».**

### Литература

Годзиковская А.А. Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времён по 2002 г. (Сопутствующие первичные материалы). – М.: ИФЗ РАН, 2016. – 258 с.

ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Введ. 2017-07-19. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.

Гусева Н.С., Дягилев Р.А. Макросейсмическое поле Билимбаевского землетрясения 1914 г. на Урале // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 133–137.

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.

Дягилев Р.А., Гусева Н.С., Верхованцев Ф.Г. Анизотропия макросейсмического поля Среднеураль-

ского землетрясения 18 октября 2015 года // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 42–46.

Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Гусева Н.С. Учалинское техногенное землетрясение 5 сентября 2012 г. с  $K_p=9.5$ ,  $ML=3.4$ ,  $I_0=5$  (Башкортостан) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 387–391.

Епифанский А.Г., Габсатарова И.П., Муромцева Л.К., Картавенко Д.В., Бабкова Е.А. Применение метода «согласования спектральных фаз» для исследования глубины Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием (г. Москва, 1–4 октября 2018 г.) / Ред. Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. – М.: ИФЗ РАН, 2018. – С. 142–147.

Кульчицкий В.Е. Оценка параметров затухания интенсивности анизотропных макросейсмических полей // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 138–149.

Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В. Обзор сейсмичности. Урал // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 238–246.

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.

Маловичко А.А., Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Дягилев Р.А., Евтюгина З.А. Билимбаевское землетрясение 17 августа 1914 г.: параметры гипоцентра по инструментальным данным // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 40–47. doi: 10.35540/2686-7907.2020.1.04

Сейсмологический мониторинг Западного Урала [Электронный ресурс]. – URL: [http://pts.mi-perm.ru/seismo\\_data/](http://pts.mi-perm.ru/seismo_data/)

Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А., Володина Е.А., Мосейчук В.М. Землетрясения 2018 года в Катав-Ивановске (Южный Урал): кинематика инициирующих разрывов // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2019. – С. 286–290.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97 [Карты]. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.

*EMSC*. Earthquake. Search for earthquakes [Site]. – URL: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>

*Gibowicz S.J., Kijko A.* An introduction to mining seismology. – San Diego, California: Academic Press, Inc., 1994. – 396 p.

*Helmholtz-Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences* [Site]. – URL: <https://www.gfz-potsdam.de/en/home/>

*Mendecki A.J.* Seismic monitoring in mines. – Chapman & Hall, 1997. – 262 p.

*Spottiswoode S.M., Milev A.M.* The use of waveform similarity to define planes of mining-induced seismic events // *Tectonophysics*. – 1998. – V. 289 (1–3). – P. 51–60. doi: 10.1016/S0040-1951(97)00306-5

*Thorbjarnardottir B.S., Peachmann J.C.* Constraints on relative earthquake locations from crosscorrelation of waveforms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1987. – V. 77, N 5. – P. 1626–1634.

*USGS*. Earthquake Hazards. Earthquakes [Site]. – URL: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>

### Сведения об авторах

**Дягилев Руслан Андреевич**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: [dra@gsras.ru](mailto:dra@gsras.ru)

**Верхованцев Филипп Геннадьевич**, науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, Россия. E-mail: [sombra@mail.ru](mailto:sombra@mail.ru)

**Варлашова Юлия Викторовна**, вед. инженер «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»), г. Пермь, Россия. E-mail: [ivanova@mi-perm.ru](mailto:ivanova@mi-perm.ru)

**Шулаков Денис Юрьевич**, канд. техн. наук, зав. лаб. «ГИ УрО РАН», г. Пермь, Россия. E-mail: [shulakov@mi-perm.ru](mailto:shulakov@mi-perm.ru)

**Габсатарова Ирина Петровна**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: [ira@gsras.ru](mailto:ira@gsras.ru)

**Епифанский Алексей Григорьевич**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: [epiphansky@gmail.com](mailto:epiphansky@gmail.com)

## Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018, $m_b=5.4$ (Urals)

© 2020 R.A. Dyagilev<sup>1</sup>, F.G. Verkholtantsev<sup>2</sup>, Yu.V. Varlashova<sup>3</sup>, D.Yu. Shulakov<sup>3</sup>,  
I.P. Gabsatarova<sup>1</sup>, A.G. Epifanskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GS RAS, Obninsk, Russia; <sup>2</sup>GS RAS, Perm, Russia; <sup>3</sup>MI UB RAS, Perm, Russia

**Abstract** The article summarizes the instrumental and macroseismic data obtained in the area of Katav-Ivanovsk earthquake, which occurred on September 4, 2018, in Chelyabinsk region, Russia. The earthquake was the strongest instrumentally recorded earthquake in the Urals ( $m_b=5.4$ ) and at the same time, it had the most seismic intensity among other earthquakes in Russia in 2018 ( $I_0=6$  points). The uniqueness of this event was given by the fact that after it for the first time for the Urals the aftershock process was recorded, the active stage of which lasted more than 1 year. Like the mainshock, some aftershocks had a significant macroseismic effect. The work contains the results of studies that allowed to determine the exact coordinates of the epicenter in conditions of lack of near stations using the relative location technique. New processing approaches also made it possible to estimate the depth of the focus through a function of phase spectrum matching. Finally, a considerable amount of macroseismic data formed the basis of the macroseismic field map.

**Keywords** earthquake, seismic intensity, aftershock, Southern Urals, relative location, temporal seismic station, phase spectrum matching function, macroseismic field.

**For citation** Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., Varlashova, Yu.V., Shulakov, D.Yu., Gabsatarova, I.P., & Epifanskiy, A.G. (2020). [Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018,  $m_b=5.4$  (Urals)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 7-20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>

### References

- Dyagilev, R.A., & Golubeva, I.V. (2008). [Estimation of efficiency of seismic event discrimination criteria  $A_s/A_p$  for stations of Ural region using statistic approaches]. In *Seismichnost' Severnoi Evrazii. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii* [Seismicity of Northern Eurasia. Proceedings of international conference] (pp. 78-80). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Dyagilev, R.A., Guseva, N.S., & Verkholtantsev, F.G. (2016). [Anisotropy of macroseismic field of Sredneural'skoye earthquake on 18 October 2015]. *Geofizika* [Russian Geophysics], 5, 42-46. (In Russ.).
- Dyagilev, R.A., Zlobina, T.V., & Guseva, N.S. (2018). [Uchaly induced earthquake on 5 September 2012 with  $K_p=9.5$ ,  $ML=3.4$ ,  $I_0=5$  (Bashkortostan)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 387-391. (In Russ.).
- EMSC. Earthquake. Search for earthquakes. (2020). Retrieved from: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>
- Epifanskiy, A.G., Gabsatarova, I.P., Muromtsev, L.K., Kartavenko, D.V., & Babkova, E.A. (2018). [Application of a method of "spectral phases matching" for a research of depth of the Altai (Chuya) earthquake of 27.09.2003]. In *Rezultaty kompleksnogo izucheniia sil'neishogo Altaiskogo (Chuiskogo) zemletriaseniia 2003 g., ego mesto v riadu vazhneishikh seismicheskikh sobytii XXI veka na territorii Rossii: materialy XXI Nauchno-prakticheskoi Shchukinskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Moskva, 1-4 oktiabria 2018 g.)* [Results of complex studying of the strongest Altai (Chuya) earthquake of 2003, its place among the most important seismic events of the XXI century in the territory of Russia: proceedings of the XXI Scientific and practical Shchukin conference with the international participation (Moscow, on October 1-4, 2018)] (pp. 142-147). Moscow, Russia: IPE RAS Publ. (In Russ.).
- Gibowicz, S.J., & Kijko, A. (1994). *An introduction to mining seismology*. San Diego, California: Academic Press, Inc., 396 p.
- Godzikovskaja, A.A. (2016). [Catalogue of seismic events of the Ural region since ancient time till 2002 (Accompanying primary data)]. Moscow, Russia: IPE RAS Publ., 258 p. (In Russ.).
- GOST R 57546-2017 (2017). [Earthquakes Seismic Intensity Scale. Enter 2017-07-19]. Moscow, Russia: Standardinform, 28 p. (In Russ.).
- Guseva, N.S., & Dyagilev, R.A. (2017). [Macroseismic field of Bilimbay earthquake in 1914 at the Urals]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological

- data. Materials of XII International Seismological School] (pp. 133-137). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Helmholtz-Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences (2019). Retrieved from: <https://www.gfz-potsdam.de/en/home/>
- Kul'chitskii, V.E. (2014). [Estimation of anisotropic macroseismic field decay parameters]. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal], 36(2), 138-149. (In Russ.).
- Malovichko, A.A., Dyagilev, R.A., Malovichko, D.A., Verkholantsev, F.G., & Golubeva, I.V. (2012). [Seismicity review. Urals]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2006* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2006] (pp. 238-246). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Malovichko, A.A., Malovichko, D.A., Dyagilev, R.A., Verkholantsev, F.G., Golubeva, I.V., & Verkholantsev, A.V. (2011). [Permskii krai 2000-2005]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2005* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2005] (pp. 269-289). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Malovichko, A.A., Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Asming, V.E., Dyagilev, R.A., & Evtiugina, Z.A. (2020). [The August 17, 1914 Bilimbaev earthquake: relocation based on instrumental data]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 40-47. (In Russ.). doi: /10.35540/2686-7907.2020.1.04
- Mendecki, A.J. (1997). *Seismic monitoring in mines*. Chapman & Hall, 262 p.
- Seismological monitoring of the Western Urals. (2020). Retrieved from: [http://pts.mi-perm.ru/seismo\\_data/](http://pts.mi-perm.ru/seismo_data/) (In Russ.).
- Spottiswoode, S.M., & Milev, A.M. (1998). The use of waveform similarity to define planes of mining-induced seismic events. *Tectonophysics*, 289(1-3), 51-60. doi: 10.1016/S0040-1951(97)00306-5
- Tevelev, A.I.V., Tevelev, Ark.V., Khotylev, A.O., Prudnikov, I.A., Volodina, E.A., & Moseichuk, V.M. (2019). [Earthquakes of 2018 in Katav-Ivanovsk (Southern Urals): kinematics of initiating failures]. In *Problemy tektoniki kontinentov i okeanov. Materialy LI Tektonicheskogo soveshchaniia* [Problems of tectonics of continents and oceans. Proceedings of LI seminar on tectonics] (pp. 286-290). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.).
- Thorbjarnardottir, B.S., & Peachmann, J.C. (1987). Constraints on relative earthquake locations from cross-correlation of waveforms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(5), 1626-1634.
- Ulomov, V.I., & Shumilina, L.S. (1999). *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniia territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97 [Karty]. Masshtab 1:8 000 000. Ob"iasnitel'naia zapiska i spisok gorodov i naseleennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raiona* [Set of common seismic zonation maps for the territory of Russian Federation – OSR-97. Scale 1:8 000 000. Explanation note and the list of cities and settlements in seismic prone regions]. Moscow, Russia: UIPE RAS Publ., 57 p. (In Russ.).
- USGS. Earthquake Hazards. Earthquakes. (2020). Retrieved from: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>

### Information about authors

**Dyagilev Ruslan Andreevich**, PhD, Leading Researcher of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: [dra@gstras.ru](mailto:dra@gstras.ru)

**Verkholantsev Filipp Gennadievich**, Researcher of the GS RAS, Perm, Russia. E-mail: [sombra@mail.ru](mailto:sombra@mail.ru)

**Varlashova Yuliya Viktorovna**, Lead Engineer of the "Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences" Branch of the Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences (MI UB RAS), Perm, Russia. E-mail: [ivanova@mi-perm.ru](mailto:ivanova@mi-perm.ru)

**Shulakov Denis Yur'yevich**, PhD, Head of Laboratory of the MI UB RAS, Perm, Russia. E-mail: [shulakov@mi-perm.ru](mailto:shulakov@mi-perm.ru)

**Gabsatarova Irina Petrovna**, PhD, Leading Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: [ira@gstras.ru](mailto:ira@gstras.ru)

**Epifanskiy Aleksey Grigor'yevich**, PhD, Leading Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: [epiphansky@gmail.com](mailto:epiphansky@gmail.com)