

**Эпицентральная область Катав-Ивановского землетрясения  
04.09.2018 г. с  $M=5.0$  (Урал)**

<sup>1</sup>Ю.В. Варлашова, <sup>2</sup>Ф.Г. Верхованцев, <sup>3</sup>Р.А. Дягилев, <sup>1</sup>Д.Ю. Шулаков

<sup>1</sup>«ГИ УрО РАН», г. Пермь; <sup>2</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь; <sup>3</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск

Катав-Ивановское землетрясение с  $M=5.0$ , произошедшее 4 сентября 2018 г. в 22<sup>h</sup>58<sup>m</sup> в Челябинской области [1], стало первым землетрясением на Урале, после которого была зафиксирована выраженная афтершоковая активность. Ранее ни для одного из ощутимых землетрясений [2–4] на Урале афтершоки не регистрировались, хотя и для Качканарского 2010 г. [2], и для Среднеуральского 2015 г. [3, 4] землетрясений в эпицентральных зонах устанавливались сети временных станций. Как было показано в [5], решения положения эпицентра землетрясения, полученные разными агентствами сразу после события по данным удаленных станций, существенным образом отличались. Для регистрации афтершоков на период сбора макросейсмических данных в эпицентральной зоне была развернута временная локальная сеть из трех автономных сейсмических станций в районе поселков Бедярыш, Карауловка и Лемеза (табл. III.11). Сеть начала работу через сутки после землетрясения и имела не вполне оптимальную конфигурацию по отношению к облаку афтершоков, поскольку ориентировалась на первые инструментальные данные об эпицентре. Тем не менее, за период ее работы с 6 по 8 сентября 2018 г. было зарегистрировано 59 афтершоков с магнитудами  $0 < ML < 3.0$  (табл. III.12).

**Таблица III.11. Сведения о сейсмических станциях временной локальной сети, установленной в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения**

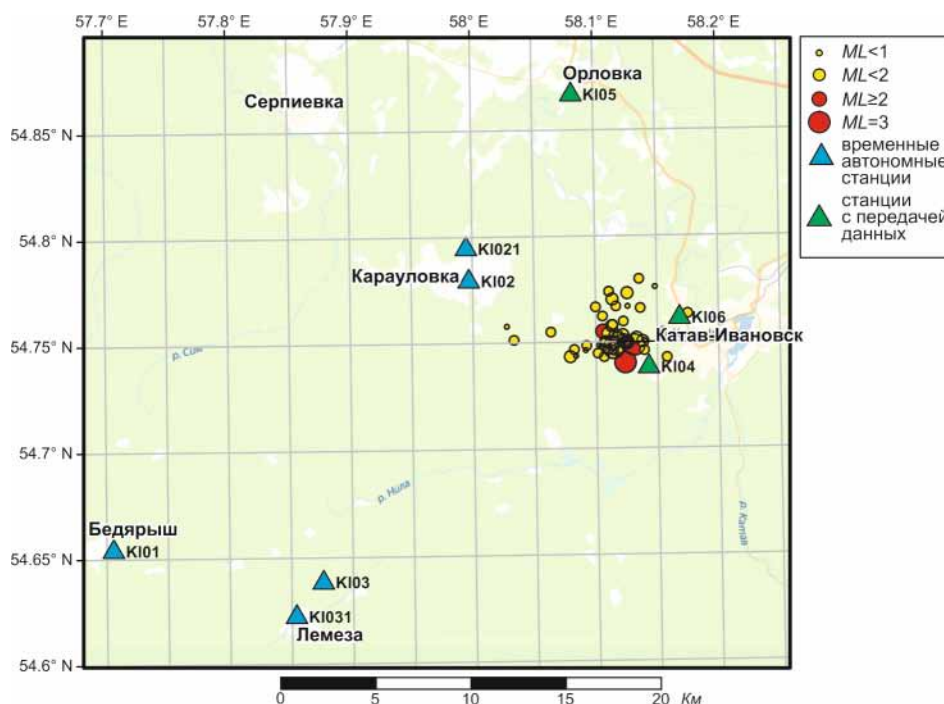
№	Сейсмическая станция		Период работы	Координаты и высота над уровнем моря			Подпочва	Тип оборудования
	название	код региональный		φ, °N	λ, °E	h, м		
1	Башлес	КІ04	02.10.2018– 16.10.2018	54.738	58.143	446	Суглинок (>30 м)	CMG-6Т+ Reftek-130-01
			с 16.10.2018					TC120-SV1+ Centaur-3; CMG-5TDE
2	Бедярыш	КІ01	06.09.2018– 16.10.2018	54.654	57.706	469	Суглинок (>16 м)	CMG-6Т+ Reftek-130-01
3	Карауловка	КІ02	06.09.2018– 08.09.2018	54.778	57.995	434	Суглинок (>10 м)	CMG-6Т+ Reftek-130-01
			02.10.2018– 20.12.2018	54.779	57.997	438		
4	Лемеза	КІ03	06.09.2018– 08.09.2018	54.638	57.876	536	Суглинок (<3 м), полускальный алевролит	CMG-6Т+ Reftek-130-01
			02.10.2018– 23.08.2019	54.622	57.854	481		
5	Орловка	КІ05	16.10.2018– 23.08.2019	54.867	58.082	327	Песок (17 м)	TC120-SV1+ Centaur-3
6	Северный	КІ06	20.12.2018– 23.08.2019	54.761	58.168	409	Суглинок (>30 м)	CMG-6Т+ Reftek-130-01
			с 23.08.2019					TC120-SV1+ Centaur-3

**Таблица III.12. Распределение по магнитудам количества афтершоков Катав-Ивановского землетрясения в 2018 г.**

Магнитуда $ML$		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	Всего
Количество событий за период	06.09.2018–08.09.2018	2	22	24	8	0	2	1			59
	03.10.2018–31.12.2018	1	14	42	43	12	6	0	0	1	119

Поскольку станции региональной сети, расположенные на расстояниях более 150 км от эпицентра [1], не обеспечивали желаемого уровня представительной регистрации (за период 6–8 сентября было зарегистрировано только два афтершока с  $ML > 2.5$ ), а афтершоковая последовательность продолжалась, одна из временных станций («Бедярыш», код КИ01) была подключена к постоянному электропитанию и продолжила непрерывную работу после прекращения регистрации другими временными станциями.

Первые результаты наблюдений временной сетью, а также сильный афтершок 29 сентября с  $M=4.2$  ( $K_p=11.5$ ,  $I_0=4-5$ ) [6], произошедший после снятия части временных станций, показали, что сейсмическая активность в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения, вероятно, будет продолжаться еще в течение длительного времени. В связи с этим в эпицентральной зоне, положение которой уже было установлено более точно, 2 октября была развернута новая временная сеть, которая продолжила работу и в 2019 г. (табл. III.11, рис. III.26).



**Рис. III.26. Расположение временных станций относительно облака афтершоков Катав-Ивановского землетрясения за 6–8 сентября 2018 г.**

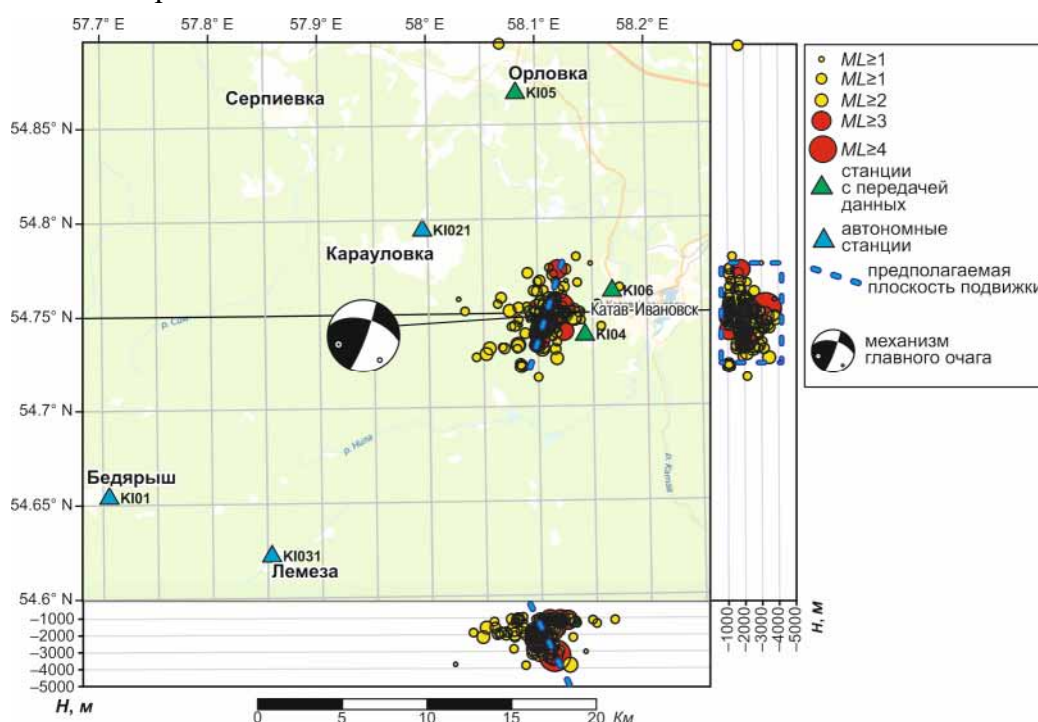
Для обеспечения возможности увязки наблюдений разных периодов сейсмическая станция «Бедярыш» в течение двух недель продолжала работу одновременно с вновь установленными станциями. После 2 октября конфигурация временной сети несколько раз менялась, но при этом всегда одновременно работали четыре станции. Исчерпывающая информация о положении всех станций, периоде их работы, об условиях установки и аппаратуре приведена в табл. III.11. Сейсмическая станция «Башлес» (КИ04), как самая близкая к эпицентру, кроме широкополосного велосиметра с 16 октября была оснащена датчиком сильных движений. Три станции («Башлес», «Орловка» и «Северный») были

оснащены средствами связи, позволявшими передавать данные в режиме, близком к реальному времени, в РИОЦ (г. Пермь) для оперативной обработки.

По результатам наблюдений сетью временных станций в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения были зарегистрированы и определены основные параметры 59 афтершоков с магнитудами  $0 < ML < 3.0$  за период с 6 по 8 сентября и 119 афтершоков – с 3 октября по 31 декабря  $0 < ML < 4.2$  (табл. III.11).

Электронный каталог сейсмических событий в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения за указанные периоды наблюдений в настоящем сборнике содержит параметры основного толчка и 178 афтершоков и приведен в [7]. Печатный вариант каталога афтершоков не публикуется, т.к. все относительно сильные события включены в основной каталог региона «ВЕС, Урал и Западная Сибирь» [6, 8].

Карта эпицентров афтершоков [7], зарегистрированных временной локальной сетью станций в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения в 2018 г., представлена на рис. III.27.



**Рис. III.27. Карта эпицентров афтершоков Катав-Ивановского землетрясения, зарегистрированных локальной сетью станций в 2018 г., и диаграмма механизма главного толчка**

Распределение афтершоков во времени представлено на рис. III.28. Из рисунка видно, что локальными наблюдениями плохо представлен период в сентябре, когда работала только одна станция – «Бедрярыш» (К101). Обработка материалов этого интервала времени, а также переобработка записей других локальных станций с использованием специальных подходов локации – задача предстоящих исследований.

Среди событий, зарегистрированных локальной сетью, наибольший интерес представляет сильный  $M=3.8$  ( $ML=4.2$ ,  $I_0=5$ ) афтершок, произошедший 15 ноября в 07<sup>h</sup>48<sup>m</sup>. Координаты эпицентра и глубина очага, определенные достаточно точно по данным локальной сети, представлены в каталоге [7]. Для этого события впервые для Уральского региона, а возможно, и для всей Восточно-Европейской платформы, получена запись сильных движений (рис. III.29) на расстоянии  $R=5$  км от очага. Необычайно высокие, но кратковременные ( $T_{0.5}=0.3$  с) значения пиковых ускорений грунта ( $PGA=423$  см/с<sup>2</sup>) были зафиксированы на компоненте EW.

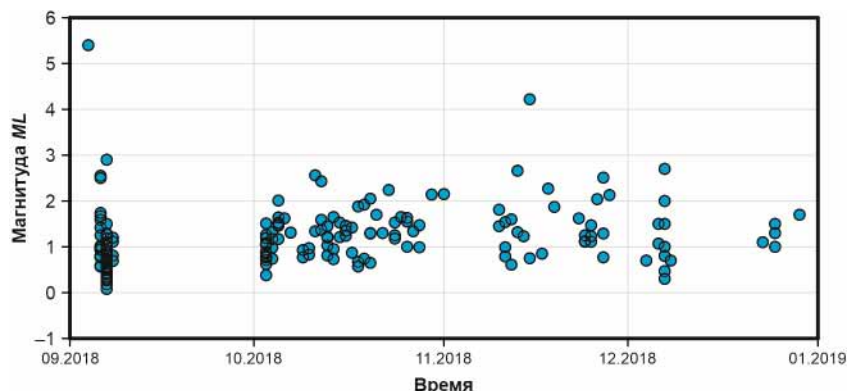


Рис. III.28. Динамика афтершоковой активности в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения за 2018 г. (по данным временной локальной сети)

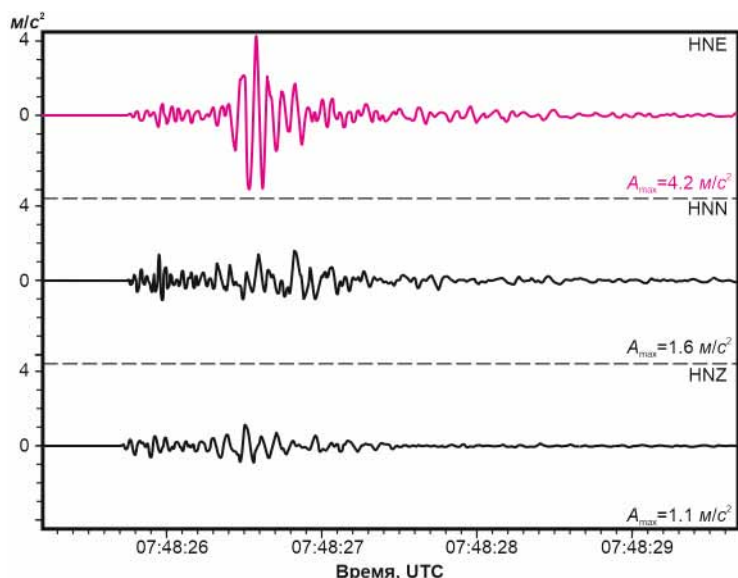


Рис. III.29. Запись сильных движений на локальной станции KI04 ( $R=5$  км)

На основании этой акселерограммы (рис. III.29) в пункте KI04 были получены инструментальные оценки интенсивности в баллах макросейсмической шкалы ШСИ-2017 [9] через  $PGA$  с помощью уравнения:

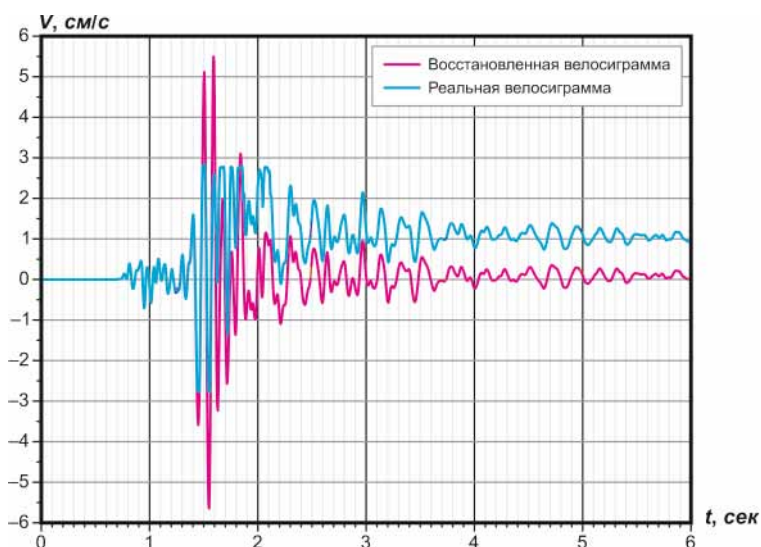
$$I=2.5 \cdot \lg(PGA)+1.25 \cdot \lg T_{0.5}+1.05 \pm 0.35, \quad (1)$$

и через  $PGV$  с помощью уравнения:

$$I=2.13 \cdot \lg(PGV)+4.74 \pm 0.55. \quad (2)$$

Рассчитать интенсивность через  $PGV$  (пиковые скорости смещения грунта) изначально не представлялось возможным из-за того, что амплитуда регистрируемого сигнала ( $2.2$  см/с) превысила пределы динамического диапазона аппаратуры. Однако после восстановления велосиграммы путем интегрирования записей прибора сильных движений (рис. III.30), удалось определить максимальную скорость смещений на зашкаленной компоненте  $EW$ , которая составила  $5.65$  см/с. Правильность полученного значения  $PGV$  подтверждается фактом почти идеального согласования формы и амплитуды рассчитанных и реальных колебаний на неискаженных участках записи.

Таким образом, по пиковым ускорениям и длительности интенсивность сотрясений ( $I$ ) в пункте KI04 составила  $7.0 \pm 0.35$  баллов, а по пиковым скоростям смещения –  $6.3 \pm 0.55$  балла. Полученные величины достаточно хорошо согласуются с оценками, полученными в результате обследования Катав-Ивановска –  $I=5.2 \pm 1.2$  балла на среднем удалении  $R=9$  км через категории-сенсоры «люди», «предметы быта» и «здания и сооружения», если учесть разницу гипоцентральных расстояний [9].

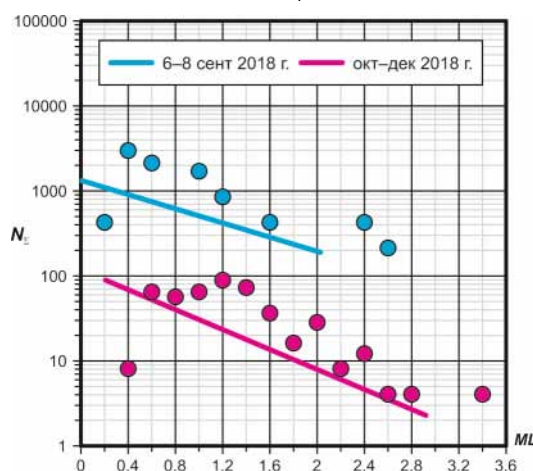


**Рис. III.30. Исходная и восстановленная велосигграммы афтершока 15.11.2019 г., полученные на локальной станции К104, компонента EW**

Регистрация афтершока 15 ноября как станциями локальной сети [7], так и станциями на больших расстояниях [6], позволила уточнить положение эпицентра главного события и двух первых сильных афтершоков, используя метод относительной локации [10]. Для сокращения неопределенности по глубине был применен способ уточнения глубин, базирующийся на расчете функции согласования фазовых спектров первых вступлений [11]. Полученные таким образом сведения о положении главного толчка Катав-Ивановского землетрясения приведены в основном каталоге региона «Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь» настоящего сборника [6, 8].

На рис. III.31 представлены графики повторяемости для разных периодов наблюдений, нормированные на годовой интервал. Получены параметры повторяемости для каждого из временных интервалов: для первых дней после землетрясения  $b=0.47\pm 0.18$ ,  $a=3.5$ ; для последних трех месяцев 2018 г.  $b=0.66\pm 0.20$ ,  $a=2.6$ . Среднеквадратичная ошибка определения наклона  $b$  рассчитывалась по формуле из [12]:

$$\sigma_b = \frac{b}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$



**Рис. III.31. Графики повторяемости для разных периодов детальных наблюдений**

Согласно полученным графикам повторяемости, сейсмический режим испытывал значительные изменения со временем: в первые дни после землетрясения сейсмическая активность была примерно на порядок выше, при этом доля сильных событий была сравнительно велика.

По пространственному распределению афтершоков появляется возможность определить общую субширотную (азимут  $\sim 20^\circ$ ) ориентацию очаговой зоны Катав-Ивановского землетрясения и наиболее вероятный угол падения плоскости подвижки ( $\sim 80^\circ$  на восток). Это в целом согласуется с одной из нодальных плоскостей (левосторонний взбросо-сдвиг) механизма главного толчка Катав-Ивановского землетрясения [11].

## Литература

1. Габсатарова И.П., 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., Петров С.И., 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 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 25–32.
2. Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В. Качканарское землетрясение 29 марта 2010 г. с  $K_p=12.1$ ,  $M_w=4.4$ ,  $I_0=5$  (Средний Урал) // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С. 336–346.
3. Dyagilev R., Guseva N., Verkholantsev F. Macro seismic field anisotropy of the  $M_L$  4.7 earthquake of 18 October 2015 in Central Urals, Russia // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. – 2018. – V. 52 (II). – P. 50–59.
4. Габсатарова И.П., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю., Надёжка Л.И., Нестеренко М.Ю., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А., Французова В.И. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 24–30.
5. Дягилев Р.А., Верхоланцев А.В., Верхоланцев Ф.Г. Уточнение местоположения гипоцентра Катав-Ивановского землетрясения 04.09.2018 г. методом относительной локации очагов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 40.
6. Part\_IV-2018. 02\_East-European-platform\_2018.xls // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
7. Part\_IV-2018. 17\_Katav-Ivanovsk\_2018.xls // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
8. Габсатарова И.П., Асминг В.Э., Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И. (отв. сост.); Баранов С.В., Белевская М.А., Варлашова Ю.В., Гусева Н.С., Злобина Т.В., Коломиец О.А., Носкова Н.Н., Петров С.И., Старикович Е.Н., Шулаков Д.Ю. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 141–143.
9. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.
10. Дягилев Р.А., Варлашова Ю.В., Верхоланцев А.В., Верхоланцев Ф.Г., Гусева Н.С., Шулаков Д.Ю. Строение очаговой зоны Катав-Ивановского землетрясения 4 сентября 2018 года по инструментальным данным // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. Тезисы докладов XI Всероссийской школы-семинара с международным участием. – М.: ИФЗ РАН, 2019. – С. 17–19.
11. Дягилев Р.А., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Параметры очага Катав-Ивановского землетрясения 4 сентября 2018 г. по инструментальным и макросейсмическим данным // Триггерные эффекты в геосистемах. – М.: ИДГ РАН, 2019. – С. 66–67.
12. Куллдорф Г. Вопросы теории оценивания. – М.: Наука, 1966. – 176 с.