

УДК 550.34

## Оценка региональной чувствительности глобальной сети Международной системы мониторинга на примере афтершоков Курчалойского землетрясения 2008 г.

© 2026 г. И.О. Китов<sup>1</sup>, И.А. Санина<sup>2</sup>, И.П. Габсатарова<sup>1</sup>

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

Поступила в редакцию 15.01.2026 г.

**Аннотация.** Рассматривается проблема повышения чувствительности телесеismicической сети (глобальной сети Международной системы мониторинга (МСМ)) к обнаружению региональных событий. Предлагается использование метода кросс-корреляции волновых форм (метод ККВФ) на этапе обработки цифровых записей в районах со слабой сейсмичностью и в асейсмичных районах, где плотные сети обычно не размещаются. Отсутствие достаточного объёма данных в таких районах затрудняет оценку разрешающей способности и чувствительности размещённых в них сетей. Применение метода ККВФ позволяет компенсировать недостаток данных за счёт снижения и амплитудного, и, соответственно, магнитудного порогов обнаружения. Это показано на примере обнаружения событий в сейсмическом регионе № 29 [Flinn, Engdahl, 1974], к которому относятся районы Северный Урал и Восточный Кавказ. На этих рассматриваемых территориях на региональных расстояниях расположено множество одинаковых сейсмических групп сети Международной системы мониторинга, что позволяет непосредственно сравнивать пороги обнаружения. В представляемом исследовании анализируются события афтершоковой последовательности Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $M_w=5.8$ , зарегистрированные региональной сетью Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) и сейсмическими станциями МСМ. Сравнение регионального каталога ФИЦ ЕГС РАН, содержащего наибольшее количество афтершоков, телесеismicического каталога ФИЦ ЕГС РАН (агентство MOS), каталогов Международного центра данных (МЦД) и Международного сейсмологического центра (МСЦ) с результатами применения метода кросс-корреляции к данным МСМ позволило определить пороги обнаружения сейсмических событий для Восточного Кавказа, которые в дальнейшем могут быть использованы при изучении сейсмичности Северного Урала.

**Ключевые слова:** сейсмичность, землетрясение, афтершоки, кросс-корреляция волновых форм, сейсмическая группа, ФИЦ ЕГС РАН, Международная система мониторинга, Международный центр данных, Международный сейсмологический центр.

**Для цитирования:** Китов И.О., Санина И.А., Габсатарова И.П. Оценка региональной чувствительности глобальной сети Международной системы мониторинга на примере афтершоков Курчалойского землетрясения 2008 г. // Российский сейсмологический журнал. – 2026. – Т. 8, № 2. – С. 7–23. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.01>. – EDN: CTPPFT

### Введение

Изучение сейсмического процесса на разных уровнях основано на непрерывных или режимных наблюдениях с использованием различных инструментальных систем. На глобальном уровне с точки зрения порога обнаружения сигналов наиболее эффективными являются сейсмические группы (СГ). Преимущество площадной расстановки регистрирующих датчиков хорошо известно и в других областях физики. Напри-

мер, регистрация электромагнитных и акустических волн давно проводится с помощью антенн, поскольку деструктивная интерференция сигналов, некогерентных искомому, в этом случае снижает уровень помехи в десятки и более раз. Конструктивная интерференция полезных сигналов приводит к общему росту отношения сигнал/шум и обнаружению сверхслабых сигналов.

В конце 1950-х гг. в СССР для мониторинга подземных ядерных взрывов были впервые использованы антенные решётки (сейсмические

группы), предложенные в своё время академиком Г.А. Гамбурцевым для решения сейсмологических задач [Султанов, 1998]; позже — в 1960-е гг. — были установлены первые цифровые станции и сейсмические группы [Ан, Коновалов, 1998]. В начале 2000-х гг. в рамках Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) была создана глобальная сеть Международной системы мониторинга (МСМ).

Сейсмическая сеть МСМ включает более 40 сейсмических групп разной апертуры. Апертура сейсмической группы определяет тип волн, для регистрации которых она наиболее эффективна. Так, сейсмические группы с апертурой более 10–15 км в первую очередь предназначены для регистрации телесеismicических фаз с кажущимися скоростями, превышающими 15 км/с; группы с апертурой от 2 до 5 км нацелены на обнаружение высокочастотных региональных фаз продольных волн  $Pg$  и  $Pn$ , а также региональных фаз  $Sn$ ,  $Lg$ ,  $Rg$  с низкими кажущимися скоростями.

Большинство сейсмических групп МСМ — малоапертурные (апертура менее 5 км). Использование именно таких групп объясняет поведение порога обнаружения сигналов от взрывов при увеличении расстояния до станции. На региональных расстояниях основной для мониторинга режима выполнения ДВЗЯИ является высокочастотная волна  $Pn$ , уровень спектра которой до частот 5–8 Гц сохраняется выше уровня спектра шума [Evernden et al., 1986]. На телесеismicических расстояниях высокочастотная компонента сигналов от взрывов быстро затухает и её уровень падает ниже уровня шума, в результате чего порог обнаружения на региональных расстояниях более низкий. Глобальная сеть МСМ спроектирована так, что для любой точки на поверхности любого континента, находящейся на расстоянии менее 20° от неё, имеется по крайней мере три малоапертурных сейсмических группы. В ряде регионов земного шара это правило не выполняется — в Южной Америке, где нет сейсмических групп, в Австралии (только две группы), в Западной Африке (Республика Нигер, одна сейсмическая группа, TORD). Отсутствие групп в Северной Африке компенсируется тем, что её территория находится на расстоянии около 20° от малоапертурных сейсмических групп, расположенных в Европе.

В конце 1980-х гг. был опробован инновационный тогда подход к обнаружению повторяющихся или похожих сигналов с помощью кросс-корреляции волновых форм [Israelsson, 1990;

Joswig, 1990]. Этот подход (далее — метод ККВФ) особенно эффективен в районах с высокой сейсмической активностью, где землетрясения часто происходят в непосредственной близости друг от друга [Arrowsmith, Eisner, 2006; Baisch et al., 2008]. В начале 2000-х гг. преимущества относительной локации с помощью названного метода были продемонстрированы при уточнении местоположения и относительных магнитуд землетрясений в Китае [Schaff, Richards, 2004a; 2004b; Schaff et al., 2004; Richards et al., 2006; Schaff, Richards, 2011]. В США для Калифорнии благодаря его применению локация событий была выполнена с точностью, на порядок и более превышающей значения, полученные другими методами. Одновременно было показано, что для той же сети трёхкомпонентных станций порог обнаружения может быть снижен на единицу магнитуды [Schaff, Waldhauser, 2005].

Использование метода ККВФ на сейсмических группах оказалось более эффективным, чем применительно к трёхкомпонентным станциям. Первые исследования, проведённые в Норвегии [Gibbons, Ringdal, 2004; 2006; Gibbons et al., 2005; 2007], показали существенное снижение порога обнаружения и повышение разрешающей способности сейсмической группы по отношению к оценкам азимута и медленности. В дальнейшем применение метода ККВФ на сейсмических группах сети МСМ показало значительное снижение порога обнаружения, позволяющее находить в каталоге МЦД до 50–80% новых событий, пропущенных ранее при стандартной обработке [Bobrov et al., 2014; 2016; 2017]. Все новые события подтверждены в рамках интерактивной обработки аналитиками МЦД и полностью удовлетворяют внутренним критериям качества [Coyne et al., 2012].

Данные сети МСМ открыты для сейсмологического сообщества и могут быть получены при оформлении запроса через платформу vDEC (virtual Data Exploitation Centre) [СТВТО, 2025]. Использование этих данных, включая данные сейсмических групп, позволяет существенно снизить порог обнаружения событий различной природы в тех местах, где нет региональных и локальных сетей сейсмических станций [Bobrov et al., 2017; Китов, Санина, 2025а; 2025б]. Эффективность обнаружения слабых событий с помощью региональной сети сейсмических групп в асейсмичных регионах, таких, например, как Арктика, оценить сложно из-за отсутствия в них статистически значимого потока событий. Несколько редких землетрясений и антропогенных событий, сконцентрированных в узких

зонах, недостаточно для оценки порога обнаружения во всём регионе. В таком случае, с нашей точки зрения, допустимо проведение оценки с использованием результатов, полученных в сейсмически активных районах, расположенных примерно на тех же эпицентральных расстояниях и азимутах относительно сети сейсмических групп. Так, для региона Северного Урала, входящего по регионализации Флинна и Энгдала [Flinn, Engdahl, 1974] в сейсмический регион № 29, и окружающих его областей, отнесённых к сейсмическим регионам № 40 и 49, в качестве аналога может рассматриваться Восточный Кавказ, также относимый к региону № 29.

Цель данного исследования – оценка чувствительности и разрешающей способности глобальной сети МСМ применительно к сейсмичности Восточного Кавказа на примере Курчалойского землетрясения 2008 года. Афтершоковая последовательность этого землетрясения хорошо изучена и документирована ФИЦ ЕГС РАН (далее – ЕГС РАН), Международным сейсмологическим центром (МСЦ) и Международным центром данных (МЦД). Для анализа используется сейсмическая сеть МСМ, включающая региональные и телесеismicкие группы, а также трёхкомпонентные станции на региональных расстояниях. Одна из этих станций – станция «Гарни» (GNI) – благодаря своему местоположению, могла бы быть самой информативной для исследуемой афтершоковой последовательности. К сожалению, она относится к дополнительной сети МСМ [Coyne et al., 2012], и её данные предоставляются только по запросам МЦД, в связи с чем для анализируемых в данной работе событий имеются только фрагменты записей. Это не позволяет обнаружить возможные сигналы за пределами небольших сегментов, в которых в МЦД в автоматическом режиме были обнаружены события по записям станций основной сети МСМ, после чего были запрошены дополнительные волновые формы.

Совместный анализ каталогов МСЦ, МЦД и регионального каталога ФИЦ ЕГС РАН позволяет оценить преимущества плотной региональной сети трёхкомпонентных сейсмических станций ЕГС РАН для обнаружения сейсмических событий на Восточном Кавказе по сравнению с глобальной сетью МСМ. С помощью метода ККВФ создаётся альтернативный список вступлений региональных волн  $P_n$  и телесеismicких волн  $P$ , которые затем ассоциируются с гипотезами событий в пределах небольшой зоны вокруг эпицентра Курчалойского зем-

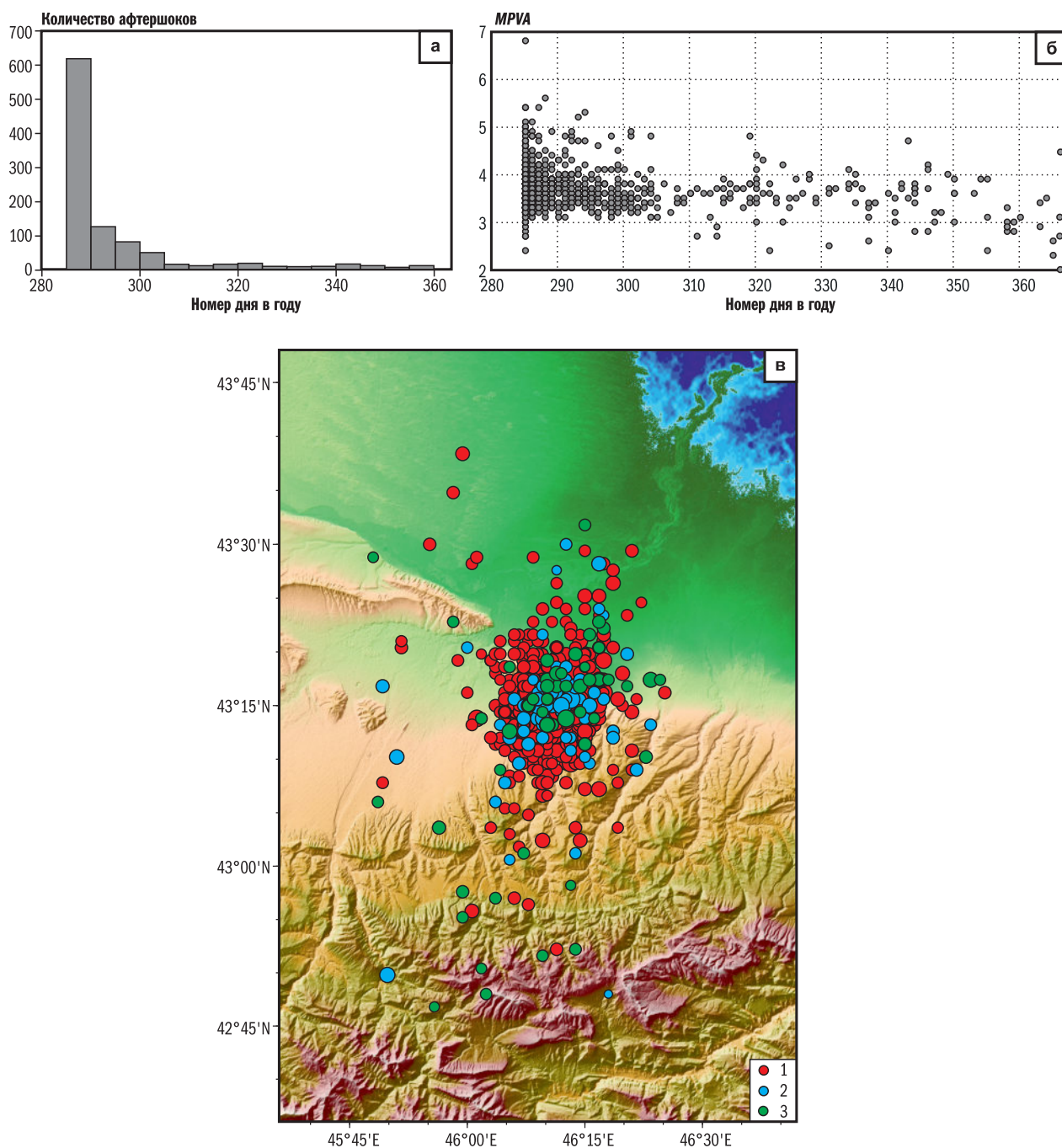
трясения. Вновь созданный ККВФ-бюллетень сравнивается с двумя бюллетенями ЕГС РАН, региональным и телесеismicким, поступающим в МСЦ как агентство MOS, и бюллетенями МСЦ и МЦД. По результатам сравнения оценивается также разрешающая способность метода ККВФ для данного случая, которая впоследствии может быть использована в качестве консервативной оценки порога обнаружения событий в других областях, аналогичных по расположению относительно сети МСМ.

#### Данные, использованные в представляемом исследовании

Наиболее детально и подробно сейсмичность Восточного Кавказа описана в каталоге ЕГС РАН. Точность и полнота этого каталога значительно возросли в конце XX в. в связи с развитием цифровой сейсмологии, которая позволяет использовать методы обработки, повышающие значение отношения сигнал/шум. Так, в частности, спектральная фильтрация сигналов даёт возможность выделять участки записи с пиковыми значениями отношения сигнал/шум.

В своём исследовании мы обратились к одному из крупнейших событий Восточного Кавказа – Курчалойскому землетрясению, произошедшему 11 октября 2008 г. вблизи села Курчалой Чеченской Республики Российской Федерации (координаты эпицентра основного толчка –  $\varphi=43.24^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=46.17^\circ\text{E}$ , глубина –  $15(\pm 5)$  км). По данным ФИЦ ЕГС РАН, время основного толчка этого землетрясения – 09:06:09.8 ( $\pm 0.6$  с), магнитуда  $MPVA=6.8$  (магнитуда по  $P$ -волне с использованием региональной калибровочной функции затухания), энергетический класс по номограмме Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1964]  $K_p=14.5$ . За период с 11 октября 2008 г. по 31 декабря 2008 г. в каталоге насчитывается 1003 события, включая основной толчок. Распределение во времени количества афтершоков Курчалойского землетрясения, значения магнитуд  $MPVA$  и координат событий, зарегистрированных за три месяца после основного толчка, приведены на рис. 1.

Региональный каталог ФИЦ ЕГС РАН используется в данной работе для оценки разрешающей способности сейсмической сети МСМ и методов обработки, применяемых в Международном центре данных (МЦД). Кроме того, с региональным каталогом ЕГС РАН сравниваются результаты обработки данных каталога МСМ методом ККВФ.



**Рис. 1.** Характеристики афтершоковой последовательности Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. по данным регионального каталога ФИЦ ЕГС РАН:

- а – распределение во времени количества афтершоков, начиная от даты основного толчка;  
 б – изменение магнитуды *MPVA* афтершоков за три месяца наблюдений после основного толчка;  
 в – карта распределения афтершоков, зарегистрированных за три месяца от момента основного толчка (1 – в октябре – красный цвет, 2 – в ноябре – синий цвет, 3 – в декабре – зелёный цвет)

Поскольку рассматриваются каталоги, полученные сетями с разными наборами станций, прямое сравнение времён вступления невозможно. Основанием для решения, что два события, включённые в разные каталоги, являются одним и тем же афтершоком Курчалойского зем-

летрясения, могут быть только времена в источнике и параметры эпицентров сравниваемых событий. При этом надо иметь в виду, что в рассматриваемых каталогах даже основной толчок имеет разные координаты и времена в источнике (табл. 1).

**Таблица 1.** Параметры эпицентра основного толчка Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. по данным разных агентств

Характеристики эпицентра	Каталоги			
	Региональный ФИЦ ЕГС РАН [Габсатарова, 2014]	Телесеismicкий ФИЦ ЕГС РАН (MOS)	МСЦ (ISC)	МЦД (IDC)
Время в источнике	09:06:09.8 ( $\pm 0.6$ с)	09:06:09.0	09:06:11.4	09:06:07.45
Координаты	$\varphi$	43.24( $\pm 0.08$ )°N	43.46°N	43.3608°N
	$\lambda$	46.17°E	46.34°E	46.3215°E
Глубина	15( $\pm 5$ ) км	14.0 км	19.8 км	0.0 км
Магнитуда	$m_b$		5.7	5.6
	MPVA	6.8		5.2

Примечание: приводимые в скобках аббревиатуры приняты международным сейсмологическим сообществом для обозначения названий разных агентств и каталогов в англоязычных публикациях.

Приводимая в каталоге МЦД магнитуда оценивается по измерению амплитуды и периода сигнала в окне  $(-0.5)$ – $(+5.5)$  с относительно времени его вступления. Для мелкофокусных землетрясений она оказывается существенно заниженной в связи с медленным ростом амплитуды сигнала, достигающей своего пика далеко за границами окна измерения [Granville et al., 2002; Granville, 2005].

Каталог МСЦ содержит актуальные данные всех сейсмических сетей — от глобальных до локальных. Каждая сеть на постоянной основе передаёт в МСЦ списки вступлений всех обнаруженных фаз и событий, лоцированных принятой в каждом агентстве программой с индивидуальными настройками и географами соответствующих регулярных волн. В МСЦ все данные объединяются в один набор, после чего проводится переоценка времени в источнике, координат гипоцентра, магнитуды и других параметров. Для слабых событий региональные и локальные сети могут быть единственным источником данных.

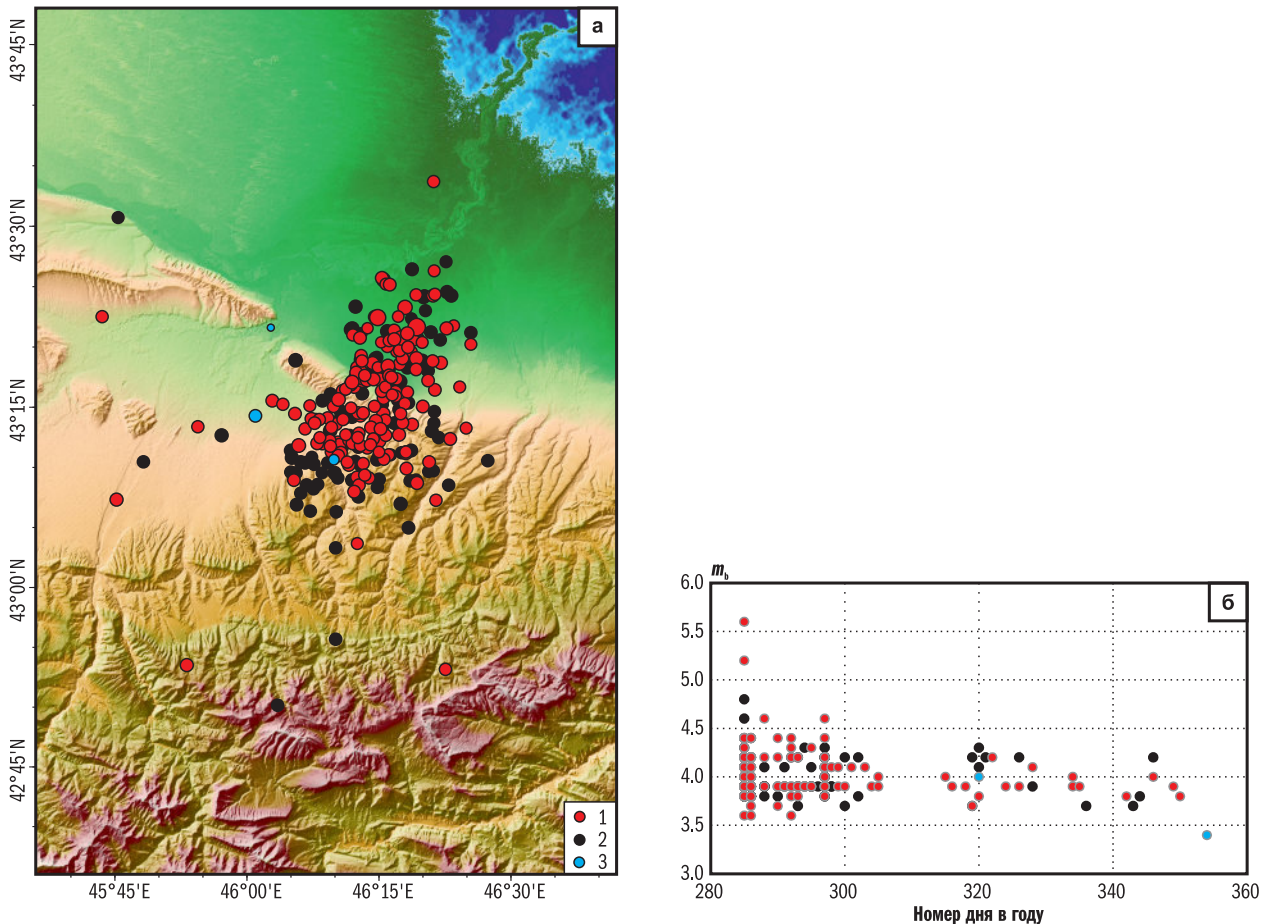
В Проверенном каталоге МСЦ (RevID) представлены 256 афтершоков Курчалойского землетрясения. Большинство из них включено в каталог на основании данных только агентства MOS и регионального каталога ЕГС РАН, которое признаётся автором и содержит 151 событие, в то время как за МСЦ числятся 110 событий, за другими агентствами — три. Важно помнить, что практически все станции ФИЦ ЕГС РАН находятся на локальных и близких региональных расстояниях ( $\Delta \leq 500$  км) от эпицентра основного толчка. При удалении от эпицентра количество регистрирующих станций, участвующих

в решении МСЦ, возрастает за счёт других сейсмических сетей, при этом близкие станции ФИЦ ЕГС РАН по-прежнему вносят свой вклад.

Параметры афтершоков Курчалойского землетрясения из каталога МСЦ за период с 00<sup>h</sup>00<sup>m</sup>00<sup>s</sup> 11 октября 2008 г. по 23<sup>h</sup>59<sup>m</sup>59<sup>s</sup> 31 декабря 2008 г. приведены на рис. 2.

Для событий, находящихся на больших расстояниях от имеющихся в текущий момент времени сетей станций, может оказаться только одна сеть, способная обнаружить их ввиду её особых свойств. В соответствии с амплитудной кривой волны  $P$  [Китов, Санина, 2025a] сейсмические группы сети МСМ способны обнаруживать телесеismicкие сигналы от слабых землетрясений практически на любом расстоянии. Благодаря этому, сигналы Курчалойского землетрясения 2008 г. и его афтершоков и были зарегистрированы сетью МСМ. После автоматической обработки и последующего интерактивного анализа в МЦД было создано 47 гипотез событий для периода с 11 октября 2008 г. по 31 декабря 2008 г. (одно главное событие + 46 афтершоков). Все они были помещены в «Стандартный бюллетень явлений» (СБЯ), являющийся официальным продуктом МЦД [Договор ..., 1996], впоследствии эти события вошли в Проверенный бюллетень МСЦ.

Самая высокая активность отмечалась в первые двое суток — 11 и 12 октября. После основного толчка в течение 15 часов было обнаружено 18 событий (основной толчок и 17 афтершоков); в следующие 24 часа — восемь афтершоков. Параметры 47 афтершоков Курчалойского землетрясения 2008 г. из каталога МЦД показаны на рис. 3.



**Рис. 2.** Параметры афтершоков Курчалойского землетрясения за период с 00:00:00 11 октября 2008 г. по 23:59:59 31 декабря 2008 г. по данным Проверенного каталога МСЦ:  
а – координаты эпицентров; б – магнитуды  $m_b$ .

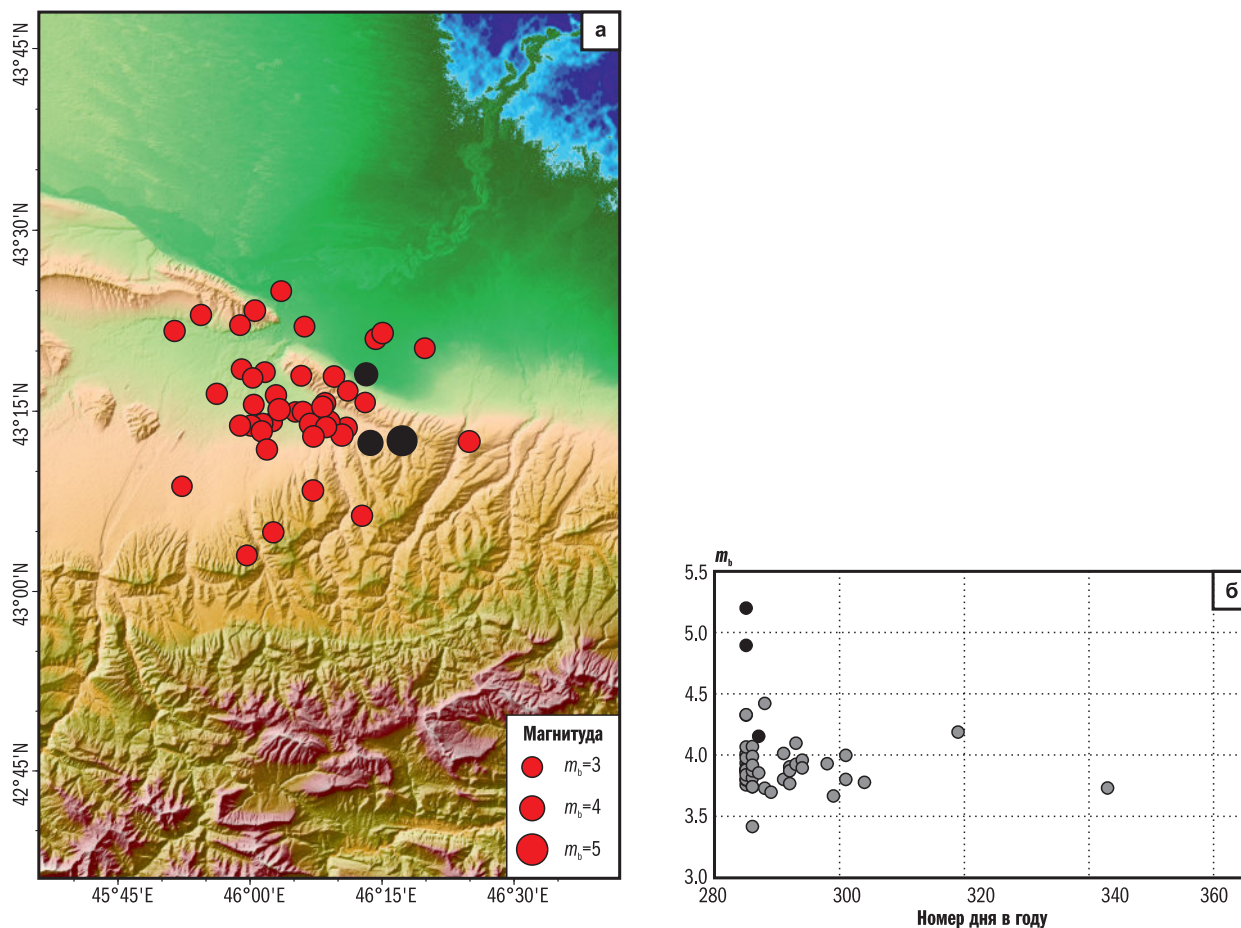
Данные агентств: 1 – ФИЦ ЕГС РАН (MOS), 140 событий; 2 – МСЦ (ISC), 110 событий; 3 – другие агентства

Самым удалённым от эпицентра главного события афтершоком оказался второй (в 09:27:37), возникший на расстоянии около 50 км от эпицентра основного толчка. Большая полуось доверительного эллипса этого афтершока с  $S_{maj}=57$  км направлена на эпицентр главного события. По данным МЦД, радиус зоны эпицентров возможных афтершоков составляет 50–60 км. Этот радиус используется для поиска относительного местоположения более слабых афтершоков, которые могут быть обнаружены только с использованием метода ККВФ. Локация искомым событий проводится в небольшой зоне вокруг эпицентра главного события и представляет собой относительную локацию, основанную на дифференциальных временах пробега между событием из каталога МЦД с известными координатами эпицентра и искомым событием.

Афтершок, представленный в каталоге МЦД с минимальной магнитудой  $m_b=3.42$ , был зарегистрирован пятью сейсмическими групп-

пами на расстояниях от 18.9° (BVAR) до 28.4° (ARCES), также обнаружено несколько афтершоков с  $m_b$  между 3.6 и 3.8. Кривую повторяемости по 47 событиям (47-ми подтверждённым гипотезам) построить не представляется возможным. Все афтершоки из каталога МЦД локализованы в пределах ~50 км от главного события, хотя их эпицентры в основном находятся к северо-западу от него.

Среди афтершоков Курчалойского землетрясения надо выделить первый и самый большой из них с магнитудой  $m_b$ (МЦД)=4.90, что очень близко к магнитуде основного события (рис. 3). Он был зарегистрирован 50 станциями МСМ, включая 27 СГ. В данной работе используется только 22 СГ из них, так как на остальных пяти были проблемы с доступностью непрерывных записей. Кроме названных сейсмических групп привлекались данные трёхкомпонентных станций, четыре из которых (BOSA, KEST, DBIC, КМВО) входят в основную сеть МСМ и две



**Рис. 3.** Параметры афтершоков Курчалойского землетрясения из каталога МЦД за период с 11 октября 2008 г. по 31 декабря 2008 г. (одно главное событие + 46 афтершоков): а – координаты эпицентров событий; б – магнитуды  $m_b$ .

Чёрным цветом отмечены три события – основной толчок и два афтершока, использованных для создания мастер-событий (МС)

(GNI, VRAC) – в дополнительную, две последние содержат лишь фрагменты непрерывной записи. Четыре трёхкомпонентные станции основной сети участвуют в гипотезах только самых сильных афтершоков и бесполезны для обнаружения слабых событий.

Важная особенность сейсмического поля Курчалойского землетрясения и его афтершоковой последовательности – относительно низкочастотный характер излучения [Габсатарова, 2014]. Сигналы от источников с низкой магнитудой на региональных расстояниях с большей вероятностью выделяются на высоких частотах [Evernden et al., 1986; Адушкин и др., 1991], что обусловлено более быстрым спадом спектра микросейсмического шума с ростом частоты по сравнению со спадом спектра сигнала. Для сейсмических событий с магнитудой менее 4.0 спектр источника имеет угловую частоту 5–10 Гц в зависимости от природы и механизма события. Поэ-

тому низкочастотный характер сигналов от событий, связанных с Курчалойским землетрясением, может стать причиной возможного повышения магнитудного порога обнаружения. На телесеismicких расстояниях, где по отношению к Курчалойскому землетрясению расположены практически все сейсмические группы сети МСМ, эффект низкочастотного излучения приводит к снижению порога обнаружения сигналов. На расстояниях более 20° затухание высокочастотной составляющей от слабых источников так велико, что спектр сигнала (в области высоких частот) опускается гораздо ниже уровня микросейсмического шума. При этом низкочастотная часть спектра сигнала может оставаться выше уровня шума. В условиях относительного повышения уровня низкочастотного спектра сигналов, излучаемых афтершоками Курчалойского землетрясения, их обнаружение на телесеismicких расстояниях может оказаться более

эффективным при применении методов, основанных на кросс-корреляции волновых форм [Габсатарова, 2014].

### Метод кросс-корреляции волновых форм и локальной ассоциации сейсмических фаз

В стандартной практике обнаружения сигналов с помощью сейсмических групп обычно применяется метод направленного приёма, основанный на суммировании сигналов, зарегистрированных датчиками, распределёнными по площади вокруг центрального элемента группы [Schweitzer et al., 2012]. В МЦД процедура направленного приёма реализована как в автоматической, так и в интерактивной обработке данных станций глобальной сети МСМ [Coyne et al., 2012]. Теоретически использование сейсмических групп и метода направленного приёма позволяет снизить амплитудный порог обнаружения в среднем с коэффициентом, равным корню квадратному из числа датчиков в группе. Однако существует несколько факторов, снижающих реальную эффективность работы группы при использовании процедуры направленного приёма. В частности, реальные времена вступления на отдельных датчиках отличаются от теоретических, используемых при суммировании для расчёта временных задержек. Это приводит к потере мощности суммарного сигнала за счёт небольших сдвигов расчётных задержек фазы относительно реальных. Кросс-корреляция волновых форм позволяет избежать не только таких эффектов в обработке сигналов, но и приближает порог обнаружения повторяющихся и/или похожих сигналов к оптимальному уровню, как это теоретически показано в работе [Turin, 1960] для метода согласованного фильтра при условии стохастического и аддитивного шума.

Процедура обнаружения сигналов с помощью метода ККВФ для сейсмических групп, основанная на использовании высококачественных шаблонных сигналов от мастер-событий (МС) при поиске в непрерывной записи похожих сигналов от близкорасположенных источников, подробно описана в [Kitov et al., 2015; Bobrov et al., 2016; 2017]. В качестве мастер-событий из каталогов обычно выбираются землетрясения (или взрывы), сигналы от которых зарегистрированы наибольшим числом станций. При использовании сейсмических групп расстояние между искомым событием и мастер-событием определяется не в пространственной, а во временной области. Основной параметр при этом — разница в относительных временах вступления

шаблонного и искомого сигнала на отдельных датчиках группы, которая при полном совпадении положения искомого и мастер-события тождественно равна нулю. При смещении искомого события относительно мастер-события разница должна меняться на всех или нескольких датчиках в зависимости от изменения скалярной медленности и азимута на источник искомого сигнала. Так как скалярная медленность (кажущаяся скорость) сигнала относительно поверхности меняется в широком диапазоне в зависимости от сейсмической фазы и эпицентрального расстояния, то изменение относительного местоположения для источника  $Lg$ -волны на 1 км будет по времени пробега вдоль сейсмической группы соответствовать 5–7 км для  $P$ -волны от источника на расстояниях 60–90°.

Относительная скорость распространения волны вдоль поверхности на каждой станции — основной фактор, определяющий разрешающую способность метода относительной локации. При смещении искомого события относительно  $i$ -ого мастер-события для каждой  $j$ -ой станции изменение времени пробега  $d^j t_i$  можно рассчитать как скалярное произведение по формуле:

$$d^j t_i = {}^j \mathbf{D}_i \cdot {}^j \mathbf{S}_i,$$

где  ${}^j \mathbf{D}_i$  — пространственный вектор между искомым и мастер-событиями,  ${}^j \mathbf{S}_i$  — вектор медленности  $i$ -ого мастер-события на  $j$ -ой станции (изменением вектора медленности между мастер-событием и искомым можно пренебречь).

Для относительной локации используется плотная сетка виртуальных местоположений искомого источника относительно мастер-события; изменение времени при переходе от одного узла к другому должно превышать временной шаг оцифровки. В каждом узле сетки оценивается среднеквадратичное значение изменения времён пробега по всем станциям, которые зарегистрировали сигналы, предположительно ассоциированные с искомым событием с разрешёнными невязками по правилам МЦД [Coyne et al., 2012]. Локация искомого события фиксируется в точке минимума среднеквадратичной невязки изменений времён пробега. Точность локации зависит от качества сигналов искомого и мастер-событий, определяемого значением отношения сигнал/шум. Так, для взрывов на испытательном полигоне в КНДР точность относительной локации оценивалась в 50–100 м [Selby, 2010; Kitov et al., 2025], а для слабых событий в Индийском океане — в несколько километров. Это объясняется тем, что метод ККВФ позволяет определять разность времён пробега с точностью

в несколько десятых секунды для сигналов от коровых землетрясений с медленностью 0.02–0.04 с/км, а для сигналов от взрывов с такой же медленностью точность достигает 0.001–0.005 с. В рамках процедуры относительной локации используются только сигналы, невязка времени пробега которых в окончательном решении локации не превышает заранее заданного порога (в данном исследовании менее 2 с), а относительная станционная магнитуда не отклоняется от средней по всем станциям более чем на единицу [Bobrov *et al.*, 2016].

Надо отметить, что использование метода ККВФ на сейсмических группах предполагает обнаружение сигналов, амплитуда которых гораздо ниже порога обнаружения методом направленного приёма, что создаёт проблему для создания гипотез событий и в автоматическом, и в интерактивном режимах. Вблизи порога обнаружения методом ККВФ могут быть как истинные, так и ложные срабатывания детектора. Поэтому ассоциация обнаруженных этим методом вступлений со статистически надёжными гипотезами истинных событий – сложная задача. Каталог событий ЕГС РАН для Курчалойского землетрясения позволяет разделить создаваемые с помощью метода ККВФ гипотезы события на основании времён в источнике. Как уже указывалось выше, использование времён вступлений на отдельных станциях невозможно, так как наборы станций сетей ЕГС РАН и МСМ для большинства слабых событий практически не пересекаются.

Разница времён в источнике – достаточный параметр идентификации одного и того же источника при условии пространственной близости искомого и мастер-событий, а также значительной разницы времён в источнике последовательных событий в каталоге ЕГС РАН. Среднее значение разницы времён в очаге между последующими афтершоками 11 октября 2008 г. составляет примерно 184 с со стандартным отклонением 187 с. Только для двух из 293 событий в каталоге ЕГС РАН за первый день разница времён в источнике меньше 10 с, для 14 – меньше 20 с и для 23 – меньше 30 с.

Метод ККВФ в совокупности с алгоритмом локальной ассоциации вступлений в рамках относительной локации позволяет создать гипотезы событий с принятыми в МЦД критериями качества для официального продукта – СБЯ [Договор ..., 1996], позволяющими соблюдать порог статистической значимости при заданных потоках ложных и истинных срабатываний детектора [Coyne *et al.*, 2012]. Основным требова-

нием МЦД можно считать необходимость ассоциации с каждой истинной гипотезой события первичных фаз продольных волн  $P$  ( $Pg$ ,  $Pn$ ,  $P$ ,  $PKP$ ,  $PKPab$ ,  $PKPbc$ ) на как минимум трёх станциях первичной сети МСМ. Невязки времён пробега этих фаз относительно теоретического годографа в СБЯ должны находиться в пределах 2 с для  $P$ , 2.2 с – для  $Pg$  и  $Pn$ , и 2.5 с – для волн в группе  $PKP$ . В данной работе для всех фаз приняты допустимые невязки МЦД. В рамках локации слабых событий (менее шести ассоциированных станций МСМ) в МЦД используются невязки оценок азимута и скалярной медленности. Для вступлений, полученных методом ККВФ, требования к оценкам азимута и медленности соблюдаются автоматически ввиду пространственной близости МС и искомого события.

### Результаты применения метода ККВФ и сравнение трёх рассматриваемых каталогов

Для расчёта коэффициента кросс-корреляции СС применяются шаблоны сигналов от нескольких мастер-событий на всех станциях сети МСМ, на которых эти сигналы были обнаружены и ассоциированы с одним из используемых мастер-событий. Для формирования максимально возможного набора мастер-событий рассматриваются все события в каталоге МСМ в пределах исследуемой зоны афтершоков за период с 2001 по 2025 год. В основной набор вошли землетрясение и два афтершока (на рис. 3 выделены чёрным цветом). Также для оценки вклада в результат применения метода ККВФ других афтершоков тестировался расширенный набор, включавший 73 события, три из которых принадлежат основному.

Для каждого используемого в расчётах шаблона получаются трассы коэффициентов корреляции, к которым применяется стандартный энергетический детектор, повторяющий детектор МЦД [Coyne *et al.*, 2012]. Список вступлений, ассоциированных с одним и тем же мастер-событием, полученный на всех станциях, используется для локальной ассоциации. Создаётся список гипотез искомого события, с каждой из которых ассоциировано три или более вступлений. Каждая станция имеет свой вес в гипотезах в соответствии с вероятностью быть ассоциированной с событиями из каталога МЦД для данного региона. Суммарный вес всех станций (вступлений), ассоциированных с одной гипотезой, используется как мера статистической надёжности гипотезы и называется весом события.

Вес события – основная статистическая характеристика гипотезы, опирающаяся на долговременные наблюдения сейсмичности вблизи изучаемой афтершоковой последовательности. Если две конкурирующие гипотезы имеют одинаковый вес, то для разрешения конфликта в качестве меры надёжности сначала анализируется количество ассоциированных вступлений, а затем среднеквадратичная невязка времени в источнике.

Созданный для каждого мастер-события список гипотез и ассоциированных с ними вступлений проверяется на конфликты с аналогичными списками других мастер-событий. Близкие мастер-события могут создавать гипотезы, состоящие из одних и тех же выделенных вступлений. Конфликт разрешается в пользу гипотезы, имеющей большую сумму весов станций, ассоциированных с ней. Гипотезы, «потерявшие» ассоциированные вступления, могут оставаться в списке, но для этого их новый общий вес должен быть не ниже порогового, а потери числа ассоциированных фаз и веса были меньше заранее определённых значений. В результате разрешения всех конфликтов между мастер-событиями остаётся один набор лучших гипотез, который признаётся окончательным автоматическим бюллетенем, полученным методом ККВФ.

Метод ККВФ включает множество параметров, от которых зависит плотность потока вступлений в каждом конкретном случае. Это, например, ширина окон для ККВФ, характеристики фильтров, пороги обнаружения для отношения сигнал/шум на исходной записи ( $SNR$ ) и трассе коэффициентов кросс-корреляции  $CC$  ( $SNR_{CC}$ ). В рамках локальной ассоциации используется свой набор параметров, таких как шаг сетки, размер сетки, минимальное количество ассоциированных с гипотезой вступлений (в данной работе их три), минимальный вес гипотезы, хотя бы одно вступление с высокой статистической значимостью, определяемой  $SNR_{CC}$  (чем больше  $SNR_{CC}$ , тем меньше вероятность, что это вступление случайное), и др.

Вариации определяющих параметров, как и в любой автоматической программе создания гипотез сейсмических событий, приводят к изменению долей правильных и ложных событий в общем потоке. Ложными событиями считаются те, что не находят независимого подтверждения в рамках имеющегося набора данных и метода проверки; при этом они не обязательно физически отсутствуют. Так, например, метод ККВФ может обнаружить новые события, 50–100% из которых не входят в каталог МЦД. При проверке этих гипотез аналитиками

МЦД оказывается, что они правильные и пропущены в каталоге МЦД вследствие ограничений автоматической обработки. Сравнение результатов применения метода ККВФ с локальными бюллетенями также может служить для оценки каждой гипотезы с точки зрения бинарной логики – «правильный/ложный». При этом «ложный» не является однозначным решением о физическом существовании события.

В данной работе выполнены расчёты с несколькими наборами определяющих параметров, и по данным сети МСМ, используя метод ККВФ, создали новые расчётные каталоги событий. Долю правильных и ложных событий в этих каталогах можно оценить путём сравнения с внешними по отношению к ним каталогами ЕГС РАН, МСЦ и МЦД. Такой подход позволяет выбрать лучший (с точки зрения рисков пропуска правильных и минимизации доли ложных гипотез) набор определяющих параметров для рутинной автоматической обработки данных не только по Кавказу, но и в дальнейшем по Северу России.

Для сравнения каталогов ЕГС РАН, МСЦ и МЦД нами была выбрана дата основного толчка Курчалойского землетрясения – 11 октября 2008 г., день наивысшей интенсивности афтершоков. Предварительно отметим, что в течение примерно 15 часов после основного толчка по данным сети ЕГС РАН был обнаружен 291 афтершок. В каталоге МСЦ для этого же временного интервала опубликованы данные по 98 событиям, среди которых 33 афтершока за авторством МСЦ и 65 – ЕГС РАН. В каталоге МЦД присутствуют 18 событий, включая основной толчок (12 октября МЦД обнаружил восемь афтершоков, 13 октября – девять). Нужно заметить, что в 2008 г. региональный бюллетень землетрясений Северного Кавказа не поступал в МЦД, соответствующий каталог событий публиковался лишь в Приложении на CD-ROM к ежегоднику «Землетрясения Северной Евразии» [*T07\_North\_Caucasus\_2008 ...*, 2014].

События, обнаруженные МЦД, в каталоге ЕГС РАН выделены жирным шрифтом.

Результаты расчётов, выполненных методом ККВФ для события 11 октября 2008 г., в сопоставлении с каталогами ЕГС РАН, МСЦ и МЦД представлены в [Китов и др., 2026]. Из каталога ЕГС РАН были выбраны только события, присутствующие хотя бы в одном из двух других каталогов – таких событий 108. В Приложение включено также одно событие из каталога МСЦ, которого нет в каталоге ЕГС РАН (выделено красным).

При сравнении анализировались времена в источнике событий. Решения, представленные в каталоге МСЦ, основаны на данных всех доступных станций, включая сеть ФИЦ ЕГС РАН, станции других агентств и исследовательских институтов, что должно было обеспечить минимальную разницу между временами в источнике для одних и тех же событий; тем не менее эта разница достигает 8.4 с (в [Китов и др., 2026] выделено жирным шрифтом).

Максимальное расстояние от афтершока МСЦ до эпицентра землетрясения, по оценке ФИЦ ЕГС РАН, — более 38 км. Это результат применения двумя агентствами различных программ локации. Для МЦД, который нашёл только самые сильные из афтершоков, разница времён в источнике с ЕГС РАН значительно меньше. При этом максимальное расстояние от афтершока МЦД до эпицентра основного события ЕГС РАН составляет более 55 км. Эти результаты дают примерную оценку распространения афтершоков относительно Курчалойского землетрясения. Максимальное расстояние между одинаковыми (по времени в источнике с афтершоком ЕГС РАН) событиями МСЦ и МЦД доходит до 66 км. Исходя из этих результатов, можно предположить, что разница в локации и глубине источников по данным ЕГС РАН и ККВФ может достигать 20–30 с. Это результат понижения точности локации с уменьшением магнитуды событий, связано с повышением ошибки времени вступления. Разность времён в источнике 15 с можно считать консервативным пределом.

Как уже отмечалось выше, в каталоге ЕГС РАН за 11 октября 2008 г. присутствуют параметры 292 событий, из которых нами были выбраны 108. В два других каталога за эту дату включены 98 (каталог МСЦ) и 18 (каталог МЦД) событий.

Как можно видеть в табл. 2, одно событие из каталога МСЦ отсутствует в каталоге ЕГС РАН. Повторная контрольная проверка записей региональных станций показала, что это слабое событие и обработка его осложнена наложением записей афтершоков, поэтому оно было удалено из регионального каталога. 80 событий каталога МСЦ не представлены в каталоге МЦД; остальные 18 событий включены в каталог МСЦ по данным МЦД.

Отсутствие в каталоге ЕГС РАН одного события из каталога МСЦ не только подтверждает тот факт, что МСЦ нашёл событие, которого нет в каталоге ЕГС РАН, но и содержит число гипотез событий, полученных методом ККВФ и не нашедших подтверждения в каталоге ЕГС РАН. Эти события ККВФ имеют такую же статистическую значимость, как и события, найденные в каталоге ЕГС РАН. По нашей методике сравнения это ложные события, хотя они никак не отличаются от других гипотез, созданных методом ККВФ. Для выяснения их природы требуются дальнейшие углублённые исследования с привлечением новых методов обработки и новых данных.

В результате применения метода ККВФ с использованием трёх наборов определяющих параметров с тремя одинаковыми мастер-событиями было обнаружено разное число событий (см. табл. 2) — от 30 (ККВФ-3) до 31 (ККВФ-1) и 39 (ККВФ-2). Одно событие МЦД было пропущено во всех трёх вариантах параметров ККВФ, то есть было найдено 17 из 18 событий. При этом дополнительно к каталогу МЦД было найдено и подтверждено каталогом ЕГС РАН от 13 (ККВФ-3), 14 (ККВФ) до 22 (ККВФ-3) афтершоков. Это означает, что от 72 до 120% статистически значимых событий в каталоге МЦД было пропущено и найдено с помощью метода ККВФ на основе тех же данных и критериев определения

**Таблица 2.** Сравнение количества событий в каталогах МСЦ и МЦД, подтверждённых каталогом ФИЦ ЕГС РАН, а также каталогами, полученными с помощью ККВФ

Количество событий	Каталоги			Каталоги, сформированные по результатам применения метода ККВФ к данным МСМ			
	ФИЦ ЕГС РАН (MOS)	МСЦ (ISC)	МЦД (IDC)	ККВФ-1	ККВФ-2	ККВФ-3	ККВФ-73
Всего	108	98	18	31	39	30	63
Из них отсутствуют:							
– в каталоге МЦД	90	80		14	22	13	45
– в каталоге ЕГС РАН		1		7	13	2	52

события, что использует МЦД. Дополнительные найденные события имеют свою цену – создание гипотез, не подтверждённых каталогом ЕГС РАН; число таких гипотез изменяется от двух (ККВФ-3) и семи (ККВФ-1) до 13 (ККВФ-2).

Отдельно стоит рассмотреть вариант использования в качестве мастер-события всех найденных в пределах зоны афтершоков 73 событий из каталога МЦД. Увеличение числа вариантов шаблонов для кросс-корреляции имеет как положительный эффект за счёт роста схожести форм сигналов от близких в пространстве событий, так и отрицательный ввиду роста количества ложных срабатываний детектора, приводящего к созданию ложных событий. Эти эффекты присутствуют в любой автоматической обработке. Например, в Международном центре данных пороги обнаружения сигналов на станциях настроены так, чтобы в автоматическом бюллетене было около половины гипотез событий, из которых в интерактивном анализе получаются правильные окончательные решения. Для варианта ККВФ с 73 МС найдено 63 события из каталога ЕГС РАН, причём десять из них отсутствуют в каталоге МСЦ, хотя в каталоге ККВФ данные ЕГС РАН не используются. Найдены все 18 событий из каталога МЦД, а также 45 событий дополнительно к нему. Это составляет 250% новых событий по правилам МЦД. При этом было создано 52 события, которые не нашли аналогичных решений в каталоге ЕГС РАН, то есть примерно половина найденных 115 событий в данном варианте ККВФ считаются ложными.

### Заключение

Анализ каталога ФИЦ ЕГС РАН показывает, что имеющаяся в пределах Восточного Кавказа региональная сейсмическая сеть трёхкомпонентных станций зарегистрировала значительную часть событий, интерпретируемых как афтершоки Курчалойского землетрясения, что говорит об её эффективности. Статистика афтершоков из каталога ЕГС РАН, обнаруженных с помощью метода ККВФ применительно к данным глобальной сети МСМ, свидетельствует о возможности существенного понижения порога обнаружения. Использовать данные сети МСМ можно значительно более эффективно и находить события с магнитудой  $m_b \sim 3.4-3.5$  на телесеismicких расстояниях. Это относится не только к сейсмоактивным территориям, таким как Восточный Кавказ, где произошло Курчалойское землетрясение и его афтершоки, но и к сейсми-

ческим событиям на слабосейсмичных территориях, таких как, например, европейская часть Севера России.

Создание плотных сетей трёхкомпонентных сейсмических станций, аналогичных кавказской, не всегда целесообразно и возможно, особенно на слабосейсмичных и труднодоступных территориях. Альтернативой могут служить достаточно редкие сети из сейсмических групп, имеющих в зависимости от решаемых задач апертуру от 2–3 до 15–20 км. Такая сеть из трёх-четырёх групп, удалённых друг от друга на 400–600 км, позволит контролировать территорию площадью до миллиона квадратных километров. При использовании современных методов обработки эти сети будут эффективны и для регистрации слабых сейсмических событий с магнитудой менее 3.

Развитие методов кросс-корреляции привело к существенному снижению порога обнаружения за счёт «обеления» микросейсмического шума [Adushkin et al., 2025]. Благодаря добавлению к исходным записям сгенерированного компьютером стохастического шума порог обнаружения может быть снижен в разы за счёт подавления в шуме компоненты, когерентной шаблонному и искомому сигналам.

Стохастизация микросейсмического шума приближает метод кросс-корреляции к идеальному случаю согласованного фильтра [Turin, 1960]. Так как амплитуда шумовой когерентной компоненты значительно меньше амплитуды искомого сигнала, то добавление достаточной для её подавления стохастической компоненты слабо скажется на самом искомом сигнале.

Проведённые исследования показали, что сейсмические группы понижают порог обнаружения на близких телесеismicких расстояниях (менее 30°). Использование малоапертурных сейсмических групп в пределах региональных расстояний позволит дополнительно понизить магнитудный порог обнаружения, как показывает опыт работы малоапертурной группы «Михнево» [Kitov et al., 2025]. Дальнейшие экспериментальные исследования в регионах с низкой сейсмичностью планируется провести в рамках проекта РНФ № 25-17-00106.

**Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 25-17-00106).**

### Литература

Адушкин В.В., Китов И.О., Пасечник И.П., Плещкач Н.К., Султанов Д.Д. Результаты регистрации высокочастотной составляющей сейсмических

волн от подземных взрывов на континентальных трассах // Доклады Академии наук СССР. — 1991. — Т. 320, № 4. — С. 839–843.

Ан В.А., Коновалов В.А. О разработке и внедрении в практику геофизических исследований и контроля за ядерными взрывами цифровой аппаратуры // Рождённая атомным веком. Часть 1. Сборник исторических очерков, документов и воспоминаний ветеранов к 40-летию создания в СССР Службы специального контроля Министерства обороны / Под ред. А.П. Васильева. — М., 1998. — С. 132–139.

Габсатарова И.П. Инструментальные параметры очага Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с  $K_p=14.5$ ,  $M_w=5.8$ ,  $I_0=7-8$  (Чеченская Республика) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск: ГС РАН, 2014. — С. 433–447. — EDN: UDUBWN

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. 1996. Протокол к ДВЗЯИ [Электронный ресурс]. — URL: [https://www.ctbto.org/sites/default/files/Documents.treaty\\_text\\_Russian.pdf](https://www.ctbto.org/sites/default/files/Documents.treaty_text_Russian.pdf)

Китов И.О., Санина И.А. Восстановление последовательности афтершоков землетрясения в Северной Атлантике с помощью кросс-корреляции волновых форм // Геодинамика и тектонофизика. — 2025а. — Т. 16, № 4. — 838. — DOI: 10.5800/GT-2025-16-4-0838. — EDN: ZSEVLX

Китов И.О., Санина И.А. Проверка качества сейсмологических бюллетеней с использованием кросс-корреляции волновых форм // Российский сейсмологический журнал. — 2025б. — Т. 7, № 1. — С. 26–41. — DOI: 10.35540.2686-7907.2025.1.02. — EDN: GHZUX

Китов И.О., Санина И.А., Габсатарова И.П. Сопоставление каталогов ФИЦ ЕГС РАН, МСЦ, МЦД и каталога афтершоков Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г., полученному по методу кросс-корреляции // Репозиторий геофизических данных [сайт]. — [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2026]. — URL: <http://repo.gsras.ru/repository/workspace#392755b0-72fb-4c95-94ca-ecc689015d83>. — DOI: 10.35540/gsras.rjs.2026.2.01

Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Тр. ИФЗ АН СССР; № 32(199)). — М.: Наука, 1964. — С. 88–93.

Султанов Д.Д. Роль Г.А. Гамбурцева в создании сейсмического метода контроля за ядерными испытаниями // Григорий Александрович Гамбурцев (1903–1955). Воспоминания, очерки, статьи / Отв. ред. В.Н. Страхов. — М.: ОИФЗ РАН, 1998. — С. 188–193. — EDN: RXAYJB

T07\_North\_Caucasus\_2008.xls. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкина Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Александрова Л.И., Ивано-

ва Л.Е., Малянова Л.С. и др. (сост.). Афтершоки Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. ( $N=1003$ ) за 2008 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. — Обнинск: ГС РАН, 2014. — Приложение на CD-ROM.

Adushkin V.V., Kitov I.O., Sanina I.A. Further development of the matched filter method for solving seismological problems // Doklady Earth Sciences. — 2025. — V. 523. — A. 13. — DOI: 10.1134/S1028334X25606182

Arrowsmith S.J., Eisner L. A technique for identifying microseismic multiplets and application to the Valhall field, North Sea // Geophysics. — 2006. — V. 71. — P. 31–40. — DOI: 10.1190/1.2187804

Baisch S., Ceranna L., Harjes H.P. Earthquake cluster: What can we learn from waveform similarity? // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2008. — V. 98, N 6. — P. 2806–2814. — DOI: 10.1785/0120080018

Bobrov D., Kitov I., Rozhkov M. Studying seismicity of the Atlantic Ocean using waveform cross-correlation // Вестник НЯЦ РК. — 2017. — Вып. 2. — С. 5–19.

Bobrov D., Kitov I., Zerbo L. Perspectives of cross correlation in seismic monitoring at the International Data Centre // Pure and Applied Geophysics. — 2014. — V. 171, N 3–5. — P. 439–468. — DOI: 10.1007/s00024-012-0626

Bobrov D.I., Kitov I.O., Rozhkov M.V., Friberg P. Towards global seismic monitoring of underground nuclear explosions using waveform cross correlation. Part I: Grand master events // Seismic Instruments. — 2016. — V. 52, Is. 1. — P. 43–59. — DOI: 10.3103/S0747923916010035

Coyne J., Bobrov D., Bormann P., Duran E., Grenard P., Haralabus G., Kitov I., Starovoit Yu. Chapter 15. CTBTO: Goals, networks, data analysis and data availability // New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). IASPEI / Ed. P. Bormann. — Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2012. — DOI: 10.2312.GFZ.NMSOP-2\_ch15

CTBTO. Resources. For researchers and experts. vDec. [сайт]. — URL: <https://www.ctbto.org/resources/for-researchers-experts/vdec> (дата обращения 11.12.2025).

Evernden J.F., Archambeau C.B., Cranswick E. An evaluation of seismic decoupling and underground nuclear test monitoring using high-frequency seismic data // Reviews of Geophysics. — 1986. — V. 24, N 2. — P. 143–215.

Flinn E.A., Engdahl E.R. Seismic and geographical regionalization // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1974. — V. 64, N 3. — part 2. — P. 771–993.

Gibbons S., Kvaerna T., Ringdal F. Monitoring of seismic events from a specific source region using a single regional array: A case study // Journal of Seismology. — 2005. — V. 9, N 3. — P. 277–294. — DOI: 10.1007/s10950-005-5746-7

- Gibbons S., Ringdal F.* A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions // NORSAR Scientific Report 2-2004. — Kjeller, Norway, 2004. — P. 41–50. — DOI: 10.21348/p.2004.0005
- Gibbons S.J., Ringdal F.* The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // *Geophysical Journal International*. — 2006. — V. 165, N 1. — P. 149–166. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x
- Gibbons S.J., Sørensen M.B., Harris D.B., Ringdal F.* The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multi-channel waveform correlation at regional distances // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 2007. — V. 160, N 3-4. — P. 285–309. — DOI: 10.1016/j.pepi.2006.11.008
- Granville J.P.* Understanding the differences between three teleseismic mb scales // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2005. — V. 95, N 5. — P. 1809–1824. — DOI: 10.1785/0120040159
- Granville J.P., Kim W.-Y., Richards P.G.* An assessment of seismic body wave magnitudes published by the Prototype International Data Centre // *Seismological Research Letters*. — 2002. — V. 73, N 6. — P. 893–906. — DOI: 10.1785/gssrl.73.6.893
- Israelsson H.* Correlation of waveforms from closely spaced regional events // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1990. — V. 80, N 6B. — P. 2177–2193. — DOI: 10.1785/BSSA08006B2177
- Joswig M.* Pattern recognition for earthquake detection // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1990. — V. 80, N 1. — P. 170–186. — DOI: 10.1007/978-3-642-73015-3\_65
- Kitov I.O., Sanin I.A., Nepeina K.S., Konstantinovskaya N.L.* Using a matched-filter technique at the Mikhnevo small-aperture seismic array // *Seismic Instruments*. — 2015. — V. 51, Is. 3. — P. 191–200. — DOI: 10.3103/S0747923915030056
- Kitov I.O., Sanina I.A., Volosov S.G., Konstantinovskaya N.L.* The 20th anniversary of the installation of the small-aperture Mikhnevo array for monitoring induced seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2025. — V. 61, Is. 2. — P. 288–304. — DOI: 10.1134/S1069351325700181
- Richards P., Waldhauser F., Schaff D., Kim W.-Y.* The applicability of modern methods of earthquake location // *Pure and Applied Geophysics*. — 2006. — V. 163, N 2-3. — P. 351–372. — DOI: 10.1007/s00024-005-0019-5
- Schaff D., Richards P.* Lg-wave cross correlation and double-difference location: Application to the 1999 Xiuyan, China, sequence // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2004b. — V. 94, N 3. — P. 867–879. — DOI: 10.1785/0120030136
- Schaff D., Richards P.* On finding and using repeating events in and near China // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. — 2011. — V. 116, N B3. — B03309. — DOI: 10.1029/2010JB007895
- Schaff D., Richards P.* Repeating seismic events in China // *Science*. — 2004a. — V. 303 (5661). — P. 1176–1178. — DOI: 10.1126/science.1093422
- Schaff D.P., Bokelmann G.H.R., Ellsworth W.L., Zankerka E., Waldhauser F., Beroza G.C.* Optimizing correlation techniques for improved earthquake location // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2004. — V. 94, N 2. — P. 705–721. — DOI: 10.1785/0120020238
- Schaff D.P., Waldhauser F.* Waveform cross correlation based differential travel-time measurements at the Northern California Seismic Network // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2005. — V. 95, N 6. — P. 2446–2461. — DOI: 10.1785/0120040221
- Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Gibbons S.J., Pirl M., Kühn D., Kvaerna T.* Chapter 9. Seismic arrays // *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*. IASPEI / Ed. P. Bormann. — Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2012. — DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP2\_ch9
- Selby N.D.* Relative locations of the October 2006 and May 2009 DPRK announced nuclear tests using International Monitoring System seismometer arrays // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2010. — V. 100, N 4. — P. 1779–1784. — DOI: 10.1785/0120100006
- Turin G.L.* An introduction to matched filters // *IRE Transactions on Information Theory*. — 1960. — V. 6. — P. 311–329. — DOI: 10.1109/TIT.1960.105

### Сведения об авторах

**Китов Иван Олегович**, д-р 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: [ikitov@mail.ru](mailto:ikitov@mail.ru)

**Санина Ирина Альфатовна**, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: [irina@idg.ras.ru](mailto:irina@idg.ras.ru)

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

## The regional sensitivity of the global International Monitoring System network assessment on the example of 2008 Kurchaloi earthquake aftershocks

© 2026 I.O. Kitov<sup>1</sup>, I.A. Sanina<sup>2</sup>, I.P. Gabsatarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GS RAS, Obninsk, Russia; <sup>2</sup>IDG RAS, Moscow, Russia

Received January 15, 2026

**Abstract** The problem of assessing the sensitivity of the teleseismic network (global IMS network) to the detection of regional events is considered. It is proposed to use the method of cross-correlation of waveforms (WCC-based methods) at the stage of processing digital recordings in areas with weak seismicity and in aseismic areas where dense networks are not located usually. The lack of sufficient data in such areas makes it difficult to assess the resolution and sensitivity of the networks located in them. The use of the WCC method makes it possible to compensate for the lack of data by reducing both the amplitude and magnitude detection thresholds. This is shown by the example of the events detection in seismic region N 29 [Flinn, Engdahl, 1974], which includes the regions of the Northern Urals and the Eastern Caucasus. In these territories under consideration, there are many identical seismic groups of the IMS network at regional distances, which makes it possible to directly compare detection thresholds. The presented study analyzes the events of Kurchaloi earthquake of October 11, 2008 with Mw=5.8 aftershock sequence, recorded by the regional network of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) and seismic stations of the International Monitoring System (IMS). A comparison of the regional catalog of the GS RAS, which contains the largest number of aftershocks, the teleseismic catalog of the GS RAS (MOS agency), the catalogs of the International Data Center (IDC) and the International Seismological Center (ISC) with the results of applying the cross-correlation waveforms method to the IMS data allowed us to define the detection thresholds for the Eastern Caucasus, which may be used in the study of the Northern Ural seismicity in the future.

**Keywords** Seismicity, earthquake, aftershocks, cross-correlation of waveforms, seismic group, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, International Monitoring System, International Data Center, International Seismological Center.

**For citation** Kitov, I.O., Sanina, I.A., & Gabsatarova, I.P. (2026). [The regional sensitivity of the global International Monitoring System network assessment on the example of 2008 Kurchaloi earthquake aftershocks]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(2), 7-23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.01>. EDN: CTPPFT

### References

- Adushkin, V.V., Kitov, I.O. & Sanina, I.A. (2025). Further development of the matched filter method for solving seismological problems. *Doklady Earth Sciences*, 523, 13. DOI: [10.1134/S1028334X25606182](https://doi.org/10.1134/S1028334X25606182)
- Adushkin, V.V., Kitov, I.O., Pasechnik, I.P., Ple-skach, N.K., & Sultanov, D.D. (1991). [Results of registration of the high-frequency component of seismic waves from underground explosions on continental paths]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 320(4), 839-843. (In Russ).
- An, V.A., & Konovalov, V.A. (1998). [On the development and implementation of digital equipment in geophysical research and nuclear explosion monitoring practice]. In *Rozhdennaia atomnym vekom. Chast' 1. Sbornik istoricheskikh ocherkov, dokumentov i vospominanii veteranov k 40-letiiu sozdaniia v SSSR Sluzhby spetsial' nogo kontrolya Ministerstva oborony. Pod red. A.P. Vasil'eva* [Born of the Atomic Age. Part 1. A collection of historical essays, documents, and veterans' memoirs for the 40th anniversary of the establishment of the Special Control Service of the Ministry of Defense in the USSR. Ed. A.P. Vasiliev] (pp. 132-139). Moscow, Russia. (In Russ).
- Arrowsmith, S.J., & Eisner, L. (2006). A technique for identifying microseismic multiplets and application to the Valhall field, North Sea. *Geophysics*, 71, 31-40. DOI: [10.1190/1.2187804](https://doi.org/10.1190/1.2187804)
- Baisch, S., Ceranna, L., & Harjes, H.P. (2008). Earthquake cluster: What can we learn from waveform similarity? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6), 2806-2814. DOI: [10.1785/0120080018](https://doi.org/10.1785/0120080018)

- Bobrov, D., Kitov, I., & Rozhkov, M. (2017). Studying seismicity of the Atlantic Ocean using waveform cross-correlation. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 5-19.
- Bobrov, D., Kitov, I., & Zerbo, L. (2014). Perspectives of cross-correlation in seismic monitoring at the International Data Centre. *Pure and Applied Geophysics*, 171(3-5), 439-468. DOI: 10.1007/s00024-012-0626
- Bobrov, D.I., Kitov, I.O., Rozhkov, M.V., & Friberg, P. (2016). Towards global seismic monitoring of underground nuclear explosions using waveform cross correlation. Part I: Grand master events. *Seismic Instruments*, 52(1), 43-59. DOI: 10.3103/S0747923916010035
- Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. (1996). Protocol to the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Available at: [https://www.ctbto.org/sites/default/files/Documents.treaty\\_text\\_Russian.pdf](https://www.ctbto.org/sites/default/files/Documents.treaty_text_Russian.pdf)
- Coyne, J., Bobrov, D., Bormann, P., Duran, E., Grenard, P., Haralabus, G., Kitov, I., & Starovoi, Yu. (2012). Chapter 15: CTBTO: Goals, networks, data analysis and data availability. In Bormann, P. (Ed.). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*. IASPEI. Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Publ. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch15
- CTBTO. (2025). *Resources. For researchers and experts. vDec*. Received from <https://www.ctbto.org/resources/for-researchers-experts/vdec>
- Evernden, J.F., Archambeau, C.B., & Cranswick, E. (1986). An evaluation of seismic decoupling and underground nuclear test monitoring using high-frequency seismic data. *Reviews of Geophysics*, 24(2), 143-215.
- Flinn, E.A., & Engdahl, E.R. (1974). Seismic and geographical regionalization. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(3), part 2, 771-993.
- Gabsatarova, I.P. (2014). [Instrumental parameters of Kurchaloi earthquake October 11, 2008 with  $K_R=14.5$ ,  $M_w=5.8$ ,  $I_0=7-8$  (Chechen Republic)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2008] (pp. 433-447). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: UDUBWN
- Gibbons, S., & Ringdal, F. (2004). *A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions. NORSAR Scientific Report 2-2004* (pp. 41-50). DOI: 10.21348/p.2004.0005
- Gibbons, S., Kvaerna, T., & Ringdal, F. (2005). Monitoring of seismic events from a specific source region using a single regional array: a case study. *Journal of Seismology*, 9(3), 277-294. DOI: 10.1007/s10950-005-5746-7
- Gibbons, S.J., & Ringdal, F. (2006). The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International*, 165(1), 149-166. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x
- Gibbons, S.J., Sørensen, M.B., Harris, D.B., & Ringdal, F. (2007). The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multi-channel waveform correlation at regional distances. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 160(3-4), 285-309. DOI: 10.1016/j.pepi.2006.11.008
- Granville, J.P. (2005). Understanding the differences between three teleseismic mb scales. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5), 1809-1824. DOI: 10.1785/0120040159
- Granville, J.P., Kim, W.-Y., & Richards, P.G. (2002). An assessment of seismic body wave magnitudes published by the Prototype International Data Centre. *Seismological Research Letters*, 73(6), 893-906. DOI: 10.1785/gssrl.73.6.893
- Israelsson, H. (1990). Correlation of waveforms from closely spaced regional events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6B), 2177-2193. DOI: 10.1785/BSSA08006B2177
- Joswig, M. (1990). Pattern recognition for earthquake detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(1), 170-186. DOI: 10.1007/978-3-642-73015-3\_65
- Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2025). [Quality assurance of seismological bulletins using waveform cross-correlation]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(1), 26-41. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2025.1.02. EDN: GHCZUX
- Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2025). [Recovery of the aftershock sequence of the North Atlantic earthquake using waveform cross-correlation]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 16(4), 838. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2025-16-4-0838. EDN: ZSEVLX
- Kitov, I.O., Sanina, I.A., Nepeina, K.S., & Konstantinovskaya, N.L. (2015). Using a matched-filter technique at the Mikhnevo small-aperture seismic array. *Seismic Instruments*, 51(3), 191-200. DOI: 10.3103/S0747923915030056
- Kitov, I.O., Sanina, I.A., Volosov, S.G., & Konstantinovskaya, N.L. (2025). The 20th Anniversary of the Installation of the small-aperture Mikhnevo array for monitoring induced seismicity. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 61(2), 288-304. DOI: 10.1134/S1069351325700181
- Kitov, I.O., Sanina, I.A., & Gabsatarova, I.P. (2026). [Comparison of the catalogs of the GS RAS, the ISC, the IDC, and the catalog of aftershocks of Kurchaloi earthquake of October 11, 2008, obtained using the cross-correlation method]. In *Repozitorii geofizicheskikh dannykh* [Repository of geophysical data]. Obninsk, Russia: GS RAS. Retrieved from <http://repo.gsras.ru/repository/workspace#392755b0-72fb-4c95-94ca-eed689015d83>. (In Russ.). DOI: 10.35540/gsras.rjs.2026.2.01

- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspperimental'naiia seismika. Trudy IFZ AN SSSR N 32(199)* [Experimental seismic. Proceedings of the IPE AS USSR N 32(199)] (pp. 88-93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Richards, P., Waldhauser, F., Schaff, D., & Kim, W.-Y. (2006). The applicability of modern methods of earthquake location. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2-3), 351-372. DOI: 10.1007/s00024-005-0019-5
- Schaff, D., & Richards, P. (2004b). Lg-wave cross correlation and double-difference location: Application to the 1999 Xiuyan, China, sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(3), 867-879. DOI: 10.1785/0120030136
- Schaff, D., & Richards, P. (2011). On finding and using repeating events in and near China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(B3), B03309. DOI: 10.1029/2010JB007895
- Schaff, D., & Richards, P. (2004a). Repeating seismic events in China. *Science*, 303(5661), 1176-1178. DOI: 10.1126/science.1093422
- Schaff, D.P., & Waldhauser, F. (2005). Waveform cross correlation based differential travel-time measurements at the northern California Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2446-2461. DOI: 10.1785/0120040221
- Schaff, D.P., Bokelmann, G.H.R., Ellsworth, W.L., Zankerka, E., Waldhauser, F., & Beroza, G.C. (2004). Optimizing correlation techniques for improved earthquake location. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(2), 705-721. DOI: 10.1785/0120020238
- Schweitzer, J., Fyen, J., Mykkeltveit, S., Gibbons, S.J., Pirli, M., Kühn, D., & Kvaerna, T. (2012). Chapter 9: Seismic arrays. In *Bormann, P. (Ed.). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). IASPEI*. Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Publ. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP2\_ch9
- Selby, N.D. (2010). Relative locations of the October 2006 and May 2009 DPRK announced nuclear tests using International Monitoring System seismometer arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1779-1784. DOI: 10.1785/0120100006
- Sultanov, D.D. (1998). [The role of G.A. Gamburtsev in the creation of a seismic method for monitoring nuclear tests]. In *Grigorii Aleksandrovich Gamburtsev (1903–1955). Vospominaniia, ocherki, stat'i. Otv. red. V.N. Strakhov* [Grigory Aleksandrovich Gamburtsev (1903–1955). Memoirs, essays, articles. Resp. ed. V.N. Strakhov] (pp. 188-193). Moscow, Russia: UIPE RAS Publ. (In Russ.). EDN: RXAYJB
- T07\_North\_Caucasus\_2008.xls. (2014). In *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes of the Northern Eurasia, 2008]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). Appendix on CD-ROM.
- Turin, G.L. (1960). An introduction to matched filters. *IRE Transactions on Information Theory*, 6, 311-329. DOI: 10.1109/TIT.1960.105

### Information about authors

**Kitov Ivan Olegovich**, Dr., Leading Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: ikitov@mail.ru

**Sanina Irina Alfatovna**, Dr., Chief Researcher of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences (IDG RAS), Moscow, Russia. E-mail: irina@idg.ras.ru

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