

УДК 550.34

Проверка качества сейсмологических бюллетеней с использованием кросс-корреляции волновых форм

© 2025 г. И.О. Китов, И.А. Санина

ИДГ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 24.01.2025 г.

Аннотация. Кросс-корреляция волновых форм (ККВФ) существенно улучшает обнаружение, ассоциацию регулярных фаз и формирование гипотез сейсмических событий в Международном центре данных (МЦД) Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ). В последовательностях афтершоков малых, средних и очень больших землетрясений было обнаружено от 50% до 80% событий, которые по своим параметрам должны были войти в стандартный бюллетень явлений (СБЯ) МЦД. Несколько процентов афтершоков, опубликованных в СБЯ, не были обнаружены с помощью кросс-корреляции, даже когда сигналы от всех других событий в тех же последовательностях использовались в качестве шаблонных. В данной работе изучаются случаи отсутствия подтверждения кросс-корреляцией событий МЦД, полученных опытными аналитиками в рутинном интерактивном анализе. В качестве референтных при сравнении бюллетеней ККВФ и МЦД используются региональные каталоги, которые обычно включают афтершоки с магнитудами до 2.0. Поскольку разрешение региональных сетей по крайней мере на одну единицу магнитуды лучше, события СБЯ, пропущенные в соответствующих региональных каталогах, вероятно, могут рассматриваться как ложные или существенно неточные. События сравниваются по времени в источнике и местоположению, поскольку региональные сети и Международная система мониторинга используют разные сейсмические станции, и прямое сравнение вступлений фаз невозможно. Изучены две афтершоковые последовательности: после землетрясения 20 марта 2008 г. в Китае с $m_b(\text{МЦД})=5.4$ и события 20 мая 2012 г. в Италии (Л'Аквила) с $m_b(\text{МЦД})=5.3$. В целом, большинство событий, не найденных в СБЯ с помощью ККВФ, отсутствуют в соответствующих региональных каталогах. В то же время эти каталоги подтверждают большинство дополнительных событий СБЯ, найденных только с помощью кросс-корреляции. Это наблюдение подтверждает выводы о высокой статистической надёжности событий, построенных с помощью ККВФ, а также возможности расширения СБЯ на 50 и более процентов верными по критериям МЦД событиями.

Ключевые слова: афтершоки, сейсмический мониторинг, кросс-корреляция волновых форм, групповые станции, Международный центр данных, Международная система мониторинга, ОДВЗЯИ.

Для цитирования: Китов И.О., Санина И.А. Проверка качества сейсмологических бюллетеней с использованием кросс-корреляции волновых форм // Российский сейсмологический журнал. — 2025. — Т. 7, № 1. — С. 26–41. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.02>. — EDN: GNCZUX

Введение

Первичная сеть сейсмических станций Международной системы мониторинга (МСМ) определяет возможности системы проверки Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), связанные с мониторингом подземных ядерных взрывов (ПЯВ). В окончательном виде первичная сейсмическая сеть должна состоять из 50 станций, которые распределены по континентам (за исключением станции РРТ, Французская Полинезия) для обе-

спечения, по возможности, равномерного применения режима сейсмического мониторинга. Станции первичной сейсмической сети МСМ распределены таким образом, чтобы по крайней мере три из них находились в пределах 2000 км от любой точки на поверхности континентов. Это даёт возможность использовать высокочастотные региональные фазы для мониторинга проведения взрывов с мерами сокрытия, например, сейсмического декаплинга с помощью большой подземной полости [Evernden *et al.*, 1986].

Использование в МСМ станций, уже длительное время работающих к началу её создания, привело к некоторому перекосу в плотности распределения по территории Евразии. Так, в западноевропейской части находятся пять высокочувствительных групповых станций первичной сети МСМ (ARCES, ESDC, FINES, GERES, NOA). На остальной территории Евразии в настоящее время работают десять групповых станций первичной сети (AKASG, BRTR, CMAR, KSRS, MJAR, MKAR, PDYAR, PETK, SONM, USRK, ZALV) и две трёхкомпонентные (KBZ, NRIK). Историческая неравномерность распределения станций определяет различие в чувствительности и разрешающей способности сети МСМ. На севере Европы МСМ обнаруживает события с магнитудой до 2.5–3.0. В некоторых областях Северной Азии порог обнаружения событий может быть на единицу магнитуды выше.

Есть две важные характеристики сейсмического мониторинга [Kværna *et al.*, 2007]. Порог обнаружения МСМ определяется минимальной магнитудой ПЯВ в заданном регионе, который может быть обнаружен тремя или более станциями МСМ с заранее определёнными уровнями невязок времени пробега, а также азимута и медленности. Порог мониторинга определяет крупнейшее событие в заданном регионе, которое может быть пропущено МСМ [Woessner, Wiemer, 2005]. Оба порога зависят от времени из-за сильных колебаний микросейсмического шума и периодов, когда станции не работают и/или не передают данные в МЦД по различным причинам.

Стандартный бюллетень явлений (СБЯ) МЦД содержит сейсмические события, имеющие заранее определённые статистические свойства, полностью определяемые количественными параметрами ассоциированных с этими событиями регулярных фаз [Coyne *et al.*, 2012]. В МЦД применяются стандартные методы обнаружения сигналов с помощью энергетических детекторов. Основным параметром для обнаружения является пороговое значение отношения среднеквадратичных амплитуд в коротком (сигнал) и длинном (шум) временных окнах. Параметры обнаруженных сигналов, особенно многочисленных слабых сигналов, не позволяют достаточно точно определить их источники. В результате созданные в автоматическом режиме обработки сейсмических данных гипотезы событий могут находиться на расстояниях до 180° от их реальных источников и окончательных гипотез событий в СБЯ, созданных в интерактивном режиме. На рис. 1 представлено распре-

деление плотности вероятности (pdf) расстояния между автоматически созданными гипотезами событий и их окончательными решениями, полученными аналитиками МЦД. Примерно 75% событий в СБЯ имеют предварительное автоматическое решение. Остальные построены аналитиками с нуля или с использованием альтернативных автоматических решений [Coyne *et al.*, 2012]. Из автоматического бюллетеня только ~50% преобразуются в события МЦД. Более 90% решений находятся на расстоянии менее 7° друг от друга, но есть решения на расстоянии порядка 180°. Существуют и количественные ограничения, связанные с интерактивной обработкой автоматического бюллетеня событий. Плотность потока создаваемых в автоматическом режиме гипотез событий не должна превышать возможностей группы аналитиков в МЦД. Недостатки автоматического и интерактивного режимов обработки отражаются в пропуске множества событий [Bobrov *et al.*, 2013; 2014; 2017], а также в формировании ложных гипотез событий, которые попадают в СБЯ и искажают статистические оценки мониторинга.

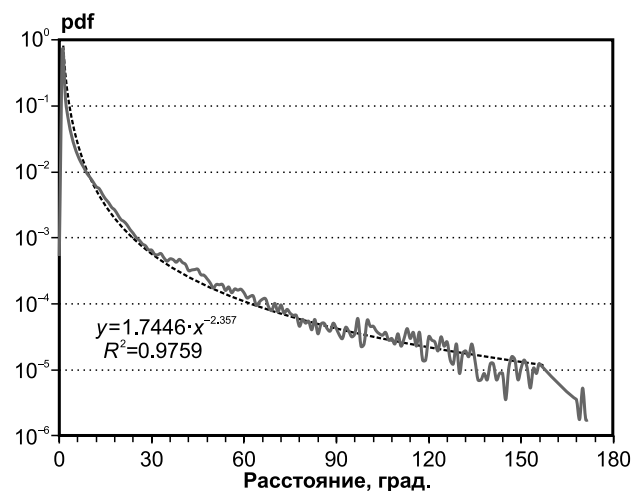


Рис. 1. Распределение плотности вероятности (pdf) расстояния (в градусах) между событием в СБЯ и автоматической гипотезой, из которой оно было создано аналитиком МЦД

Стандартный бюллетень явлений МЦД является высококачественным научно-техническим продуктом, которым пользуется широкая сейсмологическая общественность, так как СБЯ полностью воспроизводится Международным сейсмологическим центром (МСЦ) с небольшой задержкой менее трёх месяцев. Для целей мониторинга режима ДВЗЯИ даже небольшие недостатки в СБЯ создают высокий риск, связанный с пропуском потенциальных нарушений

ДВЗЯИ. Независимое исследование качественных и количественных характеристик сейсмического бюллетеня МЦД способствует повышению его полноты, согласованности и точности. Полнота бюллетеня, то есть отсутствие пропущенных событий в широком диапазоне магнитуд – важный параметр для мониторинга подземных испытаний, используемый в оценке вероятности ложноотрицательного результата автоматического интерактивного анализа данных. Согласованность относительного местоположения и магнитуд событий в бюллетене непосредственно связана с точностью и погрешностью оценки параметров сигналов (амплитуда, период, время вступления, азимут и медленность) и источников (координаты гипоцентра и время в источнике). Именно эти параметры могут быть значительно более точно измерены методами, основанными на кросс-корреляции волновых форм [Israelson, 1990; Joswig, Schulte-Theis, 1993; Withers et al., 1999; Gibbons, Ringdal, 2004; 2006; Gibbons et al., 2007; Schaff, Richards, 2004; 2011; Waldhauser, Schaff, 2008; Schaff, Waldhauser, 2010; Bobrov et al., 2014; 2016a; 2016b; Kvarna et al., 2023; Адушкин и др., 2025; Китов и др., 2025].

В данной работе исследуется полнота, согласованность и точность бюллетеня МЦД на примерах афтершоковых последовательностей землетрясений средней магнитуды, произошедших в Китае и в Италии, в зонах, известных своей относительно высокой исторической сейсмичностью. Сравнение СБЯ с автоматическим кросскорреляционным бюллетенем (АККБ), полученным прототипом полного цикла обработки данных Международной системы мониторинга, позволяет оценить потенциал данных МСМ по отношению к уточнению и повышению качества СБЯ с применением новых методов детектирования и ассоциации фаз. Сравнение двух бюллетеней МЦД, стандартного и кросскорреляционного, с региональными каталогами сейсмических событий, основанными на данных множества станций на небольших расстояниях от зон афтершоков, позволяет оценить параметры источников, которые не могут быть найдены МСМ. Оценки количественных и качественных характеристик бюллетеней МЦД в районах с хорошо изученной независимыми сейсмологическими службами сейсмичностью можно перенести на районы, в которых региональные сети отсутствуют или недостаточно развиты [Ringler et al., 2022]. Обычно это районы со слабой естественной сейсмичностью.

Данные и метод

Определяющие параметры вступлений регулярных фаз, составляющих событие в СБЯ МЦД, должны пройти ряд строгих количественных тестов, известных как критерии определения событий (КОС) [Coyne et al., 2012]. Эти тесты включают отклонение станционной магнитуды от усреднённого по сети значения, а также зависящие от фазы и типа станции (групповая или трёхкомпонентная) ограничения на невязки времени пробега, азимута на источник и медленности, соответствующих местоположению и времени в источнике для данной гипотезы события. Исторический набор данных, собранный МЦД с момента начала его работы в 2001 г. до середины 2024 г., содержит более 10 млн сейсмических фаз и около 800 тыс. событий. Большинство событий происходит в одних и тех же сейсмически активных зонах или на постоянно действующих карьерах и, таким образом, повторяется. Кросс-корреляцию волновых форм (ККВФ) для повторяющихся событий, расположенных близко в пространстве, можно использовать не только для поиска новых событий МЦД, но и для проверки качества исторических фаз и улучшения бюллетеней и каталогов [Bobrov et al., 2014]. Перед началом полной ретроактивной обработки базы данных нужно создать общую процедуру и протестировать её на нескольких простых случаях. Последовательности афтершоков относительно небольших континентальных землетрясений являются естественным выбором. Период времени обработки ограничен несколькими днями, и региональные бюллетени с высоким разрешением могут подтвердить результаты работы и МЦД, и ККВФ.

Выбрано две последовательности афтершоков с близкими характеристиками – землетрясение 20 марта 2008 г. в Китае с $m_b(\text{МЦД})=5.4$ и событие 20 мая 2012 г. в Италии с $m_b(\text{МЦД})=5.3$. Постсейсмическая активность, связанная с событием в Китае, была тщательно проанализирована в работе [Bobrov et al., 2014], где в основном рассматривалась проблема обнаружения новых для МЦД событий, удовлетворяющих КОС. Это исследование показало, что множество событий было пропущено в МЦД и на основе кросскорреляционных вступлений аналитиками МЦД было добавлено несколько десятков событий СБЯ. В то же время, примерно десять из 141 афтершока показали аномально низкий уровень кросс-корреляции с другими афтершоками на тех же станциях группирования МСМ. Бюллетень МЦД для разрушительного события в Италии

включает всего 83 афтершока, тогда как региональные сети сообщили о более чем тысяче.

Нормализованная кросс-корреляционная функция используется для расчёта коэффициента кросс-корреляции (СС) на каждом отдельном канале групповой станции. Кросс-корреляция рассчитывается между шаблонным сигналом и непрерывной записью [Bobrov *et al.*, 2014].

Произведение длительности шаблонного сигнала и ширины полосы частот, где спектр шаблонного сигнала выше микросейсмического шума, играет ключевую роль в кросс-корреляции сейсмических сигналов, поскольку оно определяет уровень разрешения [Van Trees, 1968]. Все короткие сейсмические сигналы в узких частотных диапазонах похожи (для очень узкого частотного диапазона они близки к сегментам синусоидальной функции) и хорошо коррелируют друг с другом независимо от их происхождения и пути распространения. Более длинные сигналы, измеренные на широкополосных каналах, демонстрируют гораздо более высокий уровень сложности и хорошо коррелируют между собой только тогда, когда генерируются похожими и близкими в пространстве источниками. Для слабых сигналов абсолютный уровень СС даже для очень близких в пространстве событий зависит от уровня микросейсмического шума. Перед использованием СС в детекторе вместо оригинальных сейсмограмм необходимо улучшить процедуру обнаружения. Существует множество возможностей, и, вероятно, самая простая из них — энергетический детектор *STA/LTA*, который уже реализован в МЦД для сейсмических сигналов. Этот детектор основан на краткосрочном среднем (*STA*) и долгосрочном среднем (*LTA*), которые вычисляются рекурсивно с использованием ранее вычисленных значений *STA* [Coynne *et al.*, 2012]. К многоканальным временным рядам кросс-корреляции также применяется ФК-анализ [Адушкин и др., 2016]. Это позволяет значительно улучшить различение допустимых и недопустимых сигналов благодаря чувствительности корреляции к расстоянию между событиями, нормализации амплитуд всех трасс и эффективному подавлению шума. Кросс-корреляция учитывает отклонение фактического времени вступления на отдельных каналах от их теоретических значений. Для метода направленного приёма эти отклонения могут вызывать потери мощности в суммарной трассе, когда реальные времена вступления сигналов на разные датчики группы не идеально синхронизированы с теоретическими временными сдвигами. Стандартный ФК-анализ использу-

ется для формальной оценки (псевдо-) азимута и медленности с использованием временных рядов СС для всех сигналов, полученных с помощью кросс-корреляции. Для искомым сигналов эти оценки очень близки к теоретическим значениям, связанным с путём источника/приёмника. Другие сигналы характеризуются более высокой неопределённостью в оценках азимута/медленности, поскольку их временные ряды СС являются просто шумом для направления прихода волны от искомого источника. В результате эта процедура позволяет эффективно отбраковывать вступления сигналов от удалённых событий, полученных кросс-корреляцией из-за ненулевой боковой чувствительности сейсмических станций группирования, представляющих собой одну из разновидностей фазированной антенны.

Землетрясение 20 марта 2008 г. в Китае

Крупное землетрясение в Китае, которое произошло 20 марта 2008 г. в 22:32:56 (UTC), было выбрано для демонстрации работоспособности ККВФ. Это землетрясение было обнаружено многими основными и вспомогательными станциями МСМ. Местоположение главного события с магнитудой m_b (МЦД)=5.4 было определено аналитиками МЦД по временам пробега ассоциированных с ним сейсмических фаз. Событие имело короткую, но заметную последовательность афтершоков, также зарегистрированную МСМ. В СБЯ имеется 142 события, включая главный толчок, в течение пяти дней после землетрясения и в пределах 100 км от его эпицентра. Для изученной последовательности афтершоков тринадцать групповых станций первичной сети МСМ обнаружили *P*-волны на телесеизмических расстояниях: AKASG, ARCES, CMAR, FINES, GERES, KSRS, MJAR, NOA, PETK, SONM, WRA, YKA и ZALV. Есть одна станция на расстоянии меньше 18° — MKAR. Она регулярно сообщала об обнаружении фазы *Pn*.

Афтершоки, приведённые в СБЯ, проверялись на внутреннюю согласованность с точки зрения кросс-корреляции. Из афтершоков выбирались лучшие по качеству сигналов на ассоциированных станциях для потенциального использования как событий, создающих шаблоны волновых форм для ККВФ, которые называются мастер-событиями (МС). В результате обработки данных с помощью ККВФ за тот же период времени был создан автоматический бюллетень событий (АККБ). В нём принимают участие только вступления, найденные кросс-корреляцией с МС, относящимися к землетрясению

в Китае. Оказалось, что в СБЯ есть афтершоки, которые показывают низкий уровень кросс-корреляции с любым другим афтершоком в последовательности. Такие события должны быть проверены вручную на согласованность определяющих параметров и/или на неправильную ассоциацию фаз. Такая проверка согласованности сигналов близких событий может быть включена и в интерактивную обработку МЦД.

Существует две основные причины, по которым вступление в СБЯ не может быть найдено методом ККВФ с шаблонами на станциях, ассоциированных с мастер-событиями. Иногда реальное вступление, обнаруженное путём кросс-корреляции, находится за пределами 4-секундного окна от вступления в СБЯ. Именно такая разница во временах вступления в СБЯ и АККБ определяет понятие «кросс-корреляция нашла вступление в СБЯ». Слабые мелкофокусные события характеризуются медленным ростом амплитуды сигнала на региональных, а иногда и на телесеизмических станциях. В этом случае повышается вероятность обнаружения стандартным энергетическим детектором более поздней фазы в коде вступающей *P*-волны. В некоторых случаях пропущенное ККВФ вступление является неправильно ассоциированной в СБЯ фазой от далёкого события и, таким образом, не может хорошо коррелировать ни с одним из использованных шаблонных сигналов. Важно отметить, что в обоих случаях соответствующие события СБЯ формально не противоречат правилам и рекомендациям МЦД, поскольку все определяющие параметры находятся в пределах погрешностей, принятых для невязок времени пробега, азимута и медленности. Вероятность создания ложных событий невелика, но это источник, создающий риски для сейсмического мониторинга в рамках ДВЗЯИ.

Для постсейсмической эмиссии исследуемого землетрясения в Китае количество событий СБЯ, обнаруженных любым выбранным мастер-событием, почти постоянно для магнитуд мастер-событий от 4.1 до 5.05 [Bobrov *et al.*, 2014]. Ниже 4.0 это количество испытывает почти линейный спад с магнитудой. Из пяти событий с магнитудой ниже 3.0 три нашли только себя (автокорреляция). Другие четыре события, которые могут найти с помощью ККВФ только себя, имеют m_b (МЦД), равную 3.11, 3.16, 3.49 и 4.26. На рис. 2 показаны сигналы четырёх из этих семи событий. В качестве примера хорошего слабого афтершока на рис. 3 показано событие с магнитудой 3.11, которое обнаруживает много других афтершоков с помощью ККВФ. Также есть

пять МС, которые нашли только одно событие СБЯ в дополнение к автокорреляции. Девять афтершоков СБЯ вообще не найдены с помощью кросс-корреляции с МС, причём два из них находятся в наборе из семи МС, которые могут найти только себя. Для разных МС временные сдвиги между отдельными каналами на данной станции МСМ могут различаться из-за разницы в пути распространения источник-станция. Важно отметить, что для двух событий коэффициент кросс-корреляции несимметричен, когда МС и искомое событие меняются местами. Как следствие, МС может найти другое событие, и при этом быть само пропущено найденным событием в качестве МС. Всего есть семь афтершоков, которые бесполезны как МС, и семь не найденных ККВФ событий. Также есть пять афтершоков СБЯ, которые были найдены только одним МС.

В этой работе проиллюстрирован тот факт, что СБЯ может содержать несколько процентов событий, вероятно, построенных с использованием неподходящих вступлений. На рис. 2 показано, что события низкой магнитуды, вероятно, включают одно или два слабых вступления, не связанных с последовательностью афтершоков и, таким образом, не коррелирующих с другими афтершоками на этих станциях. Станция МКАР является наиболее чувствительной в этом случае и обнаруживает большинство реальных сигналов афтершоков в Китае, в то время как ZALV, FINES и YKA могут давать ложные вступления.

МСЦ не предоставляет расширенный бюллетень для этой последовательности на основе региональных станций Китайского центра сейсмологических сетей. Мы обнаружили дополнительные 26 событий, соответствующих принятым в МЦД КОС, для этой последовательности, и только два из них соответствовали событиям в CENC. Это неудивительно, поскольку CENC также не сообщил о 14 событиях МЦД.

Землетрясение 20 мая 2012 г. в Италии

События 20 и 29 мая 2012 г. в Северной Италии были смертоносными и разрушительными. Оба землетрясения с их афтершоками были зарегистрированы региональными сетями, а также многими станциями МСМ. В СБЯ между 20 мая и 1 июня насчитывается 84 события, связанных с постсейсмической активностью в районе землетрясений. За тот же период Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр (EMSC) сообщил о 863 событиях, а Национальный

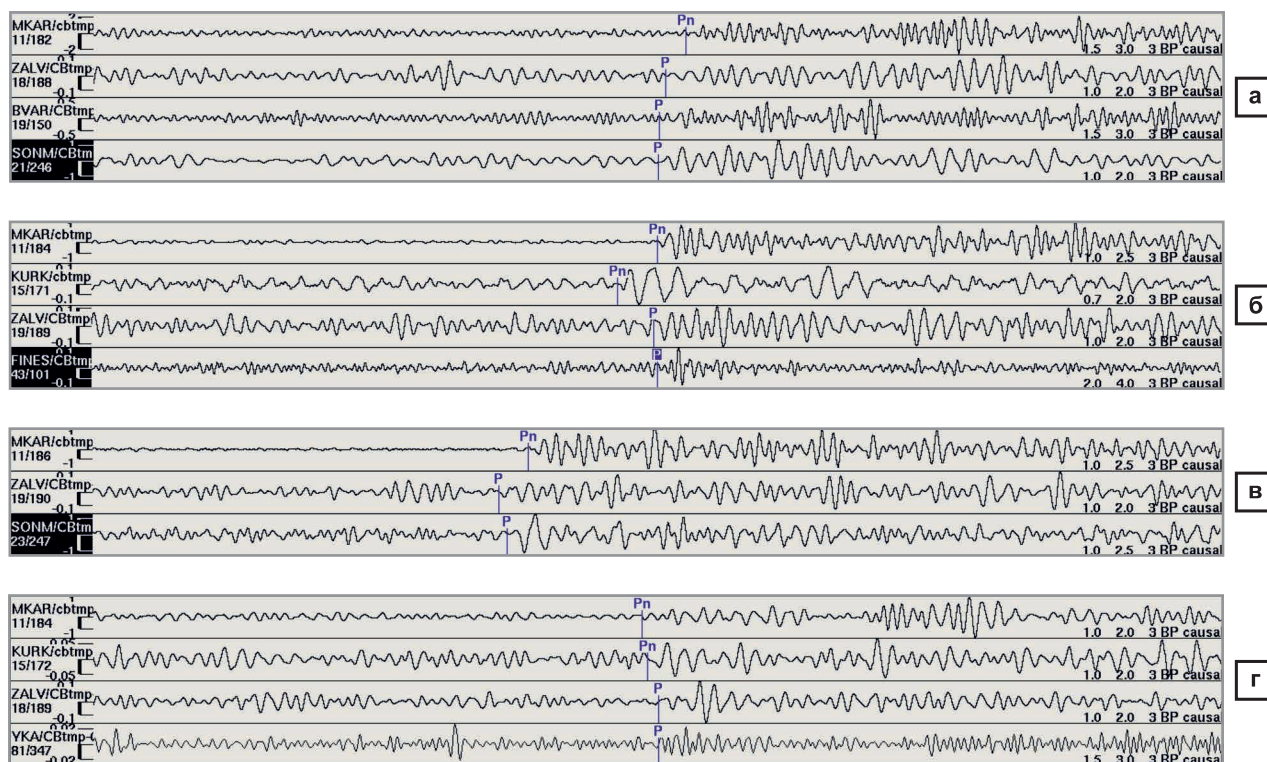


Рис. 2. Волновые формы для четырёх событий с m_b от 2.84 до 4.26, коррелирующие только с собой на трёх или более станциях МСМ:

- а – $ML=3.2$, $m_b=2.8$, $h=0$ км, число ассоциированных с событием станций, $n_{sta}=3$, $\varphi=36.28^\circ N$, $\lambda=81.91^\circ E$;
 б – $ML=3.4$, $m_b=4.3$, $h=0$ км, $n_{sta}=4$, $\varphi=35.54^\circ N$, $\lambda=81.32^\circ E$;
 в – $ML=3.1$, $m_b=3.4$, $h=0$ км, $n_{sta}=3$, $\varphi=35.61^\circ N$, $\lambda=80.77^\circ E$;
 г – $ML=2.9$, $m_b=3.1$, $h=0$ км, $n_{sta}=4$, $\varphi=35.64^\circ N$, $\lambda=81.23^\circ E$

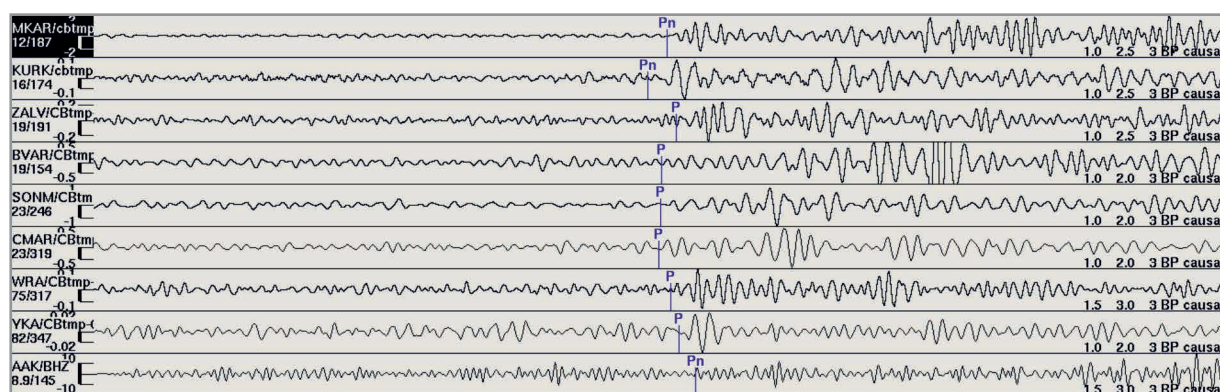


Рис. 3. Волновые формы для события с $m_b=3.11$, коррелирующие с 47 другими афтершоками на трёх или более станциях МСМ

институт геофизики и вулканологии (INGV) – о 1264 землетрясениях, включая два самых крупных события 20 и 29 мая 2012 года. Сейсмологические сети EMSC и INGV способны находить очень слабые события, используя близрегиональные и локальные станции. На рис. 5 показаны местоположения событий в двух региональных каталогах и в СБЯ. Последние в основном расположены к югу от основных зон активности афтер-

шоков, зарегистрированных региональными сетями. Некоторые события МЦД, вероятно, смещены на десятки километров. Это может свидетельствовать об отсутствии качественных вступлений, формирующих эти события.

Для подтверждения приведённых выше результатов о событиях низкого качества с точки зрения кросс-корреляции мы использовали региональный бюллетень, подготовленный Центром

сетей землетрясений Китая (CENC), который доступен через МЦД [Reviewed ISC Bulletin, 2023]. Есть 14 афтершоков СБЯ, о которых не сообщил CENC. Есть 12 афтершоков, о которых сообщил только CENC. Следовательно, оба бюллетеня требуют проверки. Из 14 уникальных событий

МЦД семь характеризуются как имеющие низкую кросс-корреляцию с другими афтершоками. На рис. 4 показаны три афтершока, о которых сообщил только МЦД. Несмотря на магнитуду выше 4.0, два из них имеют плохую корреляцию с другими афтершоками.

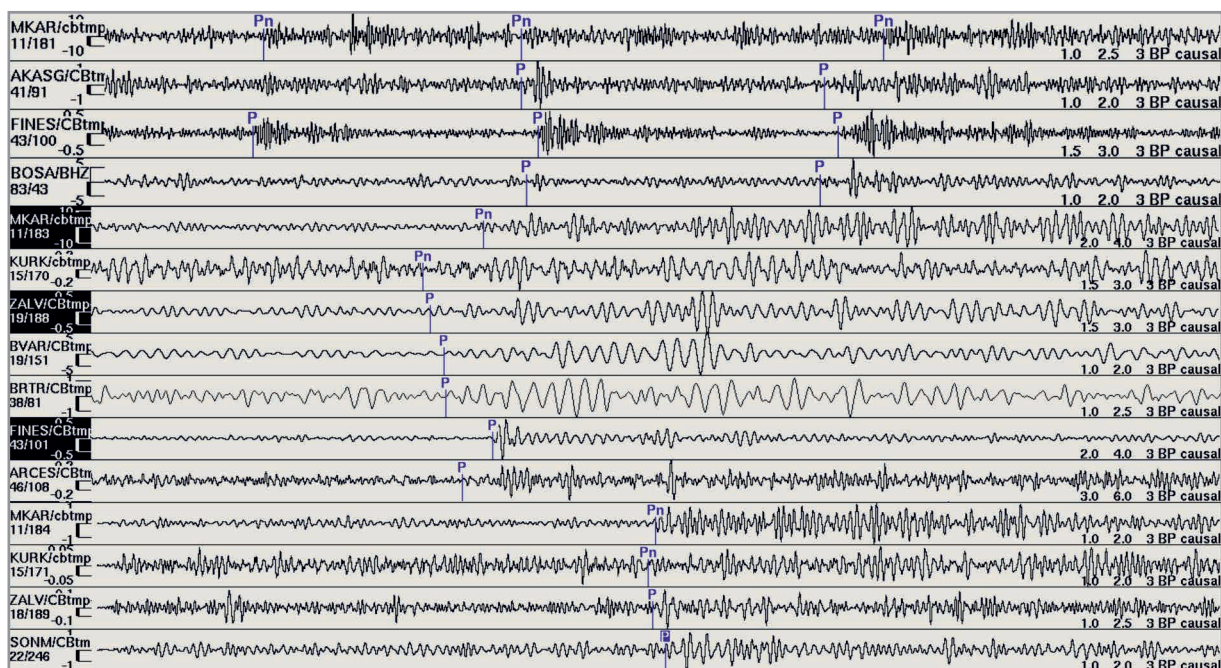


Рис. 4. Три события, о которых сообщил МЦД, но не CENC.

Все они плохо коррелируют с другими афтершоками (на трёх или более станциях), несмотря на относительно высокое видимое качество сигналов

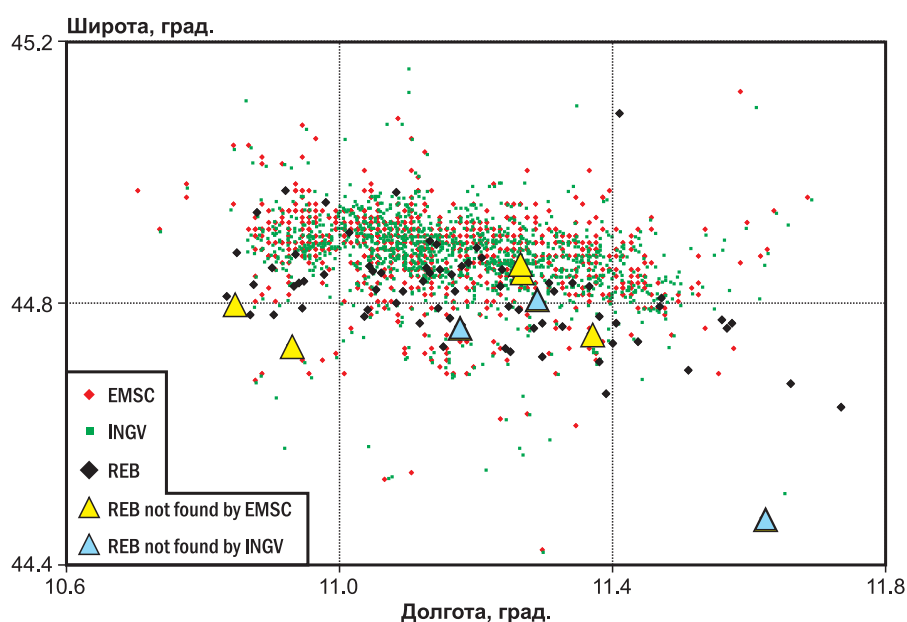


Рис. 5. Расположение событий в бюллетенях EMSC, INGV и МЦД

На рис. 6 приведены частотные распределения магнитуд для трёх агентств, что демонстрирует их относительную разрешающую способность. Также показаны результаты обработки с помощью ККВФ – АККБ. Порог полноты (или порог мониторинга МСМ) каталога МЦД находится между m_b (МЦД) 3.6 и 3.8, и события ниже этой магнитуды, вероятно, менее надёжны. Для INGV и EMSC порог намного ниже, и можно предположить, что все события в МЦД должны быть найдены обоими региональными бюллетенями. Сейсмические станции, составляющие региональные сети, и МСМ различны, и нельзя сравнивать события на уровне вступлений. Поэтому мы считаем одно событие в двух бюллетенях физически одинаковым, когда разница во времени в источнике составляет менее 12 с. Этот порог допускает значительную неточность оценки эпицентров и различие по глубине в пределах земной коры. Разница в 12 с намного меньше, чем разница между последовательными временами в источнике для афтершоков, как показано на рис. 7.

Попарная кросс-корреляция 84 событий МЦД, оценённая только по вступлениям, общим для обоих событий, представлена на рис. 8. Средний коэффициент кросс-корреляции (CC_AVE) определён для вступлений с $|CC| > 0.2$. Большинство из 84 событий в МЦД имеют $CC_AVE < 0.5$. Есть несколько событий без коррелирующих фаз. Эти события следует подробно рассмотреть

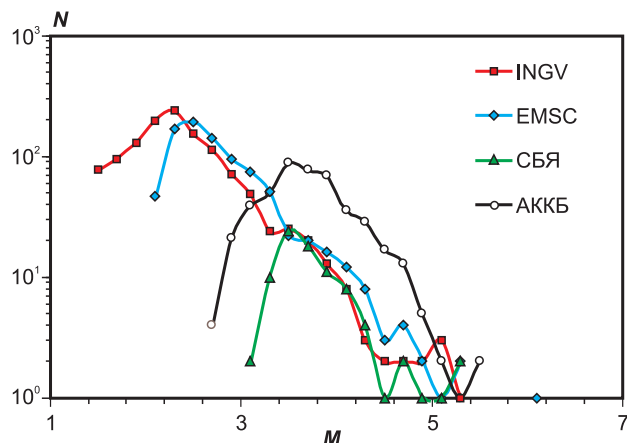


Рис. 6. Частотное распределение магнитуд для EMSC, INGV, СБЯ и АККБ.

Определения магнитуд у этих трёх агентств разные. МЦД имеет тенденцию недооценивать магнитуды объёмных волн для самых крупных событий

в интерактивном режиме и проверить их присутствие в региональных бюллетенях. Число вступлений $|CC| > 0.2$, общих для пары событий, показано на правой панели рис. 8. Наибольшее число станций группирования МСМ, которые обнаружили самые крупные землетрясения, составляет 20. Однако большинство событий имели вступления, коррелирующие с другими событиями/вступлениями, менее чем на пяти станциях. Существует четыре общие причины низкой

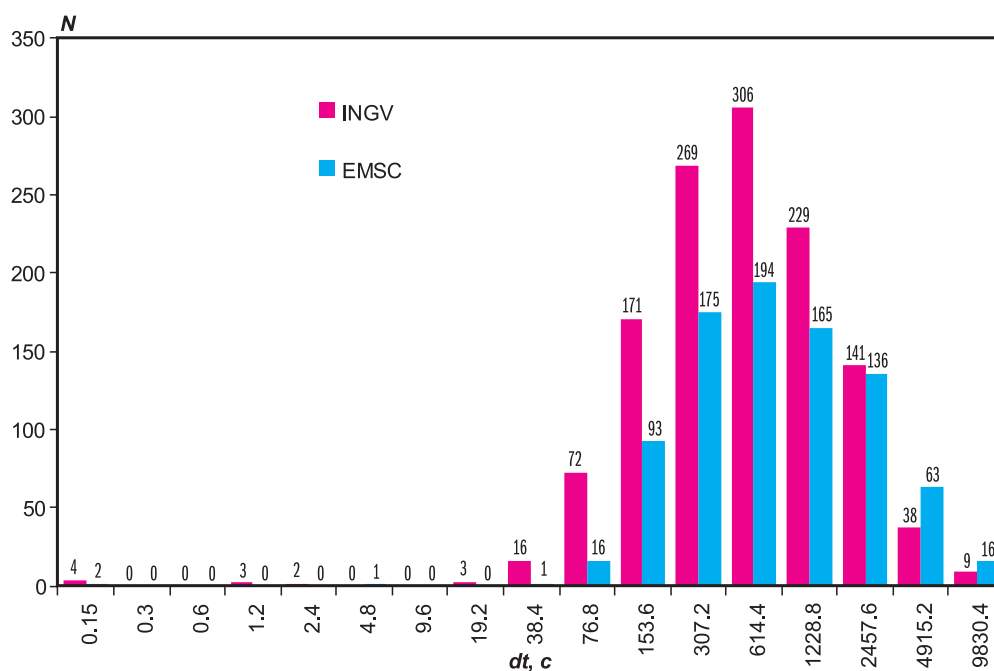


Рис. 7. Частотное распределение разницы между последовательными временами в источнике в бюллетенях EMSC и INGV

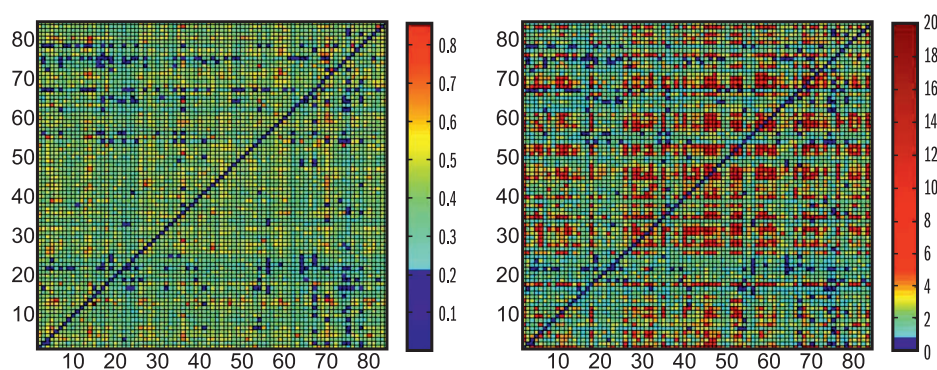


Рис. 8. Средний коэффициент кросс-корреляции (слева) и количество станций с $|CC| > 0.2$ (справа) для всех пар из 84 событий МЦД

Расчёты проводятся только для общих для обоих событий в парах вступлений. Автокорреляция исключена. Несколько событий не имеют общих станций или их сигналы слабо коррелируют

корреляции между вступлениями в СБЯ: слабый сигнал с низким отношением сигнал/шум (SNR), ложная ассоциация вторичных фаз того же сигнала, ложно ассоциированная первичная фаза от другого афтершока и ложно ассоциированная фаза от удалённого события. Первая из них — проблема обнаружения, а остальные три — проблемы ассоциации, которые представляют основной интерес для данного исследования.

На рис. 9 представлена эффективность кросс-корреляции при обнаружении сигналов от афтершоков. В дополнение к попарному расчёту кросс-корреляции фаз в СБЯ с известным временем вступления проводится дополнительная процедура детектирования новых фаз, возможно, пропущенных в СБЯ. Для этого имеющиеся шаблоны МС, у которых в паре нет соответствующего вступления во втором событии, используются для ККВФ с исходными данными в окрестности ожидаемого сигнала от второго события. При успешном обнаружении отсутствующего сигнала во втором событии, это вступление может быть ассоциировано с ним. Например, событие N1 имеет 10 ассоциированных станций, а событие N80 — только пять. Корреляция пяти шаблонов события N1 с волновыми формами в районе ожидаемого времени вступления от события N80 на соответствующих пяти станциях выявило два новых сигнала, которые можно теперь ассоциировать с событием N80 и получить семь ассоциированных станций вместо пяти в СБЯ. Количество добавленных станций приведено для каждой из 84×84 пар на правой панели рис. 9. К некоторым событиям СБЯ было добавлено до четырёх (!) новых вступлений, найденных ККВФ, но чаще всего добавляется одна новая фаза. Так как каждое новое ассоциированное вступление имеет $|CC| > 0.2$,

то возрастает и суммарное значение CC , которое имеет большое значение для статистической значимости гипотезы события. На левой панели рис. 9 показано, что у нескольких событий с новыми ассоциированными вступлениями суммарное значение CC также выросло. Отметим также, что большинство событий МЦД надёжны, и новые вступления не добавляются.

Исходя из предыдущего опыта [Bobrov *et al.*, 2013; 2014; 2016a; 2016b; 2017] ожидается, что ККВФ может добавить от 50 до 80% новых событий к СБЯ, все из которых соответствуют КОС. АККБ был создан с использованием девяти станций MCM (AKASG, BRTR, FINES, GERES, MKAR, SONM, TORD, TXAR, YKA), наиболее чувствительных к афтершокам рассматриваемого землетрясения в Италии. Он включает 453 события, многие из которых построены в кода-волнах более крупных событий, т.е. в пределах 10–20 с от соответствующих первичных вступлений. Эти кода-события намеренно сохраняются для целей мониторинга, несмотря на то, что они вносят значительное смещение в распределение магнитуды на рис. 6. Известно, что одной из эффективных мер сокрытия ПЯВ может быть их проведение в коде сильных землетрясений. События в АККБ для землетрясения в Л'Акуила не проходили интерактивный анализ, и этот бюллетень сравнивается с двумя региональными бюллетенями, чтобы подтвердить действительные и отклонить ложные события.

Сравнение показывает, что восемь из 84 событий МЦД отсутствуют (по критерию времени в источнике как определяющего параметра события) в EMSC (таблица), три из них не были обнаружены INGV (выделены в таблице). На рис. 10 и 11 представлены четыре события СБЯ,

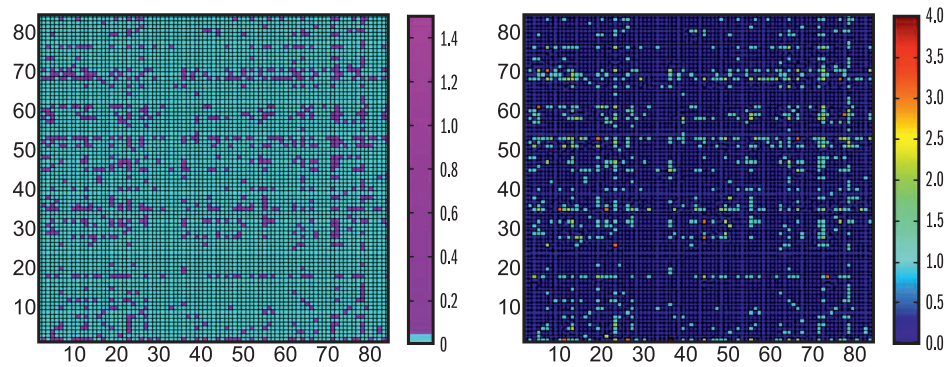


Рис. 9. Изменение суммарного коэффициента кросс-корреляции и количество станций с $|CC| > 0.2$ для 84 событий МЦД

Таблица. События СБЯ, не найденные в двух региональных бюллетенях

orid	Дата, <i>дд.мм.гггг</i>	Время в очаге, <i>чч:мм:сс</i>	Широта φ° , N	Долгота λ° , E	h , км	m_b	n_{def}
8707827	20.05.2012	02:21:03	44.76173	11.17943	33	3.55	15
8706292	20.05.2012	02:21:53	44.73437	10.93219	0	4.03	23
8707913	20.05.2012	02:26:56	44.84797	11.26905	24	3.57	10
8708069	20.05.2012	02:42:21	44.75167	11.37324	25	3.74	13
8708115	20.05.2012	03:01:59	44.80614	11.29062	29	3.29	6
8708909	20.05.2012	03:09:55	44.86047	11.26585	32	3.44	10
8711940	20.05.2012	17:38:13	44.47038	11.62594	0	4.22	13
8737915	29.05.2012	11:00:00	44.79829	10.84797	0	4.41	34

n_{def} — число регулярных сейсмических фаз, включая вторичные, использованных в определении параметров источника.

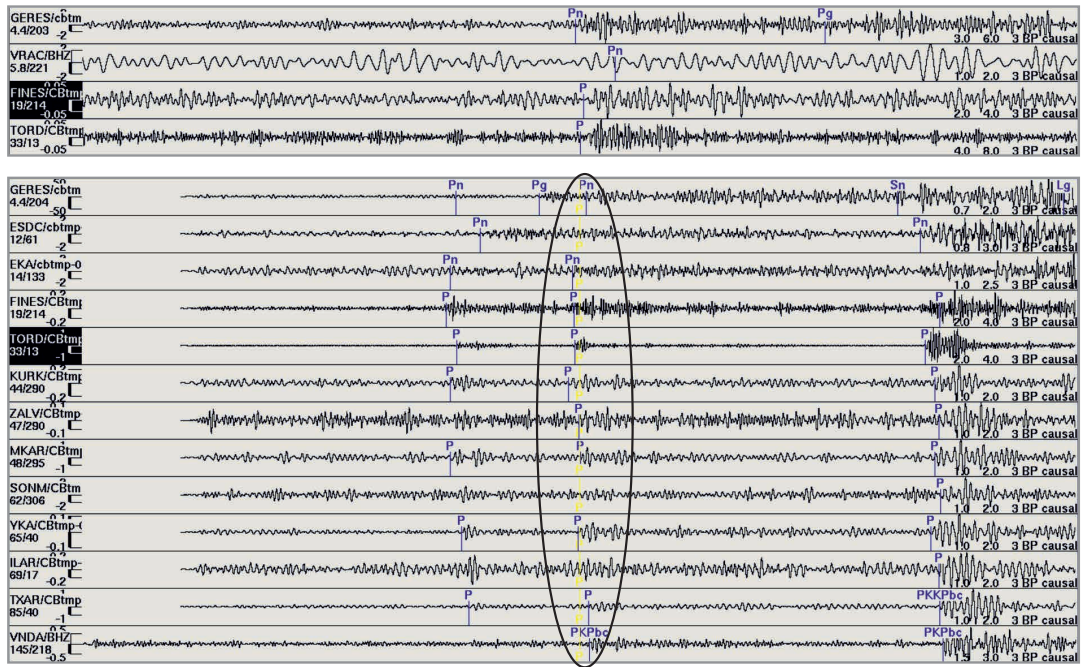


Рис. 10. Два из трёх событий МЦД, не найденных обеими региональными сетями. Верхняя панель: событие orid=8708115; нижняя: orid=8707827.

Всего EMSC не содержит данные о восьми событиях МЦД, три из которых отсутствуют в бюллетене INGV (нет ни одного события в течение 60 с вокруг времени в источнике МЦД). Если данные EMSC брать за основу, то частота ложных событий в МЦД составляет 10%

не найденные в региональных бюллетенях. Три из этих четырёх событий отсутствуют в обоих региональных бюллетенях. На рис. 10 показаны волновые формы двух из трёх событий. Одно отсутствует только в EMSC (рис. 11). Если взять бюллетень EMSC в качестве эталона, то уровень ложных событий в МЦД составляет 10%. Это чрезвычайно большой уровень ложных тревог для автоматической и интерактивной обработки, принятой МЦД. Даже три ложных события из 84 представляют собой проблему для режима мониторинга ДВЗЯИ.

Для обсуждения качества событий МЦД на рис. 10 и 11 и проблем с автоматической и интерактивной обработкой требуется детальное и тщательное исследование. Однако очевидно, что набор определяющих параметров, используемых для ассоциации с событиями СБЯ, не всегда обеспечивает надёжные и уникальные решения. По-видимому, принятие КОС недоста-

точны для однозначного определения события. Кросс-корреляция — это инструмент для обеспечения дополнительной надёжности многих решений, по крайней мере, для повторяющихся событий в последовательностях афтершоков.

Список событий, полученных методом ККВФ (АККБ), включает 453 гипотезы. Они используют вступления на девяти станциях МСМ, полученных с помощью шести мастер-событий, равномерно распределённых по зоне афтершоков. Как и для бюллетеня МЦД, качество АККБ было проверено сравнением с различными бюллетенями. Сначала были сопоставлены АККБ и СБЯ и найдены все события в последнем, кроме трёх. Два из них показаны на рис. 12. Как видно из этого рисунка, из-за низкого качества некоторых вступлений в СБЯ кросс-корреляция может стать решающим фактором для правильного выбора аналитиков МЦД.

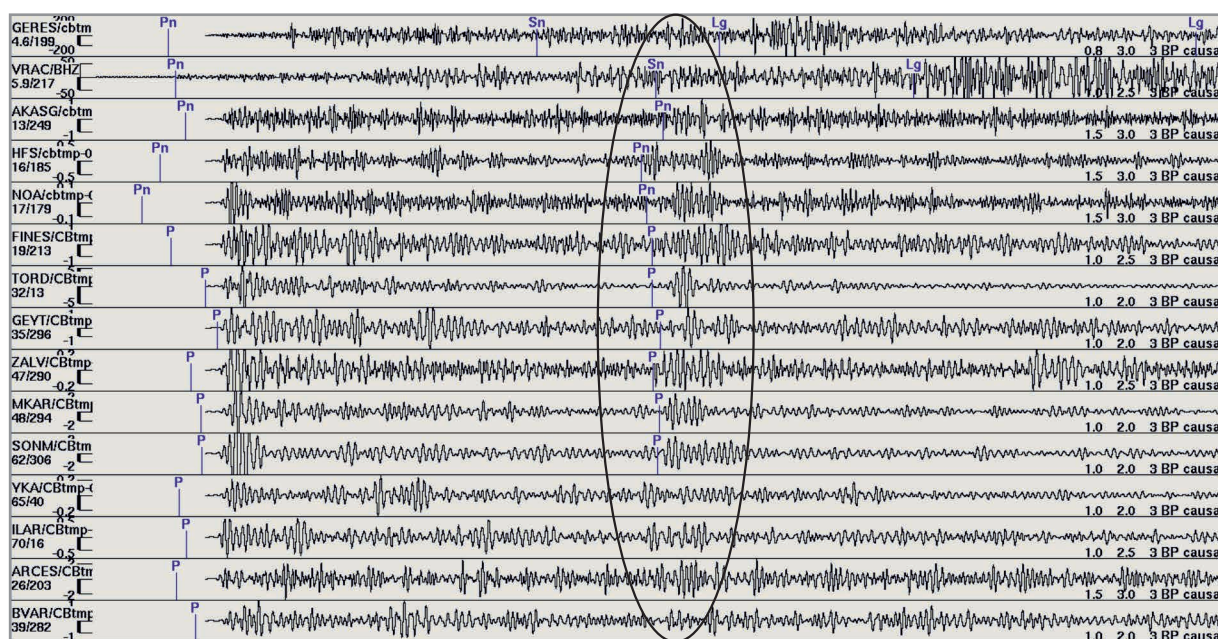


Рис. 11. Событие $\text{orid}=8737915$, не найденное только EMSC

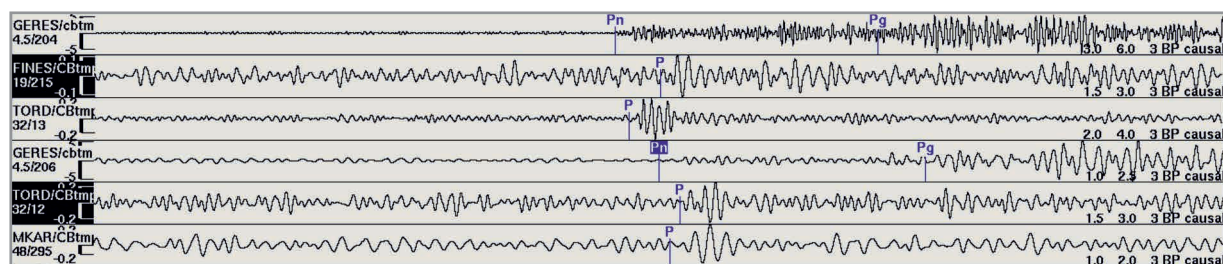


Рис. 12. Два события МЦД ($\text{orid}=8708115$, $\text{orid}=8729068$), не имеющие аналогов в АККБ.

Одна или две из трёх определяющих фаз, вероятно, нечёткие или неверные и имеют $|CC| < 0.2$

В АККБ имеется 141 событие, сопоставимое по времени в источнике (в пределах 12 с) с событиями в бюллетене INGV, и 130 в EMSC. На рис. 13 приведено сравнение частотных распределений магнитуды для двух наборов событий из АККБ, совпадающих с событиями бюллетеней INGV в EMSC. Кривые практически совпадают, кроме области высоких магнитуд. Все события АККБ по определению должны соответствовать КОС и, таким образом, соответствуют требованиям включения в СБЯ. Исходя из этого, АККБ может содержать от 46 до 57 новых событий СБЯ, т.е. МЦД потенциально пропускает от 55 до 68% верных гипотез событий. Эти оценки находятся в пределах ранее оценённого диапазона [Bobrov *et al.*, 2013; 2014; 2017]. Большее количество станций МСМ может увеличить число событий в АККБ, но вклад других станций в СБЯ значительно ниже, и ассоциация слабых, вероятно ложных, вступлений на этих станциях может не только помочь в создании новых гипотез событий, но и значительно увеличить долю ложных гипотез в АККБ.

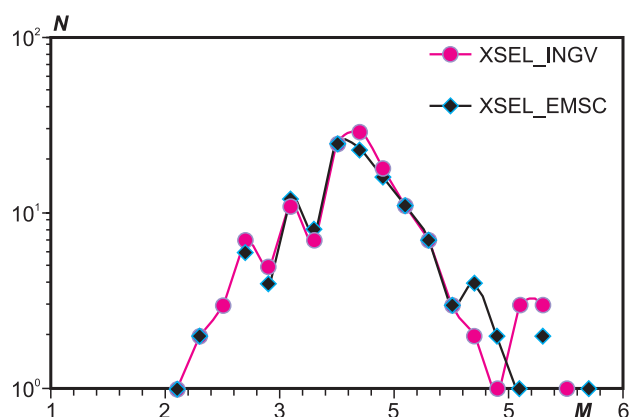


Рис. 13. Частотное распределение магнитуд событий АККБ, сопоставленных в INGV и EMSC
Оценки магнитуд взяты из региональных бюллетеней

Заключение

Ранее было показано, что ККВФ создаёт новый и более эффективный метод обнаружения сигналов и создания гипотез событий путём ассоциации множества кросс-корреляционных вступлений с одним источником, определяемым местоположением и временем в очаге [Bobrov *et al.*, 2013; 2014]. В этом исследовании показано, что ККВФ также полезна для проверки качества событий в бюллетенях. Сравнение СБЯ и АККБ с гораздо более подробными региональными бюллетенями позволяет выявить вероятные статистически ненадёжные события. Уро-

вень ложных событий в МЦД может достигать 10%, что является высоким значением, учитывая усилия опытных аналитиков в интерактивной обработке. Проблема создания ложных событий в МЦД заключается в качестве вступлений с низким SNR. Параметры, определяющие вступление, вероятно, неточные и вводят в заблуждение, когда более поздние фазы из того же события или основные фазы из событий, близких по времени и пространству, неправильно ассоциированы. Кросс-корреляция может играть ключевую роль в оценке качества вступления. Это полезная функция ККВФ, отражающаяся в полноте, согласованности и точности АККБ, который может содержать до 60–80% событий, соответствующих КОС, дополнительно к СБЯ.

Список принятых сокращений

ААКБ – автоматический кросскорреляционный бюллетень.

ДВЗЯИ – Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

ККВФ – кросс-корреляция волновых форм.

КОС – критерии определения события. Набор параметров, используемый МЦД для разделения истинных и ложных событий СБЯ.

МС – мастер-событие, шаблоны волновых форм которого используются на станциях для кросс-корреляции с непрерывной записью.

МСМ – Международная система мониторинга (International Monitoring System – IMS).

МСЦ – Международный сейсмологический центр (International Seismological Centre – ISC).

МЦД – Международный центр данных (International Data Centre – IDC).

ОДВЗЯИ – Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

СБЯ – стандартный бюллетень явлений. Официальное название бюллетеня событий в Международном центре данных Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

CENC – Китайский центр сейсмических сетей (China Earthquake Networks Center).

EMSC – Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр.

INGV – Национальный институт геофизики и вулканологии, Италия.

pdf – распределение плотности вероятности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012200561-3.

Литература

- Адушкин В.В., Китов И.О., Санина И.А. Снижение порога обнаружения сигналов методом кросс-корреляции волновых форм за счёт использования сейсмической группы трёхкомпонентных датчиков // Геофизические исследования. — 2016. — Т. 17, № 1. — С. 5–28. — DOI: 10.21455/gr2016.1-1. — EDN: VPERYN
- Адушкин В.В., Китов И.О., Санина И.А. Афтершоковая эмиссия на полигоне КНДР Пунгери продолжается // Доклады Академии наук. — 2025. (В печати).
- Китов И.О., Санина И.А., Волосов С.Г., Константиновская Н.Л. К 20-летию установки малоапертурной группы «Михнево». Мониторинг наведённой сейсмичности // Физика Земли. — 2025. (В печати).
- Bobrov D., Khukhuudei U., Kitov I., Sitnikov R., Zerbo L. Automated recovery of the 2012 Sumatera aftershock sequence using waveform cross correlation // Journal of Earth Science and Engineering. — 2013. — V. 3. — P. 437–460.
- 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, Is. 3-5. — P. 439–468. — DOI: 10.1007/s00024-012-0626-x
- 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. — 2016a. — V. 52, N 1. — P. 43–59. — DOI: 10.3103/S0747923916010035
- Bobrov D.I., Kitov I.O., Rozhkov M.V., Friberg P. Towards global seismic monitoring of underground nuclear explosions using waveform cross correlation. Part II: Synthetic master events // Seismic Instruments. — 2016b. — V. 52, N 3. — P. 207–223. — DOI: 10.3103/S0747923916030038
- Coyne J., Bobrov D., Bormann P., Duran E., Grenard P., Haralabus G., Kitov I., Starovoi Y. Chapter 15: CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability // New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2) / Ed. P. Bormann. — Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2012. — DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15
- 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. — P. 143–215.
- 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
- Gibbons S., Ringdal F. A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions / NORSAR Scientific Report: Semiannual Technical Summary No. 2. — Kjeller, Norway: NORSAR, 2004. — P. 41–50.
- Gibbons S.J., Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // Geophysical Journal International. — 2006. — V. 165. — P. 149–166. — DOI: 10.1111/J.1365-246X.2006.02865.X
- 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., Schulte-Theis H. Master-event correlations of weak local earthquakes by Dynamic Waveform Matching // Geophysical Journal International. — 1993. — V. 113, N 3. — P. 562–574. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1993.tb04652.x
- Kværna T., Harris D.B., Näsholm S.P., Köhler A., Gibbons S.J. Tracking aftershock sequences using empirical matched field processing // Geophysical Journal International. — 2023. — V. 235, N 2. — P. 1183–1200. — DOI: 10.1093/gji/ggad297
- Kværna T., Ringdal F., Baadshaug U. North Korea's nuclear test: The capability for seismic monitoring of the North Korean test site // Seismological Research Letters. — 2007. — V. 78, N 5. — P. 487–497. — DOI: 10.1785/gssrl.78.5.487
- Reviewed ISC Bulletin // International Seismological Centre [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/review/>. — United Kingdom, Thatcham: International Seismol. Centre, 2023. — DOI: 10.31905/D808B830
- Ringler A., Anthony R., Aster R., Ammon C., Arrow-smith S., Benz H. et al. Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations // Reviews of Geophysics. — 2022. — V. 60, Is. 3. — P. e2021RG000749. — DOI: 10.1029/2021RG000749
- Schaff D.P., Richards P.G. On finding and using repeating events in and near China // Journal of Geophysical Research. — 2011. — V. 116. — B03309. — DOI: 10.1029/2010JB007895
- Schaff D.P., Richards P.G. Repeating seismic events in China // Science. — 2004. — V. 303. — P. 1176–1178. — DOI: 10.1126/science.1093422
- Schaff D.P., Waldhauser F. One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2010. — V. 100, N 6. — P. 3224–3238. — DOI: 10.1785/0120100042

Van Trees H.L. Detection, Estimation and Modulation Theory. — New York: Wiley, 1968. — 768 p.

Waldhauser F., Schaff D.P. Large-scale cross correlation based relocation of two decades of northern California seismicity // *Journal of Geophysical Research*. — 2008. — V. 113, Is. B8. — DOI: 10.1029/2007JB005479

Withers M., Aster R., Young C. An automated local and regional seismic event detection and location system

using waveform correlation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1999. — V. 89, N 3. — P. 657–669. — DOI: 10.1785/BSSA0890030657

Woessner J., Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2005. — V. 95, N 2. — P. 684–698. — DOI: 10.1785/0120040007

Сведения об авторах

Китов Иван Олегович, доктор физ.-мат. наук, вед. 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: ikitov@mail.ru

Санина Ирина Альфатовна, доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. ИДГ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: irina@idg.ras.ru

Quality assurance of seismological bulletins using waveform cross-correlation

© 2025 I.O. Kitov, I.A. Sanina

IDG RAS, Moscow, Russia

Received January, 24, 2025

Abstract Waveform cross-correlation (WCC) significantly improves detection, regular phase association, and hypothesis generation of seismic events at the International Data Center (IDC) of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO). In aftershock sequences of small, medium, and very large earthquakes, extra 50% to 80% of events were found that, by their parameters, should have been included in the IDC Standard Event Bulletin (SEB). Several percent of the aftershocks published in the SEB were not detected using cross-correlation, even when signals from all other events in the same sequences were used as templates. In this paper, we study several cases of lack of cross-correlation confirmation of IDC events obtained by experienced analysts in routine interactive analysis. Regional catalogues, which usually include aftershocks with magnitudes down to 2.0, are used as references when comparing the WCC-based and IDC bulletins. Since the resolution of regional networks is at least one magnitude unit higher, the SEB events missed in the corresponding regional catalogues can probably be considered as false or significantly inaccurate. The events are compared by origin time and location, since the regional networks and the International Monitoring System use different seismic stations, and direct comparison of phase arrivals is impossible. Two aftershock sequences are studied: after the earthquake of March 20, 2008 in China with $m_b(\text{IDC})=5.4$ and the event of May 20, 2012 in Italy (L'Aquila) with $m_b(\text{IDC})=5.3$. In general, most events not found in the SEB using the WCC are missing from the corresponding regional catalogues. At the same time, these catalogues confirm most additional IDC-ready events found only using cross-correlation. This observation confirms the conclusions about the high statistical reliability of events constructed using the WCC, as well as the possibility of expanding the SEB by 50 percent or more with events that are correct according to the IDC event definition criteria.

Keywords Aftershocks, seismic monitoring, waveform cross-correlation, array stations, International Data Centre, International Monitoring System, CTBTO.

For citation 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.02>. EDN: GHCZUX

References

- Adushkin, V.V., Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2016). [The reduction in signal detection threshold with the method of waveform cross correlation by using a seismic array of three-component sensors]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 17(1), 5-28. (In Russ.). DOI: 10.21455/gr2016.1-1. EDN: VPERYN
- Adushkin, V.V., Kitov, I.O., & Sanina, I.A. (2025). [Aftershock emission at the North Korea Pungeri test site continues]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. (In print).
- Kitov, I.O., Sanina, I.A., Volosov, S.G., & Konstantinovskaya, N.L. (2025). [To mark the 20th anniversary of the installation of the Mikhnevo small-aperture group. Monitoring of induced seismicity]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. (In print).
- Bobrov, D., Khukhuudei, U., Kitov, I., Sitnikov, R., & Zerbo, L. (2013). Automated recovery of the 2012 Sumatra aftershock sequence using waveform cross correlation. *Journal of Earth Science and Engineering*, 3, 437-460.
- 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-x
- Bobrov, D.I., Kitov, I.O., Rozhkov, M.V., & Friberg, P. (2016a). 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
- Bobrov, D.I., Kitov, I.O., Rozhkov, M.V., & Friberg, P. (2016b). Towards global seismic monitoring of underground nuclear explosions using waveform

- cross correlation. Part II: Synthetic master events. *Seismic Instruments*, 52(3), 207-223. DOI: 10.3103/S0747923916030038
- Coyne, J., Bobrov, D., Bormann, P., Duran, E., Grenard, P., Haralabus, G., Kitov, I., & Starovoit, Y. (2012). CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability. In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. Potsdam, Germany: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-41. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15
- 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, 143-215.
- 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
- Gibbons, S., & Ringdal, F. (2004). A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions. *NORSAR Scientific Report: Semiannual Technical Summary No. 2*. (pp. 41-50). Kjeller, Norway: NOR-SAR Publ.
- Gibbons, S.J., & Ringdal, F. (2006). The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International*, 165, 149-166. DOI: 10.1111/J.1365-246X.2006.02865.X
- 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., & Schulte-Theis, H. (1993). Master-event correlations of weak local earthquakes by Dynamic Waveform Matching. *Geophysical Journal International*, 113(3), 562-574. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1993.tb04652.x
- Kværna, T., Harris, D.B., Näsholm, S.P., Köhler, A., & Gibbons, S.J. (2023). Tracking aftershock sequences using empirical matched field processing. *Geophysical Journal International*, 235(2), 1183-1200. DOI: 10.1093/gji/ggad297
- Kværna, T., Ringdal, F., & Baadshaug, U. (2007). North Korea's nuclear test: The capability for seismic monitoring of the North Korean test site. *Seismological Research Letters*, 78(5), 487-497. DOI: 10.1785/gssrl.78.5.487
- International Seismological Centre. (2023). Reviewed ISC Bulletin. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/review/>. DOI: 10.31905/D808B830
- Ringler, A., Anthony, R., Aster, R., Ammon, C., Arrow-smith, S., Benz, H. et al. (2022). Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations. *Reviews of Geophysics*, 60(3), e2021RG000749. DOI: 10.1029/2021RG000749
- Schaff, D.P., & Richards, P.G. (2011). On finding and using repeating events in and near China. *Journal of Geophysical Research*, 116, B03309. DOI: 10.1029/2010JB007895
- Schaff, D.P., & Richards, P.G. (2004). Repeating seismic events in China. *Science*, 303, 1176-1178. DOI: 10.1126/science.1093422
- Schaff, D.P., & Waldhauser, F. (2010). One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3224-3238. DOI: 10.1785/0120100042
- Van Trees, H.L. (1968). *Detection, Estimation and Modulation Theory*. New York: Wiley Publ., 768 p.
- Waldhauser, F., & Schaff, D.P. (2008). Large-scale cross correlation based relocation of two decades of northern California seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 113(B8). DOI: 10.1029/2007JB005479
- Withers, M., Aster, R., & Young, C. (1999). An automated local and regional seismic event detection and location system using waveform correlation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3), 657-669. DOI: 10.1785/BSSA0890030657
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684-698. DOI: 10.1785/0120040007

Information about authors

Kitov Ivan Olegovich, Dr., Leading Researcher of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences (IDG RAS), Moscow, Russia. Telephone: +74959397582. E-mail: ikitov@mail.ru

Sanina Irina Alfatovna, Dr., Chief Researcher of the IDG RAS, Moscow, Russia. E-mail: irina@idg.ras.ru