

УДК 550.34

К 20-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ МАЛОАПЕРТУРНОЙ ГРУППЫ “МИХНЕВО”. МОНИТОРИНГ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

© 2025 г. И. О. Китов¹, И. А. Санина^{1,*}, С. Г. Волосов¹, Н. Л. Константиновская¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: irina@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После доработки 03.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

За 20 лет непрерывной работы малоапертурной сейсмической группы (МСГ) “Михнево” был накоплен огромный опыт регистрации сверхслабых сигналов, генерируемых региональной и глобальной сейсмичностью, разработаны и применены методы обработки данных с высокой разрешающей способностью, включая направленное суммирование и кросс-корреляцию волновых форм. В рамках данного обзора результатов инструментальных наблюдений и обработки рассмотрены два подхода к снижению порога регистрации сейсмических событий при мониторинге наведенной сейсмичности — использование станций группирования и метода кросс-корреляции волновых форм (ККВФ). Эффективность подходов по отношению к обнаружению, локации и идентификации слабых сейсмических источников проиллюстрирована афтершоковой последовательностью землетрясения вблизи г. Мариуполь, произошедшего 07.08.2016 г., а также афтершоками пятого и шестого объявленных взрывов в КНДР, обнаруженных за период с 09.09.2016 по 11.09.2021 гг. Координаты землетрясения были оценены с помощью данных МСГ “Михнево” и временной МСГ ИДГ РАН “Ростов Дон”. Точность локации сопоставима с точностью, обеспечиваемой 49 трехкомпонентными (3-С) станциями ФИЦ ЕГС РАН и Международной системы мониторинга (МСМ). За пять дней после землетрясения методом ККВФ было обнаружено и лоцировано относительно главного толчка 12 афтершоков. В обнаружении и оценке параметров также участвовали групповые станции МСМ AKASG и BRTR и 3-С станция МСМ KBZ. Сеть станций ФИЦ ЕГС РАН обнаружила 5 афтершоков, а МСМ ни одного. Локация взрывов в КНДР с помощью ККВФ позволила определить их относительное местоположение с точностью до 100–200 м. Шестой взрыв не удалось точно лоцировать относительно других из-за конечного размера его источника, вносящего значимые изменения дифференциального времени пробега, зависящие от направления на станцию. Метод ККВФ использовался и для обнаружения и идентификации слабых сейсмических событий в пределах полигона КНДР Пунгери с помощью шаблонных волновых форм от взрывов и афтершоков пятого и шестого испытаний, зарегистрированных на групповых станциях МСМ KSRS и USRK. За пятилетний период наблюдений было обнаружено 89 событий. По оценкам кросс-корреляционных характеристик сигналов на обеих станциях оказалось возможным разделить общую афтершоковую последовательность на две отдельные, связанные с процессами в зонах влияния пятого и шестого взрывов.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, афтершоки, землетрясения, подземные взрывы, малоапертурная сейсмическая группа МСГ “Михнево”, кросс-корреляция волновых форм.

DOI: 10.31857/S0002333725020139, EDN: DMWRVW

ВВЕДЕНИЕ

Изучение проявления сейсмичности в любом регионе неразрывно связано с возможностями сейсмической сети — магнитудным порогом, т.е. величиной минимальной магнитуды события, которое может быть обнаружено в соответствии

с принятыми центрами обработки данных статистическими критериями. Особенно ярко это проявляется на платформенных территориях, где исторически сейсмические станции расположены на расстояниях порядка 1000 км и больше друг от друга, а случающиеся время

от времени события в среднем имеют магнитуду (M_L), близкую к 2. Как показывает практика последних десятилетий, абсолютно асейсмичных территорий не существует. В отдельную группу выделяются относительно слабые сейсмические события, возникающие после сильных землетрясений, мощных взрывов или других крупномасштабных техногенных воздействий на природу, так называемая наведенная сейсмичность. Эти события вызывают все больший интерес в научной среде, так как позволяют более точно определить параметры вызвавших их источников для природных событий и оценить последствия воздействия на геологическую среду от техногенных источников. Под наведенной сейсмичностью мы понимаем последовательность сейсмических событий, вызванных возмущением напряженно-деформированного состояния и/или разрушением геологических структур под воздействием природного и/или техногенного характера. Без таких воздействий наблюдаемая сейсмичность отсутствовала бы. С точки зрения физики существует только два источника энергии наведенной сейсмичности. Во-первых, это запасенная в среде тектоническая энергия, получающая дополнительные локальные каналы преобразования в сейсмическую активность в связи с перераспределением напряжений и прочности пород после воздействия естественного (например, землетрясения) или антропогенного (например, большие подземные взрывы, наполнение водохранилищ, извлечение полезных ископаемых) характера. Во-вторых, это энергия, вносимая внешним по отношению к естественному напряженно-деформированному состоянию массива источником. Самым простым примером можно считать гравитационную энергию вышележащих слоев, вносимую в массив горных пород полостью, созданной большим подземным взрывом. Эта энергия в массивах горных пород в большинстве случаев реализуется через коллапс полости и образование столба обрушения, зачастую выходящего на свободную поверхность. Наведенная сейсмичность такого рода, пожалуй, наиболее ярко отражает термин “наведенная”. Самые большие подземные взрывы также дают пример наведенной сейсмичности первого рода, то есть высвобождения запасенной в массиве тектонической энергии, которое бы не произошло без внешнего влияния. Подземные взрывы мега-

тонного класса в районах с относительно высокой сейсмической активностью могут привести к активизации пассивных разломов регионального масштаба [Вискнам, 1969]. Волна от взрыва Benham на невадском испытательном полигоне мощностью порядка 1 Мт ТНТ стала причиной/триггером землетрясения с естественным для данного разлома механизмом источника. После этого землетрясения несколько месяцев наблюдались афтершоки с характеристиками, практически не отличимыми от других естественных афтершоковых последовательностей в этом районе. Как видно из приведенных выше примеров, комбинации источников энергии и механизмов преобразования этой энергии в сейсмические события могут быть различными, что делает интерпретацию частных случаев довольно сложной, как, например, разделение афтершоковой последовательности в непосредственной близости от взрыва Benham с афтершоковой последовательностью инициированного им землетрясения. Более детальный подход к определению понятия и анализу многочисленных разновидностей наведенной сейсмичности широко представлен в монографиях [Николаев, 1994; Адушкин, Турунтаев, 2015; Баранов, Шебалин, 2019; Смирнов, Пономарев, 2020].

Диапазон магнитуд источников, связанных с наведенной сейсмичностью, очень широк — от афтершоков землетрясения Тохоку в 2011 г. с магнитудами (M_w) ~ 7.5 до магнитуд -3.0 при разработке шахт. Основные усилия исследователей направлены на повышение точности определения координат событий, оценку динамических параметров и идентификации природы их источников, для чего развиваются глобальные и региональные, устанавливаются локальные и временные сейсмические сети, совершенствуются методы обработки экспериментальных данных.

Целью нашей публикации является иллюстрация преимуществ и перспективы использования специальных систем наблюдений — малоапертурных сейсмических групп (МСГ) и одного из методов обработки данных наблюдений — метода кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) для снижения порога обнаружения и повышения точности локализации сейсмических событий отдельно стоящими региональными станциями группирования или

сетью таких станций. Такие станции и/или сети необходимы для непрерывного мониторинга слабой, в том числе наведенной, сейсмичности, особенно в асейсмичных районах в диапазоне магнитуд ниже 3. В качестве примера используются результаты деятельности малоапертурной группы (МСГ) “Михнево”, со дня организации которой в 2024 г. исполнилось 20 лет. МСГ входит в состав уникальной научной установки “Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений “Михнево” УНУ СКГН” [Кочарян и др., 2022].

Обсуждение возможностей площадных сейсмических систем наблюдения или станций группирования началось в конце 1950-х гг. Академиком Г. А. Гамбурцевым было предложено использовать группы для повышения чувствительности глобальной сейсмической сети мониторинга подземных испытаний [Султанов, 1998]. По рекомендации Советской делегации на совещании в Женеве в 1958 г. сейсмические группы были предложены в качестве технического элемента системы контроля [Федоров и др., 1958]. Первый опыт совместной обработки данных плотной группы сейсмических датчиков относится к началу 1960-х годов. Ввиду успешности применения группового подхода было предложено использовать его для повышения детальности и информативности сейсмического мониторинга сейсмоопасных регионов. Основы применения малоапертурных групп (антенн) в составе сейсмологических сетей регионального типа были разработаны в ИФЗ РАН в 1996–1997 гг. под руководством А. В. Николаева. В общей концепции применения МСГ, разработанной в ИФЗ, содержатся конкретные предложения о необходимости стадийного решения проблемы оснащения ими региональных сетей и даны конкретные оценки эффективности применения МСГ в системах региональных сейсмологических наблюдений для регионов Северного Кавказа и Центральной России. Там же была предложена технология мониторинга пространственно-временных вариаций напряженно-деформированного состояния среды на базе наблюдений с помощью МСГ, предназначенных для решения задач, связанных с развитием методов средне- и краткосрочного прогноза землетрясений, тесно связанных с основными задачами сейсмотектоники.

В 1990-е годы Институтом физики Земли (ИФЗ) РАН при помощи мобильных сейсмических групп малой апертуры проводились исследования параметров тонкой пространственной структуры сейсмических волновых полей в различных районах Восточно-Европейской платформы (ВЕП), на Кавказе и на Балтийском щите. Были опробованы группы с различной конфигурацией, в том числе с кольцевой, типа NORESS: “Домодедово” в Московской области (1992 г.), “Стрижамент” на Северном Кавказе (1995 г.), RUKSA в Карелии (1999 г.). В начале 2000-х цифровая сейсмология набрала достаточную базу данных для наиболее эффективного использования сейсмических групп при решении различных научных и практических задач [Невский, 2003; Schaff, Richards, 2004; Gibbons, Ringdal, 2006; Gibbons et al., 2007; Sanina et al., 2010; Schweitzer et al., 2012].

Одновременно с этим разрабатывались теоретические основы методов определения параметров когерентности, рассеяния и поглощения сейсмических волн. Результаты, полученные при экспериментах в Московской области, имели принципиальное значение для обоснования возможности создания групп малой апертуры в условиях центральной части ВЕП. В развитие концепции использования МСГ на региональных расстояниях в 2004 г. в ступинском районе Московской области ИДГ РАН установил группу “Михнево” (международный код MHVAR), которая была использована для решения задач обнаружения и идентификации сейсмических источников на Восточно-Европейской платформе [Sanina et al., 2010].

Приборное оснащение группы, система передачи данных и синхронизации подробно описаны в работе [Волосов и др., 2012]. В центре группы в штольне на глубине около 20 м расположен центральный прибор, а остальные размещены в контейнерах на глубине около 0.5 м. Частота опроса на канал составляет 200 Гц и чувствительность 0.007 нм/с на отсчет. Для синхронизации данных создан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий маркировку каждого отсчета оцифрованных сейсмических данных признаком минутной метки непосредственно при регистрации отсчета. Внедренные технические решения защищены двумя патентами РФ.

Как отмечено выше, центральный прибор МСГ “Михнево” расположен в штольне на глубине 20 м, где 70 лет назад начала работать сейсмическая станция № 1 (“Земля Гамбурцева”). Теоретическое обоснование и экспериментальная проверка сейсмического метода контроля в СССР были поручены академику Г. А. Гамбурцеву и возглавляемому им Геофизическому институту АН СССР (ГЕОФИАН) [Адушкин и др., 2016]. Современные наблюдения, ведущиеся на МСГ “Михнево”, являются естественным продолжением и развитием методов контроля как за сейсмическими событиями на Восточно-Европейской платформе и сопредельных территориях, так и на испытательных площадках, расположенных на телесеismicких расстояниях от станции. Вот уже 20 лет МСГ “Михнево” является единственной подобной системой наблюдений в центральной части ВЕП.

Метод кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) нашел широкое применение на региональных сетях трехкомпонентных (3-С) станций, где он используется с начала 1980-х годов, но особенно эффективно он может быть использован на станциях группирования [Adushkin et al., 2017]. В настоящее время имеется более чем двадцатилетний опыт массового применения ККВФ к большим архивам цифровых сейсмических записей. Метод ККВФ позволяет понизить порог обнаружения сейсмических сигналов и использовать практически всю информацию о форме сигнала для его идентификации в пространстве повторяющихся сейсмических событий, а также событий с известной функцией источника. Для региональных сейсмических фаз, имеющих сложную форму, широкий спектр и длительность в несколько десятков секунд, применение согласованного фильтра обеспечило снижение амплитудного порога обнаружения сигналов сейсмических событий на порядок величины, повышение точности относительной локации примерно на два порядка, а также значительно улучшило точность оценки магнитуды событий [Schaff, Richards, 2004; Bobrov et al., 2014]. На телесеismicких расстояниях разрешающая способность метода ККВФ по отношению к обнаружению и идентификации сигналов несколько снижается из-за меньшей длительности и сужения частотного диапазона сигналов от слабых источников, но все же достаточна для

понижения порога обнаружения на 0.5 единицы магнитуды [Bobrov et al., 2014; 2016a; 2016b].

Использование метода ККВФ на трехкомпонентных сейсмических группах (групповые станции, полностью состоящие из трехкомпонентных (3-С) сейсмических станций) на близрегиональных расстояниях обеспечивает значительное преимущество в обнаружении сигналов от повторяющихся событий перед любыми другими типами станций [Braun, Schweitzer, 2008; Gibbons et al., 2011; Kitov et al., 2016]. Преимущество 3-С групповой станции обусловлено ростом общей энергии шаблонного и искомого сигналов, а также специфичности, которая определяется как произведение ширины спектра сигнала над уровнем шума и его длительности [VanTrees, 1968], шаблонной волновой формы за счет увеличения общей длительности шаблона при увеличении числа каналов в три раза. За счет роста отношения сигнал/шум увеличивается число обнаруженных сейсмических сигналов от региональных источников, а увеличение специфичности волновой формы снижает поток ложных срабатываний детектора.

МАЛОАПЕРТУРНЫЕ ГРУППЫ

Основной особенностью применения малоапертурных сейсмических групп является подавление микросейсмического шума при суммировании когерентных сигналов на отдельных датчиках группы с известными теоретическими или эмпирическими задержками времен вступления. Набор задержек для вектора медленности, соответствующего положению искомого источника, позволяет не только снизить порог обнаружения, но и более точно оценить азимут и относительную скорость сигнала. Размеры МСГ настраиваются на когерентные свойства сигнала при его распространении вдоль группы и эффективную деструктивную интерференцию шума. Для регулярных региональных фаз со скоростями от ~ 3 км/с (R_g , L_g) до 8.5 км/с (P_n) оптимальная апертура составляет от 1 до 5 км.

В результате использования данных МСГ “Михнево” порог обнаружения сигналов от источников в пределах ВЕП был понижен примерно на единицу магнитуды, в региональный каталог были добавлены сотни событий, большинство из которых были идентифицированы как техногенные источники [Sanina et al.,

2010]. Многие из этих источников носят повторяющийся характер, что важно для применения оптимальных методов обнаружения.

Одним из важнейших преимуществ сейсмической группы по отношению к трехкомпонентной сейсмической станции является возможность оценки вектора медленности для вступающих сигналов. В большинстве случаев это позволяет отнести сейсмический сигнал к группе продольных, поперечных или поверхностных волн по величине скорости распространения вдоль свободной поверхности. Для оценки азимута и скалярной медленности вступающего сигнала эффективно используется *FK*-анализ [Kitov et al., 2016].

Опыт наблюдений на МСГ “Михнево” показал эффективность установки групп малой апертуры на территориях с мощным осадочным слоем, что значительно расширяет возможности применения подобных систем наблюдений в сейсмологической практике [Санина и др., 2008; 2009]. За годы эксплуатации накоплен огромный экспериментальный материал, который позволяет перейти от статистических оценок общего количества событий различной природы к решению фундаментальных задач, которые для территории центральной части ВЕП ранее не ставились: развитие методов дискриминации сейсмических событий; оценка диссипативных свойств среды; исследование структуры верхней мантии. Наблюдения за слабой сейсмичностью на МСГ “Михнево” открыли возможность развития нового подхода к контролю за состоянием площадок размещения особо ответственных объектов. Данные о сейсмических событиях, зарегистрированных на МСГ “Михнево”, начиная с 2005 г. публикуются в ежегодном издании ФИЦ ЕГС РАН “Землетрясения России” [Санина и др., 2019].

МЕТОД КРОСС-КОРРЕЛЯЦИИ ВОЛНОВЫХ ФОРМ

Обнаружение сигналов

Условием успешной работы метода кросс-корреляции волновых форм как одного из вариантов метода согласованного фильтра является подобие искомым сигналов и шаблонных сигналов от так называемых мастер-событий (МС). Выбор источников сейсмических сигналов,

пригодных для использования в качестве мастер-событий, является важной задачей. Если для данной станции имеются записи исторических событий известной природы, то именно они могут быть использованы с оптимальной эффективностью обнаружения подобных сигналов. В отсутствие таких записей можно применить различные методы построения синтетической сейсмограммы, включая метод главных компонент, приложенный к записям от других источников и на других станциях [Bobrov et al., 2016b]. Мастер-событие определяет шаблонные волновые формы на всей совокупности станций, где были зарегистрированы сигналы, в дальнейшем ассоциированные с данным мастер-событием. Для более эффективной работы метода ККВФ координаты и время в очаге, как и другие основные параметры мастер-события, должны быть определены с самой высокой доступной точностью, а сами шаблонные волновые формы должны иметь как можно более высокое отношение сигнал/шум (*SNR*). Последнее требование может быть снижено для групп слабых событий, где повторяющиеся сигналы могут и не иметь высоких значений *SNR*, но их источники находятся на близких расстояниях друг от друга. Примерами таких групп являются сейсмические рои, сейсмические события в вулканах, афтершоки взрывов. Близкими с точки зрения кросс-корреляции можно считать расстояния порядка четверти длины волны сигнала. За пределами этой зоны даже для одинаковых сигналов коэффициент кросс-корреляции быстро падает ниже уровня 0.99–0.95. Особенно важно точно оценить эмпирические времена пробега до всех ассоциированных с МС станций, так как они используются вместо значений, полученных из годографов регулярных фаз, для локации искомого события относительно МС. Подробное описание используемого нами метода ККВФ дано в работах [Bobrov et al., 2014; 2016a; 2016b; Adushkin et al., 2015; 2016a; 2016b; 2017].

На региональных расстояниях сложность волнового поля связана с высокой неоднородностью скоростной структуры на пути распространения сигнала, что делает практически невозможным точное повторение формы сигнала для источников, далеко (в смысле потери когерентности) удаленных друг от друга. В качественной форме увеличение специфичности сигнала можно

интерпретировать как снижение вероятности случайного появления похожего сигнала. Математически коэффициент кросс-корреляции соответствует косинусу угла между векторами шаблонного и испытуемого сигналов. Таким образом, увеличение размерности пространства (т.е. длины сигнала в отсчетах), в котором определен вектор шаблонного сигнала, и обогащение частотного состава приводят к снижению вероятности встретить подобный сигнал как реализацию случайной шумовой помехи, так и от удаленного источника.

Все сигналы с высоким отношением сигнал/шум, надежно ассоциированные с сейсмическими источниками, могут служить в качестве шаблонных волновых форм для метода ККВФ. Естественной количественной мерой близости форм шаблонного и текущего сигнала является коэффициент кросс-корреляции (CC). Линейный фильтр, основанный на непрерывной кросс-корреляции текущего и заранее заданного (шаблонного) сигналов, называется согласованным фильтром. Выходом согласованного фильтра является временной ряд значений $CC(t)$, к которому могут применяться стандартные методы обнаружения сигнала.

Для дискретных записей на каждом из J каналов сейсмической группы или трехкомпонентной (3-С) станции — $u_j(t)$ ($j = 1, \dots, J$) и шаблонного сигнала длиной в N отсчетов на каждом канале m_{jn} ($n = 1, \dots, N$) коэффициент кросс-корреляции (CC_j) определяется соотношением:

$$CC_j(t) = m_{jn} \cdot u_{jn}(t) / (\|m_{jn}\| \cdot \|u_{jn}(t)\|), \quad (1)$$

где t — абсолютное время, которое принимает дискретные значения в соответствии с частотой опроса, а $\|\cdot\|$ определяет $L2$ -норму временного ряда или длину вектора сигнала. Агрегированный $CC(t)$ рассчитывается усреднением по всем каналам:

$$CC_j(t) = \sum_{j=1}^J CC_j(t) / J. \quad (2)$$

Полученная дискретная трасса $CC(t)$ имеет ту же частоту опроса, что и исходные волновые формы. Для МСГ “Михнево” частота дискретизации записи составляет 200 Гц. В автоматическом режиме рутинной обработки с помощью метода ККВФ с большим числом мастер-событий приходится снижать частоту дискретизации

до 50 Гц, чтобы сократить объем вычислений. Частота Найквиста в этом случае составляет 25 Гц, что заведомо достаточно для анализа высокочастотных региональных фаз.

К трассе $CC(t)$ применяется процедура обнаружения сигнала с помощью отношения средних абсолютных амплитуд в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах, которое также используется в качестве оценки отношения сигнал/шум для кросс-корреляционных трасс — SNR_{cc} . Пороговое значение SNR_{cc} выбирается таким образом, чтобы обеспечить обнаружение как можно большего числа полезных сигналов при приемлемом потоке ложных срабатываний. Путем эмпирических оценок для МСГ “Михнево” нами выбрано пороговое отношение $SNR_{cc} > 3.5$. В режиме автоматического обнаружения региональных фаз для МСГ “Михнево” длина окна LTA равна 20 с, а для STA — 0.8 с, причем время оценки STA сдвинуто вперед относительно LTA на половину длины STA. Значения STA и LTA на каждой станции могут меняться в зависимости от решаемых задач.

Максимальное отношение уровней амплитуды коэффициента кросс-корреляции полезного сигнала и микросейсмического шума, а следовательно, и максимальное SNR_{cc} , может быть достигнуто в разных частотных диапазонах в зависимости от спектрального состава шума и функции источника, а также частотно-зависимого затухания на пути распространения. Для увеличения SNR_{cc} при стандартной обработке применяется гребенка фильтров 0.5–1.5 Гц, 1–3 Гц, 2–4 Гц, 3–6 Гц, 4–8 Гц и 6–12 Гц, которая охватывает диапазон максимумов спектров основных близ-региональных и региональных регулярных сейсмических фаз: P_g , P_b , P_n , L_g и R_g . Коэффициент кросс-корреляции рассчитывается после фильтрации в тех же частотных диапазонах и детектор по превышению порога отношения STA/LTA применяется последовательно к 6 трассам $CC(t)$. Если хотя бы одно из 6 значений $SNR_{cc}(t)$ для разных фильтров в данной точке времени превышает порог обнаружения, то сигнал считается найденным и проводится автоматический поиск максимального значения SNR_{cc} для этого сигнала в заранее заданном окне. Временной отсчет в пределах этого окна с максимальным абсолютным значением $|CC(t)|$ определяет время вступления. Значения CC

и SNR_{cc} в точке вступления сигнала являются его основными кросс-корреляционными характеристиками. Для кросс-корреляционных сигналов оцениваются и рутинные значения SNR и амплитуды, необходимые при использовании стандартных сейсмологических методов.

В рамках метода направленного приема на групповой станции вектор медленности обнаруженного сигнала определяется по пику суммарной мощности всех каналов. Для этого рассчитывается нормированная мощность сигнала, $P(S_e, S_n)$ как квадрат суммы индивидуальных трасс. Перед суммированием трасс сдвигаются друг относительно друга в соответствии с временами задержки, определяемыми значениями вектора медленности (S_e, S_n) фронта плоской волны:

$$P(S_n, S_e) = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} \left| \sum_{j=1}^J F_j(f) \cdot e^{2\pi\sqrt{-1}f(S_n \cdot dnorth_j + S_e \cdot deast_j)} \right|^2}{J \cdot \sum_{f=f_1}^{f_2} \left\{ \sum_{j=1}^J F_j(f)^2 \right\}}, \quad (3)$$

где: $F_j(f)$ — уровень амплитудного спектра j -й трассы на частоте f ; S_e и S_n — компоненты вектора медленности в направлении восток–запад и север–юг соответственно; $deast_j$ и $dnorth_j$ — координаты j -го датчика относительно центрального датчика; f_1 и f_2 — нижний и верхний пределы спектра. Сумма $S_e \cdot deast_j + S_n \cdot dnorth_j$ определяет теоретические времена задержки вступления плоской волны на датчик j относительно центрального датчика.

Для многоканальной трассы коэффициента кросс-корреляции процедура FK -анализа полностью аналогична, за исключением того факта, что трассы $CC_j(t)$ для очень близких источников, в отличие от трасс во временной области, синхронизованы между каналами без сдвигов. Действительно, сигналы от двух одинаковых источников в одном месте практически идентичны, если их амплитуды гораздо выше уровня шума, и почти полностью синхронизируются на всех каналах сразу. Поэтому пики $CC_j(t)$ на всех каналах достигаются одновременно. Суммирование трасс без задержек наиболее эффективно подавляет шум на суммарной $CC(t)$ -трассе без потери энергии сигнала в синхронизированных пиках трасс $CC_j(t)$. Нулевое значение времен задержек между каналами $CC_j(t)$ соответствует

оценке вектора медленности для исходного сигнала, полученной с помощью FK -анализа. Центр координат для FK -анализа в пространстве кросс-корреляционных трасс соответствует вектору медленности сигнала во временной области. Так как трассы $CC_j(t)$ для очень близкого к МС источника должны быть полностью синхронизированы во времени, то увеличение отклонения пика медленности на FK -диаграмме трасс $CC_j(t)$ от центра координат при неизменной форме сигналов свидетельствует об увеличении расстояния до мастер-события. Снижение пикового значения $CC(t)$ также наблюдается при изменении механизма и/или временной функции источников при неизменном расстоянии между ними. Этот эффект служит основой различных методов идентификации типа источника.

Для сейсмической группы из 3-С датчиков FK -анализ оригинальных волновых форм малоэффективен из-за фазового сдвига между записями различных компонент движения на одном датчике. Для трасс коэффициента кросс-корреляции сигналы на всех каналах 3-С группы должны быть полностью синхронизованы по определению, что делает FK -анализ более эффективным по сравнению с аналогичной по конфигурации группой вертикальных датчиков. При этом оценки азимута и скалярной медленности становятся более точными.

Относительная магнитуда

Зная магнитуду мастер-события, можно определить магнитуду искомого события, основываясь на близости их амплитуд и формы сигналов. Динамическим параметром, определяющим относительную амплитуду двух сигналов от пространственно близких событий, является отношение норм сигналов: $|x|/|y|$, где x и y являются векторами сигналов от искомого события и МС соответственно [Bobrov et al., 2014; Schaff, Richards, 2014]. Логарифм отношения определяет разницу магнитуд двух событий или *относительную магнитуду*:

$$dRM = \log(|x|/|y|) = \log|x| - \log|y|. \quad (4)$$

Для каждой станции, i , магнитуда события может быть определена через сетевую магнитуду МС, $m_b(\text{МС})$ и dRM_i . Для события, зарегистрированного на N станциях, абсолютная магнитуда по объемным волнам равна $m_b = m_b(\text{МС}) + \sum dRM_i/N$. Расчет среднеквадрата

тичной амплитуды МС $|y|$ в каждом частотном окне производится один раз для выбранного шаблона, а для искомого события рассчитываются значения $|x|$ только для вступлений сигналов, найденных с помощью кросс-корреляции.

В табл. 1 приведены основные параметры шести объявленных испытаний в КНДР по оценке Международного центра данных (МЦД): дата, время в источнике, магнитуды m_b и M_s , а также относительные магнитуды $m_b(\text{rel})$, полученные по формуле (4). Наиболее важной особенностью оценки $m_b(\text{rel})$ методом ККВФ является существенно более низкое стандартное отклонение оценки сетевой магнитуды, полученной при усреднении станционных оценок магнитуды. Разброс станционных значений магнитуды, полученных стандартными методами, в 2–7 раз выше, чем разброс относительных магнитуд.

Если принять в качестве отсчетной магнитуду, полученную МЦД для КНДР-5 (5.09), то КНДР-1 будет иметь магнитуду $m_b = 3.93$, которая, на первый взгляд, значительно ниже магнитуды 4.08, по оценке МЦД. Известно, что для слабых событий магнитуда может быть немного завышена, так как определяется лучшими станциями с позитивным смещением оценки. Стандартное отклонение для $m_b(\text{МЦД})$ составляет 0.27, что делает разницу между оценками 4.08 и 3.93 статистически незначимой. Видимо, точность оценки относительной магнитуды по методу ККВФ более высока и надежна, особенно для слабых событий, обычно составляющих последовательности наведенной сейсмичности.

Относительная локация и ассоциация фаз с источником

Для двух пространственно близких событий коэффициент кросс-корреляции на данной сей-

смической группе с постоянной конфигурацией отдельных датчиков зависит от расстояния между событиями, сходства функций источников, разницы в распределении скорости и затухания сигнала вдоль путей распространения от двух источников, а также от изменения спектральных характеристик микросейсмического шума. В целом при увеличении расстояния между МС и искомым событием CC становится ниже. Помимо уменьшения CC , смещение эпицентра искомого события относительно МС приводит к изменению времени пробега до центрального канала группы, а также к изменению относительных времен пробега до других датчиков группы.

Для цифровых сигналов изменение относительных времен прихода между каналами дискретно. Смещение времен вступления имеет характерное значение, которое зависит от частоты опроса, расстояния между датчиками и разницы векторов медленности для пары мастер/искомое событие. Для данного канала сдвиг времени вступления dt , по отношению к опорному каналу, который обычно находится рядом с геометрическим центром сейсмической группы, может быть рассчитан в соответствии с простым соотношением:

$$dt = \mathbf{s} \cdot \mathbf{d}, \quad (5)$$

где \mathbf{s} — вектор медленности плоского фронта приходящей волны, а \mathbf{d} — вектор между опорным и данным датчиком. Для дискретизации с шагом ΔT временной сдвиг по отношению к опорному каналу отсутствует, когда $dt < \Delta T$, так как оцифрованные сигналы имеют одинаковое время вступления. Если наибольшее значение dt в данной сейсмической группе для волны от источника на телесеismicком расстоянии меньше ΔT , то все вступившие на отдельных каналах сигнала

Таблица 1. Параметры шести взрывов в КНДР

Событие	Дата	Время	m_b	m_b, stdev	$m_b(\text{rel})$	$m_b(\text{rel}), \text{stdev}$	M_s
КНДР-1	09.10.2006	01:35:28	4.08	0.27	3.93	0.12	—
КНДР-2	25.05.2009	00:54:43	4.51	0.30	4.54	0.06	3.56
КНДР-3	12.02.2013	02:57:51	4.92	0.32	4.96	0.07	3.95
КНДР-4	06.01.2016	01:30:00	4.82	0.35	4.85	0.05	3.92
КНДР-5	09.09.2016	00:30:01	5.09	0.34	5.09	0.05	4.17
КНДР-6	03.09.2017	03:30:01	6.07	0.25	6.11	0.04	4.91

лы эффективно синхронизированы. На основании (5) мы можем также определить расстояние между мастер- и искомым событиями, которое приводит к изменению во времени вступления на датчики группы относительно МС.

Используя данные нескольких групповых станций, можно с большой точностью определить положение искомого события относительно источника МС. Основанные на ККВФ методы обнаружения сигналов, ассоциации найденных сейсмических фаз с гипотезами событий, а также оценки относительного положения и магнитуды созданных гипотез событий были применены для локации взрывов и афтершоков землетрясений. Предположительные эпицентры источников искомого события размещаются в узлах локальной квадратной сетки с шагом от 50 м до 50 км (в зависимости от точности оценки времени вступления и скалярной медленности сигнала) с МС в центре. Наиболее вероятное местоположение искомого события определяется по минимуму среднеквадратической ошибки оценки времени в источнике, основываясь на формуле:

$$ot_{ji}^k = t_{ij} - tt_j + dt_{ij}^k, \quad (6)$$

где: ot_{ji}^k — расчетное время в источнике для эпицентра, расположенного в узле k ; t_{ij} — время вступления события i на станции j ; tt_j — время пробега для МС на станцию j , полученное из используемого для МС бюллетеня. Изменение времени вступления на станции для k -го узла, dt_k , рассчитывалось как скалярное произведение горизонтального вектора медленности на вектор из точки расположения МС в точку узла сетки с номером $k(5)$:

$$dt_k = \mathbf{s} \cdot \mathbf{d}_k, \quad (7)$$

где \mathbf{s} — вектор медленности фронта приходящей волны, а \mathbf{d}_k — вектор между эпицентром МС и узлом. Медленность определялась скоростью распространения фаз, например, P , S или L_g . В отсутствии регионального годографа можно использовать стандартные значения из медленности модели IASP91. Процесс построения гипотезы события или обнаружения искомого источника вблизи МС называется *локальной ассоциацией* в отличие от *глобальной ассоциации*, в рамках которой предполагается, что любой сигнал может принадлежать любому источнику на земле. Сигналы, найденные МС методом ККВФ, могут принадлежать только близким к МС событиям.

При наличии заранее установленных критериев качества событий ассоциация вступлений с уникальным событием тесно связана с относительной локацией. Если для лучшего виртуального местоположения при локации созданная гипотеза события удовлетворяет критериям качества, то такая гипотеза события может быть помещена в автоматический бюллетень для дальнейшего интерактивного анализа. Для разных сейсмических агентств, центров и исследовательских институтов критерии качества различны, но обычно они опираются на совокупность уникальных параметров, вероятность случайного появления которой очень мала. Высокий уровень кросс-корреляции двух сигналов по сравнению с уровнем корреляции этих сигналов с шумом и посторонними сигналами является таким уникальным параметром. Поэтому гипотезы событий, созданные с помощью ККВФ, обладают дополнительной статистической надежностью по сравнению с такими же событиями, основанными только на стандартных параметрах: невязки времени пробега, вектора медленности и стационарной магнитуды. Локальная ассоциация фаз с сейсмическим событием в рамках ККВФ обычно создает более надежные гипотезы.

ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЛОКАЦИЯ ОБЪЯВЛЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛИГОНЕ ПУНГЕРИ В КНДР

МСГ “Михнево” зарегистрировала телесейсмические P -волны от двух больших событий в КНДР в 2009 и 2013 гг., а также от остальных трех больших событий, произошедших в 2016 и 2017 гг. Событие 2006 г. имело меньшую энергию и не было обнаружено МСГ “Михнево” стандартными методами детектирования на групповых станциях, основанными на направленном приеме [Schweitzer et al., 2012]. Близкое расположение всех испытаний в КНДР позволяет применить метод кросс-корреляции волновых форм и обнаружить сигнал от события 2006 г., который находился ниже уровня сейсмического шума. Для детектирования был применен метод, основанный на отношении средних абсолютных амплитуд в коротком (STA) и длинном (LTA) временном окне: STA/LTA. Для анализа

сигналов от испытаний длительность окна STA составляет 0.5 с, а окна LTA — 60 с. Для повышения SNR_{cc} была применена фильтрация в шести частотных диапазонах: 0.5–2 Гц, 1–3 Гц, 2–4 Гц, 3–6 Гц, 4–8 Гц и 6–12 Гц, для чего был использован полосовой фильтр Баттерворта 3-го порядка.

Примеры шаблонных записей в шести частотных диапазонах на центральном вертикальном канале (C00) представлены на рис. 1. Они используются для расчета CC . Полученные кросс-корреляционные трассы подвергаются стандартной процедуре обнаружения сигнала ($STA/LTA > 3.5$), как и суммарные трассы при формировании лучей. На рис. 2 приведены трассы SNR_{cc} для трех случаев. Для взрыва 2009 г. максимальное значение SNR_{cc} сигнала, обнаруженного с помощью согласованного фильтра, составляет 10.7 (фильтр 5: 4–8 Гц). Сигнал от события 2006 г. (так же как и сигнал от 2009 г.) был обнаружен при помощи шаблона 2013 г. и имел $SNR_{cc} = 3.8$ для фильтра 4–8 Гц. Исходя из соотношения амплитуд событий 2009 и 2006 гг. можно сделать вывод, что согласованный фильтр повысил чувствительность МСГ “Михнево” примерно в 3 раза по сравнению с методом направленного приема и позволил обнаружить сигнал ниже уровня микросейсмического шума.

Для более детальной оценки порога обнаружения сигнала от события 2006 г. мы провели численное моделирование, смешивая запись на каждом канале МСГ “Михнево” с предшествующим сигналам микросейсмическим шумом, увеличенным в C раз, где $C > 1$. Увеличивая среднюю абсолютную амплитуду шума на каждом канале в C раз, мы понижали эффективное значение SNR для суммарных трасс так же в C раз. Например, для значений $C = 3$ (для 2009 г.) и $C = 6$ (для 2013 г.) оценки SNR для метода направленного приема упали до 4.6 и 4.0 с исходных 10.6 и 27.6 соответственно. Исходя из спада амплитуды сигнала с магнитудой и при постоянном уровне микросейсмического шума можно было бы ожидать обнаружение сигнала от взрыва 2006 г. на уровне $SNR = 4.0–4.5$.

Снижение отношения сигнал/шум как следствие увеличения уровня шума при неизменном сигнале позволяет напрямую сравнить методы направленного приема (НП) и ККВФ. На рис. 3 приведены кривые оценки SNR и SNR_{cc} при

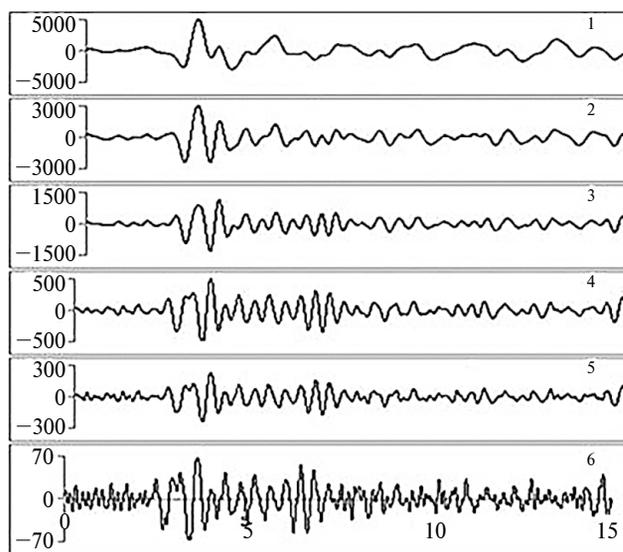


Рис. 1. Шаблоны волновых форм для канала C00 от события 2013 г. длиной 15 с. Фильтры указаны в верхнем правом углу каждой из панелей волновых форм: 1 — (0.5–2) Гц, 2 — (1–3) Гц, 3 — (2–4) Гц, 4 — (3–6) Гц, 5 — (4–8) Гц и 6 — (6–12) Гц.

увеличивающемся значении C для различных мастер-событий. Кривые STA/LTA относятся к методу НП и характеризуются быстрым спадом. Кривые CC получены по ККВФ и спадают значительно медленнее, хотя и с менее высоких начальных значений. Представлены случаи перекрестной 1/2 и 2/1, где 1 — сигнал 2013 г. и 2 — сигнал 2009 г., и автокорреляции 1/1 и 2/2. Автокорреляция дает более высокие значения SNR_{cc} , чем перекрестная корреляция. Уровень SNR_{cc} для автокорреляции тем выше, чем больше значение SNR исходных сигналов. Медленный спад свидетельствует о более эффективном подавлении шума при кросс-корреляции сигналов. Из рис. 3 можно сделать вывод, что обнаружение взрыва 2009 г. с помощью шаблона 2013 г. возможно при девятикратном увеличении уровня шума, в то время как метод НП обнаружил бы сигнал только при 7-кратном увеличении уровня.

Использование метода ККВФ на МСГ “Михнево” позволило примерно на порядок величины понизить порог обнаружения сигналов от различных источников по сравнению с трехкомпонентной станцией за счет подавления некоррелированного шума при формировании луча (~ 3.5 раза для 12 каналов) и применения согласованного фильтра (~ 3 раз). Для подзем-

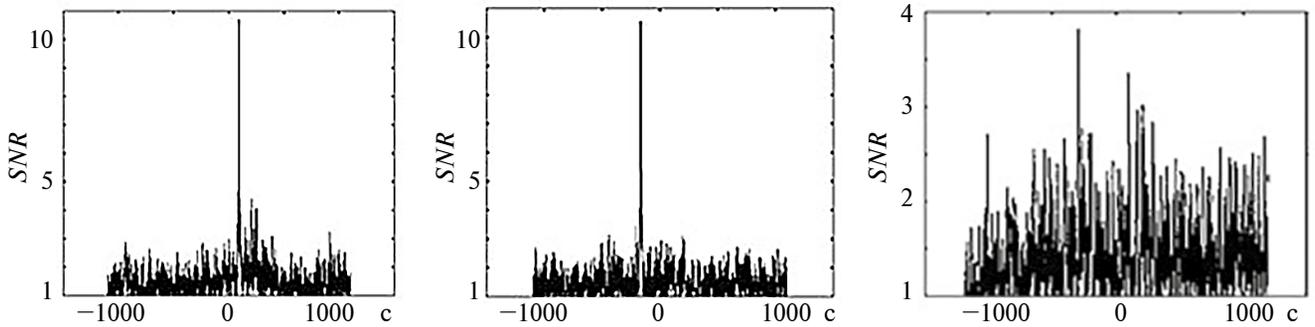


Рис. 2. Обнаружение сигналов с помощью кросс-корреляции на группе “Михнево”. Слева направо: SNC_{cc} для следующих пар мастер/искомое событие 2013/2009, 2009/2013, 2013/2006. Сигнал от события 2006 г. имеет $SNR_{cc} = 3.8$. Порог обнаружения $SNR_{cc} = 3.5$.

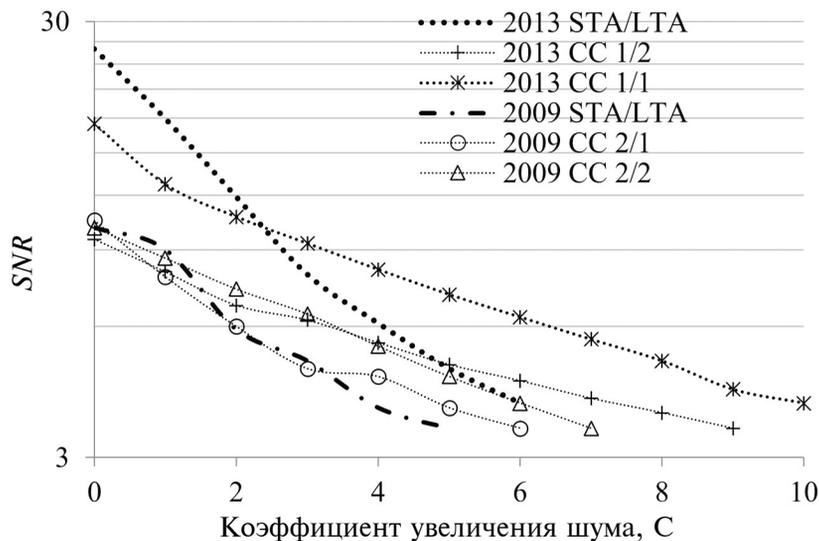


Рис. 3. Зависимость SNR для обычных и кросс-корреляционных трасс от уровня шума. По оси Y шкала логарифмическая.

ных взрывов снижение амплитудного порога обнаружения в 10 раз означает возможность обнаружения взрывного источника мощностью, так же пониженной в 10 раз.

С помощью ККВФ МСГ “Михнево” обнаружила сигналы от всех испытаний в КНДР. На рис. 4 представлена совместная относительная локация по соотношениям (5–7) для пяти взрывов в КНДР, проведенных в 2006, 2009, 2013 и (двух) в 2016 гг. при использовании станций МСМ, а также МСГ “Михнево”, вклад которой не меняет результатов локации. Местоположение события 09.09.2016 г. имеет жестко зафиксированные локальные координаты (0,0), а относительное расположение других событий определяется путем минимизации среднеквадратичной невязки дифференциальных времен про-

бега от мастер- и искомого события на станциях, где есть автоматические кросс-корреляционные вступления. Точность относительной локации 50–100 м, что достигается точностью оценки дифференциального времени пробега порядка 0.005 с. На МСГ “Михнево” частота оцифровки составляет 200 Гц или 0.005 с. На станциях МСМ шаг дискретизации варьируется от 0.05 с (20 Гц) до 0.0125 с (80 Гц). Для достижения одинаковой точности оценки времени вступления всеми станциями частота дискретизации была повышена до 200 Гц с помощью стандартной процедуры, основанной на преобразовании Фурье. При скорости P_n -волны 8 км/с шаг 0.005 с соответствует 40 м. Среднеквадратичная невязка дифференциального времени пробега для относительной локации взрывов в КНДР ниже

0.01 с или 80 м. Событие 2006 г. расположено в 2.3 км от центра координат и имеет точность оценки эпицентра порядка 250 м из-за слабых сигналов и большей неопределенности автоматической оценки времени вступления с помощью ККВФ. Важно отметить, что при высокой точности относительной локации абсолютная точность локации слабых событий приближается к точности локации больших мастер-событий с множеством станций.

Шестой взрыв имел размеры, при которых источник уже не мог считаться точечным. Время пробега в различных направлениях менялось по-разному, что приводило к значительным отклонениям от ожидаемых для точечного источника значений дифференциального времени пробега для сетки виртуальных местоположений. В результате среднеквадратичная невязка времени пробега превышала 0.2 с, что значительно превышало значения 0.01–0.02 с для пяти первых событий. Поэтому точность относительной локации составляла величину порядка 2 км, и относительное местоположение 6-го взрыва не показано на рис. 4.

ПРИМЕНЕНИЕ ККВФ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЦИИ АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Эффективность совместного использования станций группирования и метода ККВФ при обнаружении и определении координат событий хорошо иллюстрируется результатом восстановления афтершоковой последовательности тектонического землетрясения небольшой магнитуды. Вблизи г. Мариуполь 07.08.2016 г. произошло землетрясение с магнитудой 4.6 (ФИЦ ЕГС РАН), сопровождаемое серией афтершоков и приуроченное к южной периферийной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП). На рис. 5 приведены сейсмические записи основного события на двух сейсмических группах ИДГ РАН.

Пример совместной локации события 07.08.2016 г. вблизи г. Мариуполь показан на рис. 6.

В результате локации по всей совокупности сейсмических станций были определены время в источнике $T_0 = 08:15:03$ и координаты события по данным ФИЦ ЕГС РАН 47.17° с. ш. и 37.52° в. д. (49 станций). По результатам совместной

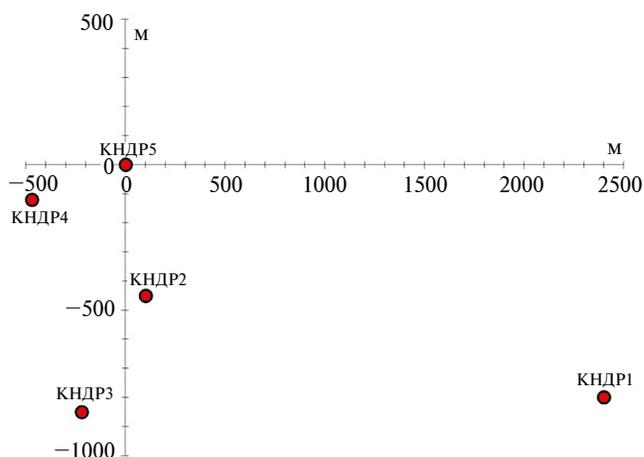


Рис. 4. Относительное местоположение эпицентров пяти объявленных взрывов в КНДР.

локации двух групп ИДГ РАН $T_0 = 08:15:06.3$, 47.16° с. ш. и 37.55° в. д. Как видно, сейсмические группы обеспечили высокую точность локации. Используя две сейсмические группы (AKASG, BRTR) и одну трехкомпонентную станцию (KBZ) МСМ, а также две станции группирования ИДГ РАН, удалось обнаружить двенадцать афтершоков, произошедших в течение 5 дней после главного события. Сейсмические станции ИДГ РАН располагались на расстояниях 3.28° — “Ростов Дон”, 7.96° — “Михнево”. Самые сильные три афтершока — 1, 12 и 3 — были зарегистрированы группой “Михнево” с магнитудами от 2.9–3.9. Эти события и запись главного события были использованы для создания шаблонов волновых форм. Обнаружение сигналов, оценка их магнитуды и относительная локация были проведены с помощью метода кросс-корреляции волновых форм.

Пример записи одного из афтершоков, зарегистрированных сейсмическими группами MHVAR и RD, произошедшего 11.08.2016 г. в 21:59:30 магнитудой 2.9, приведен на рис. 7. Общая схожесть сигналов отражается и в относительно высоких по сравнению с шумом значениях коэффициента кросс-корреляции между сигналами от землетрясения и его афтершоками, а большая длительность и специфичность этих сигналов приводит к высоким значениям SNR_{cc} , что является результатом эффективного подавления микросейсмического шума при одновременном использовании методов групповой обработки (направленного суммирования) и ККВФ.

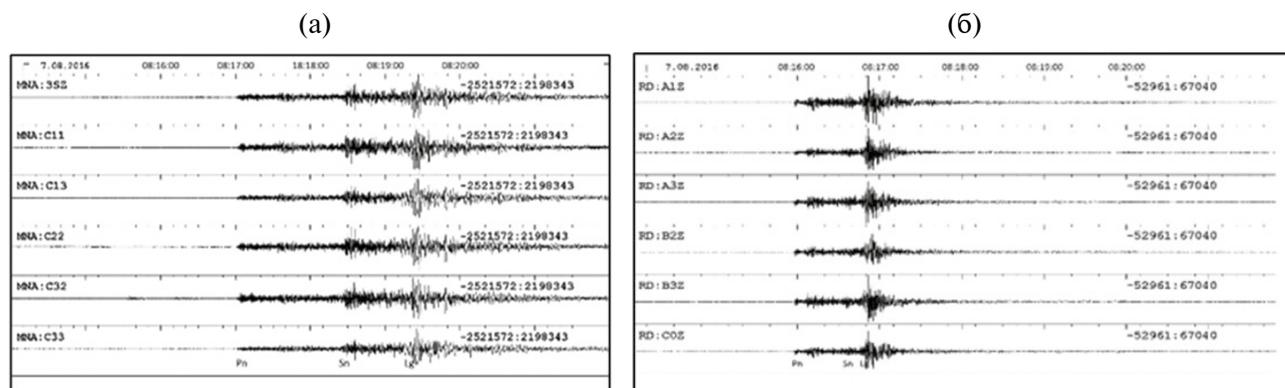


Рис. 5. Записи основного события на группах “Михнево” (а) и “Ростов Дон” (б). Коэффициенты пересчета для: MHVAR — $7.45 \cdot 10^{-6}$ мкм/с, RD — $3.16 \cdot 10^{-3}$ мкм/с [Санина и др., 2019].

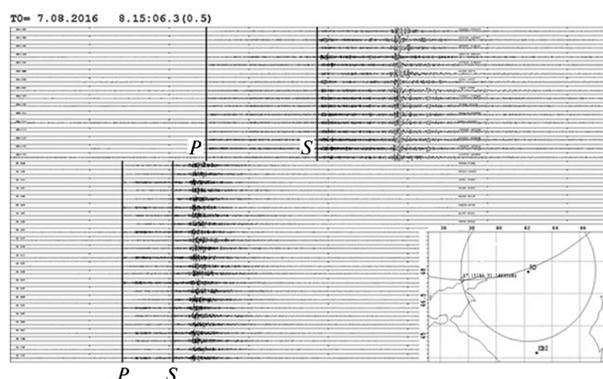


Рис. 6. Сейсмические записи на двух малоапертурных группах “Михнево” (вверху) и “Ростов-Дон” (внизу) и пример совместной локации на врезке. Вертикальные линии *P* и *S* отмечают вступления продольной и поперечной волн [Санина и др., 2019].

Выделение слабых сейсмических сигналов от афтершоков малой магнитуды было осложнено значительной техногенной нагрузкой на исследуемый регион и относительно высоким уровнем микросейсмического шума. Несмотря на сложные условия, было зарегистрировано двенадцать афтершоков, шесть из которых имели три и более ассоциированных станций из полного набора из пяти станций. Невязки времени в источнике для лучших афтершоков составляют сотые доли секунды, когда используются эмпирические времена пробега от главного толчка как мастер-события. Для таких невязок точность относительной локации составляет несколько сот метров, что создает условия для правильной сеймотектонической интерпретации положения и магнитуд афтершоков в системе региональных и локальных разломов.

В табл. 2 представлены параметры основного события и его афтершоков.

На рис. 8 приведена карта расположения выделенных афтершоков на фоне схемы тектонического районирования территории. Установленное расположение афтершоков хорошо коррелирует с известными тектоническими структурами, что косвенно подтверждает правильность определенных координат этих наведенных событий.

Сравнение разрешающей способности стандартных методов и метода ККВФ показывает большое преимущество последнего. Даже самые большие афтершоки не были обнаружены в МЦД при стандартной обработке данных со станций МСМ. Некоторые станции ФИЦ ЕГС РАН находятся гораздо ближе к эпицентру исследуемого землетрясения, что, видимо, позволяет им обнаруживать афтершоки с (относительной $m_b(\text{rel})$) магнитудой 3 и выше, что соответствует магнитудам $ML > 2.0-2.5$. Лучшее азимутальное покрытие и большее количество станций при совместном использовании сетей МСМ, ИДГ РАН и ФИЦ ЕГС РАН также позволит детально рассмотреть диаграммы направленности излучения различных фаз от главного события и афтершоков, используя станционные оценки относительной магнитуды.

РАЗЛИЧИЕ АФТЕРШОКОВ ПЯТОГО И ШЕСТОГО ВЗРЫВОВ В КНДР

Первый афтершок в серии подземных испытаний в КНДР был обнаружен только после пятого взрыва [Adushkin et al., 2017]. Это событие произошло через два дня после взрыва

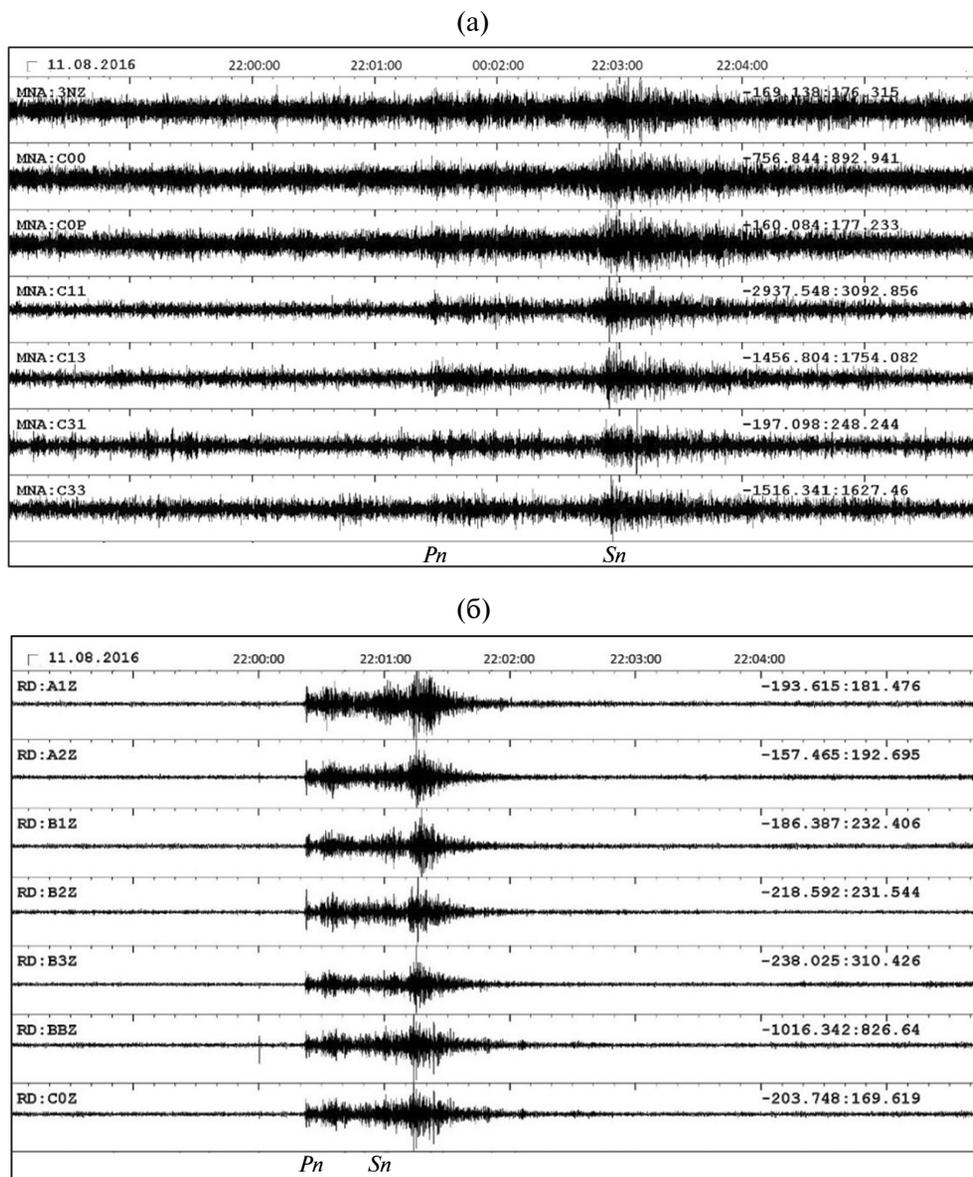


Рис. 7. Примеры записей на сейсмических группах: стационарной МНВАР (а) и временной RD (б) афтершока Мариупольского землетрясения 11.08.2016 г., время в очаге 21:59:30. Записи отфильтрованы в полосе 1–5 Гц, каналы вертикальные, названия каналов приведены слева, шкала амплитуд на записи — справа, величины даны в отсчетах АЦП. Коэффициенты пересчета: для МНВАР — $7.45 \cdot 10^{-6}$ мкм/с, для RD — $3.16 \cdot 10^{-3}$ мкм/с [Санина и др., 2019].

и было обнаружено с помощью метода ККВФ при использовании сигнала от третьего (2013 г.) взрыва в качестве шаблонного. Несмотря на различия в механизме источника и относительной амплитуде региональных фаз, удалось найти событие с относительной магнитудой m_b (по определению МЦД) около 2.1 [Adushki et al., 2017]. Так как это событие не было найдено в МЦД стандартными методами [Соупе et al., 2012], другие оценки магнитуды отсутствуют. Метод кросс-корреляции позволяет определить маг-

нитуду только по отношению к мастер-событию по формуле (4). Шестой взрыв в КНДР с магнитудой m_b (МЦД) = 6.07 (см. табл. 1) привел к возникновению более интенсивной афтершоковой последовательности, начиная с большого афтершока непосредственно (~ 8.5 мин) после взрыва.

Восстановление серии афтершоков взрывов в КНДР и единообразная оценка параметров обнаруженных событий начинаются с рутинной обработки данных на сейсмических групповых станциях MCM USRK и KSRS, расположенных

Таблица 2. Основное событие и афтершоки

№	Дата	Время			Координаты		RM	$RMS RM$
		час	мин	сек	шир.	долг.		
1	07.08.2016	8	15	3.941	47.17	37.52	0	0
2	07.08.2016	8	18	10.887	47.157	37.432	-0.92	0.305
3	07.08.2016	8	22	32.982	47.107	37.569	-1.86	0.12
4	07.08.2016	8	24	28.203	47.191	37.569	-1.82	0.233
5	07.08.2016	8	53	59.494	47.114	37.527	-2.29	0.095
6	07.08.2016	9	29	15.582	47.257	37.386	-2.33	0.035
7	07.08.2016	14	49	23.492	47.219	37.485	-2.64	0.25
8	07.08.2016	16	14	39.645	47.137	37.552	-2.04	0.342
9	07.08.2016	16	40	56.691	47.257	37.532	-2.38	0.273
10	09.08.2016	13	12	26.254	47.197	37.569	-2.16	0.388
11	11.08.2016	11	46	53.672	47.257	37.386	-2.30	0.195
12	11.08.2016	14	15	29.617	47.257	37.386	-1.95	0.120
13	11.08.2016	21	59	27.328	47.122	37.557	-1.91	0.343

Примечание: RM — относительная магнитуда, $RMS RM$ — стандартное отклонение относительной магнитуды.

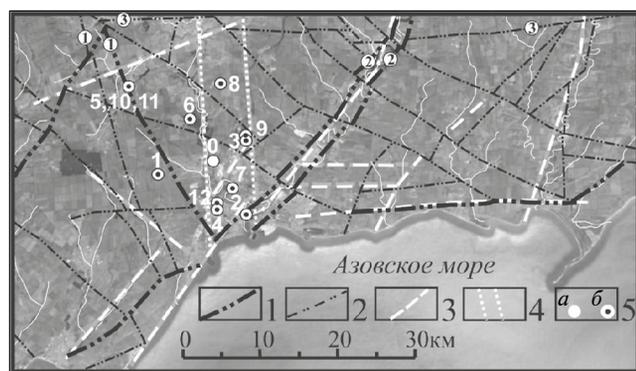


Рис. 8. Компиляционная схема неотектонических разломов и линейментов (составлена на основе работ [Китов и др., 2017; Санина и др., 2019]). 1–2 — неотектонические разломы (по материалам [Государственная..., 2012]): 1 — основные, 2 — второстепенные; 3 — линейменты; 4, 5 — эпицентр землетрясения 07.08.2016 г. (а) и его афтершоки (б); цифра — номер; цифры в кружках — номера разломов: 1 — Малоянисольский, 2 — Кальмиуский, 3 — Приморский.

на расстояниях 410 и 440 км соответственно от полигона за период с 2015 по 2021 гг. [Адушкин и др., 2021]. Для расчета кросс-корреляционных трасс мы используем 57 шаблонов многоканальных сигналов, полученных из 29 мастер-событий: 6 объявленных испытаний КНДР (станция

USRS начала работу только в конце 2008 г. и не зарегистрировала первый взрыв) и 23 афтершоков, обнаруженных в период с сентября 2016 г. по апрель 2018 г. [Kitov, Sanina, 2022]. Афтершоки, произошедшие за этот период, характеризуются наличием вступлений волн P_n , P_g , S_n и L_g с SNR , достаточным для использования соответствующих волновых форм в качестве шаблонных. Уже в этом наборе было выявлено различие во взаимной корреляции сигналов и было предварительно выделено две группы событий, как предполагалось, связанных с процессами постепенного продвижения к поверхности столба обрушения над полостями пятого и шестого взрывов. В дальнейшем начальная выборка из 23 афтершоков, в которую вошли представители обеих групп, показала достаточную эффективность и применялась без изменений. Совокупность 29 мастер-событий, произошедших на очень небольших расстояниях друг от друга, позволяла оценить уровень подобию новых сигналов по величине SNR_{cc} каждому шаблонному сигналу в отдельности. Если достаточное количество значений SNR_{cc} для сигналов, обнаруженных на станциях KSRS и USRK, превышает пороговое значение, то формируется гипотеза

события в пределах 10–12 км от полигона, то есть в пределах ± 1.5 с для изменения разности времен вступления на KSRS и USRK от взрывов, которая составляет 5.5 с. Непрерывная обработка данных с 2016 г. позволила определить параметры для статистически значимой гипотезы события, также называемые критериями определения события. (Все гипотезы событий, используемые в данной работе, были подтверждены в интерактивном анализе аналитиками МЦД.) Такой метод создания гипотез событий получил название метод мульти-мастера, что отражает одновременное использование множества похожих, но не идентичных шаблонов. Коэффициент кросс-корреляции и SNR_{rec} зависят от степени сходства самих сигналов и уровня микросейсмического шума. Поэтому два слабых, но практически идентичных сигнала могут иметь такое же значение SNR_{rec} , как и два менее похожих сигнала с высоким SNR . В нашем наборе мастеров представлены различные источники, что дает возможность найти множество похожих сигналов. Относительная локация афтершоков не проводилась в смысле достижения минимума невязок времени пробега, так как метод мульти-мастера не имеет такой возможности. Местоположение гипотез событий ограничено зоной применения виртуальной сетки локации в пределах 10–12 км от взрывов. Этот подход похож на локацию сейсмических событий с фиксированными координатами, что позволяет проверить саму гипотезу о возможном событии в данном месте, если невязки времени пробега находятся в пределах разрешенного интервала, как это принято в МЦД [Coyne et al., 2012].

В отличие от стандартной процедуры ассоциации сейсмических фаз, для повторяющихся событий можно учесть одно и то же физическое вступление несколько раз, если оно обнаружено шаблонами от близких, но разных событий. В основе этой процедуры лежит высокое сходство сигналов от пространственно близких событий. При расстоянии между событиями менее $1/4$ длины волны сигнала, используемого для ККВФ, CC должен быть выше 0.95 при отсутствии шумовой помехи. Небольшое изменение форм сигнала между близкими мастер-событиями может быть полезно для распознавания, если это изменение имеет физическую причину,

связанную с местоположением и механизмом источника. Доля вступлений из общего набора из 57 шаблонов, полученных на одной станции, является мерой надежности обнаружения соответствующего физического сигнала, который, возможно, скрыт в микросейсмическом шуме. Доля успешных обнаружений одного и того же физического сигнала для большого набора шаблонов похожа на частоту обнаружения отраженных импульсных сигналов как определяющего параметра эффективности работы радара. Разница в форме шаблона похожа на изменение частоты или ширины импульса. Поэтому мы рассматриваем одновременную ассоциацию вступлений от нескольких мастер-событий как версию работы радара, в которой кросс-корреляционные вступления представляются как согласованные с источником отражения от искомой цели. Согласованное детектирование сигналов на двух станциях в разных направлениях обеспечивает хорошую локацию найденных событий.

Возможность разделения афтершоков КНДР-5 и КНДР-6 в большой степени основано на наличии афтершока КНДР-5 [Adushkin et al., 2017], так как пятый взрыв был проведен за год до шестого. Шаблоны сигналов от пятого взрыва позволяют точно отличить его афтершоки (более высокие значения SNR_{rec}) от афтершоков КНДР-6. События, произошедшие в течение нескольких недель после КНДР-6 и связанные с обрушением кровли полости, используются в качестве шаблонов афтершоков КНДР-6. Пути распространения сигнала до USRK и KSRS практически идентичны для всех афтершоков, за исключением области вблизи источника, которая претерпела значительные структурные изменения, вызванные ударными волнами взрывов. Наблюдаемая разница формы сигналов, генерируемых событиями в двух кластерах, связана различием в их местоположении и с локальными условиями генерации/распространения сигнала. Надо отметить, что магнитуда взрыва КНДР-6 позволяет оценить радиус его упругого источника примерно в 1 км. Вряд ли эпицентр КНДР-6 был ближе 1 км от КНДР-5, так как зоны разрушения этих взрывов пересеклись бы, что могло привести к выходу продуктов детонации к поверхности. С другой стороны, взаимодействие столбов обрушения двух взрывов вряд ли бы было возможным при большем расстоянии между ними.

Двадцать девять мастер-событий разделены на три группы: КНДР-5 (12 шаблонов), КНДР-6 (10 шаблонов), а также 6 шаблонов взрывов плюс один шаблон афтершока КНДР-6, связанного с обрушением полости. Последняя группа не используется для разделения на кластеры. Группы созданы исходя из высокой корреляции между членами одной группы и относительно низкой корреляции с членами другой группы. Вновь найденный афтершок может быть отнесен к одной из групп в зависимости от уровня корреляции. Всего 61 афтершок из более 100 найденных в период между сентябрем 2016 г. и сентябрем 2021 г. можно уверенно отнести к одному из кластеров. Слабые афтершоки с низкими, но превышающими пороговые значениями SNR_{cc} ассоциированных сигналов могут не иметь достаточно выраженных свойств одного из кластеров.

Количественная разница афтершоков КНДР-5 и КНДР-6 определяется максимальным SNR_{cc} среди всех шаблонов из одной группы и средним значением SNR_{cc} в каждой группе шаблонов. На рис. 9 для каждого события, начиная с первого афтершока взрыва КНДР-5, представлена разность средних групповых значений SNR_{cc} ($dMean$) при кросс-корреляции с афтершоками, относящихся к кластерам взрывов КНДР-5 (красные круги) и КНДР-6 (черные ромбы). Для афтершоков, приписываемых КНДР-6, отрицательные значения разности $dMean$ получаются, так как средние SNR_{cc} в своей группе КНДР-6 на двух станциях значительно выше средних SNR_{cc} при кросс-корреляции с событиями в группе КНДР-5. И наоборот, эта разница положительна для предполагаемых афтершоков в группе КНДР-5. Еще одним используемым при идентификации параметром является разница максимальных значений SNR_{cc} для данного афтершока с мастерами в группах КНДР-5 и КНДР-6. Предполагается, что максимальное значение SNR_{cc} может быть достигнуто для каждого афтершока при кросс-корреляции с наиболее схожим по форме сигналом с самым высоким SNR . По совокупности двух параметров каждый афтершок может быть отнесен к одной из групп. Слабые афтершоки имеют относительно низкие значения SNR_{cc} , и поэтому их трудно различить как по максимальному в данном кластере, так и по среднему значению SNR_{cc} .

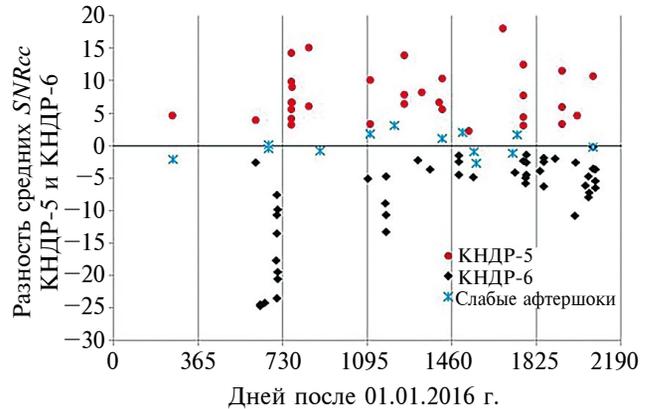


Рис. 9. Афтершоки в КНДР-5 (красные круги) находятся выше оси X , которая служит линией принятия решений. Афтершоки в КНДР-6 (черные ромбы) находятся ниже этой линии. Есть слабые события, которые нельзя отнести ни к одной из двух популяций из-за низких значений SNR_{cc} . Первый афтершок в КНДР-5 и события, следующие за КНДР-6, служат в качестве реперных для распознавания двух последовательностей афтершоков. Второй афтершок 03.09.2017 г. принадлежит кластеру КНДР-5.

Предварительная физическая интерпретация наблюдаемого разделения на две последовательности в первые годы после событий основана на механизме высвобождения гравитационной энергии, вызванной взаимодействием зон разрушения КНДР-5 и КНДР-6, которые имеют разные размеры и глубину заложения заряда. При различии энергии взрывов примерно на порядок величины, как следует из значений m_b , разница глубин заложения должна составлять несколько сотен метров, а расстояние между гипоцентрами должно быть не менее 1 км. Взаимодействие зон разрушения предполагает, что есть два отдельных кластера около гипоцентров КНДР-5 и КНДР-6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двадцать лет работы малоапертурной сейсмической группы “Михнево” доказывают практически десятикратный выигрыш в снижении амплитудного порога детектирования сигналов, которые используются для обнаружения слабых источников. Это стало возможным благодаря последовательному применению наиболее чувствительных инструментальных методов регистрации сейсмических сигналов в совокупности с методами обнаружения сверхслабых сигналов и оценки их кинематических и динамических параметров. Приведенный выше обзор охваты-

вает часть основных результатов работы МСГ “Михнево”, отдельно или в сети с другими станциями, относящихся к обнаружению и локализации сейсмических событий, связанных с наведенной сейсмичностью. Среди важнейших достижений снижение порога обнаружения сигналов и повышение точности оценки их параметров (времени вступления, азимута прихода волны и ее скорости относительно поверхности), повышение точности локализации (вплоть до нескольких сотен метров), а также обнаружение сейсмических событий с низкой магнитудой. Работа нескольких 3-С датчиков на группе “Михнево”, а также многочисленные исследования, проведенные с помощью МСГ, полностью состоящих из 3-С приборов, убедительно показали возможности понижения порога обнаружения региональных сигналов и повышения точности оценок основных параметров обнаруженных сигналов. Групповые станции, состоящие из 3-С датчиков, являются важным шагом на пути развития инструментальных наблюдений на региональных расстояниях.

Параллельно с развитием инструментальных наблюдений с помощью станции группирования “Михнево” развивались и методы обработки данных, значительно повышающие чувствительность и разрешающую способность сейсмических антенн. К ним относится направленное суммирование трасс, в том числе применяемое к кросс-корреляционным трассам на станциях группирования, состоящих как из вертикальных датчиков, так и из трехкомпонентных сейсмических приборов. Метод согласованного фильтра вносит существенный вклад в возможности обнаружения сверхслабых сигналов на региональных и телесеизмических расстояниях. Кроме того, ККВФ позволяет использовать сейсмические группы для идентификации природы событий как за счет оценки подобия сигналов, так и повышения точности относительной (и возможно абсолютной) локализации событий. Повышение точности оценки вектора медленности сейсмических волн, а также оценки параметров, связанных со взаимной корреляцией сигналов, играют важную роль в построении статистически значимых гипотез событий при эффективном подавлении ложных гипотез, состоящих из неверно ассоциированных сигналов.

Для иллюстрации преимуществ групповых станций и методов ККВФ при исследовании

наведенной сейсмичности в данном обзоре приведены примеры афтершоковой активности после землетрясения в г. Мариуполь и после объявленных взрывов в КНДР. Мы использовали основанные на ККВФ методы обнаружения сигналов, ассоциации найденных сейсмических фаз с событиями, а также оценки относительно положения и магнитуды найденных событий. Эти методы были разработаны в ИДГ РАН для глобальных, региональных и локальных сетей сейсмических станций. Вся обработка идет в автоматическом режиме, включая создание шаблонных сигналов с помощью обычного детектора. Амплитуда некоторых сигналов, детектированных с помощью кросс-корреляции, так мала, что их было бы очень трудно найти в интерактивном режиме.

Нами было обнаружено 12 естественных наведенных событий (афтершоков) в течение 5 дней после землетрясения 2016 г. в г. Мариуполь, 6 из которых имели 3 и более ассоциированные станции из общего набора из 5 станций. Афтершоковая активность в пределах испытательного полигона КНДР, по-видимому, наблюдается до сих пор, но данные имеются только для периода, использованного в нашем обзоре. Сигналы от наведенных техногенных сейсмических событий (афтершоков) на полигоне в первые годы после двух самых крупных испытаний несут в себе информацию о принадлежности к кластеру, связанному с одним из двух взрывов. Значительное число повторяющихся, но немного различающихся сейсмических событий в пределах небольшой площади позволяет использовать методы, подобные радару, для численной оценки разницы для успешной дискриминации событий в двух кластерах. Разработанный нами метод мульти-мастера может быть использован для идентификации природы событий в любой области, где наблюдается достаточно высокая сейсмическая активность и есть сейсмические группы на региональных расстояниях.

Невязки времени в источнике для лучших по числу ассоциированных станций афтершоков составляют сотые доли секунды, когда используются эмпирические времена пробега от мастер-события. Для таких невязок погрешность относительной локализации составляет несколько сотен метров, что создает условия для правильной сейсмотектонической интерпретации положения

и магнитуд афтершоков в системе региональных и локальных разломов. Сравнение разрешающей способности стандартных методов и метода ККВФ показывает большое преимущество последнего. Даже самые большие по магнитуде афтершоки землетрясения в г. Мариуполь не были обнаружены в МЦД при стандартной обработке данных со станций МСМ. Некоторые станции ФИЦ ЕГС РАН находятся гораздо ближе к эпицентру исследуемого землетрясения, что, видимо, позволяет им обнаруживать афтершоки с магнитудой 3 и выше.

Следующим этапом в развитии метода ККВФ в применении к естественным и техногенным наведенным последовательностям сейсмических событий нам видится в совместном использовании станций различных сетей для подтверждения и уточнения сейсмологического бюллетеня. Лучшее азимутальное покрытие и большее количество станций при совместном использовании сетей МСМ, ИДГ РАН и ФИЦ ЕГС РАН также позволит детально рассмотреть диаграммы направленности излучения различных фаз от главного события и афтершоков, используя стационарные оценки относительной магнитуды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с использованием данных УНУ “Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений “Михнево”” и в рамках государственного задания ИДГ РАН № FMWN-2025-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б.* Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН. 2015. 364 с.
- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево” от сейсмостанции №1 до современной геофизической обсерватории // *Физика Земли*. 2016. № 1. С. 108–119.
- Адушкин В.В., Китов И.О., Санина И.А.* Кластеризация афтершоковой активности подземных взрывов в КНДР // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 501. № 1. С. 69–72.
<https://doi.org/10.31857/S2686739721110037>
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН. 2019. 218 с.
- Волосов С.Г., Королев С.А., Солдатенков А.М.* Система синхронизации записей станций малоапертурной сейсмической антенны “Михнево” // *Сейсмические приборы*. 2012. Т. 48. № 1. С. 26–34.
- Государственная геологическая карта Украины. Центральнотуринопольская серия. L-37 VIII (Мариуполь), L-37 IX (Таганрог). Масштаб 1:200 000. Пояснительная записка. Киев: ДНВП “Геоинформ Украины”. 2012. http://geoinf.kiev.ua/wp/w/Viewer.php?pr1&umpl37-8&fmpkv_137-8_1.jpg
- Китов И.О., Санина И.А., Сергеев С.С., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л.* Обнаружение, оценка магнитуды и относительная локация слабых афтершоков с помощью кросс-корреляции волновых форм: землетрясение 7 августа 2016 г. в Мариуполе // *Сейсмические приборы*. 2017. Т. 53. № 2. С. 58–80.
- Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Ряховский И.А., Санина И.А.* Уникальная научная установка “Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений “Михнево”” // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2.
- Невский М.В., Чулков А.Б., Морозова Л.А., Еременко О.А.* Проблемы и перспективы развития систем сейсмологических наблюдений в XXI веке. Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука. 2003. С. 180–212.
- Николаев А.В.* Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность / А. В. Николаев, И. Н. Галкин (ред.). М.: Наука. 1994. 222 с.
- Санина И.А., Габсатарова И.П., Черных О.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л.* Интеграция малоапертурной группы “Михнево” в систему сейсмических наблюдений на Восточно-Европейской платформе. Сейсмичность Северной Евразии: Материалы Международной конференции / А. А. Маловичко (отв. ред.). 2008. С. 264–268.
- Санина И.А., Черных О.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г.* Малоапертурная сейсмическая антенна “Михнево”: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы // *Докл. РАН*. 2009. Т. 428. № 4. С. 536–541.
- Санина И.А., Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Габсатарова И.П.* Сейсмотектоническая обстановка землетрясения 07 августа 2016г и его афтершоков // *Физика Земли*. 2019. № 2. С. 156–167.
<https://doi.org/10.31857/S0002-333720192156-167>
- Санина И.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л.* Уникальной научной установке “МИХНЕВО” ИДГ РАН — 15 // *Динамические процессы в геосферах*. 2019. № 11. С. 48–56.
<https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.38623>
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Султанов Д.Д., Роль Г.А., Гамбурцева* в создании сейсмического метода контроля за ядерными испытаниями. М.: ОИФЗ РАН. 1998. Т. 3. С. 188–193.
- Федоров Е.К., Тамм И.Е., Семенов Н.Н., Садовский М.А., Пасечник И.П. и др.* Доклад совещания экспертов по изучению методов обнаружения нарушений возможного соглашения о приостановке ядерных испытаний // *Атомная энергия* 1958. Т. 5. Вып. 4.

- Adushkin V.V., Kitov I.O., Konstantinovskaya N.L., Nepeina K.S., Nesterkina M.A., Sanina I.A.* Detection of ultraweak signals on the Mikhnevo small-aperture seismic array by using cross-correlation of waveforms // *Dokl. Earth Sci.* 2015. V. 460. № 2. P. 189–191.
- Adushkin V.V., Kitov I.O., Sanina I.A.* Application of a three-component seismic array to improve the detection efficiency of seismic events by the matched filter method // *Dokl. Earth Sci.* 2016a. V. 466. № 1. P. 47–50.
- Adushkin V.V., Kitov I.O., and Sanina I.A.* Decrease in signal detection threshold by waveform cross correlation method owing to the use of a seismic array of three-component sensors // *Geofiz. Issled.*, 2016b. V. 17. № 1. P. 5–28.
<https://doi.org/10.21455/gr2016.1-1>
- Adushkin V.V., Bobrov D.I., Kitov I.O., Rozhkov M.V., Sanina I.A.* Remote detection of aftershock activity as a new method of seismic monitoring // *Dokl. Earth Sci.* 2017. V. 473. № 1. P. 303–307.
- Bobrov D., Kitov I., Zerbo L.* Perspectives of cross correlation in seismic monitoring at the International Data Centre // *Pure Appl. Geophys.* 2014. V. 171. № 3–5. P. 439–468.
- 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. № 1. P. 43–59.
- 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. № 3. P. 207–223.
- Braun T., Schweitzer J.* Spatial noise field characteristics of a three component small aperture test array in Central Italy // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2008. V. 98. № 4. P. 1876–1886.
- Bucknam R.C.* Geologic effects of the Benham underground nuclear explosion, Nevada Test Site // *Bull. Seismol. Soc. of Am.* 1969. V. 59. № 6. P. 2209–2219.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0590062209>
- Coyne J., D. Bobrov, P. Bormann, E. Duran, P. Grenard, G. Haralabus, I. Kitov, Yu. Starovoit* Chapter 15: CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability / P. Bormann (ed.). *New Manual of Seismological Practice Observatory.* 2012.
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15
- Gibbons S.J., Ringdal F.* The detection of low magnitude seismic events using array based waveform correlation // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 165. P. 149–166.
- Gibbons S.J., Schweitzer J., Ringdal F., Kværna T., Mykkeltveit S., Paulsen B.* Improvements to seismic monitoring of the European Arctic using three component array processing at SPITS // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2011. V. 101. № 6. P. 2737–2754.
- Gibbons S.J., Sorensen M.B., Harris D.B., Ringdal F.* The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multichannel waveform correlation at regional distances // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2007. V. 160. N. 3–4. P. 285–309.
- Kitov I.O., Volosov S.G., Kishkina S.B., Konstantinovskaya N.L., Nepeina K.S., Nesterkina M.A., and Sanina I.A.* Detection of Regional Phases of Seismic Body Waves Using an Array of Three Component Sensors // *Seismic Instruments.* 2016. V. 52. № 1. P. 19–31.
- Kitov I.O., Sanina I.A.* Analysis of Sequences of Aftershocks Initiated by Underground Nuclear Tests Conducted in North Korea on September 9, 2016 and September 3, 2017 // *Seism. Instr.* 2022. V. 58. P. 567–580.
<https://doi.org/10.3103/S0747923922050097>
- Sanina I.A., Gabsatarova I.P., Chernykh O.A., Riznichenko O.U., Volosov S.G., Nesterkina M.A., Konstantinovskaya N.L.* The Mikhnevo small aperture array enhances the resolution property of seismological observations on the East European Platform // *J. Seismol.* 2010. V. 15. № 3. P. 545–556.
- Schaff D.P., Richards P.G.* Repeating seismic events in China // *Science.* 2004. V. 303. P. 1176–1178.
- Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Gibbons S.J., Pirli M., Kühn D., Kværna T.* Seismic arrays, in *New Manual of Seismological Practice Observatory* / Bormann. P. (ed.). 2012. Ch. 9.
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP2_ch9
- Schaff D. P. and Richards P.G.* Improvements in magnitude precision, using the statistics of relative amplitudes measured by cross correlation // *Geophys. J. Int. Seismology.* 2014. V. 197. № 1. P. 335–350.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt433>
- Van Trees H.L.* *Detection, Estimation and Modulation Theory.* 1968. John Wiley and Sons.

The 20th Anniversary of the Installation of the Small-Aperture “Mikhnevo” Array. Monitoring Induced Seismicity

I. O. Kitov^a, I. A. Sanina^{a,*}, S. G. Volosov^a, and N. L. Konstantinovskaya^a

^a*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: irina@idg.ras.ru*

Received October 14, 2024; revised December 3, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — Over 20 years of continuous operation of the small-aperture seismic array (SASA) “Mikhnevo”, a huge experience in recording ultra-weak signals generated by regional and global seismicity has been accumulated. High-resolution data processing methods have been developed and applied, including directional summation and waveform cross-correlation. Within the framework of this review of the results of instrumental observations and processing, two approaches to reducing the detection threshold for seismic events when monitoring induced seismicity are considered — the use of array stations and the method of waveform cross-correlation (WCC). The effectiveness of the approaches in relation to the detection, location, and identification of weak seismic sources is illustrated by the aftershock sequence of the earthquake near Mariupol that occurred on August 7, 2016, as well as the aftershocks of the fifth and sixth announced explosions in the DPRK, detected during the period from September 9, 2016, to September 11, 2021. The coordinates of the earthquake were estimated using the data of the “Mikhnevo” array and the temporary SASA of the IDG RAS “Rostov-Don”. The location accuracy is comparable to the accuracy provided by 49 three-component (3-C) stations of the FRC UGS RAS and the International Monitoring System (IMS). In the five days after the earthquake, 12 aftershocks were detected and located relative to the mainshock using the WCC method. The group stations of the IMS AKASG and BRTR and the 3-C station KBZ also participated in the detection and estimation of the parameters. The network of stations of the FRC UGS RAS detected 5 aftershocks, and the IMS did not detect a single one. The location of explosions in the DPRK using the WCC made it possible to determine their relative location with an accuracy of 100–200 m. The sixth explosion could not be accurately located relative to the others due to the finite size of its source, which introduced significant changes in the differential travel time, depending on the direction to the station. The WCC method was also used to detect and identify weak seismic events within the DPRK Punggye-ri test site using template waveforms from explosions and aftershocks of the fifth and sixth tests, recorded at the IMS array stations KSRS and USRK. Over a five-year observation period, 89 events were detected. Based on estimates of the cross-correlation characteristics of signals at both stations, it was possible to divide the general aftershock sequence into two separate ones associated with processes in the zones of influence of the fifth and sixth explosions.

Keywords: induced seismicity, aftershocks, earthquakes, underground explosions, small-aperture seismic array “Mikhnevo”, waveform cross-correlation