

УДК 550.3

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КАТАЛОГА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, СОЗДАННОГО НА МАЛОАПЕРТУРНОЙ ГРУППЕ «МИХНЕВО»

© 2025 г. И. О. Китов, И. А. Санина*, Н. Л. Константиновская,
С. Г. Волосов, О. В. Овчинникова

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

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

Представлены результаты совместного анализа каталогов событий, ассоциированных со взрывами на Михайловском ГОКе по данным малоапертурной группы (МСГ) «Михнево», и станций Международной системы мониторинга с 2011 по 2024 гг. с использованием метода кросс-корреляции волновых форм. Подтверждено высокое качество каталога, создаваемого по данным МСГ «Михнево».

Ключевые слова: МСГ «Михнево», карьерные взрывы, метод кросс-корреляции, каталог сейсмических событий.

Для цитирования: Китов И.О., Санина И.А., Константиновская Н.Л., Волосов С.Г., Овчинникова О.В. Оценка качества каталога сейсмических событий, созданного на малоапертурной группе «Михнево» // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 2. С. 17–27. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_17

Введение

Более 20 лет МСГ «Михнево» (MHVAR), входящая в состав уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» УНУ СКГН» [Kocharyan et al., 2022] ведет непрерывную регистрацию волнового поля и поиск сейсмических событий различного генезиса. Как показал анализ созданных каталогов за двадцатилетний период наблюдений, основными сейсмическими событиями на территории Восточно-Европейской платформы (ВЕП) являются промышленные взрывы, производимые более чем на 300-х карьерах по добыче полезных ископаемых. Карьеры расположены на расстояниях от 60 до 400 км от МСГ, а магнитуда по локальной шкале M_L от взрывов оценивается от 1.2 до 3.8. Ежегодно регистрируется 500–700 таких событий.

Созданный по данным МСГ «Михнево» каталог передается в Единую геофизическую службу РАН (ЕГС РАН) для публикации в ежегодных сборниках «Землетрясения России». Сотрудниками ЕГС РАН проводится предварительная проверка предоставленных данных, если эти события были зарегистрированы и другими сейсмологическими станциями.

Высокая чувствительность МСГ «Михнево», определяемая ее свойствами как сейсмической антенны, эффективно подавляющей микросейсмический шум, позволяет обнаруживать очень слабые события, как правило, взрывы на небольших карьерах, сведения о которых попадают только в каталог МСГ. В этом случае точность локации и природа события оказываются в компетенции сотрудников ИДГ РАН, ведущих обработку данных. Это обстоятельство делает актуальной независимую проверку каталога событий, созданных на станции «Михнево», различными методами. Такая верификация каталога важна как для настройки процедуры обнаружения и идентификации сигналов, так и для надежности использования созданного каталога для научных и прикладных задач. Сравнение с альтернативным каталогом, полученным с помощью независимых станций и других методов обработки, может помочь в решении обеих задач.

Одной из активных площадок в пределах ВЕП являются карьеры Михайловского ГОКа. Михайловский ГОК – крупнейшее горнодобывающее предприятие по добыче железистых кварцитов,

расположенный в г. Железногорске Курской области. Добыча руд Михайловского месторождения происходит в трех карьерах (Южном, Центральном и Северном), имеющих общую протяженность около 6 км и ширину около 4 км. Объем разведанных запасов руды составляет более 11 млрд тонн, что является достаточным для работы предприятия на введенных мощностях на протяжении 300 лет. Добыча руды осуществляется открытым способом при помощи взрывания, экскавации и транспортировки горной массы автомобильным и железнодорожным транспортом. Одновременно к подрыву в карьере готовится несколько крупных породных блоков (от 3–5 до 10–15), расположенных на его разных участках. В каждом блоке вдоль уступа разбуривается система скважин, обычно в шахматном порядке, состоящая из нескольких десятков или сотен скважин глубиной 8–16 м и диаметром 160 или 250 мм. В каждую скважину помещается от 500 до 1500 кг эмульсионного ВВ. Для повышения эффективности разрушающего действия взрыва верхний участок скважины длиной 3–6 м закрепляется забойкой. При подрыве каждого блока применяется система короткозамедленного взрывания, при которой скважины или их группы из 2–7 скважин подрываются последовательно. Время замедления между подрывом скважин или их небольших групп составляет 20–50 мс. Масса ВВ, используемая при отбойке одного блока, составляет примерно 50–300 т. Блоки подрываются также поочередно со временем замедления от 2 до 6 с. В результате полное время реализации одного массового взрыва составляет от 10–20 до 30–40 с, иногда до 100 с и более [Адушкин, 2012].

Несмотря на то, что взрывы на карьерах Михайловского ГОКа достаточно мощные, первые вступления объемных волн P и S , используемых для расчета координат события, определяются сложно. Это объясняется тем, что на данном эпицентральной расстоянии первой регистрируется волна P_n , которая обладает сравнительно малой амплитудой, что может привести к некорректной оценке времени первого вступления и, соответственно, эпицентрального расстояния. Использование же последующих фаз, например, волны P_g , не является корректным, т.к. при короткозамедленных взрывах происходит наложение волн от последующих подрывов, и реальное время вступления этой волны может быть искажено. Это же относится и к волнам S_n и L_g .

Ранее было показано, что волновые формы от источников в пределах района проведения взрывных работ уверенно регистрируются на станции MHVAR и повторяются с высокой степенью подобию [Китов и др., 2014; Санина, Константиновская, 2022]. Это позволяет использовать для оценки качества каталога метод кросс-корреляции волновых форм (ККВФ), который требует наличия в качестве образца для расчета кросс-корреляции подтвержденную волновую форму, зарегистрированную в условиях низкого уровня шума – шаблонного сигнала.

Вторым способом проверки каталога является сравнение его с данными другого, созданного независимо.

В качестве альтернативного в этой работе используется каталог событий, созданный в Международном центре данных (МЦД) Временного технического секретариата (ВТС) Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ). С задержкой в несколько месяцев этот каталог полностью публикуется в предварительном бюллетене Международного сейсмологического центра и доступен широкому сейсмологическому сообществу. В нем содержатся сведения о сейсмических событиях, связанных со взрывами на Михайловском ГОКе.

Сейсмическая сеть Международной системы мониторинга (МСМ ВТС ОДВЗЯИ) включает множество сейсмических групп, одна из которых, AKASG (29.22° N, 50.70° E), находится в пределах нескольких сот километров от источника исследуемого нами набора данных. В совокупности с другими станциями сейсмической и инфразвуковой сетей МСМ, станция AKASG участвует в создании событий официального проверенного бюллетеня МЦД (REB – *Reviewed Event Bulletin*), основной особенностью которого является необходимость ассоциации с каждым событием сигналов первичных продольных волн (P_g , P_n , P , PKP , PKP_{ab} , PKP_{bc}) или инфразвуковых волн (I) с определенным уровнем качества оценок основных параметров на трех и более станциях. Ограничение на минимальное количество станций позволяет обеспечить необходимый уровень статистической значимости гипотез событий.

Данные

Основным источником сигналов в исследуемом районе являются взрывы на выброс, поэтому кроме сейсмических фаз часто регистрируются и инфразвуковые сигналы на ближайших станциях МСМ. Такие события можно считать более надежными с точки зрения идентификации их природы, так как землетрясения небольшой магнитуды не создают инфразвуковых сигналов с амплитудой, достаточной для регистрации на инфразвуковых станциях. В [Приложение А] приведен проверенный каталог событий МЦД (REB) с 2001 до середины 2024 г., в котором даны оригинальный идентификатор последней версии гипотезы события в базе данных МЦД (*orid*), время в источнике (*origin time*), координаты (*Lat, Lon*), число ассоциированных с событием фаз (*Nass*), магнитуда ($mb = -999.0$ означает отсутствие измеренной величины), глубина (*depth*) в километрах и номер дня в году (*jdate*). Выборка событий из полного каталога МЦД осуществлялась по координатам событий. Район был ограничен по широте от 51.50° N до 54.00° N и от 33.50° E до 37.00° E по долготе. Карьер расположен примерно в центре выбранного координатного прямоугольника.

В [Приложение Б] находятся бюллетени для этих событий, в которых даны названия станций (название инфразвуковых станций начинается с «I», далее идет двузначный номер станции и аббревиатура страны), фазы («I» – инфразвуковой сигнал), время пробега в секундах, эпицентрально расстояние в градусах, азимут от события на станцию в градусах, отношение сигнал/шум (SNR), медленность в секундах на градус, азимут со станции на событие в градусах. Как видно из бюллетеня, среди событий REB для исследуемого региона есть и чисто инфразвуковые. В большинстве случаев времена источников этих событий не попадают в интервал, в котором регистрируются взрывы из исследуемого района на станции «Михнево». Технологический процесс подготовки и проведения взрывов, скорее всего, ограничен утренними и дневными рабочими часами. Поэтому события, произошедшие в неурочное время, можно не рассматривать как соответствующие целям и задачам исследования данного типа антропогенной активности.

Для целей нашего исследования каталог в [Приложение А] разделен на чисто инфразвуковые события (*Pure Infra*) и события, в которых есть хотя бы одна сейсмическая фаза (*Seismic Infra*). Два типа таких событий это *S* – сейсмические и *SI* – сейсмо-инфразвуковые. Всего в используемой части каталога 114 чисто инфразвуковых событий, произошедших с 2011 г., и 194 события с сейсмическими фазами, зарегистрированными в тот же период времени. 2011 г. выбран в качестве начала, так как данные по станции AKASG имеются только для периода между 2011 и началом 2024 г. В свою очередь, шаблонные волновые формы имеются для всех событий из основного каталога, начиная с 2001 г. Таким образом, для использования метода кросс-корреляции волновых форм между событиями можно выбрать больше шаблонов предполагаемых сигналов от взрывов, чем имеется непрерывных записей на станции AKASG.

В каталоге ИДГ за период наблюдений, проведенных с января 2009 по февраль 2024 г., на станции «Михнево» находится 241 событие, приписываемых взрывам на карьерах Михайловского ГОКа. В [Приложение В] приведены основные параметры событий ИДГ, включая предварительный список на начало 2024 г. В графе «*ML*» даны оценки локальной магнитуды по данным ИДГ. Это значение изменяется в диапазоне от 2.8 до 3.8. В последние годы наметилась тенденция к росту значений *ML*. Времена вступления региональных фаз P_n и S_n позволяют оценить расстояние до источника по разности времен вступления. Азимут на событие определяется по разности времен прихода волн P_n и S_n на отдельные датчики группы методом направленного суммирования. Совокупность азимута и расстояния дает оценку координат события. Важно отметить, что даже одна групповая станция может с большой точностью найти координаты регионального события, если есть оценки времен и азимутов вступления хотя бы двух фаз [Санина и др., 2020]. Четыре параметра достаточно точно определяют координаты эпицентра. При наличии трех фаз, например, P_n , S_n и L_g точность только возрастает.

В данном исследовании используются два независимых каталога МЦД и ИДГ. На рис. 1 приведена схема расположения эпицентров событий по данным ИДГ (IDG) и МЦД (IDC). Для МЦД различаются чисто инфразвуковые (*Infra*) события и источники, которые содержат либо только сейсмические сигналы (*S*), либо и сейсмические, и инфразвуковые сигналы (*SI*). Как видно, инфразвуковые события, даже с учетом больших доверительных эллипсов, вряд ли напрямую связаны с карьерными взрывами. Это же подтверждается временами в источнике для этих событий вне рабочего периода карьера. Для нескольких чисто инфразвуковых событий, с временами в источнике, попадающими в рабочий интервал карьера, была проведена стандартная обработка на AKASG и ни одно из этих событий не имело вступлений на сейсмической станции.

Разброс эпицентров событий МЦД с сейсмическими фазами на схеме больше, чем для событий ИДГ. Многие из этих событий имеют довольно большие доверительные эллипсы, захватывающие территорию карьера. Со статистической точки зрения координаты этих событий не противоречат возможности их реального расположения в пределах карьера. События, лоцированные ИДГ, находятся в пределах или на небольших расстояниях от карьера, за исключением нескольких. При сравнении каталогов МЦД и ИДГ установлено, что почти все события в них, начиная с 2011 г., имеются в обоих каталогах. Однако есть события уникальные как для ИДГ, так и для МЦД. Тем более важно и интересно подтвердить как общие, так и уникальные для каждого каталога события.

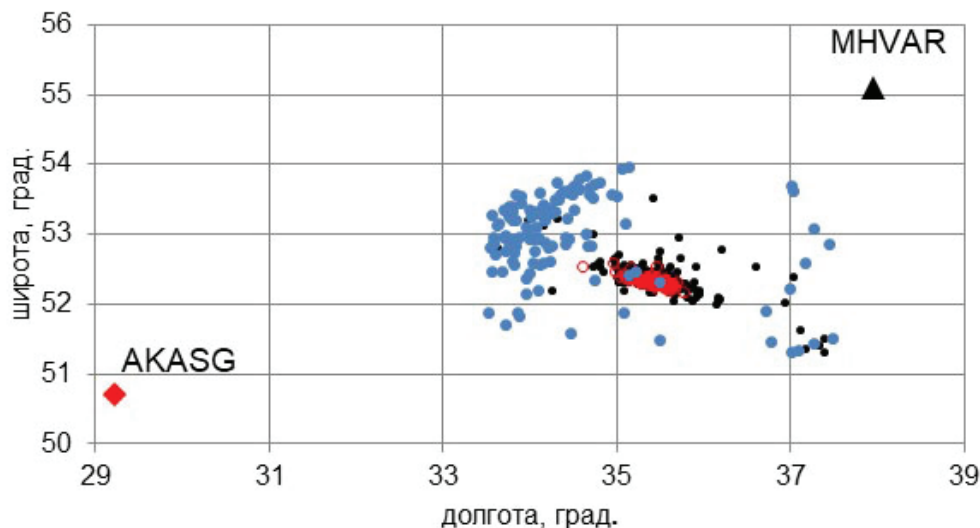


Рис. 1. Схема расположения эпицентров событий, лоцированных ИДГ (IDG) и МЦД (IDC). Для МЦД различаются чисто инфразвуковые (голубые кружки – *Infra*) события и источники, от которых зарегистрированы либо только сейсмические сигналы (*S*), либо и сейсмические, и инфразвуковые (черные кружки – *SI*). Красные кружки – события ИДГ. Станции AKASG (красный ромб) и MHVAR (черный треугольник) находятся в практически диаметрально противоположных направлениях от источников

Метод анализа

Метод кросс-корреляции волновых форм был применен к оценке качества каталогов, созданных на основе данных МСГ «Михнево» и станции AKASG. Изложим кратко суть метода, более детально описанного в [Китов и др., 2025]. Коэффициент кросс-корреляции сигналов (*CC*) количественно выражает подобие волновых форм. 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 (1):

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

где t – абсолютное время, которое принимает дискретные значения в соответствии с частотой опроса,

а $\|\times\|$ определяет L2-норму временного ряда или длину вектора сигнала. Агрегированный $CC(t)$ рассчитывается усреднением по всем каналам (формула 2):

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

Полученная дискретная трасса $CC(t)$ имеет ту же частоту опроса, что и исходные волновые формы. Для МСГ «Михнево» частота дискретизации записи составляет 200 Гц. Частота Найквиста в этом случае составляет 100 Гц, что заведомо достаточно для анализа высокочастотных региональных фаз.

В рамках использования метода согласованного фильтра CC обеспечивает оптимальное обнаружение сигналов, где под оптимальностью понимается обеспечение максимального значения отношения сигнал/шум (SNR). Оптимальность достигается одновременным действием двух факторов; кросс-корреляция максимальна для похожих (когерентных) сигналов (максимум 1.0 для двух одинаковых сигналов) и наиболее эффективно подавляет некогерентный шаблонному сигналу, в лучшем случае аддитивный стохастический, шум. Когерентный искомому сигналу шум существенно снижает способность метода согласованного фильтра к обнаружению похожих сигналов. Такие условия существуют в периоды высокой афтершоковой активности после катастрофических землетрясений. В пределах ВЕП микросейсмический шум можно считать близким к стохастическому, так как его источником является множество природных и антропогенных процессов.

Сейсмическая группа, составленная из 10–20 датчиков, распределенных по поверхности, придает дополнительные свойства временным рядам CC в методе кросс-корреляции. Во-первых, регистрация на группе увеличивает специфичность сигнала, понимаемую как снижение плотности векторов данных (шума и других нерелевантных сигналов) вокруг шаблонного сигнала в N -мерном пространстве, где N – число отсчетов в шаблонном (многоканальном на станциях группирования) сигнале. Увеличение N снижает вероятность случайного повторения шаблонного сигнала, снижает CC для шума и повышает SNR для искомого когерентного сигнала. Во-вторых, группа обеспечивает скоростную фильтрацию сигналов, то есть приходящие с различных азимутов одинаковые сигналы в пространстве векторов данных, определяемом шаблонным сигналом, не коррелируют. Как у любой фазированной антенны, у сейсмической группы есть диаграмма направленности. Разрешающая способность сейсмической антенны зависит от ее конфигурации и апертуры. Для региональных расстояний наиболее эффективными являются малоапертурные группы, которые настроены на относительно медленные региональные фазы от P_n до R_g . Направленный прием сейсмической антенны успешно используется при групповой обработке сигналов во временной области. Для кросс-корреляционной области этот эффект групповой обработки еще выше, так как некогерентный шум оптимально подавляется на этапе поканального расчета CC и направленное суммирование с нулевым фазовым сдвигом обеспечивает максимальное значение SNR для трасс CC (далее – SNR_{CC}).

В применении к данным МСА «Михнево» метод кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) показал высокую эффективность обнаружения сигналов от различных сейсмических событий, в том числе от повторяющихся техногенных источников. Так, сигнал от первого объявленного испытания в КНДР удалось найти на станции «Михнево», используя сигнал от второго взрыва в качестве шаблона волновой формы [Адушкин и др., 2015]. При этом обычное направленное суммирование во временной области не было достаточно эффективным методом понижения порога обнаружения сигнала. Каталоги техногенных источников с магнитудами менее 2 публикуются ежегодно в различных изданиях и центрах данных, например, ЕГС и ISC. Как и в любом методе обнаружения сигналов, порог детектирования ККВФ на групповой станции настраивается на уровень потока ложных срабатываний. Это не отражается негативно на работе оператора станции из-за сверхвысокой рабочей нагрузки, связанной с созданием большого числа гипотез событий, но предотвращает пропуск небольших событий, отсутствие которых в каталоге может исказить оценки параметров сейсмичности.

Непрерывная обработка данных методом ККВФ за весь период с 2011 г. не проводилась, так как она требует огромных компьютерных ресурсов и вряд ли может добавить значительное число событий,

так как активность карьера ограничена одним-двумя событиями в месяц. Поверхностная непрерывная обработка с помощью одного высококачественного шаблона не выявила ни одного дополнительного события с 2011 г. Этого можно было ожидать, так как ненайденные события имели бы очень слабые сигналы. Иначе они бы попали в бюллетени МЦД и ИДГ.

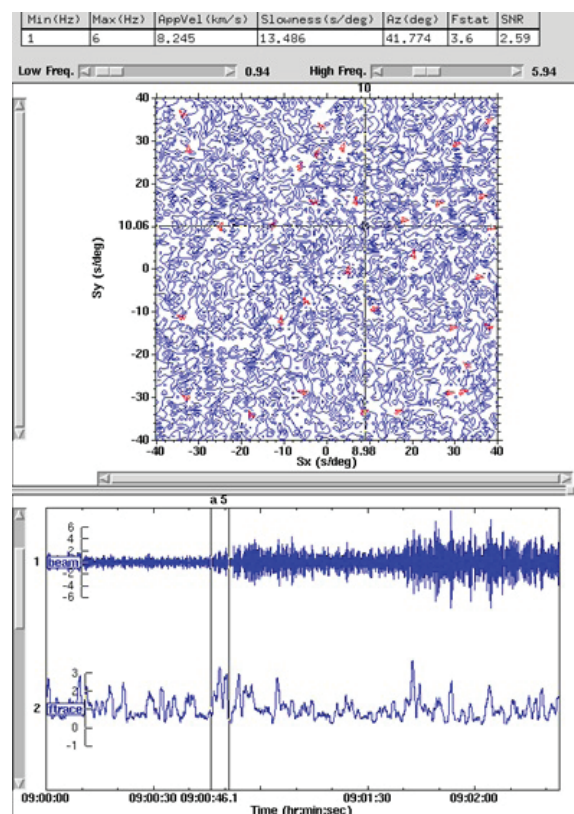
Для подтверждения принадлежности сигнала к популяции взрывов на карьерах Михайловского ГОКа среди всех событий в каталоге МЦД (используя волновые формы на станции AKASG) в [Приложение А] применен метод мульти-мастера, подробно изложенный в [Китов, Санина, 2022]. Этот метод основан на применении множества шаблонных сигналов из одной популяции или кластера событий, связанных с одним и тем же типом источников в небольшой по размерам области. Примерами таких кластеров являются карьеры, сейсмические рои, афтершоковые последовательности подземных взрывов или небольших землетрясений. Кросс-корреляция выбранных шаблонных сигналов с непрерывными записями на той же станции должна найти похожие сигналы с временами вступления, близким к приведенным в бюллетене событий в [Приложение Б]. Если подавляющее большинство шаблонов находит данный сигнал (на станции AKASG) из этого бюллетеня, то существование этого сигнала и принадлежность его к кластеру исследуемого карьера подтверждаются одновременно. Отсутствие корреляции не доказывает однозначно, что сигнала нет, но является значительным аргументом в пользу низкого качества такого сигнала, которое может быть обусловлено его малой амплитудой, сравнимой с уровнем микросейсмического шума. Как видно из бюллетеня МЦД в [Приложение Б], отношение сигнал/шум для фазы P_n от взрывов на карьерах Михайловского ГОКа зачастую находится ниже уровня автоматического детектирования: от 3.5 до 4.0 в зависимости от частотного диапазона детектора. Это означает, что сигналы были добавлены оператором для удовлетворения требования об ассоциации P волн на трех первичных станциях.

Для обработки методом мульти-мастера были отобраны 140 событий из каталога МЦД со вступлениями волны P_n на станции AKASG. Они разделены на две группы: чисто сейсмические события (54) и события с ассоциированными инфразвуковыми сигналами (86). В [Приложение Г] приведен список выбранных мастер-событий, шаблоны которых на станции AKASG были использованы для кросс-корреляции с непрерывными записями во временных интервалах вокруг событий из каталогов МЦД и ИДГ. Так как кросс-корреляция многоканальных записей требует больших расчетных мощностей, был выбран часовой или двухчасовой интервал, включающий искомое вступление для событий из каталогов.

Волновые формы шаблонов на станции AKASG от события 2016029 показаны на рис. 2. Шаблоны различной длины выбираются из сегмента длиной 125 с, где первые 5 с представляют собой шум перед сигналом. Максимальная длина шаблонного сигнала 120 с без учета шума. Показаны каналы после обработки различными фильтрами (Баттерворта 3-го порядка): 10–20 Гц для трех верхних каналов, 6–12 Гц для следующей тройки каналов, 3–6 и 1.0–2.0 Гц для следующих троек. Всего на станции AKASG в этот день было 22 работающих вертикальных канала. Справа на рисунке приведена FK диаграмма, на которой в соответствующих окнах есть результаты расчетов скорости волны – 8.245 км/с, которая хорошо согласуется со скоростью P_n волны в пределах ВЕП, и азимута на событие со станции AKASG – 41.77°. Отношение сигнал/шум для волны P_n на AKASG по результатам FK анализа составляет 2.59, что является довольно низким значением. Бюллетень МЦД [Приложение Б] дает оценку 1.79.

В процессе обработки с помощью кросс-корреляции используются различные длины шаблонов: от 20 до 120 с и пять фильтров. Это позволяет выбирать части сигнала с самой высокой амплитудой и/или с высокой когерентностью. При увеличении расстояния между источниками влияние второго фактора на значение коэффициента кросс-корреляции становится все менее заметным, так как когерентность снижается. Поэтому амплитуда может быть важна, так как когерентность сигналов от различных источников в пределах карьера все же выше, чем когерентность каждого из сигналов с шумом. Метод согласованного фильтра, основой которого и является поиск похожих сигналов с помощью кросс-корреляции, обеспечивает оптимальное отношение сигнал/шум. Это означает, что значение

б



а

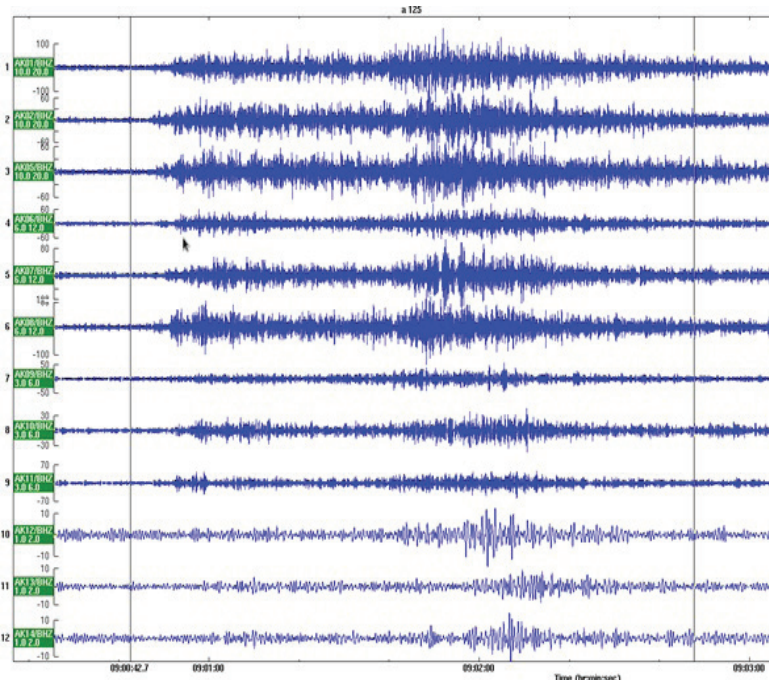


Рис. 2. а – волновые формы события на станции AKASG; б – окно оценки параметров вступления P_n волны с помощью ФК анализа (сверху); суммарная трасса по направлению к событию с азимутом 41.77° при скорости волны 8.245 км/с приведены в нижней части окна расчета ФК диаграммы. Время вступления $09:01:46.1$

SNR, рассчитанное на всех станционных каналах при замене исходных волновых форм на трассы коэффициента кросс-корреляции с соответствующими шаблонными сигналами, которое называется SNR_{cc} , будет максимальным из всех возможных для искомого сигнала. Далее используется SNR_{cc} для обнаружения сигнала и вводится порог детектирования, который бы разделял истинные и ложные срабатывания детектора в пропорции, соответствующей задачам исследования.

Пример записи события 2011033 на трех вертикальных каналах МСГ «Михнево» приведен на рис. 3а. На рис. 3б представлены примеры волновой формы и шаблонов, используемых для анализа в различных частотных диапазонах.

Результаты расчетов SNR_{cc} для нескольких репрезентативных случаев приведены в [Приложение Г]. Мастер-события с шаблонами на станции AKASG разделены на две группы: сейсмо-инфразвуковые и чисто сейсмические. Времена вступления, определяемые мастер событиями для идентификации искомого события, должны быть в пределах нескольких секунд от табличных значений в каталогах МЦД и/или ИДГ. Для каждого из рассматриваемых событий представлены значения SNR_{cc} для каждого из шаблонов. Если значение SNR_{cc} ниже порогового, то ячейка для этой пары событие-шаблон остается пустой. Одно и то же вступление в каталоге может быть найдено всего 140 шаблонами. Общее количество успешных шаблонов приведено внизу таблицы вместе со средним значением SNR_{cc} по всем ненулевым ячейкам из 140. Достоверно найденное событие может иметь от 30 до 140 успешных шаблонов. Несколько событий в левой части таблицы (например, 2013038 и 2013184) не имеют найденных вступлений вблизи ожидаемого времени, но могут иметь хорошие вступления далеко от ожидаемого времени. Это вступления, скорее всего, связаны с наличием в шаблонах волн L_g и R_g от других источников. На эти паразитные сигналы в шаблонах реагируют источники, не связанные

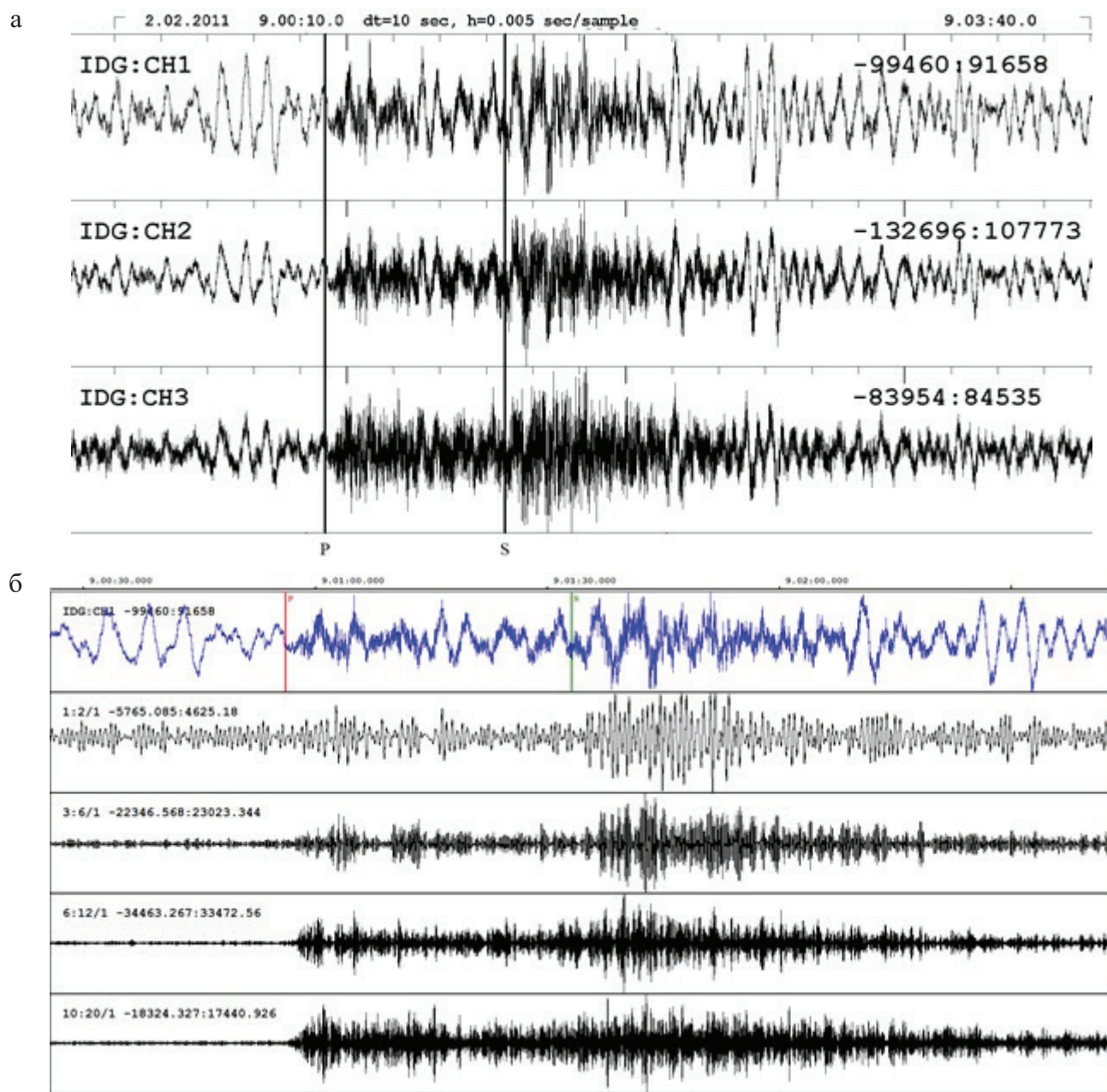


Рис. 3. а – пример волновых форм для трех вертикальных каналов события 2011033 на МСГ «Михнево» (запись нефильтрованная); б – волновая форма и шаблоны в частотных диапазонах 1:2, 3:6, 6:12, 10:20 Гц. Показаны времена вступления волн P и S

с исследуемым объектом. Это предположение хорошо иллюстрируется достаточно устойчивым детектированием одними и теми же шаблонами сигналов в различные дни, но во времена, отличные от соответствующих взрывам на карьерах Михайловского ГОКа.

В [Приложение Г] особый интерес представляют события, которые присутствуют только в одном из каталогов. Например, событие 2016078 не было найдено в МЦД, но есть в ИДГ, несмотря на то что его характеристики на станции AKASG близки к событию 2016062, обнаруженному с помощью ККВФ: 122 успешных шаблонов и $SNR_{cc} = 9.81$.

Случаи пропуска событий в одном из каталогов немногочисленны. В каталоге МЦД всего 190 подтвержденных в данном исследовании событий и 2 неподтвержденных. В каталоге ИДГ содержится 214 событий, из которых подтверждено 210 и 4 не подтверждено. Два из этих событий (2012041 и

2016062) отсутствуют в каталоге ИДГ, так как были зарегистрированы только одним центральным прибором и определение их координат в отсутствии оценок азимута прихода волн не проводилось. События (2013038, 2013291, 2014290) присутствуют в каталоге ИДГ, но их записи существенно зашумлены. Событие (2013184) хотя и было отнесено оператором как взрыв на одном из карьеров Михайловского ГОКа, имеет форму записи несколько отличающуюся от традиционной для этого карьера, что вероятно и не дало возможности идентифицировать его с использованием ККВФ.

Заключение

Проведенное исследование показало высокое качество каталога, созданного по данным МСГ «Михнево». При этом следует отметить, что «Михнево» в основном производит локацию и идентификацию событий без привлечения дополнительных станций, в то время как каталог AKASG формируется с учетом данных других станций МЦД. В случае событий на карьерах Михайловского ГОКа основной причиной неверного определения координат, связанных со взрывами на них, являются малые амплитуды P_n и S_n по сравнению с микросейсмическим шумом. Здесь следует подчеркнуть важную роль созданной за многие годы работы группы «Михнево» базы волновых форм от техногенных событий на ВЕП, которая позволяет оператору принять правильное решение при идентификации анализируемого события, что в свою очередь является базой для использования метода ККВФ.

В практическом приложении кросс-корреляции нужно отметить высокую надежность обнаружения сигналов от самих событий (высокие значения SNR_{cc}) и устойчивую картину успешного взаимного детектирования источников в рамках кластера, связанного с небольшой по размерам площадью, занимаемой этими источниками. Непрерывная кросс-корреляция, как показано на примере обнаружения и идентификации взрывов на карьерах Михайловского ГОКа, могла бы облегчить процесс обработки сейсмических данных. Распространение этой методики на другие карьеры, а также типы кластеров, позволит улучшить статистику обнаружения событий и определения их природы. Автоматическое обнаружение сигналов от источников на территории центральной части ВЕП с помощью кросс-корреляции позволило бы существенно снизить нагрузку на оператора сейсмической станции.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200561-3).

Список литературы

- Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории Европейской части России // Физика Земли. 2012. № 2. С. 110–130. <https://doi.org/10.7868/S000233371301002X>
- Адушкин В.В., Китов И.О., Константиновская Н.Л., Непеина К.С., Нестеркина М.А., Санина И.А. Обнаружение сверхслабых сигналов на малоапертурной сейсмической антенне «Михнево» с помощью кросс-корреляции волновых форм // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 6. С. 707. <https://doi.org/10.7868/S0869565215060158>
- Китов И.О., Санина И.А., Непеина К.С., Константиновская Н.Л. Использование метода согласованного фильтра на малоапертурной сейсмической антенне «Михнево» // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 3. С. 5–18. <https://elibrary.ru/SLRRSD>
- Китов И.О., Санина И.А. Анализ последовательностей афтершоков, инициированных подземными ядерными испытаниями, проведенными в Северной Корее 09.09.2016 г. и 03.09.2017 г. // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 3. С. 25–42. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-2>
- Санина И.А., Константиновская Н.Л. Особенности идентификации карьерных взрывов в центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» // Российский сейсмологический журнал. 2022. Т. 4. № 2. С. 23–32. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.2.02>
- Китов И.О., Санина И.А., Волосов С.Г., Константиновская Н.Л. К 20-летию создания малоапертурной группы «Михнево». Мониторинг наведенной сейсмичности // Физика Земли. 2025. № 2. С. 158–178.

Санина И.А., Волосов С.Г., Гоев А.Г., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Тарасов С.А. Точность локации эпицентров сейсмических событий по данным малоапертурной сейсмической группы «Михнево»: нужны ли дополнительные сейсмические станции? // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 2. С. 48–60. <https://doi.org/10.21455/gr2020.2-4>

Kocharyan G.G., Loktev D.N., Ryakhovsky I.A., Sanina I.A. Mid-Latitude Geophysical Observation Complex «Mikhnevo» // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Vol. 13 (2). P. 0590. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590>

Приложение А: <https://disk.yandex.ru/i/eUNP6HcQO5XCwQ>

Приложение Б : <https://disk.yandex.ru/i/pgEVQmiQRliRIQ>

Приложение В: <https://disk.yandex.ru/i/kc774OQpCZDkEQ>

Приложении Г: <https://disk.yandex.ru/i/odCZ07xPXkiYVA>

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE CATALOG OF SEISMIC EVENTS, CREATED AT THE MIKHNEVO SMALL-APERTURE GROUP

**© 2025 I. O. Kitov, I. A. Sanina*, N. L. Konstantinovskaya,
S. G. Volosov, O. V. Ovchinnikova**

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

The results of a joint analysis of catalogs of events associated with the Mikhailovsky GOK explosions according to the data of MSG «Mikhnevo» and stations of the International Monitoring System from 2011 to 2024 using the method of cross-correlation of waveforms are presented. The high quality of the catalog created according to the data of MSG «Mikhnevo» has been confirmed.

Keywords: MSG «Mikhnevo», quarry blasts, cross-correlation method, catalog of seismic events.