

УДК 550.34

СНИЖЕНИЕ ПОРОГА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ КРОССКОРРЕЛЯЦИИ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ

© 2016 г. В.В. Адушкин^{1,2}, И.О. Китов¹, И.А. Санина^{1,2}

¹ *Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*

² *Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Использование метода кросскорреляции волновых форм (КВФ) позволяет снизить амплитудный порог обнаружения повторяющихся сейсмических событий в 5–10 раз, повысить более чем на порядок величины точность оценки их относительного местоположения и магнитуды, а также надежно идентифицировать природу источника. В представляемом исследовании продемонстрировано, что состоящая из трехкомпонентных датчиков временная сейсмическая группа (далее 3-С группа) находит больше “правильных” сигналов с более высоким средним значением отношения сигнал/шум по сравнению с подгруппой из вертикальных каналов тех же датчиков.

Для анализа использованы записи повторяющихся взрывов в семи карьерах, удалённых от центральной станции на расстояние от 60 до 350 км. Для каждого карьера были отобраны лучшие шаблонные волновые формы, обеспечивающие обнаружение максимального количества “правильных” сигналов с наиболее высоким отношением сигнал/шум. Было проведено прямое сравнение эффективности обнаружения и идентификации сигналов от взрывов с помощью полной 3-С группы и подгруппы вертикальных датчиков. Результаты сравнения свидетельствуют, что 3-С группы имеют значительные преимущества перед станциями любых других типов при обнаружении и идентификации сейсмических событий на региональных расстояниях. Эти преимущества обусловлены ростом общей энергии шаблонного и искомого сигналов, а также усилением специфичности шаблонной волновой формы за счет увеличения в три раза её общей длительности. Рост отношения сигнал/шум приводит к увеличению числа обнаруженных сейсмических сигналов, а усиление специфичности волновой формы снижает поток ложных ассоциаций.

Ключевые слова: кросскорреляция волновых форм, сейсмическая группа, трехкомпонентные станции, обнаружение сигнала, карьерные взрывы.

Введение

Уже первые опыты использования метода КВФ (или метода согласованного фильтра) для анализа сейсмических данных показали возможность значительного снижения порога обнаружения сигналов от событий, происходящих на расстоянии в несколько километров друг от друга [Geller, Mueller, 1980; Israelsson, 1990; Joswig, 1990; Joswig, Schulte-Theis, 1993]. В течение многих лет такие исследования оставались единичными, однако к началу XXI в. широкое распространение цифровой регистрации и развитие глобальных и региональных сетей сейсмических станций привело к формированию больших архивов сейсмических записей. Это сделало возможным массовое применение современных методов обработки сигналов, среди которых одним из наиболее успешных является метод КФВ, использующий практически всю информацию о форме и амплитуде сигналов. В совокупности с доступностью цифро-

ВЫХ

архивов отмеченное способствовало быстрому росту общего числа исследований и расширению области применения метода КВФ.

В самом простом виде рассматриваемый метод включает два этапа. На первом из цифровых архивов станций глобальной или региональной сетей выбираются имеющие высокое качество волновые формы, надежно связанные с известными источниками. Далее эти волновые формы называются шаблонными (или шаблонами), а источники, с которыми они связаны, – мастер-событиями. В качестве мастер-событий могут рассматриваться землетрясения, карьерные взрывы, а также мощные подземные взрывы с точными оценками мощности, местоположения и времени события.

Затем все отобранные на первом этапе шаблонные волновые формы используются для расчета непрерывного временного ряда коэффициентов кросскорреляции с текущими волновыми формами. Обнаружение сигнала может быть основано как просто на применении порогового значения для коэффициента кросскорреляции, так и с привлечением более сложных методов.

Наиболее впечатляющие результаты метод КВФ продемонстрировал при анализе регулярных сейсмических фаз на региональных расстояниях. Многочисленные исследования показали возможность снижения порога обнаружения сигнала на один порядок величины (см. например, [Schaff, Richards, 2004, 2011; Gibbons, Ringdal, 2006; Schaff, 2008; Schaff, Waldhauser, 2010]). Если выразить преимущество метода КВФ количественно, то доступными для обнаружения становятся вступления фаз с отношением сигнал/шум 0.1–0.2. Одним из главных условий успешного использования метода для идентификации сейсмических сигналов является пространственная близость их источников (см. например, [Schaff et al., 2004; Schaff, Waldhauser, 2005; Richards et al., 2006; Waldhauser, Schaff, 2008; Yao, Shearer, Gerstoft, 2012]). Когда одно или несколько из множества близких событий, обнаруженных с помощью метода КВФ, характеризуются высокой абсолютной точностью локации, то и все остальные события автоматически приобретают ту же абсолютную точность оценки эпицентра.

Этот результат, как и многократное снижение неопределенности оценки магнитуды даже при использовании одной станции [Bobrov, Kitov, Zerbo, 2014; Schaff, Richards, 2014], имеет ключевое значение для сейсмотектонических исследований. Магнитуды пространственно близких источников можно оценить, используя отношение среднеквадратичных амплитуд близких по форме сигналов, что дает точную оценку магнитуды искомого события относительно магнитуды мастер-события. В то же время стандартная магнитуда по объемным волнам использует только оценки амплитуды и периода, на которые влияют различия пути распространения от источников к станциям и искажения, связанные с микросейсмическим шумом.

Эффективность обнаружения сигналов с помощью метода КВФ зависит как от качества и представительности шаблонных волновых форм, так и от типа сейсмических станций, с помощью которых получены используемые для анализа записи. Трехкомпонентные станции составляют большую часть глобальных и региональных сетей. Однако как в обнаружении сигналов стандартными методами, так и при использовании кросскорреляции они проигрывают сейсмическим группам, большинство которых оснащено только вертикальными датчиками. Сейсмические группы, состоящие из трехкомпонентных датчиков, не так широко распространены, но имеют большое преимущество перед группами вертикальных датчиков в обнаружении региональных фаз поперечных волн стандартными методами.

Авторами впервые выполнена количественная оценка снижения амплитудного порога обнаружения сигналов и их источников с использованием метода КВФ на малоапертурной сейсмической группе трехкомпонентных датчиков при региональном мониторинге. Программное обеспечение для всех расчетов разработано авторами исследования.

Кросскорреляция волновых форм на сейсмической группе

Впервые метод КВФ был применён С. Гиббонсом и Ф. Рингдалом [Gibbons, Ringdal, 2004] к многоканальным записям сейсмических групп *NORES*, *NORSAR* и *Hagfors*. В качестве повторяющихся источников рассматривалась серия из восьми взрывов небольшой мощности, выполненных в центральной части Швеции. Большинство этих взрывов было проведено в подземной полости, что значительно снизило их сейсмическую энергию. Координаты, времена в источнике и мощность каждого из взрывов были известны с большой точностью.

Снижение амплитудного порога обнаружения сигналов сейсмической группой по сравнению с одиночной трехкомпонентной станцией за счет применения метода регулируемого направленного приема (РНП) пропорционально корню квадратному из числа датчиков, что дает выигрыш от 3 до 6 раз в зависимости от количества станций в группе. Ожидалось, что взрывы будут обнаружены хотя бы лучшей и ближайшей из трех станций группирования, расположенной на расстоянии порядка 100 км. Несмотря на преимущества, создаваемые априорной информацией об источниках, стандартный метод обнаружения с помощью РНП пропустил семь из восьми взрывов. Единственное событие, найденное стандартным методом, было использовано для создания шаблонных волновых форм, и тот же метод РНП, примененный к многоканальным кросскорреляционным трассам, позволил обнаружить сигналы от всех восьми событий. Таким образом, можно утверждать, что совместное использование методов КВФ и РНП позволяет снизить порог обнаружения повторяющихся сейсмических сигналов еще в несколько раз по сравнению с выигрышем, достигаемым методом РНП на оригинальных волновых формах. Развивая метод КВФ в применении к сейсмическим группам, С. Гиббонс с соавторами [Gibbons, Kväerna, Ringdal, 2005] документировал существенное снижение амплитудного порога обнаружения очень слабых землетрясений.

Позже для автоматического обнаружения событий с помощью метода КВФ в афтершоковых последовательностях средних по магнитуде землетрясений были предложены алгоритмы для одной региональной сейсмической группы [Harris, Dodge, 2011; Slinkard, Carr, Youngl, 2013]. Одновременно в Международном центре данных аналогичная процедура была разработана для глобальной сети станций Международной системы мониторинга [Coyne et al., 2012 ; Bobrov, Kitov, Zerbo, 2014].

Мерой близости шаблонного и неизвестного сигнала, включая реализации микросейсмического шума, служит коэффициент кросскорреляции CC_j , который для дискретной записи на каждом из J каналов сейсмической группы $u_j(t)$ ($j=1, \dots, J$) и шаблонного сигнала длиной в N отсчетов на каждом канале m_{jn} ($n=1, \dots, N$) определяется соотношением

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

где t – абсолютное время, принимающее дискретные значения в соответствии с частотой оцифровки; $\|\cdot\|$ определяет $L2$ -норму временного ряда или длину вектора сигнала. Агрегированный коэффициент кросскорреляции рассчитывается усреднением по всем каналам сейсмической группы как

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

Полученная дискретная трасса $CC(t)$ имеет ту же частоту оцифровки, что и исходные волновые формы. К ней применяется стандартная процедура обнаружения сигнала с помощью отношения средних абсолютных амплитуд в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах [Freiberger, 1963], которое используется также в качестве оценки отношения сигнал/шум для кросскорреляционных трасс SNR_{CC} . (Для исходных трасс отношение сигнал/шум обозначается SNR .) Пороговое значение SNR_{CC} выбирается так, чтобы обеспечить обнаружение как можно большего числа полезных сигналов при небольшом потоке ложных срабатываний. Путем эмпирических оценок нами выбрано $SNR_{CC} > 3.5$. В режиме автоматического обнаружения $LTA = 40$ с, $STA = 0.8$ с, а время оценки STA сдвинуто вперед относительно LTA на половину длины STA .

Максимальное отношение уровней амплитудных спектров полезного сигнала и микросейсмического шума, а следовательно, и максимальное SNR_{CC} достигается на разных частотах в зависимости от спектрального состава шума и функции источника, а также от частотнозависимого затухания на пути распространения сигнала. Нами с применением фильтров Баттерворта третьего порядка были подготовлены шаблоны волновых форм для продольных и поперечных волн в пяти частотных диапазонах, пронумерованных от 1 до 5: 2–4, 3–6, 4–8, 6–12, 8–16 Гц. Коэффициент кросскорреляции рассчитывается во всех диапазонах, а детектор STA/LTA применяется к пяти отфильтрованным трассам $CC(t)$.

Таким образом получают пять трасс $SNR_{CCm}(t)$, где $m = 1, \dots, 5$. Для каждого дискретного значения времени t выбирается наибольшее значение $SNR_{CCm}(t)$ и составляется одна трасса $SNR_{CC}(t)$. Если значение $SNR_{CC}(t)$ превышает порог обнаружения, то сигнал считается найденным. Для этого сигнала по всем пяти трассам SNR_{CC} в окне длиной N отсчетов после первого вступления проводится автоматический поиск максимального значения SNR_{CC} , которое приписывается найденному сигналу вместе с максимальным абсолютным значением $|CC(t)|$ в том же окне.

Метод КВФ использует похожесть двух сигналов от разных источников, зарегистрированных на одном канале записи, в то время как метод РНП основан на когерентности сигналов от одного источника на разных каналах. При низкой когерентности сигналов от данного источника на отдельных датчиках группы метод РНП перестает работать. Если близкие по магнитуде и механизму источники в пространстве незначительно удалены друг от друга, то сигналы от них, зарегистрированные на одном и том же канале, должны быть похожи в связи с практической идентичностью путей распространения. В предельном случае сигналы от двух имеющих одинаковую природу и механизм и совпадающих в пространстве источников абсолютно синхронизованы на каждом канале. Поэтому коэффициент кросскорреляции с шаблонной волновой формой может оставаться достаточно высоким даже для сигналов ниже уровня шума [Van Trees, 1968]. Так как микросейсмический шум практически не коррелирует с шаблонными сигналами, то отношение сигнал/шум для временного ряда коэффициента корреляции увеличивается. Крайне важно, что коэффициент корреляции достигает максимального значения на всех каналах одновременно, что и определяет более высокую эффективность метода КВФ по сравнению с детектированием методом РНП. Когерентность обычных сигналов на сейсмической группе часто нарушается из-за отклонения времени прихода сигнала на отдельные датчики от теоретических значений, используемых при суммировании трасс.

Низкая корреляция между записями на разных каналах одного трехкомпонентного датчика – один из факторов, сдерживающих их повсеместное использование в региональных сейсмических группах [Wagner, Owens, 1995; Braun et al., 2004; Gibbons et al., 2011; Кумов и др., 2015]. Наибольшую выгоду от использования 3-С групп извлекают методы обработки, основанные на поляризационном анализе [Kedrov, Permyakova, 1994; Kennett, 2000]. Вследствие квазиэллиптической поляризации продольных и поперечных волн суммирование трасс методом РНП не приводит к подавлению шума. Даже небольшой фазовый сдвиг резко снижает когерентность сигналов, которая необходима при суммировании сейсмических трасс с задержками, определяемыми временем распространения волны вдоль группы. Поэтому суммирование записей может проводиться лишь по каждой компоненте в отдельности; чувствительность группы повышается только для тех фаз поперечных волн, у которых амплитуда ниже на вертикальных каналах.

Одно из важнейших преимуществ использования сейсмической группы – возможность оценки вектора медленности для вступающих сигналов, что позволяет в большинстве случаев по величине скорости распространения вдоль свободной поверхности отнести сейсмический сигнал к группе поперечных или поверхностных волн. Для оценки азимута и скалярной медленности вступающего сигнала используется *FK*-анализ [Coyne et al., 2012; Schweitzer et al., 2012]. Рассчитывается нормированная мощность сигнала $P(S_n, S_e)$, как квадрат суммы индивидуальных трасс. Для многоканальной трассы коэффициента кросскорреляции процедура расчета *FK*-диаграммы полностью аналогична стандартной. Перед суммированием трассы сдвигаются друг относительно друга в соответствии с временами задержки, определяемыми значениями вектора медленности (S_n, S_e) фронта плоской волны:

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

где $F_j(f)$ – уровень амплитудного спектра j -й трассы коэффициента корреляции $CC_j(t)$ на частоте f ; S_n, S_e – компоненты вектора медленности в направлении север-юг и восток-запад соответственно; $dnorth_j$ и $deast_j$ – координаты j -го датчика относительно центрального датчика; f_1 и f_2 – нижний и верхний пределы спектра. Сумма $S_n \cdot dnorth_j + S_e \cdot deast_j$ определяет теоретические времена задержки вступления плоской волны на датчик j относительно центрального датчика. Значения азимута и скалярной медленности, для которых спектр мощности достигает максимума, рассматриваются как азимут и медленность когерентного сигнала в плоском фронте вступающей волны. Длина окна для расчета спектра зависит от заранее определяемой ширины частотного диапазона (f_1, f_2) – так, для частот 3–6 Гц длина окна не превышает 1 с.

Расчет мощности производится в узлах регулярной сетки медленности (S_e, S_n) . Точка $(S_{e\max}, S_{n\max})$, соответствующая максимальному значению мощности, определяет направление и скорость прихода плоского фронта для данного вступления. Точность оценки медленности сигнала контролируется скоростью спада его мощности при удалении от точки максимального значения и наличием вторичных максимумов. Спад мощности относительного максимального значения обычно выражается в децибелах (дБ), а его зависимость от медленности иллюстрируется двумерным графиком на плоскости (S_n, S_e) .

Для сейсмической 3-С группы *FK*-анализ оригинальных волновых форм малоэффективен из-за наличия фазового сдвига между записями разных компонент на одном

датчике. Для трасс коэффициента кросскорреляции 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.

Конфигурация малоапертурной группы трехкомпонентных датчиков и экспериментальные данные

Мониторинг региональной сейсмичности, проводимый одной станцией или сетью станций, заключается в обнаружении сигналов от источников различных типов в пределах исследуемого района, оценке их характеристик и установлении соответствия обнаруженных сигналов сейсмическим событиям. Снижение порога обнаружения и увеличение точности оценок кинематических и динамических характеристик сигнала повышают качество каталога сейсмических событий и связанных с ним сейсмологических и тектонических исследований. Так, в целях контроля стабильности сейсмических и геодинамических условий при выборе площадки для атомной станции (АС), её строительства и эксплуатации нормативными документами предусматривается проведение сейсмического и геодинамического мониторинга в пределах ближнего района размещения АС. Одна из основных задач при этом – обнаружение и правильная идентификация природы источника сейсмических волн [Адушкин, Кочарян, Санина, 2011; Адушкин и др., 2013; Бугаев, Кишкина, Санина, 2012; Кишкина, Бугаев, 2014].

Самой высокой эффективностью обнаружения продольных и поперечных фаз региональных волн (P_g , P_n , S_n , L_g ...) обладает сейсмическая 3-С группа. Состоящая из семи трёхкомпонентных датчиков временная малоапертурная (~1 км) сейсмическая группа была установлена в Нижегородской области (координаты центрального датчика С – $\varphi=55.76$ °с.ш. и $\lambda=42.31$ °в.д.) и работала в течение четырех месяцев 2013 г. Конфигурация группы, которая в дальнейшем будет именоваться NN3CAR2013, показана на рис. 1.

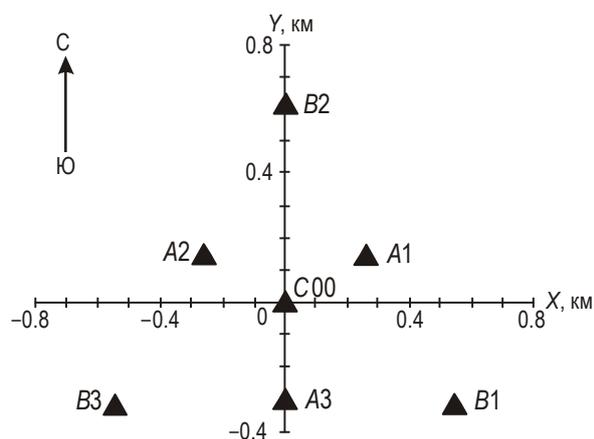


Рис. 1. Конфигурация временной малоапертурной группы NN3CAR2013, установленной в 2013 г. в Нижегородской области

Треугольники – трехкомпонентные сейсмические станции (датчики): C00 – центральная станция с координатами $X=0$, $Y=0$, относительно которых определяется местоположение источников обнаруживаемых сигналов; A1–A3 – станции, установленные в вершинах внутреннего треугольника, B1–B3 – внешнего. Ось X ориентирована в направлении на восток (E -компоненты), ось Y – на север (N -компоненты)

Выбранная конфигурация обеспечивает относительно равномерное распределение разрешающей способности группы по азимуту и волновому числу. Частота оцифровки на всех датчиках была одинакова и составляла 200 Гц. Из опыта известно, что высокая частота оцифровки важна для эффективности применения метода кросскорреляции волновых форм [Schweitzer et al., 2012].

Обнаружение сейсмических сигналов и идентификация их источников проводились в интерактивном режиме. Для событий, произошедших на региональных расстояниях,

составлялся отдельный каталог, с помощью которого оценивался уровень естественной сейсмической активности. Так как Восточно-Европейская платформа характеризуется низким уровнем природной сейсмичности, региональные сейсмические фазы были связаны главным образом с техногенными источниками. Большую часть идентифицированных источников составили карьерные взрывы – за время работы группы было обнаружено 323 взрыва, связываемых с 31 карьером (рис. 2, серые кружки).

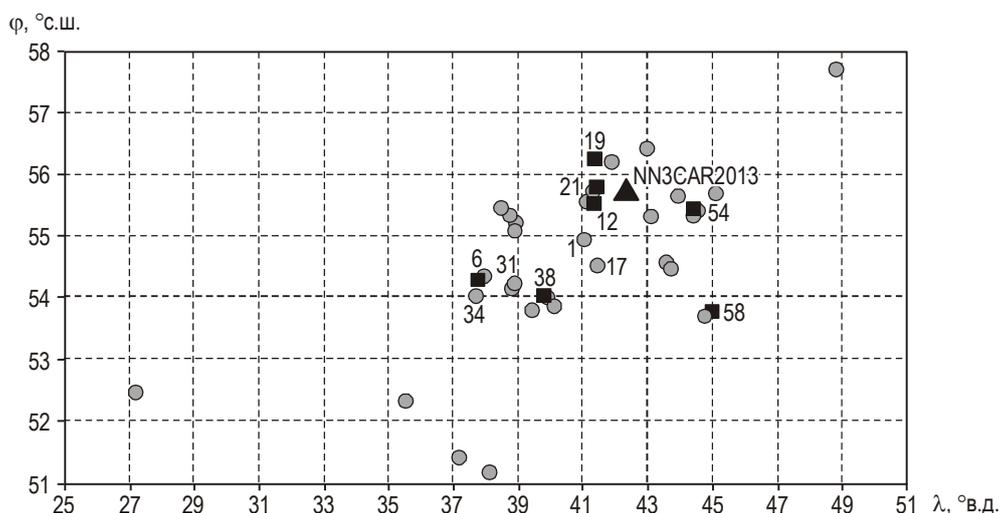


Рис. 2. Местоположение временной малоапертурной группы NN3CAR2013 (черный треугольник) и карьеров с идентифицированными взрывами (серые кружки). Черные квадраты – семь карьеров, использованных для анализа в данном исследовании

Главная задача представляемого исследования – оценка эффективности обнаружения сигналов полной 3-С группой и её подгруппой, состоящей только из вертикальных датчиков. Повторные взрывы на карьерах дают возможность статистической оценки количественной разницы в пороге обнаружения. Поэтому из всего набора карьеров для анализа были отобраны семь с наибольшим числом идентифицированных событий и лучшим покрытием всего диапазона расстояний и азимутов. Анализировались сигналы от 144 взрывов. В табл. 1 представлены координаты карьеров, определенные сейсмическим методом, расстояния до центральной станции группы и число зарегистрированных взрывов, которое меняется от 11 для карьера № 54 (Анненковский) до 60 для карьера № 19 (Ковров).

Таблица 1. Карьеры, в которых произведены взрывы, использованные для анализа

| Номер карьера | Название* | Географические координаты | | Расстояние до центральной станции | Число взрывов |
|---------------|---------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------|
| | | λ , °В.Д. | φ , °С.Ш. | | |
| 6 | Венев | 37.71 | 54.30 | 334 | 13 |
| 12 | Добрятинский | 41.29 | 55.53 | 69 | 60 |
| 19 | Ковров | 41.33 | 56.27 | 84 | 13 |
| 21 | Костенецкий | 41.41 | 55.80 | 56 | 14 |
| 38 | Погореловский | 39.76 | 54.07 | 248 | 11 |
| 54 | Анненковский | 44.37 | 55.40 | 132 | 14 |
| 58 | Исса | 44.88 | 53.80 | 278 | 19 |

* Названия карьеров приводятся в соответствии с [Землетрясения..., 2015].

Карьеры №№ 1, 17, 31, 34 (см. рис. 2) с числом взрывов от 10 до 18, также входящие в интерактивный каталог, преднамеренно не использовались для сопоставления эффективности обнаружения сигналов 3-С группой и ее вертикальной подгруппой. Мы используем их местоположение вблизи исследуемых карьеров для решения дополнительной задачи – оценки потока ложных срабатываний. Метод КФВ является одним из самых чувствительных методов проверки правильности идентификации источников, полученной стандартными сейсмологическими методами.

Для каждого из рассматриваемых взрывов были подготовлены многоканальные фрагменты волновых форм длительностью 10 мин с вступлением P -волны в середине. Расчеты коэффициента кросскорреляции и SNR_{CC} производились только в пределах десятиминутных интервалов.

Подготовка шаблонных волновых форм

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, удаленных друг от друга на большое расстояние. При увеличении длительности сигнала и расширении его спектрального состава усиливается специфичность шаблонной волновой формы. Качественно специфичность сигнала можно выразить как обратное значение вероятности случайного появления похожего сигнала в микросейсмическом шуме. Математически коэффициент кросскорреляции является нормированным скалярным произведением векторов 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 или сигнала от удаленного источника.

Успех применения метода КВФ основывается на высоком качестве шаблонных сигналов, два основных критерия которого – представительность сигнала и высокое значение отношения сигнал/шум. Так как предварительная идентификация источников и распределение их по карьерам выполнена в интерактивном режиме, нам остается выбрать шаблоны сигналов с $SNR > 5$. Такой выбор порогового значения основан на опыте работы авторов с региональными продольными и поперечными волнами [Bobrov, Kitov, Zerbo, 2014; Китов и др., 2014, 2015].

В данном исследовании сравнивается эффективность обнаружения сигналов с помощью метода КВФ на семи каналах вертикальной подгруппы и на 21 канале трехкомпонентной 3-С группы. Шаблоны для вертикальной подгруппы должны быть идентичны шаблонам вертикальных каналов для всей группы. Поэтому сначала строятся шаблоны для всей группы, а затем из них извлекаются вертикальные каналы.

Метод РНП, применяемый к данным малоапретурной сейсмической группы, позволяет значительно снизить уровень некоррелированного микросейсмического шума и таким образом повысить значение отношения сигнал/шум. Как показано в работе [Китов и др., 2015], вертикальная подгруппа сейсмической группы NN3CAR2013 обнаруживает сигналы от семи карьеров лучше, чем радиальная и трансверсальная подгруппы, хотя две последние более эффективны при обнаружении поперечных волн без выраженной вертикальной компоненты движения.

Тем не менее, использование 21 канала в методе РНП в любом случае понижает эффективность обнаружения в связи с квазиэллиптической поляризацией региональных

сейсмических фаз. Фазовый сдвиг между тремя компонентами, зарегистрированными на одном трехкомпонентном датчике, при суммировании отдельных каналов приводит к потере энергии сигнала, что превышает выигрыш от подавления шума. Поэтому SNR сигнала, обнаруженного на вертикальной подгруппе, практически всегда выше, чем отношение сигнал/шум для того же сигнала на 3-С группе, включающей вертикальные и сдвинутые по фазе горизонтальные каналы. Принятие порога $SNR > 5$ для 3-С группы при создании шаблонов гарантирует повышенное качество сигналов на вертикальной подгруппе.

Таблица 2. Число шаблонов волн P - и S -волн для семи карьеров

| Номер карьера | Всего шаблонов | | Лучшие шаблоны | |
|---------------|----------------|-----|----------------|-----|
| | P | S | P | S |
| 6 | 12 | 9 | 4 | 3 |
| 12 | 5 | 6 | 3 | 3 |
| 19* | 10 | 10 | 2 | 3 |
| 21 | 8 | 12 | 0 | 5 |
| 38 | 3 | 11 | 1 | 4 |
| 54 | 7 | 9 | 2 | 4 |
| 58 | 10 | 9 | 3 | 3 |

* Для карьера 19 использованы только первые 20 из 60 возможных событий.

Не все сигналы от 144 взрывов использовались в качестве шаблонных. Из списка для карьера № 19 были убраны 40 событий для того, чтобы примерно выровнять статистику сигналов по разным карьерам. Затем волны были разделены на продольные и поперечные по их скорости, что возможно благодаря FK -анализу. Как уже обсуждалось выше, сильная квазиэллиптическая поляризация в региональных волнах приводит к значительному искажению результатов FK -анализа трёхкомпонентных записей, и поэтому для оценки азимута и медленности была использована подгруппа вертикальных датчиков. Число вступлений P - и S - волн, удовлетворяющих критериям SNR , примерно одинаково для всех карьеров за исключением карьера № 38, где поперечные волны, видимо, имеют более высокую амплитуду. Сравнивая данные о количестве зарегистрированных взрывов (см. табл. 1) с числом используемых шаблонов (см. табл.2), можно сделать вывод, что примерно половина взрывов создает сигналы, достаточные для использования в качестве шаблонных в методе КВФ. Общее число шаблонных волновых форм составляет 121. Все фрагменты записей, не принимавшие участия в создании шаблонов, используются в дальнейшем анализе методом кросскорреляции.

Длительность шаблонов P - и S -волн различна. Для P -волны ширина окна составляет 12 с, причем в это окно включены 2 с до вступления сигнала. Для S -волны длительность увеличена до 20 с, включая 4 с до вступления. Обнаружение сигналов и формирование шаблонных волновых форм производится в автоматическом режиме. Небольшой временной интервал в шаблоне до вступления сигнала необходим для учета возможной неточности определения времени прихода, что важно для S -волн, а также из-за вариации времен их вступления на различные датчики.

Примеры трех компонент шаблонных сейсмограмм, сформированных по записям центральной станции (COE, CON, COZ) для всех семи карьеров, приведены на рис. 3. Частотный диапазон записей соответствует максимуму SNR . Время вступления всех P -волн было определено точно; для S -волн показаны записи в интервале 4–20 с.

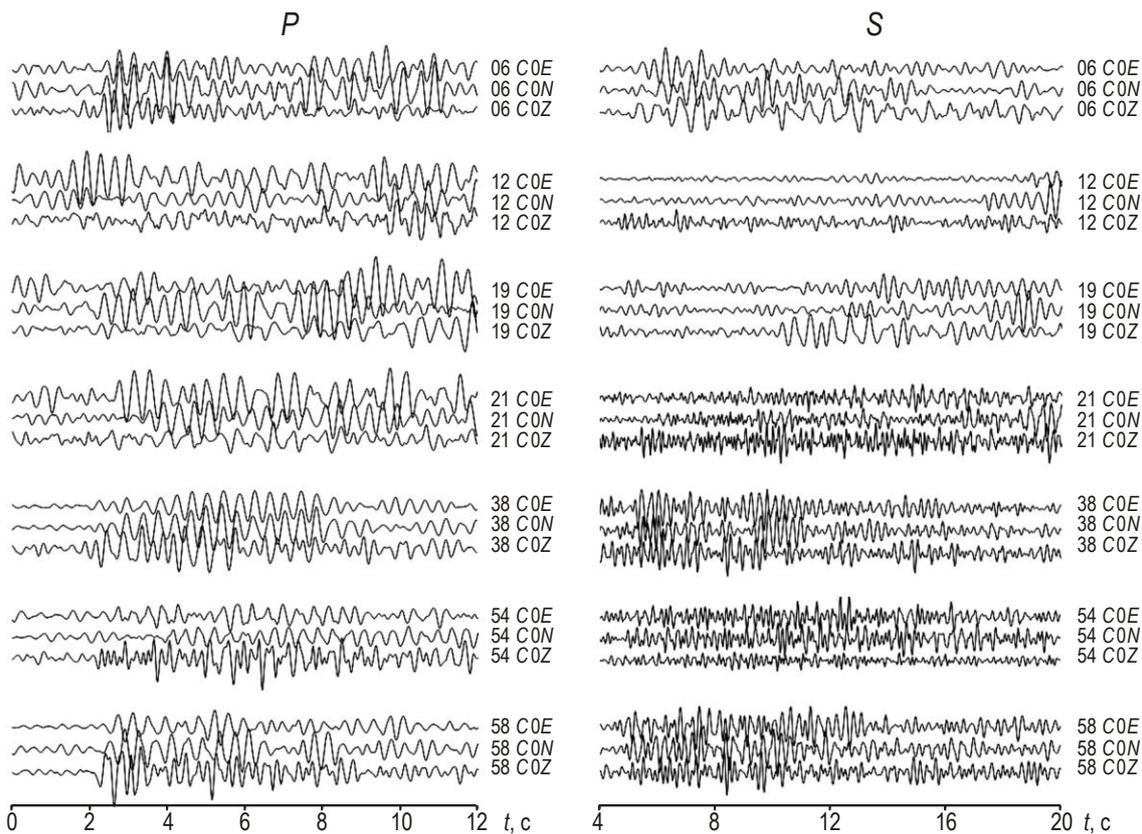


Рис. 3. Примеры шаблонов P - (слева) и S -волн (справа), сформированных по записям трёх компонент на центральной станции (COE, CON, COZ) для карьеров №№ 6, 12, 19, 21, 38, 54, 58 (сверху вниз). Для S -волн показаны записи в интервале 4–20 с

Выбор лучших шаблонов

На предыдущем этапе для каждого из семи карьеров с использованием требования к качеству сигнала ($SNR > 5$) было построено от 11 до 21 шаблона. Правило репрезентативности шаблонных волновых форм требует, чтобы лучшие шаблоны для каждого карьера обеспечивали обнаружение как можно более высокого SNR_{CC} и возможно большего числа сигналов от повторяющихся взрывов. Для этого рассчитывались коэффициенты SNR и SNR_{CC} для всех пар, составленных из шаблонов и фрагментов исходной записи. Так, для карьера № 6 рассматривалось 19 фрагментов записей и 21 шаблон, из которых 12 включают P -волны и 9 – S . Всего возникает 399 пар “шаблон–искомый сигнал”; при этом 21 пара соответствует автокорреляции, в связи с чем исключается из анализа. Как было определено ранее, условие обнаружения сигнала данным шаблоном задается порогом $SNR_{CC} > 3.5$.

Несколько примеров обнаружения продольной волны, связанной со взрывом в карьере № 6, приводятся на рис. 4.

На каждом из четырёх фрагментов представлены волновые формы трёх компонент сигналов (COE, CON, COZ), зарегистрированных центральной станцией COO; под ними – трасса SNR_{CC} , полученная по 21 каналу.

На рис. 4, а приведен пример успешного обнаружения сигнала, так как $SNR_{CC} > 10$. Это означает, что шаблон и найденный сигнал практически совпадают, но это не случай автокорреляции. В то же время исходный сигнал на всех каналах так велик, что его можно было легко найти с помощью метода РНП и обычного детектора.

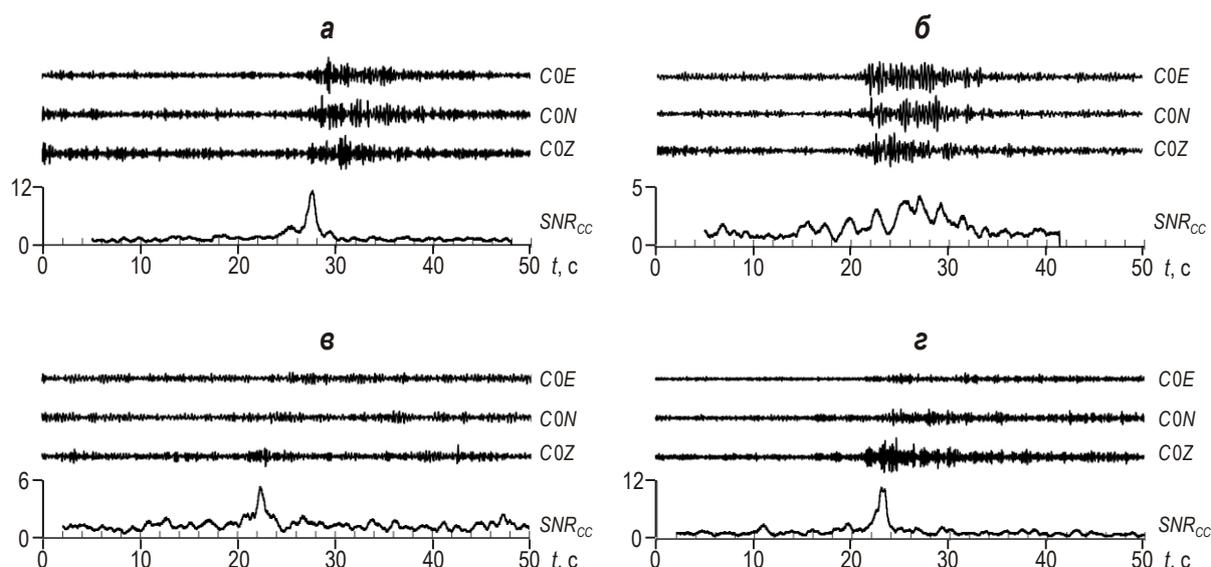


Рис. 4. Примеры обнаружения P -волны от взрывов с использованием метода КВФ. Карьер № 6. Трассы SNR_{CC} получены по 21 каналу

На рис. 4, б представлен пример высокоамплитудного сигнала, который хотя и был обнаружен с помощью метода КВФ, но находился на грани обнаружения, так как значение SNR_{CC} составляло только 3.6.

Обратный вышеописанному пример представлен на рис. 4, в. Можно видеть, что метод КВФ позволил обнаружить сигнал с хорошим $SNR_{CC}=5.5$, пропущенный при использовании стандартного метода РНП.

Самый распространенный случай обнаружения сигнала с помощью метода КВФ показан на рис. 4, г. Средний по амплитуде исходный сигнал, присутствующий на вертикальном канале $C0Z$, уверенно обнаруживается методом КВФ по значению $SNR_{CC}\approx 10$.

После расчетов, проведенных со всеми шаблонами и фрагментами записей, были получены оценки количества найденных сигналов и соответствующие им значения SNR_{CC} . На этом этапе можно провести предварительный анализ эффективности обнаружения сигналов методом КВФ с использованием каналов всей 3-С группы и только её вертикальной подгруппы. Сравнение было проведено для трёх лучших шаблонов P -волны и шести S -волны, поскольку эти числа соответствуют минимальному количеству шаблонов по всем карьерам для P -волн (три шаблона, карьер № 38) и для S -волн (шесть шаблонов, карьер № 12). Результаты сопоставления иллюстрирует рис. 5.

На рис. 5, а представлен случай, когда сигнал обнаружен в обеих конфигурациях группы, но SNR_{CC} больше на 3-С группе; на рис. 5, б – обратный случай, когда SNR_{CC} больше на вертикальной подгруппе. На рис. 5, в сигнал обнаруживается только вертикальной подгруппой, а 3-С группа дает $SNR_{CC}<3.5$. На рис. 5, г показан случай, когда сигнал обнаруживает только 3-С группа. Для сигнала, обнаруженного только в одной конфигурации сейсмической группы (3-С или В), мы рассчитываем разницу SNR_{CC} в месте максимума для обнаруженного сигнала. Если обе конфигурации обнаруживают один и тот же сигнал с близкими, но разными временами вступления, то разница SNR_{CC} рассчитывается для двух максимумов. В статистике обнаруженных сигналов учитываются все вступления. Линия порогового значения 3.5 демонстрирует различие между SNR_{CC} сигналов и микросейсмического шума. При общей длительности представленной части записи в 210 с уровень SNR_{CC} превышает пороговый только в области сигналов,

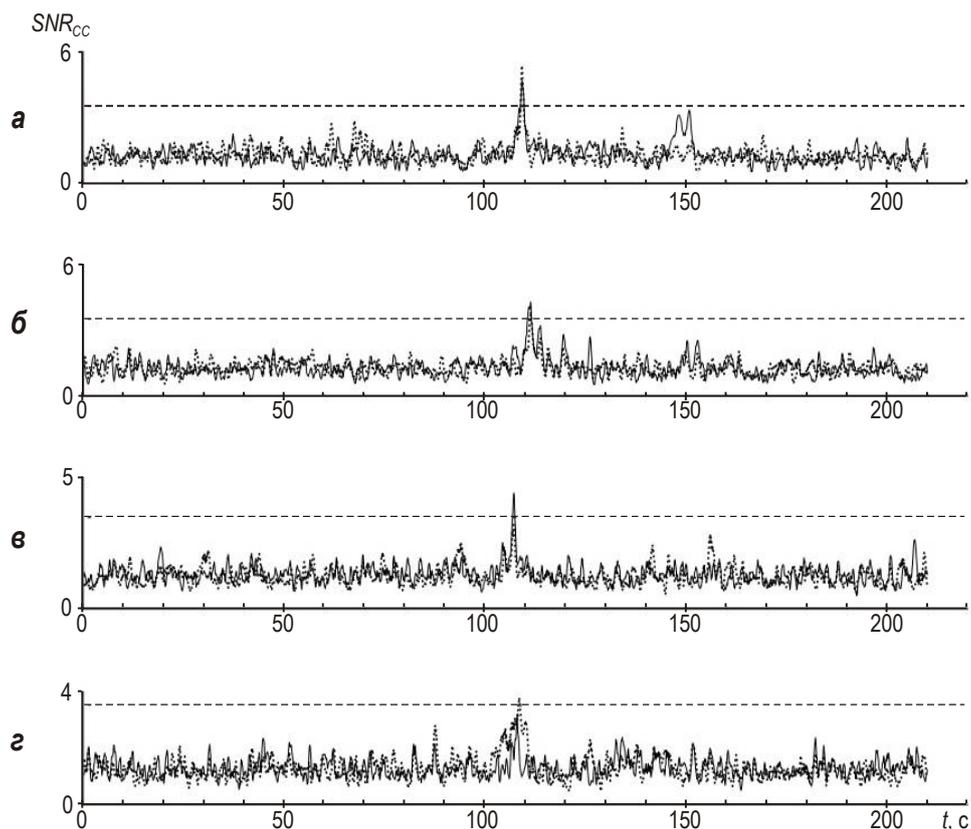


Рис. 5. Примеры обнаружения P -волны от взрывов в карьерах №№ 6 (а, б), 38 (в, г) с использованием метода КВФ. Трассы SNR , полученные по записям только вертикальных каналов – черные кривые, всех трёх каналов 3-С группы – серые. Установленный порог обнаружения $SNR_{CC}=3.5$ отмечен штриховой линией

а в остальное время остается не более 2.0. Однако на графиках есть несколько выбросов SNR_{CC} на уровень 2.5–3.0 и выше. Таким образом, снижение порогового значения привело бы к многочисленным ложным срабатываниям детектора, основанного на кросскорреляции волновых форм.

Сравнение результатов для всей 3-С группы и её вертикальной подгруппы представлены в табл. 3. Для каждого карьера выбраны три лучших шаблона P -волн и шесть лучших шаблонов S -волн. Значения SNR_{CC} , полученные при кросскорреляции всех 10-минутных фрагментов записи для данного карьера и выбранных шаблонов, усредняются по всем фрагментам и однотипным шаблонам. Для каждого карьера и типа волны рассчитывается разность между средними значениями SNR_{CC} для 3-С группы и вертикальной подгруппы (в табл. 3 – СИ). Жирным шрифтом в табл. 3 выделены отрицательные разности средних значений SNR_{CC} . В последнем столбце представлено общее количество 10-минутных фрагментов (Ф) для каждого карьера за вычетом одного с автокорреляцией.

Поскольку для самых удаленных от 3-С группы карьеров (№№ 6, 38, 58) времена вступления P - и S - волн разнесены во времени на 10 с и более, перекрытия соответствующих шаблонов не происходит. В целом для 3-С группы наблюдаются более высокие средние значения SNR_{CC} и по P -, и по S -волнам. Чем выше среднее значение SNR_{CC} для данного шаблона, тем позже должен достигаться порог обнаружения для сигналов от остальных взрывов на том же карьере при спаде их амплитуды или при увеличении уровня микросейсмического шума. В этом состоит основное преимущество использо-

вания

Таблица 3. Сравнение числа обнаруженных сигналов всей 3-С группой (залитые строки) и её вертикальной подгруппой (В)

| Номер карьера | Группа | P-волна | | | S-волна | | | | | | Φ |
|---------------|--------|-------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-------------|-------------|----|
| | | 3-С | В | СШ | 3-С | В | СШ | 3-С | В | СШ | |
| 6 | 3-С | 16 | 15 | 15 | 16 | 17 | 16 | 16 | 16 | 15 | 18 |
| | В | 13 | 11 | 17 | 14 | 15 | 14 | 13 | 9 | 13 | |
| | СШ | 1.9 | 1.6 | 0.2 | 1.1 | 1.1 | 2.3 | 2.1 | 2.0 | 1.9 | |
| 12 | 3-С | 4 | 4 | 3 | 9 | 8 | 8 | 8 | 5 | 2 | 12 |
| | В | 1 | 1 | 1 | 7 | 9 | 5 | 6 | 10 | 8 | |
| | СШ | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 1.3 | 1.0 | 1.2 | 0.9 | -1.3 | -0.8 | |
| 19 | 3-С | 12 | 12 | 11 | 17 | 15 | 15 | 15 | 14 | 13 | 19 |
| | В | 16 | 6 | 10 | 17 | 18 | 17 | 14 | 13 | 18 | |
| | СШ | -0.8 | 1.1 | 0.9 | 2.2 | -0.7 | 1.5 | 0.6 | 1.0 | -1.7 | |
| 21 | 3-С | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 12 |
| | В | 8 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | |
| | СШ | 1.8 | 2.6 | 1.1 | -0.4 | 0.8 | -2.1 | 0.0 | 2.2 | 2.2 | |
| 38 | 3-С | 12 | 11 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 13 |
| | В | 13 | 12 | 10 | 12 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | СШ | 0.7 | 1.0 | -0.7 | 0.4 | 3.5 | 3.0 | 3.4 | 3.1 | 3.5 | |
| 54 | 3-С | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 7 | 6 | 10 |
| | В | 10 | 9 | 9 | 10 | 7 | 10 | 9 | 6 | 4 | |
| | СШ | 2.4 | 3.7 | 2.9 | 3.3 | 3.9 | 4.5 | 3.5 | 2.9 | 2.0 | |
| 58 | 3-С | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 |
| | В | 12 | 13 | 12 | 11 | 11 | 11 | 2 | 11 | 11 | |
| | СШ | 1.1 | 0.3 | 1.0 | 2.9 | 3.0 | 2.8 | 1.7 | 3.4 | 3.2 | |

для кросскорреляции многоканальных записей 3-С группы – для заданного порога обнаружения она позволяет найти более слабые сигналы, которые будут пропущены вертикальной подгруппой.

Эффективность шаблонов P-волн для вертикальной подгруппы, выраженная в общем количестве обнаруженных вступлений, по крайней мере, не ниже, чем для всей 3-С группы. Только для карьера № 58 число обнаруженных вступлений одинаково для обеих конфигураций и достигает максимально возможного значения 13, т.е. числа фрагментов для этого карьера минус один, который содержит данный шаблон. Для карьеров №№ 6, 38 максимально возможное число сигналов не достигнуто как для P-, так и для S-волн.

Трёхкомпонентные шаблоны S-волны для удаленных карьеров имеют в среднем более высокие значения SNR_{CC} (большая положительная разность в табл. 3) и большее количество обнаруженных фаз. Для карьера № 54, удалённого от группы NN3CAR2013 примерно на 130 км, 3-С шаблоны демонстрируют более высокую эффективность обнаружения по обоим параметрам, причем несколько шаблонов P- и S-волн находят сигналы на всех фрагментах записей. Такие шаблоны можно рассматривать как максимально репрезентативные.

Для ближайших к 3-С группе карьеров №№ 12, 19, 21 картина эффективности обнаружения сигналов более разнообразна. Иногда шаблоны обеспечивают больше обнаруженных сигналов, но имеют относительно низкие значения SNR_{CC} . Шаблонные сигналы P-волны, полученные по записям от карьера № 12 на вертикальной подгруппе, позволяют обнаружить всего один из двенадцати возможных сигналов, а 3-С шабло-

ны – только четыре. Это представляется важным моментом для дальнейшего исследования, и поэтому три шаблона P -волны от карьера № 12 были сохранены среди лучших. В то же время шаблонные сигналы S -волны на вертикальной подгруппе позволяют обнаруживать десять сигналов из двенадцати. Не исключено, что некоторые из событий, приписываемых карьере № 12, на самом деле были взрывами на соседних карьерах с другой функцией источника и путем распространения. Для карьера № 19 обнаруживаются почти все сигналы; для карьера № 21 – все.

Метод КВФ основан на использовании самого лучшего шаблона для каждой группы повторяющихся событий; только для них имеет смысл сравнение эффективности обнаружения с помощью 3-С группы и вертикальной подгруппы. Из всех имеющихся шаблонов (121) в качестве лучших было отобрано 40 (количество лучших шаблонов для каждого карьера см. в табл. 2).

Критерии отбора были применены только к параметрам кросскорреляции с событиями, которые в интерактивном каталоге были идентифицированы как принадлежащие одному карьере. В табл. 4 перечислены все лучшие шаблоны. Название шаблонов содержит волну (P или S), номер карьера (06-58), дату события (например, 20130610) и время в источнике (ЧЧ:ММ:СС), взятые из интерактивного каталога.

Таблица 4. Среднее значение SNR_{CC} для 40 шаблонов, коррелированных с фрагментами записей от соответствующих им карьеров, и число вступлений, найденных шаблонами во всех 104 фрагментах. Лучший шаблон для каждого карьера выделен жирным шрифтом

| Шаблон | Нормальный шаблон (длительность 10 мин) | | | | Длинный шаблон (длительность 32 мин) | | | | Шаблон с расширенным спектром | | | |
|---------------------------|--|------------|---------------------|-----------|---|-------------|---------------------|-----------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------|
| | SNR_{CC} | | Число вступлений | | SNR_{CC} | | Число вступлений | | SNR_{CC} | | Число вступлений | |
| | 3-С | В | 3-С | В | 3-С | В | 3-С | В | 3-С | В | 3-С | В |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| P0620130610_115857 | 5.8 | 5.7 | 24 | 35 | 6.7 | 6.5 | 27 | 38 | 6.7 | 6.2 | 23 | 32 |
| S0620130610_115857 | 6.5 | 5.4 | 27 | 33 | 6.7 | 5.5 | 23 | 36 | 6.7 | 4.9 | 21 | 25 |
| P0620130628_094308 | 4.7 | 4.8 | 15 | 23 | 4.4 | 4.8 | 10 | 16 | 4.4 | 4.5 | 12 | 13 |
| S0620130628_094308 | 7.8 | 5.4 | 26 | 25 | 8.5 | 5.7 | 32 | 23 | 8.5 | 5.1 | 22 | 18 |
| P0620130812_135915 | 5.7 | 5.5 | 28 | 39 | 6.4 | 6.3 | 29 | 45 | 6.4 | 5.6 | 24 | 34 |
| S0620130815_064129 | 7.6 | 5.8 | 20 | 24 | 8.7 | 6.7 | 26 | 25 | 8.7 | 5.2 | 17 | 18 |
| P0620130830_073132 | 5.1 | 5.0 | 21 | 22 | 5.4 | 5.0 | 17 | 19 | 5.4 | 4.7 | 17 | 17 |
| P1220130625_082836 | 4.6 | 5.2 | 7 | 14 | 6.0 | 5.5 | 10 | 16 | 4.4 | 4.2 | 6 | 10 |
| S1220130720_081155 | 6.8 | 3.6 | 46 | 31 | 7.7 | 6.3 | 35 | 40 | 7.2 | 5.4 | 37 | 29 |
| P1220130802_075555 | 4.6 | 5.5 | 28 | 15 | 5.0 | 5.3 | 23 | 35 | 4.6 | 3.6 | 27 | 15 |
| S1220130806_115446 | 6.8 | 3.9 | 24 | 37 | 6.2 | 5.1 | 41 | 19 | 7.2 | 5.4 | 28 | 25 |
| P1220130820_103355 | 4.3 | 5.7 | 21 | 20 | 5.5 | 6.3 | 35 | 49 | 4.1 | 3.5 | 20 | 14 |
| S1220130820_103355 | 5.0 | 3.5 | 37 | 60 | 5.4 | 6.2 | 34 | 50 | 4.7 | 5.5 | 32 | 56 |
| S1920130521_080112 | 8.0 | 6.7 | 24 | 34 | 7.8 | 7.0 | 24 | 40 | 7.8 | 6.7 | 22 | 31 |
| P1920130521_112252 | 4.5 | 5.1 | 22 | 50 | 5.2 | 7.7 | 34 | 49 | 4.3 | 5.0 | 17 | 48 |
| S1920130523_081338 | 6.4 | 6.2 | 16 | 50 | 6.7 | 7.3 | 22 | 43 | 6.3 | 6.0 | 14 | 48 |
| P1920130610_084413 | 4.5 | 5.9 | 17 | 41 | 6.0 | 8.3 | 26 | 45 | 4.5 | 5.9 | 17 | 40 |
| S1920130617_082856 | 7.3 | 6.5 | 36 | 43 | 7.4 | 6.2 | 23 | 40 | 7.0 | 6.2 | 26 | 34 |
| S2120130618_075835 | 9.0 | 8.6 | 29 | 47 | 9.8 | 9.1 | 25 | 43 | 9.4 | 9.0 | 29 | 58 |
| S2120130716_081209 | 12.6 | 9.5 | 26 | 38 | 13.2 | 10.0 | 19 | 26 | 13.0 | 9.6 | 21 | 31 |
| S2120130724_080323 | 8.8 | 7.5 | 29 | 41 | 9.8 | 8.4 | 35 | 43 | 8.8 | 6.0 | 14 | 22 |
| S2120130730_075048 | 10.6 | 9.9 | 27 | 40 | 10.9 | 9.7 | 20 | 35 | 10.7 | 10.2 | 25 | 38 |
| S2120130813_083246 | 9.2 | 8.8 | 36 | 56 | 9.6 | 8.9 | 37 | 40 | 9.7 | 9.1 | 35 | 47 |
| S3820130705_122129 | 11.2 | 7.8 | 21 | 15 | 12.6 | 8.5 | 25 | 20 | 10.7 | 7.5 | 21 | 14 |
| P3820130719_135456 | 7.1 | 6.2 | 31 | 33 | 9.1 | 7.4 | 32 | 29 | 7.1 | 5.6 | 30 | 16 |
| S3820130719_135456 | 12.5 | 8.8 | 23 | 25 | 14.2 | 9.8 | 24 | 28 | 11.9 | 8.5 | 23 | 20 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------|-----|----|----|------|------|----|----|------|-----|----|----|
| S3820130813_122544 | 13.3 | 9.9 | 15 | 14 | 15.3 | 11.0 | 15 | 16 | 12.6 | 9.7 | 15 | 12 |
|--------------------|------|-----|----|----|------|------|----|----|------|-----|----|----|

Окончание табл. 4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---------------------------|-------------|------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|
| S3820130816_102801 | 13.0 | 9.6 | 20 | 14 | 14.8 | 10.7 | 20 | 16 | 12.3 | 9.5 | 16 | 13 |
| S5420130719_111033 | 11.3 | 7.9 | 14 | 13 | 11.8 | 8.1 | 24 | 13 | 10.1 | 6.5 | 17 | 9 |
| P5420130806_123232 | 11.0 | 7.8 | 17 | 19 | 14.3 | 9.7 | 14 | 12 | 10.7 | 7.6 | 13 | 17 |
| S5420130815_101827 | 11.8 | 7.5 | 17 | 10 | 14.2 | 9.1 | 14 | 12 | 11.6 | 7.4 | 13 | 10 |
| S5420130816_091530 | 7.3 | 4.9 | 12 | 6 | 8.2 | 5.3 | 8 | 3 | 7.1 | 4.7 | 9 | 9 |
| S5420130906_102828 | 13.9 | 9.0 | 14 | 12 | 14.9 | 10.1 | 18 | 10 | 12.4 | 7.6 | 17 | 9 |
| P5420130910_100738 | 10.9 | 7.8 | 12 | 15 | 14.4 | 9.0 | 12 | 9 | 10.9 | 7.7 | 11 | 13 |
| P5820130706_054732 | 8.8 | 6.4 | 15 | 12 | 12.0 | 8.2 | 23 | 12 | 8.5 | 6.3 | 12 | 12 |
| S5820130706_054732 | 10.4 | 7.2 | 18 | 12 | 11.8 | 8.0 | 23 | 13 | 10.0 | 7.2 | 13 | 11 |
| P5820130713_131335 | 7.3 | 6.1 | 16 | 14 | 8.0 | 6.8 | 15 | 13 | 7.9 | 5.7 | 16 | 14 |
| P5820130723_121550 | 5.7 | 5.2 | 16 | 18 | 6.1 | 5.4 | 14 | 14 | 6.8 | 5.8 | 15 | 15 |
| S5820130812_112248 | 6.3 | 4.1 | 17 | 9 | 6.6 | 4.4 | 17 | 9 | 5.8 | 3.8 | 15 | 5 |
| S5820130905_123706 | 12.1 | 8.1 | 14 | 14 | 13.8 | 8.9 | 17 | 13 | 11.2 | 7.3 | 14 | 11 |

При выборе шаблонов надо помнить, что большее число обнаруженных сигналов для шаблонов от некоторых карьеров не обязательно свидетельствует о большей эффективности вертикальной подгруппы. Среди сигналов вполне могут оказаться вступления, ложно ассоциированные с данным карьером. Дополнительным параметром, который позволяет разделить сигналы на правильно и ложно ассоциированные с данным карьером, служит невязка медленности, оцениваемая в рамках *FK*-анализа кросскорреляционных трасс. Этот анализ на этапе выбора лучших шаблонных форм, по-видимому, избыточен. Он играет ключевую роль при оценке эффективности обнаружения данным шаблоном сигналов от “своего” карьера и отсеивания ложных вступлений от других карьеров.

Надо отметить, что близко расположенные к группе карьеры (расстояние менее 100–150 км) не создают на станции достаточно развитой волновой картины: времена прихода *P*- и *S*-волн разделены всего несколькими секундами, что затрудняет разделение на группы по типу волн. Объединяя шаблоны *P*- и *S*-волн в один, мы могли бы повысить его специфичность. При этом длительность общего шаблона растет пропорционально расстоянию между источником и приемником, а время расчетов кросскорреляции – пропорционально квадрату числа точек в шаблоне.

Кроме того, при увеличении расстояния времена вступления *P*- и *S*-волн расходятся всё дальше, и интервал между концом видимой части *P*-волны и началом *S*-волны заполняется микросейсмическим шумом. Расчет коэффициента кросскорреляции с шумом представляется пустой тратой ресурсов. Тем не менее, далее рассматривается влияние длительности и спектрального состава шаблонов на эффективность обнаружения методом КВФ.

Сравнение эффективности обнаружения сигнала методом КВФ с помощью 3-С группы и её вертикальной подгруппы

Специфичность сигнала определяется его спектральным составом и длительностью шаблонной волновой формы. Поэтому прежде чем делать выводы об эффективности обнаружения сигналов методом КВФ при использовании 3-С группы и только вертикальных датчиков, необходимо доказать, что изменение этих параметров не оказывает значительного влияния на окончательный результат. Нельзя не отметить, что специфичность сигнала может как вырасти, так и снизиться при увеличении окна кросскорреляции и расширении спектра шаблона. Так, кроме проблемы с резким увеличением

времени расчетов при расширении временного окна шаблона, есть эффекты, противодействующие повышению специфичности сигнала. При расширении окна за пределы физического сигнала P - и/или S -волны добавляется неспецифический шум, что может отрицательно сказаться на уровне коэффициента корреляции со всеми сигналами. Тогда вместо желаемого роста SNR_{CC} при корреляции с подобными сигналами из того же места, что было бы следствием увеличения специфичности сигнала, может произойти снижение SNR_{CC} и будет пропущено большее число “правильных” сигналов.

Для исследования влияния ширины окна корреляции были созданы шаблоны P - и S -волн длительностью 32 с (длинный шаблон). В результате, шаблоны P -волн включали S -волну, а окна для S -волн иногда включали наиболее скоростные фазы поверхностных волн. В свою очередь, расширение частотного диапазона шаблонных волновых форм должно положительно сказаться на увеличении SNR_{CC} для близких по форме сигналов, но всё зависит от частотного состава микросейсмического шума. Если в какой-то части расширенного частотного диапазона уровень шума выше уровня сигнала, то вместо ожидаемого роста специфичности волновой формы может произойти её снижение. В целях исследования эффектов спектрального состава для тех же нормальных шаблонов, что использовались в предыдущем анализе, были введены три новых фильтра Баттерворта третьего порядка – 2–6, 5–15, 10–30 Гц. Как и ранее, для всех новых параметров шаблонных форм рассчитывалось среднее значение SNR_{CC} и число обнаруженных вступлений, но теперь использовалось только 40 лучших шаблонов из приведенных в табл. 4.

Обратившись к приведенным в табл. 4 данным, можно видеть, что для небольшого числа шаблонов среднее SNR_{CC} и/или число вступлений падает при увеличении длительности и расширении частотного состава. Однако для большинства шаблонов среднее значение SNR_{CC} и число вступлений растет. При выборе длительности окна и ширины спектрального диапазона для каждого шаблонного сигнала не стоит пренебрегать таким, хоть и небольшим, преимуществом. В целом, практически все 3-С шаблоны имеют большое преимущество перед вертикальной подгруппой независимо от длины окна и спектра шаблона. Важно отметить, что оно гораздо ярче выражено для шаблонов S -волн, где энергия колебаний на горизонтальных каналах больше, чем для P -волн.

Таким образом, метод КВФ позволяет эффективно использовать дополнительный источник информации о форме волны путём объединения всех компонент движения в одном параметре – агрегированном коэффициенте кросскорреляции. Метод РНП вынужден использовать каждую из трех компонент отдельно, даже учитывая поляризационные свойства сигнала [Kedrov, Permyakova, 1994; Kennett, 2000]. Этот свидетельствует о значительном выигрыше в эффективности обнаружении сигналов при использовании сейсмических 3-С групп. Осталось выяснить, сколько обнаруженных вступлений правильно и сколько ложно ассоциированы с каждым карьером.

Проблема правильности ассоциации сигналов с карьерами гораздо сложнее, чем простой подсчет количества вступлений, обнаруженных данным шаблоном для совокупности взрывов, отнесенных к одному и тому же карьере. Для распределения сигналов по карьерам использовался интерактивный бюллетень, составленный экспертами на основе оценок времен вступления P - и S -волн, а также азимута на источник, полученного с помощью FK -анализа. Эти оценки имеют ограниченную точность, что делает вероятной неверную ассоциацию сигнала с карьером. Вокруг исследуемых карьеров есть множество других, некоторые из которых находятся довольно близко (см. рис. 2). Если несколько сигналов от соседних карьеров по ошибке были внесены в группу исследуемого, то вполне вероятно, что лучшие шаблоны не покажут высокой корреляции с такими неправильно ассоциированными сигналами. Так, согласно приведенному

в табл. 3, для карьеров №№ 12, 19 не все сигналы были найдены даже при использовании лучших шаблонных форм.

Проблемой является и возможность ложной ассоциации сигнала от одного карьера с другим. В таком случае поиск сигналов должен включать все события, обнаруженные на сейсмической группе. Поэтому рассчитывались коэффициенты корреляции и SNR_{CC} каждого из 40 шаблонов с каждым из 104 10-минутных фрагментов. Оставляя порог обнаружения на уровне 3.5, мы получили оценки числа вступлений, представленные в табл. 4. Преимущество в числе обнаруживаемых вступлений на 3-С группе и вертикальной подгруппе меняется от карьера к карьере и от шаблона к шаблону. Удлинение шаблона и расширение его спектрального состава могут привести как к увеличению, так и к снижению общего числа обнаруженных вступлений. Среди вступлений, правильно ассоциированных с карьером данного шаблона, могут оказаться и сигналы, неверно ассоциированные с другими карьерами. Так, некоторые шаблоны вертикальной подгруппы от ближайших карьеров (№№ 12, 19, 21) находят от 50 до 60 из 104 сигналов.

При всем разнообразии распределения числа вступлений по карьерам, типам волн, а также длине и спектральному составу шаблонов можно выделить два важных свойства. Во-первых, число вступлений, обнаруженных вертикальной подгруппой обычно больше, чем число вступлений, найденных всей группой. Во-вторых, практически для каждого шаблона число найденных вступлений больше количества фрагментов, ассоциированных со взрывами на карьере, связываемом с шаблоном. Оба этих наблюдения – следствие ограниченной специфичности шаблонов и наличия боковых лепестков чувствительности в диаграмме направленности метода КВФ, примененного к сейсмической группе. Действительно, не слишком удаленные карьеры с примерно одинаковой схемой подрыва могут создавать на близрегиональных расстояниях похожую картину волнового поля. В таком случае шаблоны одного карьера будут иметь некоторую чувствительность к сигналам от соседних, которая, хоть и невысока, но при значительной амплитуде и длительности “чужих” сигналов допускает обнаружение сигналов, ложно ассоциированных со “своим” карьером.

Несомненно, что даже для достаточно высокого порога обнаружения некоторые вступления могут оказаться результатом ложного срабатывания детектора. Но большинство вступлений, полученных с помощью метода КВФ от “чужих” карьеров, не являются ложными.

В табл. 5 представлены результаты кросскорреляции лучших шаблонов (см. табл. 4) от карьеров №№ 12, 19, 21 с 13 фрагментами карьера № 21. Как видно, шаблон для карьера № 21 обнаруживает все 13 вступлений, причем SNR_{CC} увеличивается в 9 случаях при переходе от вертикальной подгруппы к 3-С группе. Таким образом, группа трехкомпонентных датчиков имеет более высокую чувствительность к истинным сигналам от карьера № 21.

Несколько неожиданно, что все предполагаемые сигналы от карьера № 21 хорошо коррелируют с шаблоном от карьера № 19, причем SNR_{CC} на подгруппе вертикальных каналов во всех 13 случаях выше, чем для всей 3-С группы. Несмотря на то, что увеличение специфичности при использовании более длительных 3-С шаблонов от карьера № 19 с расширенным диапазоном частот может привести к дальнейшему снижению SNR_{CC} при кросскорреляции шаблона и сегментов от карьера № 21, вполне вероятно, что часть сигналов от этого карьера может на самом деле принадлежать карьере № 19, и наоборот. Так как правильная ассоциация сигналов, по-видимому, требует более глубокого исследования специфических характеристик волнового поля от близких

Таблица 5. Результаты расчетов SNR_{CC} при кросскорреляции 13 фрагментов записей от карьера № 21 с шаблонами от карьеров №№ 12 (21/12), 19 (21/19), 21 (21/21).
Заливкой выделены строки, соответствующие 3-С группе

| Фрагмент/ шаблон | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 21/12 3-С | 4.87 | 3.95 | 3.00 | 2.75 | 2.97 | 3.56 | 3.32 | 4.82 | 3.37 | 2.95 | 3.90 | 3.39 | 2.49 |
| 21/12 В | 3.51 | 3.47 | 4.53 | 3.24 | 2.46 | 2.95 | 3.56 | 4.18 | 4.08 | 3.17 | 3.22 | 2.85 | 4.20 |
| 21/19 3-С | 3.82 | 5.14 | 7.17 | 4.87 | 4.61 | 4.53 | 4.09 | 5.66 | 5.43 | 4.96 | 6.28 | 4.74 | 4.78 |
| 21/19 В | 6.15 | 8.67 | 9.92 | 8.58 | 6.33 | 7.00 | 8.54 | 8.71 | 8.95 | 9.27 | 8.51 | 5.65 | 9.37 |
| 21/21 3-С | 8.07 | 9.55 | 8.32 | 7.43 | 5.52 | 8.23 | 8.69 | 10.72 | 9.16 | 7.11 | 5.62 | 6.88 | 17.93 |
| 21/21 В | 6.90 | 9.19 | 8.99 | 7.35 | 4.46 | 7.64 | 7.73 | 9.83 | 10.03 | 8.65 | 9.84 | 5.23 | 11.93 |

карьером, не следует слишком доверять количественным показателям обнаружения сигналов с помощью шаблонов для карьеров №№ 19, 21 в сегментах “чужих” карьеров.

Шаблон от карьера № 12 гораздо хуже коррелирует с сигналами от карьера № 21, но некоторая чувствительность всё же имеется – из 13 сигналов 5 обнаруживаются 3-С группой и 6 вертикальной подгруппой по превышению порогового значения SNR_{CC} . Интересно, что только два фрагмента дают SNR_{CC} выше 3.5 как на 3-С группе, так и на вертикальной подгруппе, причем в обоих случаях на 3-С группе значение SNR_{CC} выше. Может быть, что в действительности эти сигналы относятся к источникам, пространственно близким к карьере № 21, и не обязательно принадлежат карьере № 12.

Возможности увеличения длительности шаблона и расширения его спектрального состава не беспредельны, и поэтому всегда существует вероятность правильного срабатывания детектора КВФ и ложной ассоциации с “чужим” карьером. Так как ложная ассоциация сигнала подразумевает различие в положении и функции источника шаблонных волновых форм, такие сигналы считаются ложными только для целей нашего сравнения эффективности обнаружения сигналов с помощью трехкомпонентных и вертикальных сейсмических групп. Действительно, имея большие различия в сейсмических источниках шаблонов, называемых мастер-событиями, и в самих шаблонах, невозможно рассматривать различия в эффективности обнаружения как следствие конфигурации группы.

Существует одно важное свойство волн, зарегистрированных на сейсмической группе, которое помогает удалять большинство ложно ассоциированных сигналов. Когда шаблонный и искомый сигналы приходят от близких источников, коэффициент кросскорреляции достигает максимума на всех каналах одновременно, а трассы SNR_{CC} для таких сигналов синхронизованы без временных и фазовых сдвигов на всех датчиках. Кросскорреляция с высокоамплитудными сигналами от удаленного источника не приводит к синхронизации трасс SNR_{CC} на всех каналах, так как согласие в форме сигналов достигается случайным образом и только на части каналов. Отсутствие синхронизации выражается в отклонении максимума спектра мощности $P(S_n, S_e)$ в соотношении (3) от центральной точки. Для сигналов от близких источников максимум должен соответствовать центру координат (0,0), так как одновременность прихода одинаковых фаз на всех каналах соответствует бесконечному значению скорости движения фронта относительно группы или нулевой медленности.

На рис. 6 представлены четыре диаграммы *FK*-анализа, примененного к трассам коэффициента кросскорреляции шаблона S3820130719_135456 от карьера № 38 (см. табл. 4) с различными фрагментами текущих записей. Изменение мощности измеряется в децибелах (дБ) относительно максимального значения; соответствующая шкала представлена справа от каждой диаграммы.

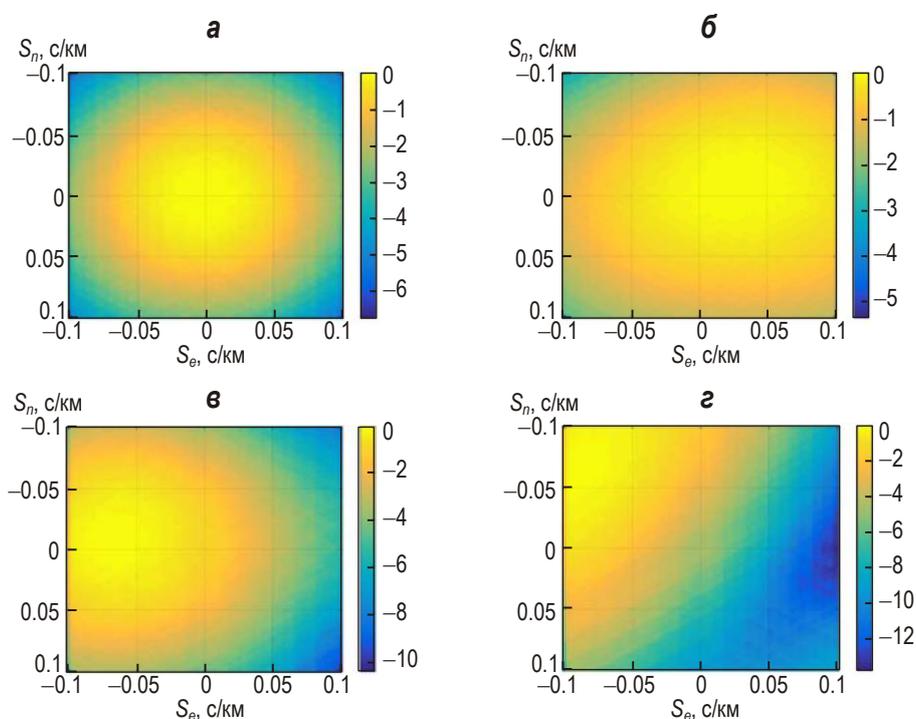


Рис. 6. Результаты *FK*-анализа, примененного к трассам коэффициента кросскорреляции шаблонов с различными фрагментами записей сигналов от карьера № 38. Пояснения см. в тексте

На рис. 6, *а* показан результат кросскорреляции двух хороших записей взрывов в карьере № 38, для которых невязка медленности, т.е. расстояние до центра группы, составляет только 0.007 с/км. Это случай надежного обнаружения и ассоциации сигнала с помощью метода КВФ. На рис. 6, *б* скорость спада мощности с ростом медленности меньше, чем на рис. 6, *а*, что, видимо, связано с менее четким сигналом от карьера № 38. Невязка медленности составляет 0.04 с/км, что делает ассоциацию данного сигнала с карьером № 38 менее надежной.

На рис. 6, *в* представлен случай кросскорреляции с записью от карьера № 6, для которой невязка медленности составляет 0.06 с/км. Это значение можно считать близким к порогу, разделяющему истинные сигналы от карьера № 38 и ложно ассоциированные с ним. Карьеры №№ 6 и 38 удалены от станции NN3CAR2013 примерно в одном направлении (см. рис. 2), что делает возможным срабатывание детектора на боковом лепестке чувствительности. На рис. 6, *г* приведен случай кросскорреляции с другим фрагментом записи от карьера № 6. Невязка медленности составляет более 0.1 с/км, что означает приход сигнала не от карьера № 38.

Пороговое значение для каждого карьера не может быть выбрано произвольно, оно должно быть обосновано статистикой разделения правильных и ложных сигналов. Для этого предполагается, что интерактивный бюллетень событий достаточно точно ассоциирует повторяющиеся сигналы с карьерами. Надо отметить, что любое пороговое

значение не позволяет однозначно разделить классы правильной и ложной ассоциации сигналов, так как эффект снижения амплитуды сигнала от фиксированного в пространстве источника на результат *FK*-анализа во многом аналогичен эффекту удаления от мастер-события источника сигнала с постоянной амплитудой.

После введения порогового значения медленности статистика вступлений обнаруженных от “своего” и “чужих” карьеров должна включать общее число обнаруженных сигналов и число сигналов со скалярной медленностью ниже пороговой. Эти числа представлены через косую черту в табл. 6. В качестве порогового было выбрано значение 0.05 с/км, что, конечно, не является окончательным выбором для постоянно действующей системы обнаружения на основе метода КВФ. Таким образом, для каждого шаблона из табл. 4 были получены четыре числа, причем каждый шаблон существует в двух вариантах – для 3-С группы и вертикальной подгруппы. Так как нашей целью является демонстрация преимуществ 3-С группы в обнаружении правильных сигналов, то важно получить общую оценку эффективности удаления ложно ассоциированных сигналов. Поэтому в табл. 6 представлена статистика, агрегированная на уровне карьера. Введение порога медленности в целом снижает количество предполагаемых ложных вступлений в 5–10 раз, хотя в некоторых случаях спад не превышает 2 раз. Как уже обсуждалось выше, пространственная близость карьеров №№ 12, 19, 21 привела к большому количеству ложных ассоциаций. Теперь мы убедились, что ложно ассоциированные сигналы эффективно удаляются введением порогового значения невязки медленности.

Таблица 6. Число вступлений, обнаруженных с использованием 40 шаблонных волновых форм при кросскорреляции с фрагментами записей от “своих” и “чужих” карьеров, до/после применения порога невязки медленности 0.05 с/км (залитые столбцы – данные 3-С группы, без заливки – подгруппы вертикальных датчиков)

| Номер карьера | Фрагменты записи от карьеров | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------------|--------|----------------|-------|--------------------|-------|-------------------|-------|----------------|-------|--------------------|-------|
| | “своих” | | | | | | “чужих” | | | | | |
| | Нормальный шаблон | | Длинный шаблон | | С широким спектром | | Нормальный шаблон | | Длинный шаблон | | С широким спектром | |
| 6 | 109/85 | 108/81 | 101/68 | 90/70 | 109/85 | 90/70 | 50/7 | 33/3 | 56/11 | 28/5 | 50/5 | 28/5 |
| 12 | 34/26 | 30/22 | 31/22 | 27/22 | 27/24 | 27/22 | 43/16 | 58/20 | 32/15 | 42/17 | 24/15 | 42/17 |
| 19 | 74/50 | 73/36 | 69/43 | 61/34 | 55/38 | 73/36 | 61/23 | 66/14 | 35/19 | 55/12 | 38/19 | 65/14 |
| 21 | 61/49 | 64/51 | 60/43 | 62/53 | 58/56 | 62/53 | 38/17 | 64/16 | 55/14 | 57/17 | 37/15 | 57/17 |
| 38 | 61/54 | 59/55 | 61/50 | 55/54 | 58/56 | 55/49 | 35/6 | 39/3 | 46/14 | 25/2 | 27/6 | 25/2 |
| 54 | 67/53 | 54/49 | 51/48 | 46/42 | 56/48 | 46/43 | 7/2 | 7/3 | 13/2 | 4/1 | 7/2 | 4/1 |
| 58 | 82/81 | 63/62 | 80/78 | 64/63 | 75/75 | 64/63 | 10/2 | 16/4 | 20/6 | 11/3 | 13/7 | 11/3 |

Надо отметить, что шаблоны для карьеров №№ 54, 58 обладают высокой степенью специфичности, так как число вступлений, обнаруженных в “чужих” сегментах, крайне невелико. Во многом это связано с отсутствием соседних карьеров, фрагменты записей от которых использовались в данном исследовании. Для всех шаблонов сигналы, прошедшие проверку на невязку медленности, по-видимому, могут с большой вероятностью считаться правильными. В этом контексте нужно отметить, что во всех случаях 3-С группа находит больше и теряет гораздо меньше правильных вступлений, чем вертикальная подгруппа. Этот результат подтверждает необходимость использования трехкомпонентных групп для обнаружения и ассоциации региональных фаз продольных и поперечных волн.

Обсуждение результатов

Трехкомпонентные сейсмические группы обладают значительным преимуществом перед любыми другими станциями, используемыми для обнаружения сигналов методом кросскорреляции волновых форм от повторяющихся событий. В данном исследовании продемонстрировано, что временная 3-С группа NN3CAR2013 с помощью лучших шаблонов для мастер-событий находит большее количество “правильных” сигналов региональных фаз продольных и поперечных сейсмических волн от повторяющихся взрывов, произведенных в семи карьерах, удалённых от станции на расстояние от 60 до 350 км.

Сигналы, найденные с использованием трехкомпонентных шаблонов, имеют более высокие значения SNRCC, чем сигналы, обнаруженные подгруппой только вертикальных датчиков. Использование трехкомпонентных датчиков приводит к усилению специфичности шаблонных волновых форм, позволяя тем самым более эффективно удалять сигналы, которые могут быть ложно ассоциированы с данным мастер-событием. При увеличении длительности и расширении спектрального состава шаблонных волновых форм в пределах записи регулярных сигналов отмечается тенденция повышения чувствительности метода КВФ. Однако надо помнить, что расширение окна кросскорреляции влечет за собой необходимость увеличения вычислительных ресурсов.

Преимущество 3-С группы обусловлено ростом общей энергии шаблонного и искомого сигналов, а также специфичности шаблонной волновой формы за счет увеличения общей длительности шаблона при увеличении числа каналов в три раза по сравнению с аналогичной по конфигурации группой вертикальных датчиков. Показано, что за счет роста отношения сигнал/шум увеличивается число обнаруженных сейсмических сигналов от взрывов. Усиление специфичности волновой формы снижает поток ложных срабатываний.

Подобное представленному исследованию было проведено для обнаружения сверхслабого сигнала методом КВФ на сети из семи трехкомпонентных станций, удалённых на расстояние от 80 до 200 км от предполагаемого источника взрыва [Zhang, Wen, 2015]. Авторам названной работы удалось найти сейсмологические свидетельства возможного проведения в КНДР 12.05.2010 г. необъявленного подземного испытания ядерного оружия крайне малой мощности. Отметим, что это единственный случай регистрации подобного взрыва на сети станций, не являющейся классической сейсмической группой, в связи с чем невозможно количественно оценить снижение порога обнаружения сигнала для разных источников или провести прямое сравнение с нашими результатами.

Аналогия упомянутого эксперимента с нашим исследованием состоит в том, что были рассчитаны коэффициенты кросскорреляции записей от предполагаемого взрыва с шаблонными записями от известных взрывов 2009 и 2013 гг. Однако суммирование семи коэффициентов кросскорреляции осуществлялось с различными временными сдвигами, соответствующими смещениям возможного эпицентра относительно мест проведения объявленных испытаний. Необходимо отметить, что сейсмическое событие 12.05.2010 г. в КНДР не было обнаружено ни техническими средствами мониторинга Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, ни национальными системами мониторинга. Обнаружение китайскими коллегами сверхслабых сигналов на региональных расстояниях стало возможно только благодаря совместному использованию нескольких трехкомпонентных станций и метода согласованного фильтра (метода КВФ).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы П.2П Президиума РАН.

Литература

- Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Санина И.А. О вкладе взрывных работ в развитие сейсмодеформационных процессов в регионе // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 1. С.92–94.
- Адушкин В.В., Санина И.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Горбунова Э.М. Иванченко Г.Н. Современные геодинамически активные зоны центральной части Восточно-Европейской платформы // Докл. РАН. 2013. Т. 452, № 5. С.1–4.
- Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б., Санина И.А. Особенности сейсмологического мониторинга районов размещения объектов атомной энергетики на Восточно-Европейской платформе // Ядерная и радиационная безопасность. 2012. № 3. С.1–9.
- Землетрясения России в 2013 году. Обнинск: ГС РАН, 2015. 224 с.
- Китов И.О., Санина И.А., Непейна К.С., Константиновская Н.Л. Использование метода согласованного фильтра на малоапертурной сейсмической антенне “Михнево” // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 3. С.5–18.
- Китов И.О., Волосов С.Г., Кишкина С.Б., Константиновская Н.Л., Непейна К.С., Нестеркина М.А., Санина И.А. Обнаружение региональных фаз объемных сейсмических волн с помощью группы трехкомпонентных датчиков // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1. С.27–45.
- Кишкина С.Б., Бугаев Е.Г. Контроль сейсmobезопасности объектов атомной энергетики // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 2(58). С.153–163.
- Bobrov D., Kitov I., Zerbo L. Perspectives of Cross-Correlation in Seismic Monitoring at the International Data Centre // Pure and Applied Geophys. 2014. V. 171, N 3-5. P.439–468. doi: 10.1007/s00024-012-0626x
- Braun T., Schweitzer J., Azzara R., Piccinini D., Cocco M., Boschi E. Results from the temporary installation of a small aperture seismic array in the Central Apennines and its merits for local event detection and location capabilities // Ann. Geophys. 2004. V. 47, N 5. P.1557–1568.
- Coyne J., Bobrov D., Bormann P., Duran E., Grenard P., Haralabus G., Kitov I., Starovoit Yu. Chapter 15: СТВТО: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability // (ed. P. Bormann) New Manual of Seismological Practice Observatory. 2012. doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15
- Freiberger W.F. An approximation method in signal detection // Quart. J. App. Math. 1963. V. 20. P.373–378.
- Geller R.J., Mueller C.S. Four similar earthquakes in central California // Geophys. Res. Lett. 1980. V. 7. P.821–824.
- Gibbons S., Ringdal F. A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions // NORSAR Scientific Report: Semiannual Technical Summary 2004. N 2. 2004. NORSAR, Kjeller, Norway. P.41–50.
- 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., Kvaerna T., Ringdal F. Monitoring of seismic events from a specific source region using a single regional array: a case study // J. Seismol. 2005. V. 9. P.277–294.
- Gibbons S.J., Schweitzer J., Ringdal F., Kvaerna T., Mykkeltveit S., Paulsen B. Improvements to Seismic Monitoring of the European Arctic Using Three-Component Array Processing at SPITS // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2011. V. 101, N 6. P.2737–2754.
- Israelsson H. Correlation of waveforms from closely spaced regional events // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1990. V. 80. P.2177–2193.
- Harris D., Dodge D. An autonomous system of grouping events in a developing aftershock sequence // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2011. V. 101. P.763–774.
- Joswig M. Pattern recognition for earthquake detection // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1990. V. 80. P.170–186.
- Joswig M., Schulte-Theis H. Master-event correlations of weak local earthquakes by dynamic waveform matching // Geophys. J. Int. 1993. V. 113. P.562–574.

- Kedrov O.K., Permyakova V.E.* A new approach for three-component seismic array processing // *Anali di Geofisica*. 1994. V. XXXVII, N 3. P.255–266.
- Kennett B. L.N.* Stacking three-component seismograms // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 141. P.263–269.
- Richards P., Waldhauser F., Schaff D., Kim W.-Y.* The Applicability of Modern Methods of Earthquake Location // *Pure and Applied Geophysics*. 2006. V. 163. P.351–372.
- Schaff D.P.* Semiempirical statistics of correlation-detector performance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2008. V. 98. P.1495–1507.
- Schaff D., Richards P.G.* Repeating seismic events in China // *Science*. 2004. V. 303. P.1176–1178.
- Schaff D., Richards P.G.* On finding and using repeating events in and near China // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116: B03309. doi: 10.1029/2010/B007895.
- Schaff D., Richards P.* Improvements in magnitude precision, using the statistics of relative amplitudes measured by cross correlation // *Geophys. J. Int.* 2014. V. 197. P.335–350. doi: 10.1093/gji/ggt433.
- Schaff D., Waldhauser F.* Waveform cross correlation based differential travel-time measurements at the northern California Seismic Network // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2005. V. 95. P.2446–2461.
- Schaff D., Waldhauser F.* One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2010. V. 100. P.3224–3238.
- Schaff D.P., Bokelmann G.H.R., Ellsworth W.L., Zanker E., Waldhauser F., Beroza G.C.* Optimizing correlation techniques for improved earthquake location // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2004. V. 94. P.705–721.
- Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Gibbons S., Pirli M., Kühn D., Kvaerna T.* Seismic Arrays // *New Manual of Seismological Practice Observatory / Ed. P. Bormann*. 2012. Ch. 9. doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch9.
- Slinkard M., Carr D., Young C.* Applying waveform correlation to three aftershock sequences // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2013. V. 103. P.675–693.
- Van Trees H.L.* *Detection, Estimation and Modulation Theory*. N.-Y.: John Wiley and Sons, 1968. 768 p.
- Wagner G.S., Owens T.J.* Broadband eigen-analysis for three-component seismic array // *IEEE Trans. Signal Processing*. 1995. V. 43. P.1738–1741.
- Waldhauser F., Schaff D.* Large-scale cross-correlation based relocation of two decades of Northern California seismicity // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B08311. doi: 10.1029/2007JB005479.
- Zhang M., Wen L.* Seismological Evidence for a Low-Yield Nuclear Test on 12 May 2010 in North Korea // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86, N 1. January/February 2015. doi: 10.1785/02201401170.
- Yao H., Shearer P., Gerstoft P.* Subevent location and rupture imaging using iterative back-projection for the 2011 Tohoku Mw 9.0 earthquake // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 190, N 2. P.1152–1168. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05541.x.

Сведения об авторах

АДУШКИН Виталий Васильевич – доктор физико-математических наук, Академик РАН, Советник РАН, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495)-939-79-78. E-mail: adushkin @idg.chph.ras.ru

КИТОВ Иван Олегович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495)-939-75-82. E-mail: Ikitov@mail.ru

САНИНА Ирина Альфатовна – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495)-939-75-82. Irina@idg.chph.ras.ru

THE REDUCTION IN SIGNAL DETECTION THRESHOLD WITH THE METHOD OF WAVEFORM CROSS CORRELATION BY USING A SEISMIC ARRAY OF THREE-COMPONENT SENSORS

V.V. Adushkin^{1,2}, I.O. Kitov¹, I.A. Sanina^{1,2}

¹ *Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

Abstract. The use of waveform cross-correlation allows reducing the amplitude detection threshold of repeating seismic events by a factor of 5 to 10, to improve the accuracy of relative location and seismic magnitude estimate more than by an order of magnitude, and also provides the possibility to reliably identify the source nature. In this study, we demonstrate that in comparison with the sub-array of vertical channels temporary seismic array of three-component sensors (3-C) detects more valid signals with higher mean signal-to-noise ratios (SNR). For this analysis, we used records of repeating blasts from seven quarries that are from 60 km to 350 km distant from the 3-C array center. For each quarry, we selected best waveform templates which provided maximum quantity of valid signals with the largest signal-to-noise ratios. We have directly compared the efficiency of detection and identification of blasts' signals with the help of complete 3-C array and sub-array consisting of vertical sensors. The results of comparison indicate that the 3-C arrays have considerable advantages over any other types of stations, that is based on the increase of total energy of template and sought signals and also on the specifics of the template waveform due to the three times increase of total length of the template. The growth of the signal-to-noise ratio results in the increasing number of detected seismic signals and specifics of the waveform reduce the rate of false alarms.

Keywords: waveform cross-correlation, seismic array, three-component stations, signal detection, quarry blasts.

References

- Adushkin V. V., Kocharyan G.G., and Sanina I.A. Contribution of explosions to development of seismic strains in the region of the East European Craton, *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 441, no. 1, pp. 1523-1525.
- Adushkin V. V., Sanina I.A., Vladimirova, Gabsatarov Yu.V., Gorbunova E.M., and Ivanchenko G.N. Modern geodynamically active zones in the Central East European Craton, *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 452, no. 2, pp. 1042-1045.
- Bugaev E.G., Kishkina S.B., and Sanina I.A., Peculiarities of seismic monitoring in the sites of nuclear energy objects within the East European Craton, *Yad. Radiats. Bezop.*, 2012, no. 3, pp. 1–9.
- Bobrov D., Kitov I., and Zerbo L. Perspectives of Cross-Correlation in Seismic Monitoring at the International Data Centre, *Pure and Applied Geophys*, 2014, vol. [171](#), no 3-5, pp. 439-468. doi: 10.1007/s00024-012-0626x
- Braun T., J. Schweitzer, R. Azzara, D. Piccinini, M. Cocco, and Boschi E. Results from the temporary installation of a small aperture seismic array in the Central Apennines and its merits for local event detection and location capabilities, *Ann. Geophys.*, 2004, vol. 47, no. 5, pp. 1557-1568.
- Coyne J., D. Bobrov, P. Bormann, E. Duran, P. Grenard, G. Haralabus, I. Kitov, and Yu. Starovoit Chapter 15: CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability, (ed. P. Bormann) *New Manual of Seismological Observatory Practice*, 2012, doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15
- Freiberger W.F. An approximation method in signal detection, *Quart. J. App. Math*, 1963, vol. 20, pp.3 73–378.
- Geller R. J. and Mueller C. S. Four similar earthquakes in central California, *Geophys. Res. Lett.* 1980, vol. 7, pp. 821-824.
- Gibbons S. and Ringdal F. A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosions, *NORSAR Scientific Report: Semiannual Technical Summary*, 2004, no. 2, NORSAR, Kjeller, Norway, pp. 41–50.
- Gibbons S. J. and Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophys. J. Int.*, 2006, vol. 165, pp.149–166.
- Gibbons S., Kværna T., and Ringdal F. Monitoring of seismic events from a specific source region using a single regional array: a case study, *J. Seismol.*, 2005, vol. 9, pp.277–294.

- Gibbons S. J., Schweitzer J., Ringdal F., Kværna T., Mykkeltveit S., and Paulsen B. Improvements to Seismic Monitoring of the European Arctic Using Three-Component Array Processing at SPITS, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2011, vol. 101, no. 6, pp. 2737–2754.
- Israelsson H. Correlation of waveforms from closely spaced regional events, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1990, vol. 80, pp.2177–2193.
- Harris D. and Dodge D. An autonomous system of grouping events in a developing aftershock sequence, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2011, vol. 101, pp.763–774.
- Joswig M. Pattern recognition for earthquake detection, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1990, vol. 80, pp. 170-186.
- Joswig M. and Schulte-Theis H. Master-event correlations of weak local earthquakes by dynamic waveform matching, *Geophys. J. Int.* 1993, vol. 113, pp. 562-574.
- Kedrov O.K. and Permyakova V.E. A new approach for three-component seismic array processing, *Annali di Geofisica*, 1994, vol. XXXVII, no. 3, pp. 255-266.
- Kennett B. L.N., Stacking three-component seismograms, *Geophys. J. Int.*, 2000, vol. 141, pp. 263-269.
- 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, vol. 52, no. 1, pp. 19-31.
- Kitov I.O., Sanina I.A., Nepeina K.S., and Konstantinovskaya N.L., Application of the matched filter technique at the Mikhnevo small aperture seismic array, *Seism. Prib.*, 2014, vol. 50, no 3, pp. 5–18 (in Russ).
- Kishkina S.B. and Bugaev E.G. Control of seismic safety for the nuclear energy objects, *Vestn. NYaTs RK*, 2014, no. 2, pp. 153–163.
- Richards P., Waldhauser F., Schaff D., and Kim W.-Y. The Applicability of Modern Methods of Earthquake Location, *Pure and Applied Geophysics*, 2006, vol. 163, pp.,351-372.
- Schaff D. P. Semiempirical statistics of correlation-detector performance, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2008, vol. 98, pp.1495–1507.
- Schaff D. and Richards P. G. Repeating seismic events in China, *Science*. 2004, vol.303, p.1176–1178.
- Schaff D. and Richards P. G. On finding and using repeating events in and near China, *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116: B03309. doi: 10:1029/2010/B007895.
- Schaff D. and Waldhauser F. Waveform cross correlation based differential travel-time measurements at the northern California Seismic Network, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2005, vol. 95, pp. 2446–2461.
- Schaff D. and Waldhauser F. One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2010, vol. 100, pp. 3224–3238.
- Schaff D. P., Bokelmann G. H. R., Ellsworth W. L., Zanker E., Waldhauser F., and Beroza G. C. Optimizing correlation techniques for improved earthquake location, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2004, vol. 94, pp. 705–721.
- Schaff D. and Richards P. Improvements in magnitude precision, using the statistics of relative amplitudes measured by cross correlation, *Geophys. J. Int.*, 2014, vol. 197, pp. 335–350. doi: 10.1093/gji/ggt433
- Schweitzer J., Fyen J., Mykkeltveit S., Gibbons S., Pirli M., Kühn D., and Kvaerna T. Seismic Arrays, (ed. P. Bormann) *New Manual of Seismological Observatory Practice*, 2012, Ch. 9. doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch9.
- Slinkard M., Carr D., and Young C. Applying waveform correlation to three aftershock sequences, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2013, vol. 103, pp. 675-693.
- Van Trees H.L. *Detection, Estimation and Modulation Theory* / John Wiley and Sons, 1968.
- Wagner G.S. and Owens T.J. Broadband eigen-analysis for three-component seismic array, *IEEE Trans. Signal Processing*. 1995, vol. 43, pp.1738-1741
- Waldhauser F. and Schaff D. Large-scale cross-correlation based relocation of two decades of Northern California seismicity, *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, B08311. doi: 10.1029/ 2007JB005479.
- Zemletryaseniya Rossii v 2013 g.* (Earthquakes in Russia in 2013), Obninsk: GS RAN, 2015
- Zhang M. and Wen L. Seismological Evidence for a Low-Yield Nuclear Test on 12 May 2010 in North Korea, *Seismological Research Letters*, 2015, vol. 86, no. 1. doi:10.1785/02201401170
- Yao H., Shearer P., and Gerstoft P. Subevent location and rupture imaging using iterative back-projection for the 2011 Tohoku Mw 9.0 earthquake, *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 190, no. 2, pp. 1152–1168. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05541.x