

УДК 550.34.01+551.591

МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО КОМПЛЕКСУ ИНФРАЗВУКОВЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Смирнов А.А., Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Представлена методика совместного использования сейсмических и инфразвуковых данных для распознавания природы регистрируемых событий и уточнения положения их эпицентров, основанная на поиске функции взаимной корреляции эталонных и текущих записей сейсмических станций с дальнейшей ассоциацией событий-кандидатов с инфразвуковыми фазами. Опробование методики на материалах 7 месяцев регистрации промышленных взрывов в карьере Акбастау (Алматинская область) сейсмической станцией AS058-Курчатов (KURK) и двумя инфразвуковыми станциями: в Курчатове (KURIS) и Маканчи (MKIAR) показало ее высокую надежность.

ВВЕДЕНИЕ

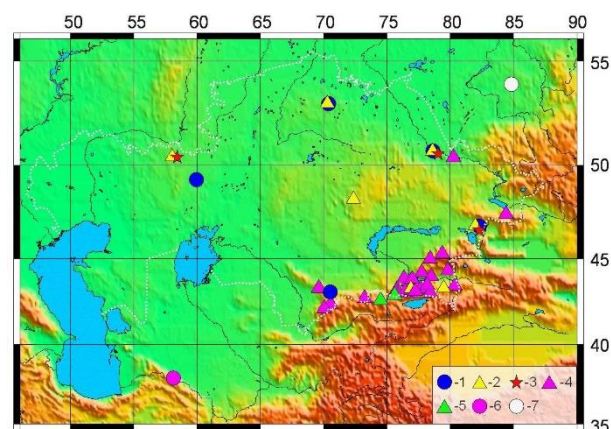
Система мониторинга взрывов разной природы и землетрясений нацелена на оперативное обнаружение событий, высокоточную параметризацию их источников, определение природы событий (распознавание). Казахская система мониторинга, находящаяся под оперативным управлением Института геофизических исследований (ИГИ), включает станции двух технологий – сейсмической и инфразвуковой. При этом, часть станций входит в международные, глобальные системы, тогда как некоторые станции включены только в национальную систему. В последние годы меняется базовое техническое обеспечение системы мониторинга, которое влечет за собой изменение программного обеспечения обработки сейсмических и геофизических данных, разработку новых методик распознавания природы событий с использованием как текущих регистрируемых событий, так и исторических оцифрованных данных.

Одним из результатов работы казахской системы мониторинга является сводный бюллетень событий, создаваемый по данным станций двух применяемых геофизических технологий. В его заключительной форме должны быть представлены распознанные источники – землетрясения, промышленные и ядерные взрывы. Все эти события могут являться угрозой для существующих на территории Казахстана и приграничных с ним государств населенным пунктам, промышленным объектам, а также инфраструктуре разрабатываемых месторождений. Обработку данных, поступающих от сейсмических и инфразвуковых станций, входящих в национальную систему мониторинга землетрясений и взрывов, выполняет Центр данных Института геофизических исследований.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сеть стационарных сейсмических станций ИГИ [1] в настоящее время состоит из пяти сейсмических групп международного уровня и восьми трехкомпонентных станций (рисунок 1). При составлении сейсмического бюллетеня (KNDC) дополнительно используются данные станций некоторых других стран и организаций. В режиме реального времени посту-

пают данные станций из Кыргызстана, Туркменистана, России. Из Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) МОН РК поступают таблицы параметров зарегистрированных сейсмических фаз за каждые сутки.



1 – сейсмические группы ИГИ; 2 – трехкомпонентные станции ИГИ; 3 – инфразвуковые станции ИГИ; 4 – сейсмические станции СОМЭ МОН РК; 5 – сейсмические станции ИС КР; 6 – сейсмическая группа Алибек, Туркменистан; 7 – сейсмическая и инфразвуковая группа Залесово (Россия)

Рисунок 1. Расположение сейсмических станций ИГИ и других организаций, данные которых используются при создании бюллетеня KNDC

Ежегодно станциями на территории Центральной Азии регистрируется и обрабатывается около 20 000 сейсмических событий, из которых примерно 5 000 составляют взрывы разной природы, главным образом, промышленные карьерные. При обработке зарегистрированных событий не делается различия между событиями разной природы, для них проводится полная обработка с определением всех параметров, необходимых для составления сейсмического бюллетеня.

На рисунке 2 показано соотношение количества землетрясений и взрывов в бюллетенях KNDC за 2004–2019 гг. Видно, что это соотношение довольно стабильно, но в последние годы наблюдается тенденция увеличения доли взрывов в общем объеме регистрируемых событий.

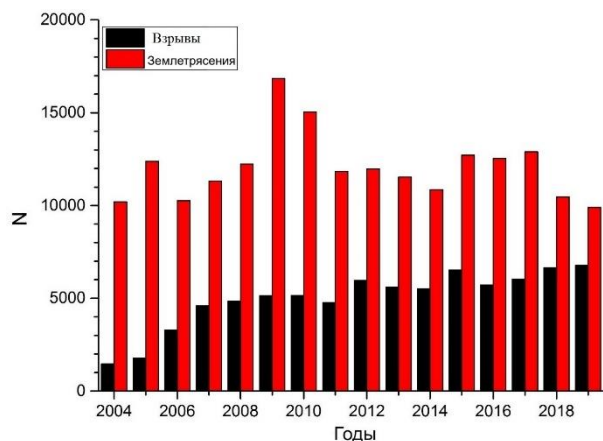


Рисунок 2. Распределение количества землетрясений и взрывов по годам в бюллетене KNDC

Распределение эпицентров зарегистрированных сейсмических событий на исследуемой территории представлено на рисунке 3. В [2] показано, что на территории Казахстана имеются области, где сейсмичность взрывов намного превышает сейсмичность землетрясений, а выделившаяся суммарная сейсмическая энергия взрывов сопоставима или даже превышает таковую у землетрясений.

Большое количество событий, совпадающих или близких к карьерам, является карьерными взрывами, однако, известны случаи, когда рядом с карьерами происходят землетрясения, даже довольно сильные, которые на первом этапе обработки принимаются за взрывы. Например: Карагандинское землетрясение 2014 г., Екибастузское землетрясение 2019 г. и другие.

Распознать, а порой и доказать природу источника, является непростой задачей, тогда как это очень важно для дальнейших работ по оценке сейсмической опасности. Требуется, чтобы, в конечном счете, каталог землетрясений был очищен от взрывов и состоял только из природных событий. Поскольку получить информацию о проведенных взрывах от горнодобывающих предприятий удастся не всегда, для распознавания часто используются только сейсмические методы. Обычно для распознавания сейсмических событий по записям сейсмических станций изучается следующий комплекс параметров: 1 – координаты эпицентра события и их близость к известным карьерам; 2 – глубина события; 3 – особенности волновой картины записей; 4 – время события относительно суток; 5 – диапазон энергетических классов; 6 – спектральное отношение амплитуд в различных волновых группах; 7 – характеристики спектров разных волновых групп; 8 – распределение знаков первых вступлений и механизмы очага.

Каждый из перечисленных параметров в отдельности не является надежным признаком для верного разделения сейсмических событий на взрывы и землетрясения. Выявление нескольких признаков в комплексе, например, близость местоположения эпицентра события к известному карьере, малая глубина события, характерная запись этого события инфразвуковой станцией, а также время события, относящееся к рабочему времени суток, повышает шанс отнести зарегистрированное сейсмическое событие к классу карьерных взрывов.

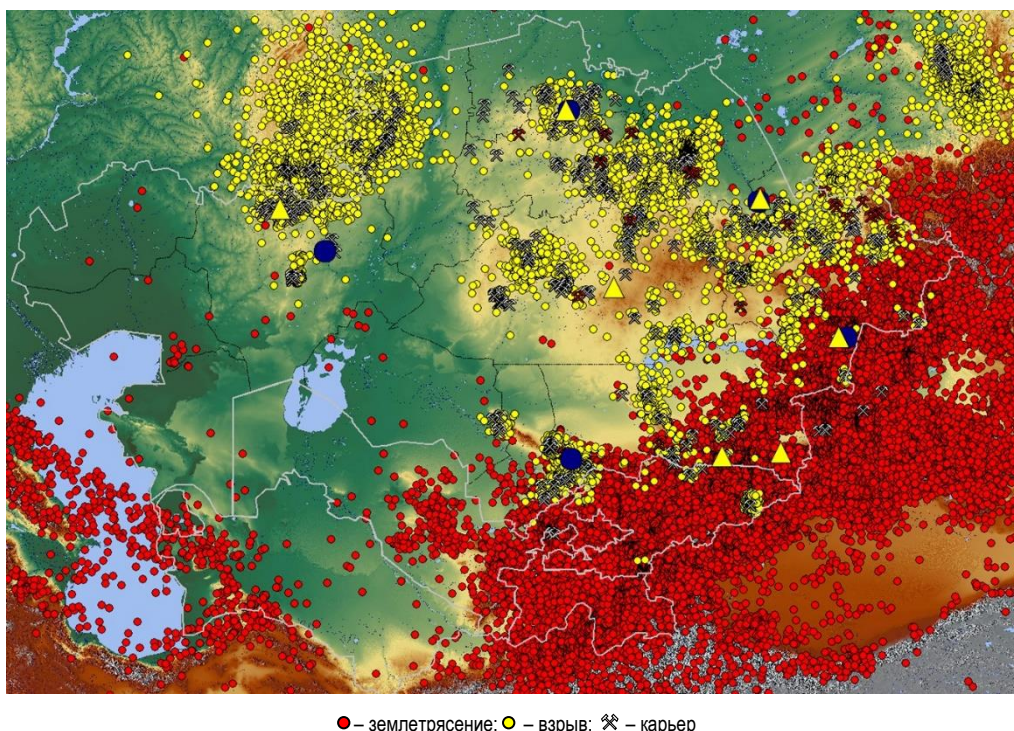


Рисунок 3. Эпицентры землетрясений и взрывов, зарегистрированных за 2006–2016 гг.

Наибольшую эффективность при распознавании показало применение спектрального отношения поперечных и продольных волн и особенностей волновой картины записи события. В качестве дополнительного критерия используется характерный для каждого карьера диапазон энергетических классов. Следует отметить, что конкретные количественные критерии распознавания могут различаться для различных регионов Казахстана, для разных станций регистрации и разных карьеров, что обуславливает необходимость специального изучения и поиска новых критериев распознавания. В данной статье для решения задачи распознавания привлечены инфразвуковые данные.

В составе сети мониторинга ИГИ в настоящее время работают три инфразвуковые станции: Актобинск (IS31), 2001 г., входящая в международную систему мониторинга Организации по Договору о

всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (МСМ ОДВЗЯИ); Курчатов (KURIS), 2010 г., восстановленная вблизи ранее действовавшей инфразвуковой станции; Маканчи (MKIAR), 2016 г., построенная в рамках договора с Центром прикладных технологий воздушных сил (АФТАС, США). В Центр данных в режиме реального времени поступают также данные инфразвуковой группы Залесово (IS46), расположенной на территории России, являющейся станцией МСМ ОДВЗЯИ.

Инфразвуковые станции часто регистрируют сигналы от карьерных взрывов. На рисунках 4 и 5 приведены примеры регистрации и обработки записи взрыва на угольном карьере Каражыра Семипалатинского испытательного полигона 14.06.2011 г. станциями в Курчатове – сейсмическими KURBB, KURK (рисунок 4), и инфразвуковой KURI (рисунок 5).

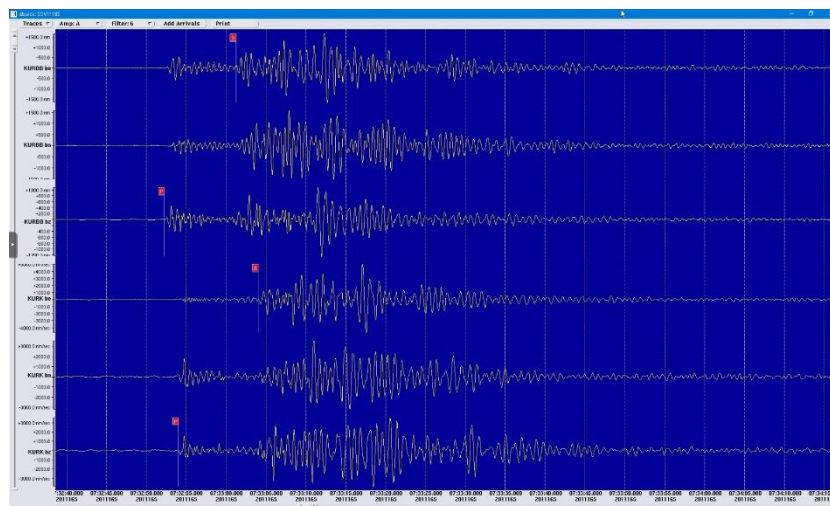


Рисунок 4. Результаты регистрации взрыва на угольном карьере Каражыра (СИП) 14.06.2011 г. сейсмическими станциями KURBB и KURK

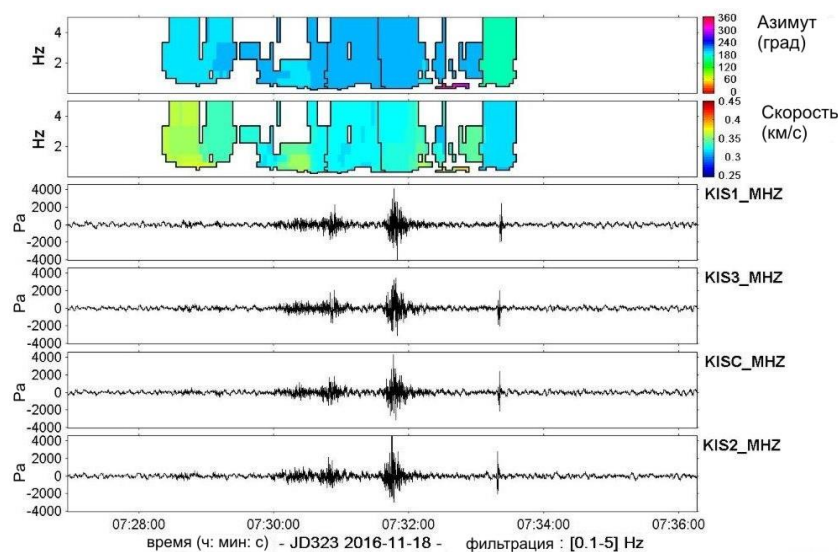


Рисунок 5. Результаты регистрации взрыва на угольном карьере Каражыра (СИП) 14.06.2011 г. инфразвуковой станцией KURI (четыре нижние трассы соответствуют четырем элементам группы)

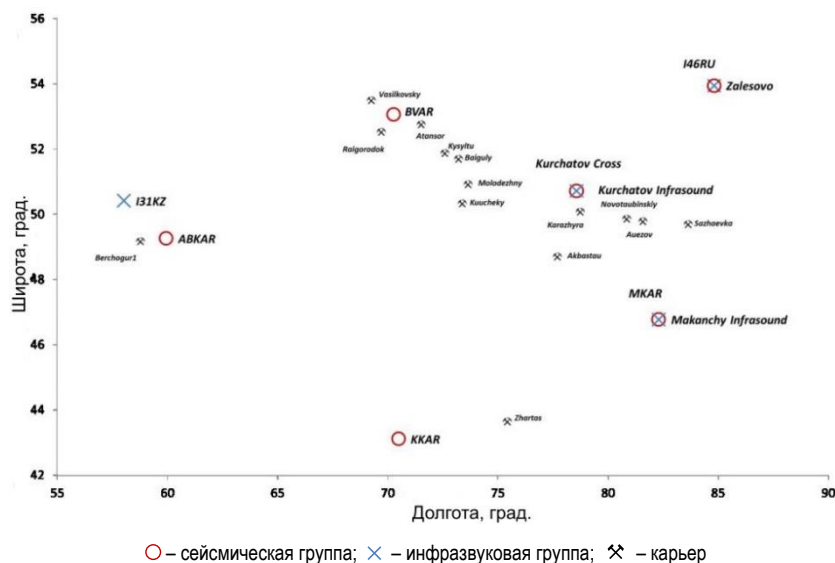


Рисунок 6. Взаимное расположение изученных карьеров и станций казахстанской сейсмоакустической сети

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

Многие события, являющиеся карьерными взрывами, включаются одновременно и в сейсмические бюллетени событий, и в инфразвуковые бюллетени детектирований. Методика распознавания природы событий, включенных в бюллетени, по комплексу сейсмических и инфразвуковых данных, предназначена повысить степень уверенности распознавания взрывов, произведенных в подавляющем большинстве на активно действующих карьерах территории Казахстана, а также значительно повысить точность их локализации за счет надежной привязки события к конкретному карьере.

На рисунке 6 показано взаимное расположение изученных в процессе разработки методики карьеров на территории Казахстана и станций сейсмоакустической сети.

Суть методики заключается в следующем. Для двенадцати карьеров ранее получены волновые формы сейсмических записей конкретных сейсмических станций, а также волновые формы инфразвуковых записей на станциях инфразвуковой сети. Было установлено, что запись сейсмической фазы каналовой волны Lg от взрывов для каждого карьера на конкретной станции имеет специфическую форму. При этом, форма записей этой фазы от разных взрывов, зарегистрированных одной и той же станцией на одной и той же компоненте для одного и того же карьера, очень похожи друг на друга [3]. В [3] это свойство волновых форм используется для уточнения положения источников при сейсмическом мониторинге. В данном случае это свойство используется в качестве критерия распознавания. Достоверность распознавания повышается за счет поиска и использования соответствующей инфразвуковой фазы.

Для того, чтобы определить, является ли новое зарегистрированное событие взрывом в пределах одно-

го из изученных ранее карьеров, нужно выполнить следующие шаги (рисунок 7):

- создается база данных эталонных записей – волновых форм, для ряда карьеров. Это – сейсмические записи взрывов на точно установленных карьерах;
- создается сейсмический бюллетень по данным сейсмических станций за определенный период времени;
- проводится сравнение с эталонной формой текущих сейсмических записей на той станции, которая использована как источник эталонной волновой формы. Сравнение ведется путем нахождения функции взаимной корреляции ФВК «эталонной формы» с текущими записями соответствующего канала. Расчет производится с использованием ПО *GeoTool* [4, 5];
- создается бюллетень инфразвуковых детектирований по данным инфразвуковых станций;
- проводится ассоциация событий из сейсмического бюллетеня, набора событий кандидатов и бюллетеня инфразвуковых фаз.

Данная методика не работает для карьеров, имеющих очень большие линейные размеры, т.к. в этом случае волновые формы сейсмических фаз от взрывов в разных частях одного и того же карьера могут существенно различаться. Теоретически это ограничение можно обойти по мере накопления большого количества записей событий в этих карьерах. Имея большое количество событий для больших карьеров, можно выделить не одну, а несколько эталонных записей, каждая из которых соответствует определённому участку большого карьера, и далее использовать эти эталонные записи как и в случае «небольших» карьеров.

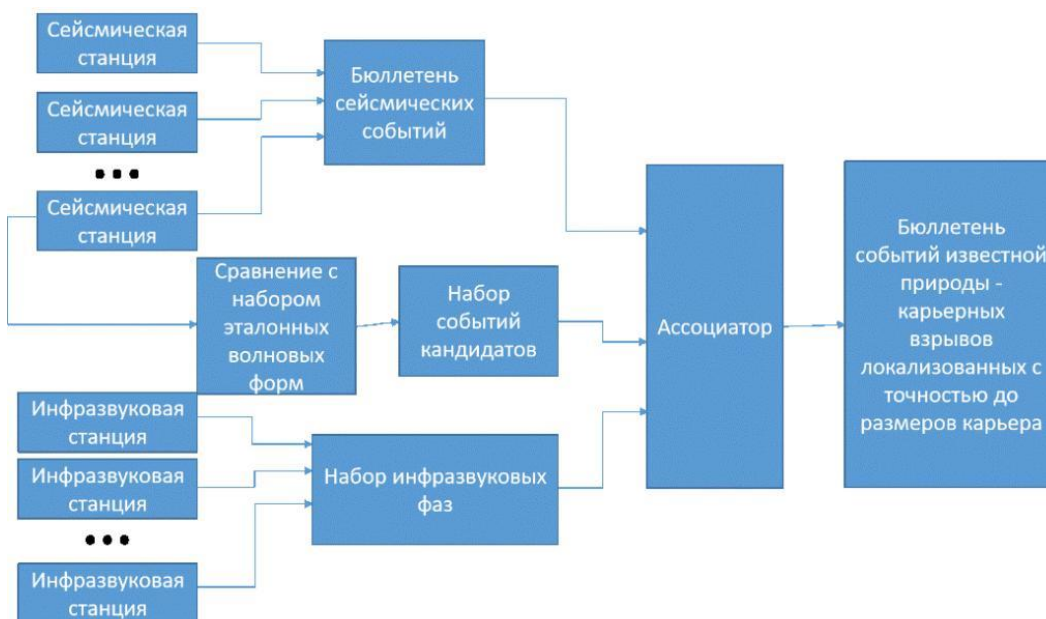


Рисунок 7. Блок-диаграмма методики распознавания сейсмических событий по комплексу инфразвуковых и сейсмических данных

ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСПОЗНАВАНИЯ

Методика опробована на сейсмических событиях вблизи карьера Акбастау в Восточно-Казахстанской области, зарегистрированных сейсмической станцией KURK (компонента N-S). На рисунке 8 показана «эталонная форма» для фазы Lg записей взрывов в карьере Акбастау, зарегистрированных той же станцией на той же компоненте, то есть, для той же пары «источник – приёмник».

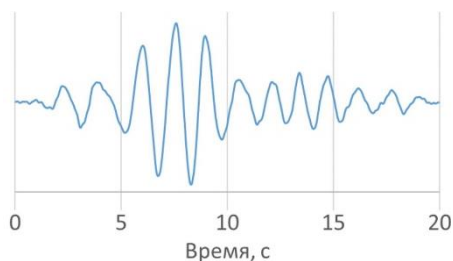


Рисунок 8. «Эталонная форма» фазы Lg записей взрывов в карьере Акбастау, зарегистрированных станцией KURK (компонента N-S), полученная с использованием пакета программ GISMO [6]

«Эталонная форма» сравнивалась с суточными фрагментами записи того же канала той же станции. Для каждого из этих фрагментов был найден глобальный максимум. Затем ко времени, когда наблюдались максимумы ФВК, прибавлялись времена пробега от карьера до каждой из инфразвуковых станций (KURIS и MKIAR), рассчитанных для фазовой скорости 0,3 км/с. Затем в автоматических бюллетенях инфразвуковых детектирований для этих станций был произведен поиск сигналов, имеющих времена, совпадающие с расчётными, и близкие азимуты.

Тестовый поиск проведен в записях с 24.09.2017 г. по 30.04.2018 г. Всего было найдено 211 пиков ФВК. Для 96 пар «источник – приёмник»/«карьер – станция» были найдены инфразвуковые сигналы. На рисунке 9 показана зависимость отношения количества найденных сигналов к количеству предсказанных от значения ФВК между эталонной формой и записью N-S компоненты станции KURK для этих событий. Всего было найдено 74 взрыва, о которых с высокой степенью уверенности можно сказать, что они произведены в карьере Акбастау.

Как видно из рисунка 9: 1) у событий-кандидатов, имеющих высокие значения ФВК, относительное количество найденных инфразвуковых фаз существенно больше, чем у событий-кандидатов, где значение ФВК ниже; 2) относительное количество инфразвуковых фаз существенно увеличивается для событий, имеющих значения ФВК 0,75 и выше.

Таким образом, проведенное тестирование новой методики показало ее работоспособность. Найдено эмпирическое прогнозное пороговое значение ФВК, равное 0,75. При таком значении ФВК распознавание можно считать надежным. Дальнейшие исследования для других карьеров покажут, является ли это эмпирическое значение универсальным или оно индивидуально для каждого карьера. Применение технологии к данным мониторинга за изучаемый период позволило обнаружить 74 события, которые с высокой вероятностью являются взрывами в карьере Акбастау. Из них 31 событие было включено в сейсмический бюллетень. Удалось установить с высокой точностью положение эпицентра этих взрывов в карьере.

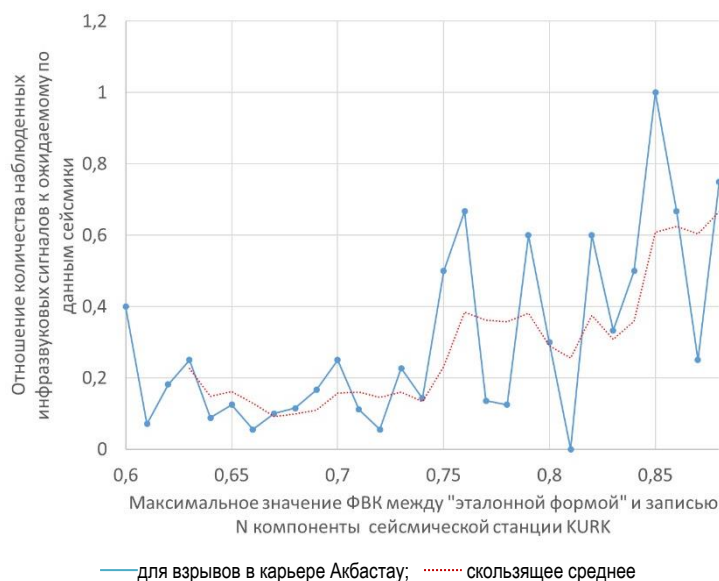


Рисунок 9. Зависимость отношения количества найденных инфразвуковых сигналов к количеству предсказанных от значения ФВК между эталонной формой и записью N-S компоненты. Станция KURK

Однако методика имеет некоторые ограничения. Во-первых, она не подходит для карьеров, где в период инструментальных наблюдений произведено относительно малое количество взрывов или взрывы ранее не были зарегистрированы сейсмическими станциями. Во-вторых, она не позволяет отследить все взрывы в известных карьерах, т.к. используются инфразвуковые сигналы, а их регистрация может быть невозможна при определенном состоянии атмосферы. В-третьих, методика с меньшей достоверностью позволяет распознавать взрывы в очень больших по размерам карьерах (Экибастуз, Молодежный, Каражыра). В таких случаях необходимо привлекать в комплексе другие параметры и критерии распознавания природы источников, например, знаки первых вступлений, механизмы очагов и др.

Тем не менее, как показало опробование методики на реальных данных, она успешно работает и может быть использована на практике. Методика позволяет распознать достаточно большое количество событий и существенно повысить точность локализа-

ции событий на десятки километров. Кроме того, она может быть использована, например, при создании базы данных эталонных событий. Зная, где расположены активные по взрывной деятельности карьеры, используя результаты параметризации сейсмических событий, можно распознать, является ли событие взрывом или землетрясением. Для взрывов можно однозначно определить, был ли произведен взрыв в карьере или за его пределами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая методика и созданная на ее основе технология распознавания природы событий на основе комплекса сейсмических и инфразвуковых данных позволяют использовать эталонные записи, найденные для активных карьеров Казахстана, для целей распознавания принадлежности обнаруженного события к классу взрывов и определения его точного местонахождения. Опробование методики на материалах одного из карьеров показало свою работоспособность и высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhailova, N.N. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan / N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. 2016. – January–June. – Volume 53, Issue 1. – 2019. – P. 27–38.
2. Мукамбаев, А.С. Сейсмичность взрывных работ на территории Республики Казахстан / А.С. Мукамбаев, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 4. – С. 124–130.
3. Slinkard, M Multistation Validation of Waveform Correlation Techniques as Applied to Broad Regional Monitoring / M. Slinkard, D. Schaff, N. Mikhailova, S. Heck, Ch. Young, P. G. Richards // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2014. – Vol. 104, No. 6. – P. 2768–2781, doi: 10.1785/0120140140.
4. Coyne, J. IDC Documentations Geotool Software User Tutorial / J. Coyne, K. Clark, S. Lloyd. – 16 July 2003. – 59 p.
5. Coyne, J.M. GEOTOOL sourcebook / J.M. Coyne, I. Henson // Technical Report C95-01.DAPRA Contract F19628-93-C-0094.SAIC-Teledyne Browne Engineering. – 1995.
6. GISMO documentation [Электронный ресурс]: <http://www.giseis.alaska.edu/Seis/EQ/tools/GISMO/>