

УДК 550.344

О мониторинге карьерных взрывов, производимых на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона

© 2024 г. А.С. Мукамбаев, Н.Н. Михайлова, В.И. Дубровин

ИГИ НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

Поступила в редакцию 25.12.2023 г.

Аннотация. На территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) расположено несколько месторождений полезных ископаемых, на некоторых из них в настоящее время ведётся активная взрывная деятельность. Наибольшее количество взрывов производится на угольном карьере «Каражыра». Регистрация этих взрывов производится станциями сети ИГИ НЯЦ РК, три из которых входят в Международную Систему Мониторинга. Это сейсмические группы «Боровое» (AS057), «Мақанчи» (PS23), «Курчатов-Крест» (AS058). Расстояния до карьера от этих станций составляют 668, 452 и 68 км соответственно. Всего за 19 лет наблюдений зарегистрировано около 2800 взрывов. Анализ результатов рутинной обработки по оперативным сейсмическим бюллетеням Центра данных ИГИ НЯЦ РК показал, что поле полученных эпицентров взрывов намного превышает размеры карьера. Проведена детальная обработка волновых форм взрывов для выяснения причин такого разброса. Для обработки и анализа волновых форм использовано программное обеспечение Geotool и DTK – GPMCC, входящее в пакет NDC-in-a Box. Установлено, что значения бэказимутов (обратных азимутов) – азимут со станции на эпицентр взрыва по разным региональным фазам Pn , Pg , Sn и Lg – отличаются друг от друга и имеют разную дисперсию. Существуют систематические отклонения азимутов для некоторых фаз от истинного азимута. Отмечена чёткая зависимость точности определения эпицентра от энергии (мощности) взрыва. Найдены и субъективные факторы в работе аналитиков, влияющие на точность оценок. Даны рекомендации в проведении обработки для аналитиков Казахстанского национального центра данных (KNDC) для повышения точности.

Ключевые слова: полигон, карьерный взрыв, сейсмическая группа, конфигурация, обратный азимут, прогрессивная мультисканальная корреляция.

Для цитирования: Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н., Дубровин В.И. О мониторинге карьерных взрывов, производимых на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 2. – С. 27–41. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.02>. – EDN: MQCCCK

Введение

В последние годы в разных странах значительно возрос интерес к изучению сейсмичности асейсмичных территорий. Это связано с получаемыми результатами в исследованиях тектоники платформенных областей инструментальными сейсмическими методами. Считавшиеся асейсмичными территории переходят в разряд слабоактивных, где регистрируются землетрясения с магнитудами вплоть до $M=5$, а иногда и выше. Эти события представляют собой заметный риск для имеющихся на таких территориях ответственных объектов атомной, химической, добывающей отраслей.

Такой территорией, относящейся ранее к асейсмичным на территории Казахстана согласно действующим картам ОСР (ОСЗ), является и территория бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Полигон расположен на востоке Казахстана. Он был создан в 1947 г. в 140 км к западу от г. Семипалатинска. Первый ядерный взрыв был произведён 29.08.1949 года. Подземные ядерные испытания были начаты 11.10.1961 г. и продолжались вплоть до 19.10.1989 года. Всего за время испытаний с 1949 по 1989 г. на СИП произведено 30 наземных, 86 воздушных и 340 подземных ядерных испытаний, в т.ч. 212 – в штольнях и 128 – в скважинах. Таким образом, всего

произведено 456 испытаний [Семипалатинский ..., 2003].

Вопрос о сейсмичности территории СИП периода проведения здесь ядерных испытаний неоднократно поднимался в ряде публикаций, например, в [Михайлова и др., 2021]. В годы проведения ядерных испытаний мировые сети сейсмических наблюдений пристально следили за сейсмическими событиями, эпицентры которых приходились на территорию СИП. Чаще всего это были ядерные взрывы, они включались в отдельные специальные каталоги. Первые сведения о том, что в районе СИП происходят и природные землетрясения, были получены в 1976 г., когда детальный анализ записей одного сейсмического события зарубежными специалистами по ядерному мониторингу позволил говорить, что событие, ранее принятое за ядерный взрыв, скорее всего, является землетрясением [Pooley et al., 1983]. Этот факт позволял предположить, что здесь могут иметь место и другие землетрясения. Однако системное изучение вопроса о существовании на территории СИП природной сейсмичности началось только после закрытия испытательного полигона, создания Национального ядерного центра (НЯЦ РК) и Института геофизических исследований (ИГИ НЯЦ РК) в его составе, строительства и запуска новой сети станций сейсмических и инфразвуковых наблюдений, основной целью которой был мониторинг ядерных взрывов и землетрясений в поддержку Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных взрывов (ДВЗЯИ) [Договор ..., 2022]. В результате почти 20-летнего периода работ было установлено наличие на СИП и вблизи него природной сейсмичности [Михайлова и др., 2021].

Но выявление зачастую редких и слабых событий тектонического характера затруднено постоянно возникающими сейсмическими сигналами от техногенных событий, главным образом, от карьерных взрывов. Именно с такой ситуацией мы имеем дело при изучении сейсмичности на СИП. Решение проблемы чёткого разделения сейсмических событий на тектонические и техногенные, в частности, регистрация и выявление взрывов из общего количества регистрируемых событий, необходимо для создания сейсмических каталогов, свободных от техногенных помех и включающих в себя только тектонические землетрясения.

Наличие в каталогах недостаточно аргументированной информации может приводить к ложным выводам и неверным оценкам сейсмической опасности. Поэтому так важно постоянно

изучать и идентифицировать карьерные взрывы в сейсмических бюллетенях.

Настоящая работа посвящена результатам регистрации и идентификации карьерных взрывов на территории Семипалатинского испытательного полигона средствами стационарной сети НЯЦ РК и полевой сети временных сейсмических станций, исследованию факторов, влияющих на точность оценок параметров взрывов по сейсмическим данным, подходам к распознаванию природы сейсмических событий.

1. Карьеры на территории СИП

В период с 2000 г. на территории СИП действовало несколько карьеров, где велась добыча твёрдых полезных ископаемых: «Каражыра» (уголь), «Найманжал» (золото), «Есимжал» (марганец), «Каражал» (флюорит), «Шорское» (молибден), «Байтемир» (золото), «Коскудук» (золото). К 2020 г. действующими остались только три карьера – «Каражыра», «Каражал» и «Есимжал» (рис. 1). В настоящее время взрывы производятся только на этих трёх карьерах [Соколова и др., 2017; Мукамбаев, Михайлова, 2017].

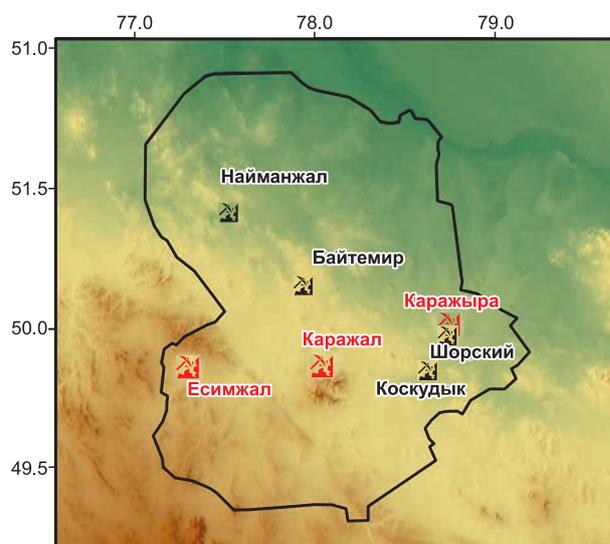


Рис. 1. Карта расположения карьеров на территории СИП.

Чёрная линия – граница СИП; действующие (красным цветом) и недействующие (чёрным цветом) карьеры

Ниже приводится основная информация об активных в настоящее время карьерах.

Рудник «Есимжал» расположен на территории Восточно-Казахстанской области у границы с Карагандинской областью в пределах Семипалатинского полигона в западной его части (рис. 2). Объект добычи – марганец. Способ

разработки — карьер. Буровзрывные работы ведутся здесь с 2006 года. Преимущественное время производства взрывов — 13:00–14:00 и 18:00–19:00 час местного времени.

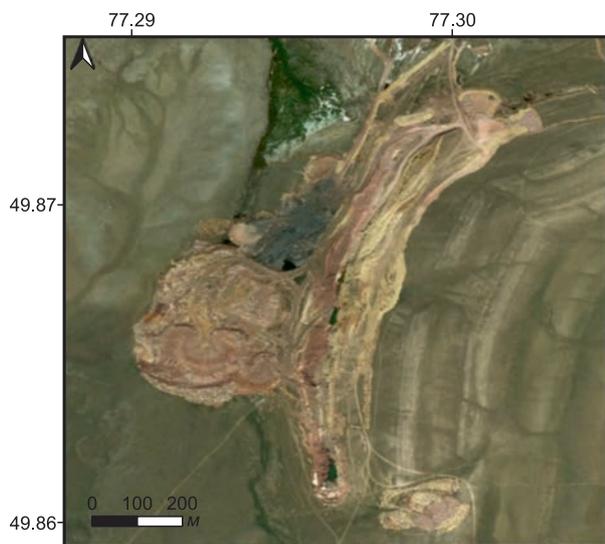


Рис. 2. Спутниковый снимок с изображением карьера «Есимжал» (карта Google)

Рудник «Каражал» расположен в центральной части Семипалатинского полигона. Объект добычи — флюорит (плавиковый шпат). Способ разработки — карьер. Карьер вытянут в северо-западном направлении на 800 м, ширина — 100–200 м, глубина — до 15 м (рис. 3).

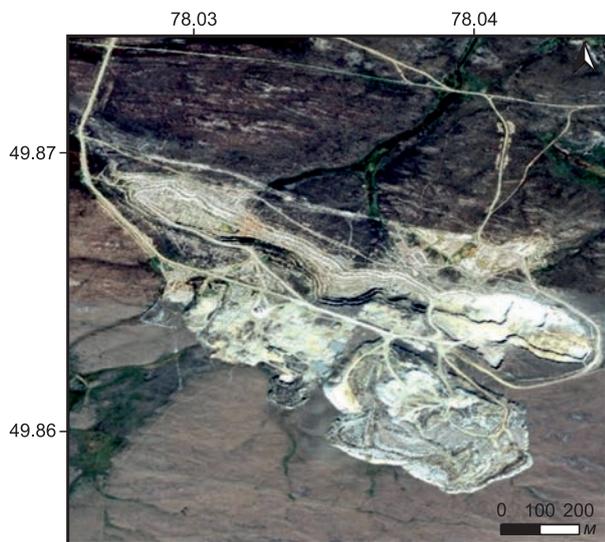


Рис. 3. Спутниковый снимок с изображением карьера «Каражал» (карта Google)

Угольный разрез «Каражыра» расположен на территории восточной части Семипалатинского полигона (рис. 4). Объект добычи — уголь. Способ разработки — карьер. Угольный разрез име-

ет один большой карьер с фронтальной полосой отработки шириной 300 м, длиной 2100 м, глубиной 40 м, которая перемещается по мере отработки на юг–юго-восток по азимуту 155°.



Рис. 4. Спутниковый снимок с изображением карьера «Каражыра» (карта Google)

2. Регистрация карьерных взрывов на территории СИП сейсмическими и инфразвуковыми станциями НЯЦ РК. Методика обработки данных

Сеть регистрирующих сейсмических станций

Сеть сейсмических станций Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК) достаточно подробно описана в работах [Михайлова, 2016; Mikhailova, Sokolova, 2019]. Это редкая сеть, станции которой расположены в основном по периметру страны. В состав сети входят пять сейсмических групп с различной конфигурацией и апертурой, а также семь трёхкомпонентных сейсмических и три инфразвуковые станции. На рис. 5 показано расположение станций сети НЯЦ РК и территория бывшего СИП.

По данным этой сети, только за последние 20 лет на территории Казахстана было зарегистрировано около 388 000 сейсмических событий, из которых примерно 120 000 связаны со взрывными работами на карьерах и в шахтах. В среднем каждый год регистрируется 18000 событий, 6000 из которых — промышленные взрывы.

На рис. 6 и 7 показаны графики общего ежегодного количества землетрясений и взрывов по данным сети станций НЯЦ РК на территории всего Казахстана и на территории СИП. Из этих графиков следует, что количество взрывов в Казахстане в последние 20 лет неуклонно возрастало примерно от 1000 до 6000 в год. Заметна стабилизация этого параметра в последние четыре года.

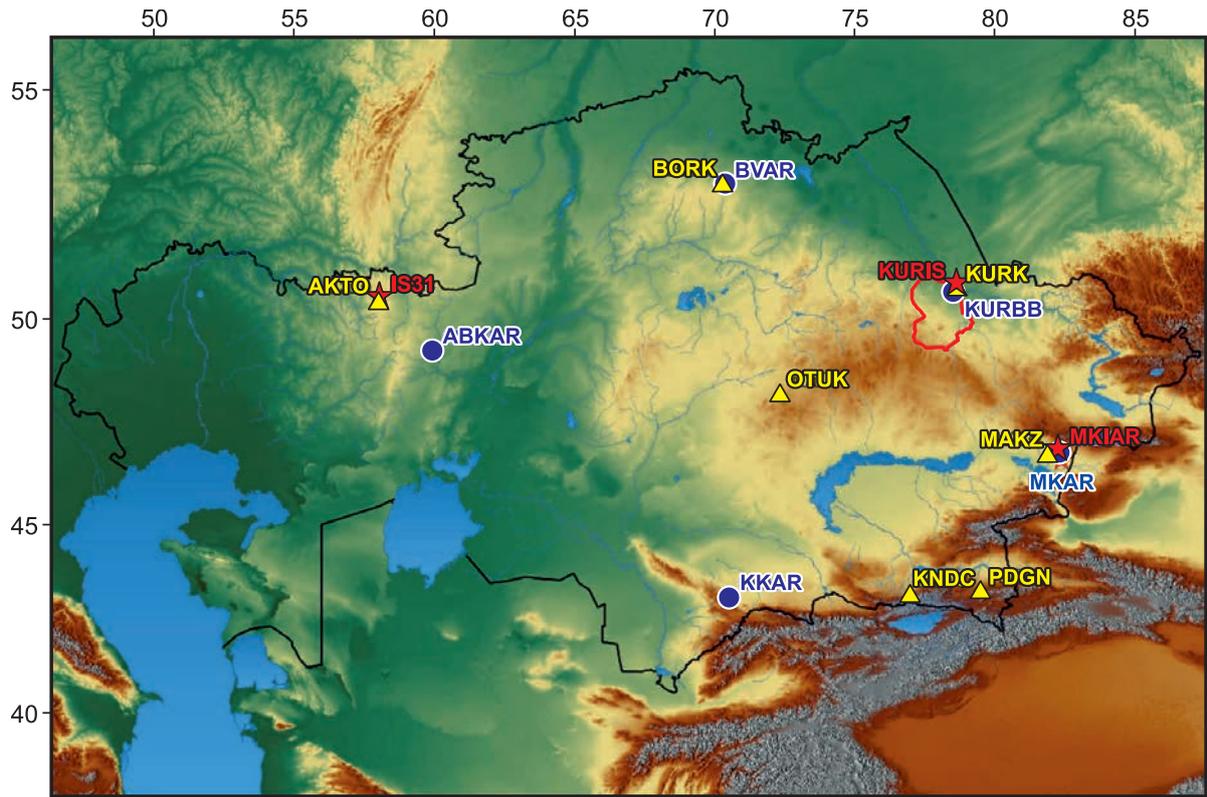


Рис. 5. Схема расположения сейсмических и инфразвуковых станций НЯЦ РК.

Треугольник – трёхкомпонентная сейсмическая станция; кружок – сейсмическая группа; звёздочка – инфразвуковая станция

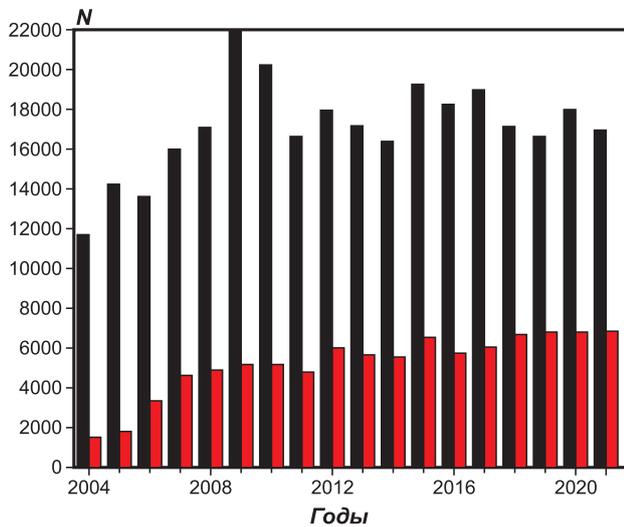


Рис. 6. Общее количество регистрируемых ежегодно сейсмических событий (чёрные столбики) и взрывов по данным сети станций НЯЦ РК (красные столбики)

Как следует из рис. 7, на территории СИП ежегодно в последние десятилетия регистрируется более 100 взрывов, а в 2012–2017 гг. их количество превышало 200 взрывов в год. Основное количество взрывов производится на карьере

«Каражыра», на других карьерах производится всего несколько взрывов в год. Средняя мощность взрывов составляет 10 т, но некоторые взрывы достигают мощности 50 т. Карта эпицентров взрывов по данным оперативной сейсмической обработки за пять лет приведена на рис. 8.

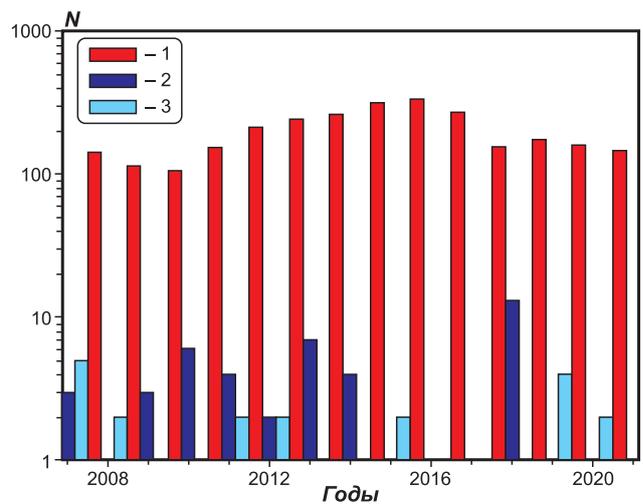


Рис. 7. Общее количество зарегистрированных карьерных взрывов на карьерах «Каражыра» (1), «Караджал» (2) и «Есимжал» (3)

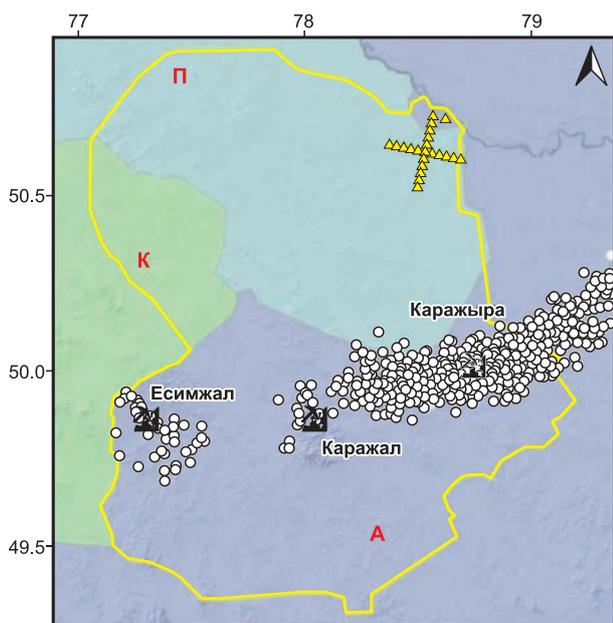


Рис. 8. Карта эпицентров взрывов и карьеров на территории СИП за пять лет (2017–2021 гг.) по результатам оперативной обработки.

Белые кружки – эпицентры взрывов; жёлтый крест – сейсмическая группа «Курчатов-Крест». П – Павлодарская обл.; К – Карагандинская обл.; А – Абайская обл.

В регистрации взрывов территории СИП в основном принимают участие две сейсмические группы. Это сейсмическая группа «Курчатов-Крест» и сейсмическая группа «Маканчи». Конфигурация этих групп представлена на рис. 9 и 10. По наиболее сильным взрывам к их обработке присоединяются данные сейсмических групп «Боровое» и «Акбулак», а также трёхкомпонентной станции «Ортау». Конфигурация групп «Боровое» и «Акбулак» аналогична конфигурации сейсмической группы «Маканчи» (MKAR PS23). Подробные данные об установленной на станциях аппаратуре и её характеристиках можно найти на веб-сайте Казахского национального центра данных (КНЦД) (<https://kndc.kz/>) и в работе [Смирнов и др., 2022].

В центре данных ИГИ НЯЦ РК проводятся оперативная обработка всех поступающих данных и составление сейсмических бюллетеней. Обработка осуществляется следующим образом. Первый этап – это автоматическая обработка, проводимая в режиме, близком к реальному времени, по данным пяти сейсмических групп. Сначала ведётся автоматическое детектирование сигнала, далее методом F-K анализа [Сарон, 1969] определяются азимут и кажущаяся скорость для каждого обнаруженного типа фаз, измеряются максимальная амплитуда, период и ряд других

параметров. Для этого используется программное обеспечение DP/EP, разработанное в норвежском центре NORSAR [Fyen, 1989]. Затем проводится автоматическая локализация событий. Для этого используется программа GBF, также разработанная в центре NORSAR [Kvaerna, 1993]. По результатам локализации составляется автоматический сейсмический бюллетень, который размещается на веб-сайте КНЦД.

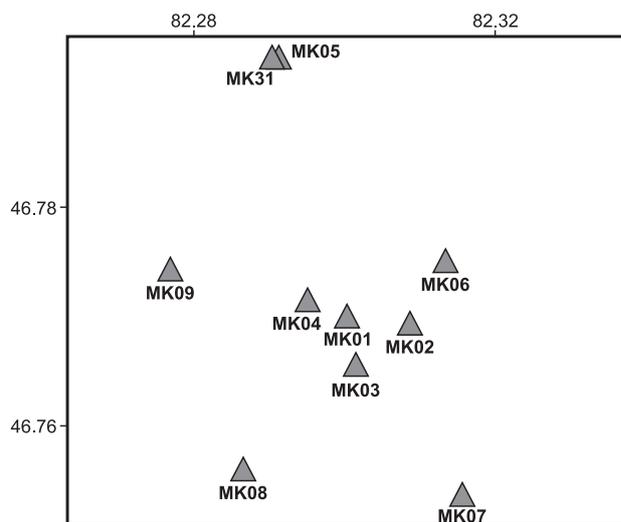


Рис. 9. Конфигурация сейсмической группы «Маканчи».

Апертура группы – 4 км. МК01–МК09 – элементы с однокомпонентными вертикальными сейсмометрами; МК31 – трёхкомпонентная станция

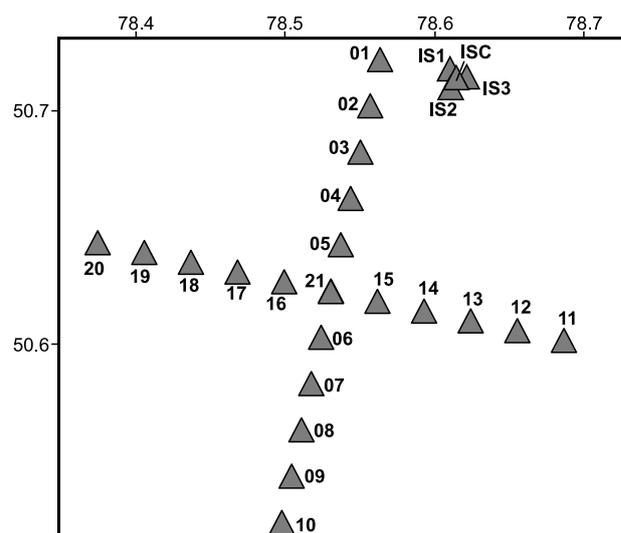


Рис. 10. Конфигурация сейсмической группы «Курчатов-Крест» (KUR ASO58).

Апертура группы – 21.5 км. 01–20 – элементы с однокомпонентными вертикальными сейсмометрами; 21 – трёхкомпонентная станция. Рядом изображена инфразвуковая группа IS

Наиболее полная и более точная информация с использованием большего количества станций проводится при составлении оперативного интерактивного сейсмического бюллетеня. Аналитик просматривает исходные записи, проверяет правильность автоматически расставленных вступлений. Корректирует времена вступлений, переименовывает неправильно распознанные фазы. Для вновь найденных по каким-то станциям вступлений определяет азимут и «медленность». Для локализации используется программное обеспечение Sea Tools (версия 1.1), разработанное в Американском Национальном центре данных. По результатам локализации составляется оперативный интерактивный бюллетень. Готовность интерактивного бюллетеня – одни сутки после реального времени события. В бюллетень включаются все детектированные и локализованные события в пределах изучаемой территории Центральной Азии независимо от природы событий, т.е. в бюллетенях содержится информация как о землетрясениях, так и о взрывах. Только на третьем этапе, который занимает несколько месяцев, распознаётся природа источников и маркируются события – землетрясения, взрывы, нераспознанные источники.

3. Причины низкой точности локации взрывов в оперативных бюллетенях

Известно, что положение эпицентра и глубина источника в комплексе со временем в очаге являются одними из лучших дискриминантов.

Соответствие положения эпицентра карьеру, глубина, близкая к нулю, в км, а также время взрыва, соответствующее типичному времени производства взрывов на данном карьере, позволяют с высокой вероятностью отнести такое событие к взрывам.

Однако из рис. 11 видно, что облако эпицентров взрывов карьера «Каражыра» занимает область, линейные размеры которой около 100 км, что намного превышает размеры карьера. Почему такая плохая точность оценок эпицентра? Нами проведён детальный анализ этой ситуации.

Первая причина – это, безусловно, недостаточно хорошая система регистрирующих станций. Анализ бюллетеней показывает, что для большинства событий с энергетическими классами K менее 8 в обработке данных участвуют только времена вступлений на станции «Курчатов-Крест» ($\Delta=68$ км) и азимут и времена вступлений по станции Маканчи ($\Delta=453$ км). По умолчанию при автоматической обработке заложено условие, что для сейсмической группы «Курчатов-Крест» с апертурой 21.5 км не проводится F-K анализ и не определяется азимут для тех событий, которые находятся на расстояниях от группы ближе 200 км. Это сделано в силу того, что априори считалось, что невозможно добиться хорошей корреляции сейсмических записей на отдельных элементах станции при близком расположении источника (в нашем случае это 68 км). Поэтому азимут по группе «Курчатов-Крест», как правило,

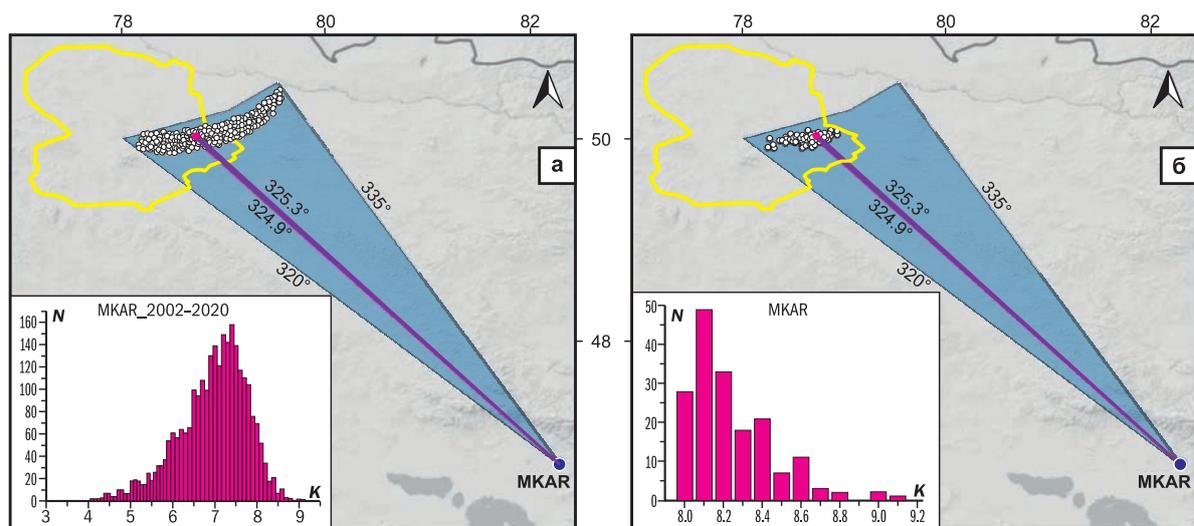


Рис. 11. Карта расположения сейсмической группы «Маканчи» и угольного карьера «Каражыра» и распределение количества взрывов (N) по энергетическому классу (K): а – с $K \geq 3.6$; б – с $K \geq 8$.

Истинный азимут на карьер 324.9–325.3° (фиолетовый сектор) и область значений азимутов по станции «Маканчи» для взрывов (голубой сектор 320–335°)

не определяется в автоматической и оперативной обработке.

По сейсмической группе «Маканчи» регистрируются практически все события с $K \geq 3.6$, проводится F-K анализ для всех событий. Но, как видно из рис. 11, азимут определяется с большой погрешностью (диапазон оценок от 320° до 335° при истинном азимуте на карьер $324.9\text{--}325.3^\circ$).

Наблюдается чёткая зависимость точности локации от энергии взрывов. Если рассмотреть более сильные взрывы карьера «Каражыра» с $K \geq 8$, то облако эпицентров существенно уменьшается, его линейные размеры составляют примерно 20 км. Это происходит благодаря тому, что к обработке подключаются данные сейсмической группы Боровое, расположенной на расстоянии 668 км от карьера в диаметрально противоположном направлении на карьер, чем группа «Маканчи». Для локации добавляются значения азимутов и времена вступлений сейсмических

фаз по этой группе. На рис. 12 показана картина локации взрывов с участием станции «Боровое» для двух групп взрывов по разным выборкам по диапазонам энергетических классов. В целом по группе «Боровое» азимут на карьер определяется довольно точно. Там, где участвует группа «Боровое», облако эпицентров резко уменьшается, точность решений значительно увеличивается.

Вторая причина плохой точности – большой разброс значений азимутов на карьер по данным сейсмической группы «Маканчи». Как показал анализ, объективно имеет место изменение значений азимута в разных волновых группах на одной записи взрыва. Покажем это на данных сейсмической группы «Маканчи». Были рассмотрены сейсмические записи и проведена их обработка с помощью программного обеспечения DTK-GPMCC для пяти разных взрывов из карьера «Каражыра». Параметры этих взрывов приведены в таблице.

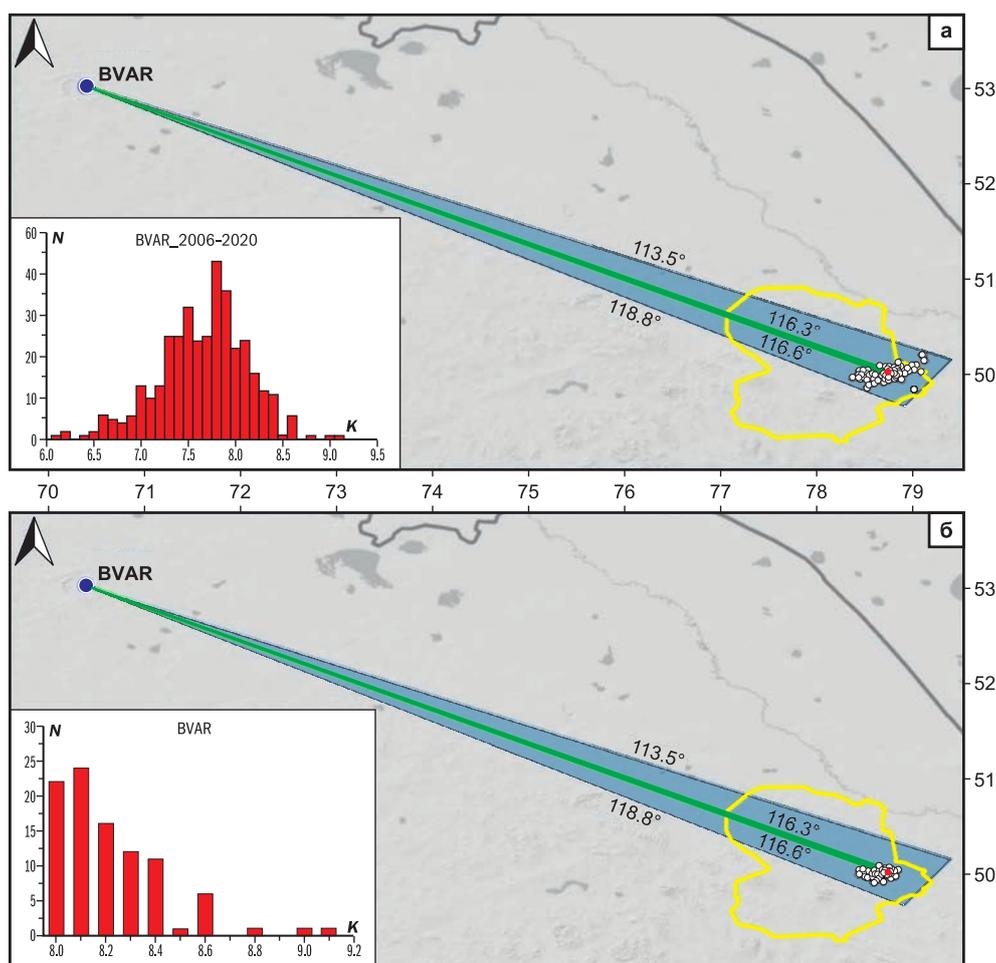


Рис. 12. Карта расположения сейсмической группы «Боровое» и угольного карьера «Каражыра» и количество взрывов по энергетическому классу: а – с $K \geq 6$; б – с $K \geq 8$.

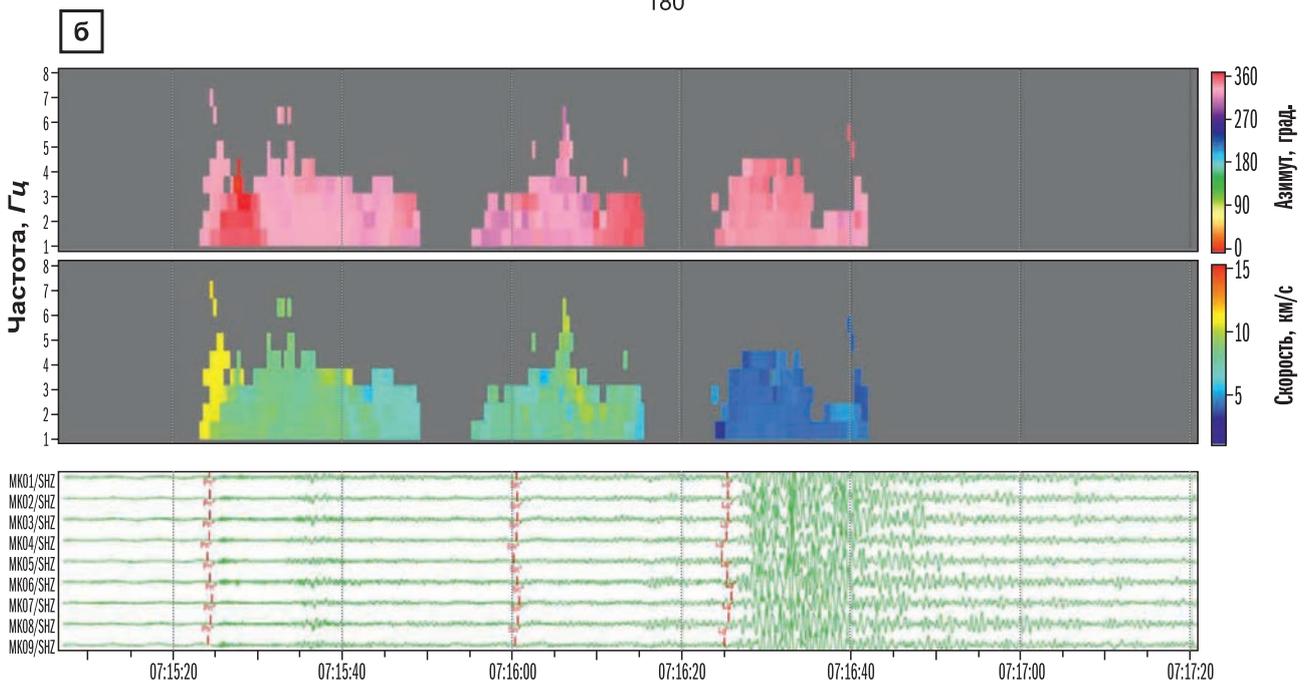
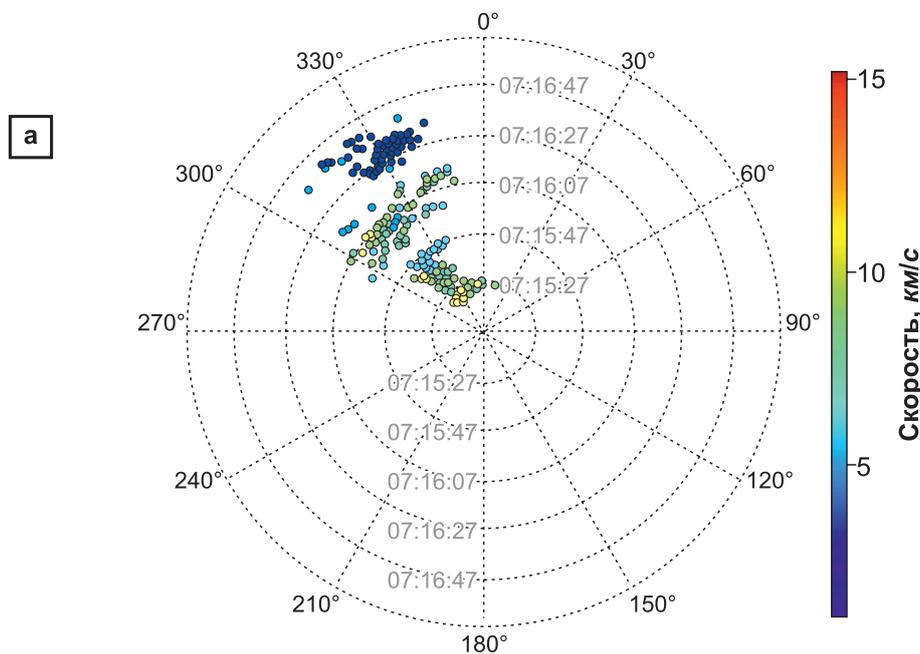
Истинный азимут на карьер $116.31\text{--}116.62^\circ$ (зелёный сектор) и область локализации эпицентров взрывов (голубой сектор $113.5\text{--}118.8^\circ$)

DTK-GPMCC позволяет с помощью метода прогрессивной мультисканальной корреляции PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation) [Cansi, 1995] по данным сейсмической группы

произвести анализ азимута во времени в процессе записи. На рис. 13 показан такой анализ для события № 3 из таблицы.

Таблица. Параметры взрывов карьера «Каражыра»

№	Дата, дд.мм.гггг	Время, чч:мм:сс.с	φ , °N	λ , °E	H , км	MPV	K
1	22.02.2022	07:14:20.312	49.9890	78.7482	0	3.1	8.6
2	27.02.2022	07:14:55.948	49.9958	78.5934	0	3.0	8.3
3	22.03.2022	07:37:31.214	49.9780	78.9216	0	3.0	8.0
4	09.04.2022	07:23:52.274	50.0172	78.8493	0	2.7	7.5
5	23.04.2022	07:21:13.977	50.0099	78.8417	0	2.7	7.1



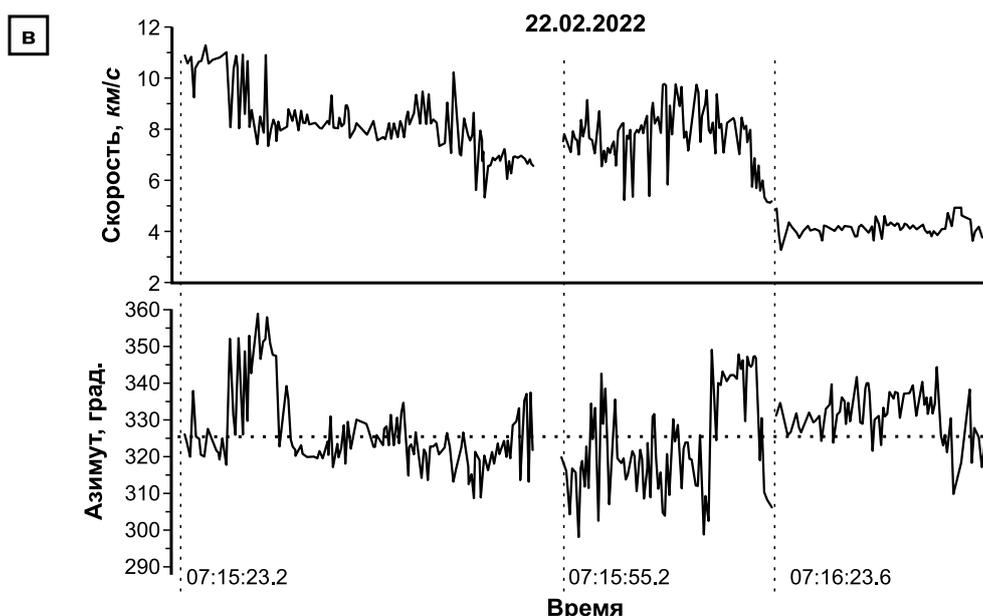


Рис. 13. Обработка записи взрыва 22.02.2022 г. в карьере «Каражыра»: а – диаграмма азимут–время–кажущаяся скорость; б – РМСС-диаграммы для азимута и кажущейся скорости, записи события на отдельных элементах группы «Маканчи»; в – изменения во времени кажущейся скорости и азимута

На азимутальной диаграмме показаны значения азимута в разные моменты времени. Время соответствует времени на сейсмограмме, оно растёт от центра круга к его границам. Разные цвета показывают значения кажущейся скорости. Мы видим, что в самом начале записи кажущаяся скорость соответствует волне Pn (жёлтые точки), азимут практически точно равен истинному азимуту на эпицентр взрыва 325° . Через несколько секунд происходит смена типа сейсмических волн и резкая смена азимута на значительно более высокие значения. С приходом волны Pg , который можно проследить по значениям кажущейся скорости около $6\text{--}7\text{ см/с}$, азимут уменьшается при значительных вариациях значений. Для волн Sn и Lg (синие точки) азимут принимает большие значения около 330° . Следовательно, в течение одной сейсмограммы значения азимута могут значительно меняться. Общий диапазон составляет почти 50° . Проведён анализ вариации наблюдаемых азимутов для всех взрывов, указанных в таблице, и сделан вывод: в течение записи с приходом разных типов волн на станцию «Маканчи» меняется азимут на источник. Закономерным представляется факт, что поперечные волны характеризуются большими значениями азимута, чем продольные при существенном разбросе отдельных значений. Наиболее верные значения, близкие к истинному азимуту на карьер, дают самые первые вступления Pn -волн. Но, к сожалению, именно эти

волны, как правило, имеют малую интенсивность, и оператор легко может взять для анализа другой тип волны с другим азимутом.

Третья причина низкой точности – неиспользование сейсмической группы «Курчатов-Крест» для определения азимута. Проведён эксперимент по использованию части 21-элементной группы в составе подгруппы из девяти элементов для проведения Ф-К анализа (рис. 14). В результате сделан вывод об уверенном определении азимутов по Ф-К диаграмме такой подсистемы и возможности использования этого подхода в рутинной обработке.

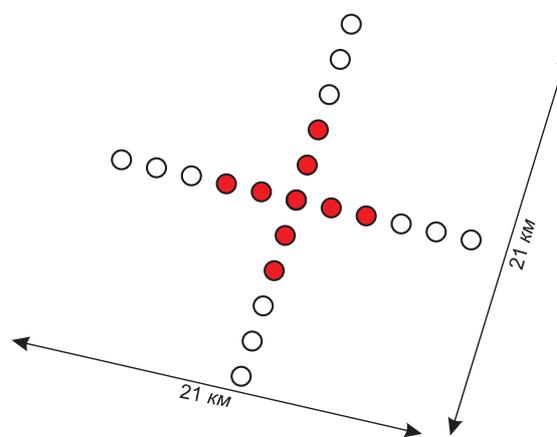


Рис. 14. Подгруппа из девяти элементов (красные кружки) сейсмической группы «Курчатов-Крест», использованная для эксперимента по оценке азимута на карьер

Пример использования такого подхода с применением программы Geotool показан на рис. 15. Результаты F-K анализа записи карьерного взрыва на «Каражыра» 9 апреля 2022 г., $MPV=2.7$, $K=7.5$ (станция «Курчатов-Крест») по подгруппе дают надёжные значения азимута, соответ-

ствующие реальному расположению карьера. Даже при использовании одной этой подгруппы со значениями времён вступлений и азимута точность значительно повышалась. Всего переобработано таким способом около 50 событий (рис. 16).

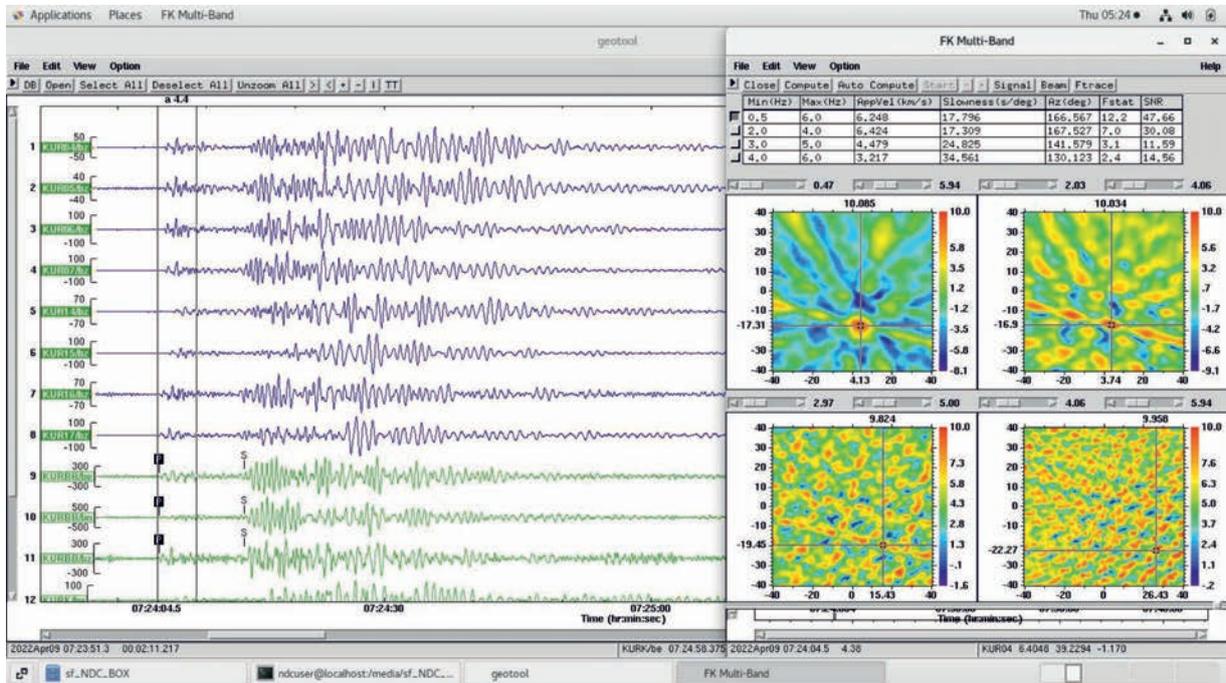


Рис. 15. Результат F-K анализа по подгруппе «Курчатов-Крест» для записи карьерного взрыва 9 апреля 2022 г., $MPV=2.7$, $K=7.5$.

Полученные значения кажущейся скорости (App.Vel.), медленности (Slowness), обратного азимута (Az) и др. в различных диапазонах частот 0.5–6.0, 2.0–4.0, 3.0–5.0, 4.0–6.0 Гц

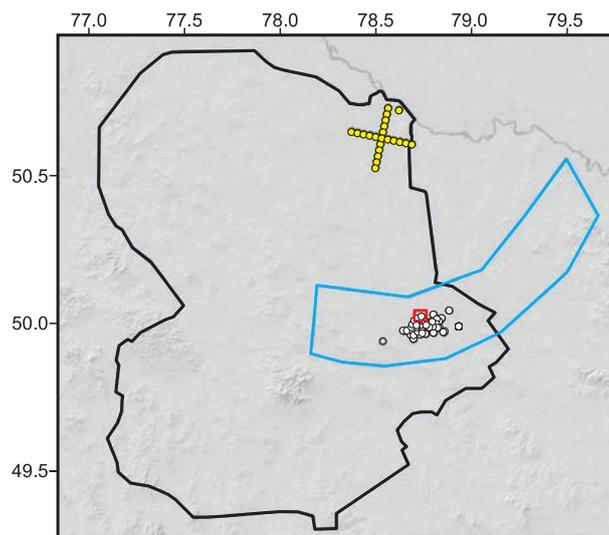


Рис. 16. Результат локации эпицентров (белые кружки) карьерных взрывов при использовании только подгруппы «Курчатов-Крест» (жёлтые кружки).

Голубой контур показывает площадь, занимаемую эпицентрами при отсутствии значений азимута по «Курчатов-Крест»

Таким образом, на основе проведённого анализа были сделаны рекомендации аналитикам сейсмических данных, позволяющие эффективно повысить точность локализации эпицентра при обработке промышленных взрывов на карьере «Каражыра». Рекомендации следующие: 1 – использование сейсмической подгруппы из девяти элементов группы «Курчатов-Крест»; 2 – использование по сейсмической группе «Маканчи» волновой группы продольных волн P_n для определения азимута с помощью F-K анализа.

Распознавание природы событий. Надёжность отнесения события к взрывам существенно увеличивается при совместном анализе сейсмических и инфразвуковых данных. В работе [Смирнов и др., 2020] была описана методика совместного использования сейсмических и инфразвуковых данных для распознавания природы сейсмических событий. В случае взрывов в «Каражыре» инфразвуковые сигналы хорошо записываются инфразвуковой группой «Курчатов» (KURIS). Пример записи инфразвука показан на рис. 17.

Если на инфразвуковой станции есть сигнал от события в районе карьера «Каражыра», то это, практически со 100%-ой вероятностью, – взрыв. Но если такого сигнала нет, то это не значит, что событие не является взрывом. Это связано с сезонными явлениями в атмосфере, влияющими на наличие инфразвуковых сигналов. Был проведён анализ вероятности обнаружения инфразвуковой записи у карьерных взрывов «Каражыра» в разные периоды года. Рассмотрены и обработаны записи по инфразвуковой станции KURIS за весь 2022 г., всего – более 100 взрывов. Рассчитана вероятность обнаружения инфразвуковой записи, равная отношению количества обнаруженных инфразвуковых записей взрывов к общему количеству взрывов за этот период. График изменения вероятности обнаружения инфразвукового сигнала от взрывов во времени показан на рис. 18. Наибольшее количество обнаружений наблюдается в зимние месяцы, наименьшее – в летние месяцы. Это относится не только к взрывам «Каражыры», но и вообще к количеству детектирований по инфразвуковым станциям Казахстана.

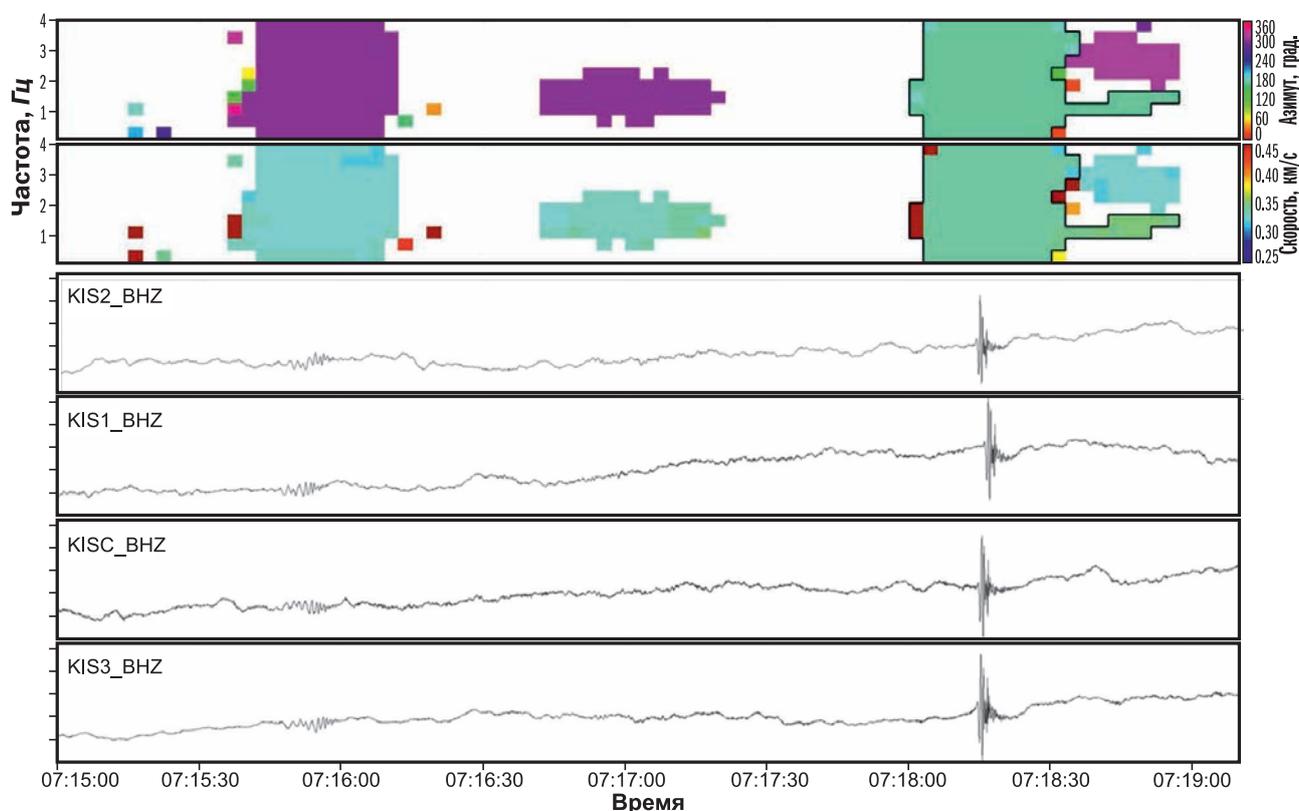


Рис. 17. Инфразвуковой сигнал по станции «KURIS» от взрыва в карьере «Каражыра» 22.02.2022 г.

Обработка программой РМСС. Чёрными линиями выделены сигналы с азимутом 167° , распространяющиеся со скоростью звука

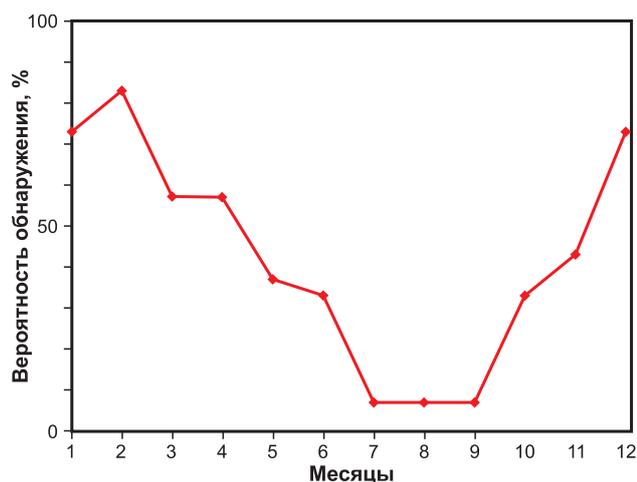


Рис. 18. Вероятность обнаружения инфразвуковых сигналов от взрывов в карьере «Каражыра» в течение 2022 г.

Следует отметить, что через территорию полигона вблизи карьера «Каражыра» проходят глубинные тектонические разломы – Калба-Чингизский, Чинрауский, Жананский, Сиректасский и Кызыл-Адырский, с которыми связаны природные тектонические землетрясения [Соколова и др., 2017; Соколова и др., 2020]. В последние годы на полигоне обнаружены и техногенные землетрясения, индуцированные разными процессами. В частности, это индуцированные землетрясения вблизи карьера «Каражыра». Интенсивное техногенное воздействие регулярными мощными взрывами может вызвать подъём флюидов и спровоцировать или ускорить процесс подготовки тектонических землетрясений. Одно из таких землетрясений было зарегистрировано 25 октября 2019 г. в районе карьера в 01 час 09 мин по Гринвичу. Координаты эпицентра: 49.9979°N, 78.8628°E, магнитуда $MPV=3.2$, энергетический класс $K=8$. Всего с 2008 по 2021 г. на территории карьера «Каражыра» зарегистрировано пять землетрясений [Аристова и др., 2022; Соколова и др., 2020]. Были изучены сейсмические записи этих землетрясений, а также записи инфразвуковой станции на время, когда должны были прийти сигналы от того же источника. Ни при одном землетрясении инфразвуковых сигналов обнаружено не было.

Заключение

1. Проведённые на большом статистическом материале, включающем более 2000 записей взрывов на карьере «Каражыра», исследования позволили выявить причины неудовлетворительной точности локализации их эпицентров при

массовой оперативной обработке. Большая часть взрывов обрабатывалась по станциям «Курчатов-Крест» (времена вступления) и «Маканчи» (времена и азимут).

2. Чёткая зависимость точности локализации от энергии взрыва связана с добавлением к двум основным других станций, в частности, «Боровое».

3. Предложено проведение при обработке записей взрывов F-K анализа с использованием подсистемы сейсмической группы средней апертуры «Курчатов-Крест». Из 21 элемента выделена малоапертурная группа в составе девяти элементов. Экспериментальное использование такой подгруппы для определения азимута существенно повысило точность определения эпицентра взрывов. Облако эпицентров уменьшилось в линейных размерах в девять раз.

4. Обнаружен эффект зависимости значений азимута от используемых волновых групп в пределах одной сейсмограммы (Pn , Pg , Sn , Lg) по станции «Маканчи». Наиболее точные оценки получены по группе Pn .

5. Надёжность отнесения события к взрывам существенно увеличивается при совместном анализе сейсмических и инфразвуковых данных. Наличие инфразвукового сигнала практически точно указывает на то, что событие в районе «Каражыры» является взрывом.

6. По результатам анализа сделаны рекомендации аналитикам волновых форм по методике обработки событий на территории СИП для повышения точности локализации и распознавания.

Литература

Аристова И.Л., Соколова И.Н., Великанов А.Е. Индуцированная сейсмичность в районах угольных месторождений Восточного Казахстана по данным сети KzNet // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2022. – № 2 (20). – С. 13–23.

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний / Подготовительная комиссия Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. – Вена, Австрия, 2022. – 153 с.

Михайлова Н.Н. Важные результаты, полученные благодаря открытию сейсмических групп в Казахстане // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. 2. – С. 23–31.

Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Великанов А.Е., Мукамбаев А.С. Природная и техногенная сейсмичность территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона и его окрестностей. – Алматы, 2021. – 179 с.

- Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Сейсмичность взрывных работ на территории Республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 4. – С. 124–130.
- Смирнов А.А., Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Методика распознавания сейсмических событий по комплексу инфразвуковых и сейсмических данных // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 2. – С. 105–111.
- Смирнов Ю.А., Смирнов А.А., Михайлова Н.Н. Спектральные характеристики сейсмических и инфразвуковых шумов по данным станций сети мониторинга Национального ядерного центра Республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК. – 2022. – Вып. 4. – С. 82–93. – DOI: 10.52676/1729-7885-2022-4-82-93
- Соколова И.Н., Михайлова Н.Н., Великанов А.Е. Техногенно-индуцированные сейсмические события на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона по данным полевых наблюдений // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 7–15. – DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.01. – EDN: GZKBNS
- Соколова И.Н., Михайлова Н.Н., Великанов А.Е., Полешко Н.Н. Техногенная сейсмичность на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 2. – С. 47–57.
- Семипалатинский испытательный полигон: создание, деятельность, конверсия / Под ред. В.С. Школьника. – Алматы, 2003. – 344 с.
- Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method // Geophysical Research Letters. – 1995. – V. 22. – P. 1021–1024. – DOI: 10.1029/95GL00468
- Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. – 1969. – V. 57, Iss. 8. – P. 1408–1418. – DOI: 10.1109/PROC.1969.7278
- Fyen J. Event processor program package // NOR-SAR Semiannual Technical Summary. 1 Oct 1988 – 31 Mar 1989. Scientific Report 2-88/89. – Kjeller, Norway: NORSAR, 1989. – DOI: 10.21348/p.1989.0003
- Kvaerna T. Initial results from global generalized beamforming // NORSAR Semiannual Technical Summary. 1 Apr – 30 Sep 1992. Scientific Report 1-92/93. – Kjeller, Norway: NORSAR, 1993. – DOI: 10.21348/p.1992.0008
- Mikhailova N.N., Sokolova I.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre, 2016 January-June. – 2019. – V. 53, Iss. 1. – P. 27–38. – DOI: 10.31905/RK46YGLU
- Pooley C.I., Douglas A., Pearce R.G. The seismic disturbance of 1976 March 20, East Kazakhstan: earthquake or explosions? // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1983. – V. 74. – P. 621–631. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.1983.tb01893.x

Сведения об авторах

Михайлова Наталья Николаевна, д-р физ.-мат. наук, директор Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК), г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: mikhailova@kndc.kz

Мукамбаев Айдын Серикович, зам. директора Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации ИГИ НЯЦ РК, г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: mukambayev@kndc.kz

Дубровин Виталий Игоревич, науч. сотр. Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации ИГИ НЯЦ РК, г. Алматы, Республика Казахстан. E-mail: vitaliy@kndc.kz

On Monitoring of mining explosions conducted on the territory of the former Semipalatinsk Test Site

© 2024 A.S. Mukambayev, N.N. Mikhailova, V.I. Dubrovin

IGR NNC RK, Almaty, Kazakhstan

Received December 25, 2023

Abstract Several mineral deposits located on the territory of the former Semipalatinsk Test Site (STS) conduct active blasting activity. The largest number of explosions is carried out at the Karazhyra coal mine. These explosions are recorded by stations of the IGR NNC RK network, three of them are part of the International Monitoring System. These are seismic arrays Borovoye (AS057), Makanchi (PS23), Kurchatov-Cross (AS058). The distances to the mines from these stations are 668 km, 452 km, 68 km, respectively. In total, about 2800 explosions were recorded during 19 years of observations. The analysis of the results of routine processing on operational seismic bulletins of the IGR NNC RK Data Center has shown that the field of received epicenters of explosions exceeds the size of the quarry. A detailed processing of explosions waveforms was carried out to find out the reasons of this scatter. Geotool and DTK – GPMCC software included in the NDC-in-a Box package was used to process and analyze the waveforms. It was found that back azimuth values for different regional phases Pn, Pg, Sn, Lg differ from each other and have different dispersion. There are systematic deviations of back azimuths for some phases from the true one. A clear dependence of the epicenter determination accuracy on the energy (power) of the explosion was noted. Subjective factors in the work of analysts that affect the accuracy of estimates are also found. Processing recommendations to improve accuracy were given for analysts of Kazakhstan National Data Centre (KNDC).

Keywords Test Site, mining explosion, seismic array, configuration, back azimuth, progressive multichannel correlation.

For citation Mukambayev, A.S., Mikhailova, N.N., & Dubrovin, V.I. (2024). [On Monitoring of mining explosions conducted on the territory of the former Semipalatinsk Test Site]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(2), 27-41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.02>. EDN: MQCCKC

References

- Aristova, I.L., Sokolova, I.N., & Velikanov, A.E. (2022). [Induced seismicity in the areas of coal deposits in East Kazakhstan according to the KzNet network]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR* [Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic], 2(20), 13-23. (In Russ.).
- Cansi, Y. (1995). An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. Method. *Geophysical Research Letters*, 22, 1021-1024. DOI: [10.1029/95GL00468](https://doi.org/10.1029/95GL00468)
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wave-number spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1408-1418. DOI: [10.1109/PROC.1969.7278](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278)
- Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). (2022). *Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*. Vienna, Austria, 153 p.
- Fyen, J. (1989). Event processor program package. In: *NORSAR Semiannual Technical Summary. 1 Oct 1988 – 31 Mar 1989. Scientific Report 2-88/89*. Kjeller, Norway: NORSAR Publ. DOI: [10.21348/p.1989.0003](https://doi.org/10.21348/p.1989.0003)
- Kvaerna, T. (1993). Initial results from global Generalized Beamforming. In: *NORSAR Semiannual Technical Summary, 1 Apr – 30 Sep 1992. Scientific Report 1-92/93*. Kjeller, Norway: NORSAR Publ. DOI: [10.21348/p.1992.0008](https://doi.org/10.21348/p.1992.0008)
- Mikhailova, N.N. (2016). [Important results obtained due to the discovery of seismic groups in Kazakhstan]. *Vestnik NIATs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 23-31. (In Russ.).
- Mikhailova, N.N., & Sokolova, I.N. (2019). Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre, 2016, January-June, 53(1)*, 27-38. DOI: [10.31905/RK46YGLU](https://doi.org/10.31905/RK46YGLU)
- Mikhailova, N.N., Sokolova, I.N., Velikanov, A.E., & Mukambayev, A.S. (2021). *Prirodnaia i tekhnogennaia seismichnost' territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona i ego okrestnostei* [Natural and

- man-made seismicity of the territory of the former Semipalatinsk test site and its surroundings]. Almaty, Kazakhstan, 179 p. (In Russ.).
- Mukambayev, A.S., & Mikhailova, N.N. (2017). [Seismicity of blasting operations in the territory of the Republic of Kazakhstan]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 4, 124-130. (In Russ.).
- Pooley, C.I., Douglas, A., & Pearce, R.G. (1983). The seismic disturbance of 1976 March 20, East Kazakhstan: earthquake or explosions? *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 74, 621-631. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1983.tb01893.x
- Shkol'nik, V.S. (Ed.). (2003). *Semipalatinskii ispytatel'nyi poligon: Sozdanie deiatel'nost', konversii* [Semipalatinsk test site: Creation, activity, conversion]. Almaty, Kazakhstan, 344 p. (In Russ.).
- Smirnov, A.A., Mukambayev, A.S., & Mikhailova, N.N. (2020). [Methodology of identification of seismic events based on a number of infrasound and seismic data]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 105-111. (In Russ.).
- Smirnov, Yu.A., Smirnov, A.A., & Mikhailova, N.N. (2022). [Spectral characteristics of seismic and infrasound noises according to the stations of the monitoring network of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 4, 82-93. (In Russ.). DOI: 10.52676/1729-7885-2022-4-82-93
- Sokolova, I.N., Mikhailova, N.N., & Velikanov, A.Ye. (2020). [Induced seismic events on the territory of the former Semipalatinsk Test Site (STS) according to the data of field observations]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(4), 7-15. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.01. EDN: GZKBNS
- Sokolova, I.N., Mikhailova, N.N., Velikanov, A.E., & Poleshko, N.N. (2017). [Induced seismicity on the territory of Kazakhstan]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 2, 47-57. (In Russ.).

Information about authors

Mikhailova Natalya Nikolaevna, Dr., Director for Center of Acquisition and Processing Special Seismic Information of the Institute of Geophysical Research of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (IGR NNC RK), Almaty, Kazakhstan. E-mail: mikhailova@kndc.kz

Mukambayev Aidyn Serikovich, Deputy Director for Center of Acquisition and Processing Special Seismic Information of the IGR NNC RK, Almaty, Kazakhstan. E-mail: mukambayev@kndc.kz

Dubrovin Vitaliy Igorevich, Researcher at Center of Acquisition and Processing Special Seismic Information of the IGR NNC RK, Almaty, Kazakhstan. E-mail: vitaliy@kndc.kz