

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»
Алтае-Саянский филиал

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

ФАТЕЕВ Александр Владимирович

**НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ
ПО ДАННЫМ ПЛОТНЫХ СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЯ
В УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ КУЗБАССА**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.т.н. Еманов Александр Федорович

Новосибирск

2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ИЗУЧЕННОСТЬ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН.....	11
1.1. Изученность известных примеров наведенной сейсмичности при добыче твердых полезных ископаемых	11
1.2. Развитие методики мониторинга наведенной сейсмичности на примере Кузбасса.....	15
1.2.1. Сеть сейсмологических станций.....	16
1.2.2. Центр сбора и обработки сейсмологических данных.....	18
1.2.3. Первичная обработка сейсмологических данных.....	20
1.2.4. Применение метода двойных разностей для уточнения координат гипоцентров сейсмических событий	20
1.2.5. Сейсмическая томография с двойными разностями	23
Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ УГЛЯ В КУЗБАССЕ И ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЕЕ РАЗВИТИИ.....	25
2.1. Изучение техногенной сейсмичности около г. Осинники.....	26
2.2. Мониторинг техногенной сейсмичности в районе г. Полысаево	27
2.3. Наведенная сейсмичность на севере Кузбасса.....	50
2.4. Эксперимент с локальной сетью станций в районе шахты «Распадская»	53
2.5. Триггерные эффекты в развитии наведенной сейсмичности Кузбасса....	60
2.6. Выводы.....	71
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В РАЙОНЕ БАЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 18 ИЮНЯ 2013 Г., СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН	74
3.1. История сейсмичности в очаговой зоне	74

3.2. Исследование сейсмического процесса, сопровождавшего землетрясение 9 февраля 2012 г.	76
3.3. Бачатское землетрясение 18 июня 2013, $ML=6.1$	86
3.3.1. Инструментальные и региональные данные	86
3.3.2. Механизмы очагов	88
3.3.3. Макросейсмические данные	90
3.3.4. Сейсмичность очаговой области Бачатского землетрясения	92
3.3.5. Мониторинг развития сейсмического процесса во времени	98
3.4. Тектоническая позиция очага и природа Бачатского землетрясения.....	103
3.5. График повторяемости землетрясений для района Бачатского разреза в сравнении с природными и техногенными сейсмоактивными зонами Алтае-Саянской горной области	110
3.6. Выводы.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – наведенная сейсмичность в угледобывающих районах Кузбасса на предмет определения пространственно-временной структуры и закономерностей ее формирования.

Актуальность исследования. Технический прогресс требует существенного увеличения темпов добычи угля в Кузбассе, соответственно возрастает воздействие человека на геосреду и ее отклик. Земная кора находится при этом под разными типами воздействий, такими как перемещение больших масс горной породы, сейсмическое воздействие массовых промышленных взрывов, воздействие вибрации от работы добывающего оборудования, откачка вод с подземных горных выработок. В связи с этим особую значимость и актуальность приобретают:

- проведение исследований, направленных на изучение природы возникновения и закономерностей формирования наведенной сейсмичности при добыче угля как подземным, так и открытым способом;
- формирование системы мониторинга, базирующееся на понимании особенностей протекания техногенных сейсмических процессов;
- уточнение сейсмической опасности территории, оценка возможного сейсмического риска и последствий от сильного землетрясения в Кузбассе.

Используемые в исследовании данные получены с плотных сетей наблюдения совместно с региональной сетью широкополосных станций. Уточнение полученных параметров гипоцентров землетрясений выполняется в несколько итераций с использованием локальной скоростной модели. Таким образом, возникает возможность оперативно получать точные сведения о большом количестве землетрясений и исследовать их на качественно новом уровне.

Значимость исследований в данном направлении подчеркивает Указ Президента РФ №12 от 11.01.2018 г. «Об утверждении основ государственной политики РФ в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года». В данном документе в числе основных угроз, влияющих

на состояние защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, среди прочих указаны стихийные бедствия, вызванные активизацией геофизических процессов и угрозы, вызванные негативным изменением окружающей среды.

Среди необходимых мероприятий указаны проведение мониторинга и анализа рисков природного и техногенного характера, а также развитие системы мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций [Указ Президента РФ, 2018].

Цель исследования – существенно повысить знание о закономерностях формирования наведенной сейсмичности в Кузбассе, о триггерных механизмах воздействия на нее, таких как вибрация от угледобывающего оборудования и перемещение больших масс горной породы.

Научные задачи:

1. По данным плотных сетей цифровых сейсмологических станций и современных средств локации событий определить пространственно-временные параметры (положение гипоцентров землетрясений, их энергетические характеристики, механизмы очагов, время в очаге) и выявить отличительные особенности наведенной сейсмичности в районе добычи угля подземным способом в Кузбассе; изучить возможность триггерного воздействия на развитие техногенного сейсмического процесса.

2. По данным плотных сетей цифровых сейсмологических станций и современных средств локации событий определить пространственно-временные параметры (положение гипоцентров землетрясений, их энергетические характеристики, механизмы очагов, время в очаге) и выявить отличительные черты сейсмического процесса при добыче угля открытым способом в районе разреза «Бачатский»; провести сравнительный анализ природных и техногенных сейсмических активизаций.

Фактический и теоретический материал, методы исследования, программное обеспечение, достоверность полученных результатов. В основу

решения поставленных задач легли фундаментальные разработки по изучению наведенной сейсмичности известных сейсмологов, таких как В.В. Адушкин, С.С. Арефьев, А.Ф. Еманов, А.А. Козырев, К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, В.Н. Опарин, В.С. Пономарев, С.Б. Турунтаев и др.

Фактической основой являются данные многолетнего мониторинга плотными временными сетями цифровых сейсмологических станций (до 30-40 на участке 10x10 км), выполненного с 2005 по 2018 гг. в Кемеровской области при совместных исследованиях Алтае-Саянским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» и Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Данные получены с использованием современной высокоточной регистрирующей аппаратуры «Байкал», прошедшей сертификацию и калибровку в Федеральном государственном учреждении «Новосибирский центр стандартизации, метрологии и сертификации» для регистрации сейсмических колебаний [Семибаламут, Рыбушкин, 2003]. Это позволило на качественно новом уровне точности рассчитывать параметры землетрясений и механизмов их очагов в большом диапазоне энергий. В работе также использованы данные, полученные на цифровых сейсмологических станциях региональной сети Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» за указанный период.

Определение по полученным сейсмограммам параметров землетрясений, таких как гипоцентры землетрясений, время их возникновения, энергетический уровень, механизмы очагов осуществлялось с использованием протестированных и зарегистрированных программ, признанных мировым научным сообществом современных методов цифровой обработки данных, таких как:

- пакет программ SeisComP3 [Weber et al, 2007] в качестве основной системы обработки,
- пакет программ HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002] для уточнения параметров локации событий в рамках многослойной скоростной модели,

полученной в результате экспериментальных исследований непосредственно в районе работ,

- метод двойных разностей [Waldhauser and Ellsworth, 2000] в целях уточнения положения гипоцентров землетрясений,
- итерационный алгоритм сейсмической томографии с двойными разностями (DD-томография, double-difference tomography) [Zhang and Thurber, 2003б], осуществляющий одновременное уточнение скоростной модели и координат гипоцентров сейсмических событий,
- пакет программ FPFIT [Reasenberg and Oppenheimer, 1985] для расчета и отображения фокальных механизмов.

Указанные программные пакеты и алгоритмы были адаптированы соискателем к работе с данными, полученными в Алтае-Саянском регионе, в частности, путем применения уточненной скоростной модели для района исследований.

В работе были использованы возможности современных геоинформационных систем, таких как ArcVIEW и ArcGIS [ARCGIS..., 2001], а также высокоточные цифровые модели рельефа, созданные на основе радарной топографической съемки SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 3x3" [SRTM...].

Лично автором получены следующие **новые научные результаты:**

1. Выявлено перемещение сейсмических активизаций вместе с продвижением угледобывающего забоя при добыче угля **подземным** способом. Гипоцентры большинства землетрясений располагаются ниже выработки. Установлен триггерный характер влияния вибрации на режим наведенной сейсмичности. Доказано влияние интенсивности добычи угля на одной лаве на сейсмический процесс другой, находящейся на расстоянии порядка 500 м.

2. Установлена тесная пространственная связь сейсмического процесса в районе Бачатского угольного разреза с **открытой** горной выработкой и распространение его в глубину до 4-5 км. Выявлен пульсирующий характер

техногенной сейсмической активизации. На основе сравнительного анализа материалов эпицентральных работ в зонах крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области установлено отличие в параметрах графиков повторяемости техногенных сейсмических активизаций от природных активизированных зон.

Лично автором или при его активном участии выполнены полевые эксперименты с плотными высокоточными сетями цифровых сейсмологических станций в Кузбассе с 2005 по 2018 гг. При обработке данных рассчитан весь основной комплекс параметров сейсмических событий: время в очаге, пространственные координаты гипоцентра, оценка энергетических характеристик, механизм очага землетрясения и др. В результате анализа полученных экспериментальных данных определены особенности наведенной сейсмичности в Кузбассе в районах добычи угля подземным и открытым способами. Получены принципиально новые представления о масштабах наведённой сейсмичности в Кузбассе.

Теоретическая и практическая значимость результатов. Существование явно выраженных техногенных сейсмических активизаций в осадочном бассейне Кузнецкой впадины, выявленные особенности пространственного расположения сейсмических активизаций относительно связанных с ними участков горных работ, характер протекания сейсмических процессов – все это является новыми данными, которые необходимо использовать для развития фундаментальных представлений в области физики очага землетрясений и для построения геодинамических моделей, обосновывающих тектонические процессы.

Рассчитанные параметры гипоцентров тысяч землетрясений в Кемеровской области в 2005-2018 гг. являются уникальными по точности наблюдений данными и могут быть успешно использованы в своих работах как учеными при верификации и сопоставлении с другими геолого-геофизическими данными для этого района, так и экспертами при принятии решений о капитальном

строительстве промышленных и гражданских объектов и при определении устойчивости техногенных сооружений в связи с сейсмическим риском на территории Кемеровской области.

Исследования показали, что энергетический уровень возможных техногенных землетрясений коррелирует с интенсивностью добычи твердых полезных ископаемых, линейными размерами горных выработок и массой перемещенного грунта. Таким образом, добыча угля, осуществляемая без должного контроля за сейсмической обстановкой, а также перемещение огромных масс пород могут приводить к катастрофическим последствиям для экономики и экологии региона.

Апробация. Результаты работы были представлены и получили одобрение специалистов на **18 международных** (Боровое, Казахстан, 2008; Херсонес, Греция, 2008; Цукуба, Япония, 2008; Вена, Австрия, 2008, 2009, 2010; Ханой, Вьетнам, 2010; Стамбул, Турция, 2011, 2014; Москва, 2012; Санкт-Петербург – Москва, 2013; Канкун, Мексика, 2013; Новосибирск, 2014, 2015, 2017; Бишкек, Киргизия, 2014; Макати, Филиппины, 2014; Курчатова, Казахстан, 2014), **17 региональных и всероссийских** (Иркутск, 2009, 2012, 2014; Москва, 2010, 2013, 2015, 2016; пос. Черный Ануй, Алтайский край, 2010, 2012; Кемерово, 2011; Новосибирск, 2013, 2013а, 2013б, 2014; Апатиты, 2013; Кызыл, 2015; Саяногорск, 2016) семинарах, конференциях и симпозиумах; а также на **3 молодежных конференциях и школах молодых ученых** (Москва, 2009, 2015; Новоханы, Азербайджан, 2015).

Публикации. Всего соискателем опубликовано 155 работ. **Материалы диссертации полностью изложены** в 67 научных работах, из них 8 статей в журналах из Перечня ВАК, 2 главы в монографиях, 23 статьи в ведущих отечественных и зарубежных изданиях и тематических сборниках, 34 – в материалах конференций и тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 111 наименований. Полный объем диссертации составляет 137 страниц, включая 64 рисунка и 2 таблицы.

Благодарности. В первую очередь автор безгранично благодарен директору АСФ ФИЦ ЕГС РАН, д.т.н. Александру Федоровичу Еманову, чье научное руководство привело к осознанию сути поставленных задач, пониманию направлений их решения и способствовало успешному освоению методов исследования. Роль Александра Федоровича в формировании автора как специалиста невозможно переоценить.

Особенно хотелось бы отметить вклад в данную работу к.г.-м.н. А.А. Еманова, соратника и соавтора цикла работ по сейсмичности Алтае-Саянского региона. Его помощь в освоении новых методов и разработок в современной сейсмологии неоценима.

Автор также благодарен всему коллективу АСФ ФИЦ ЕГС РАН за поддержку на всех этапах исследования, в частности к.ф.-м.н. Е.В. Лесковой, к.г.-м.н. В.М. Соловьеву, а также В.Г. Подкорытовой и А.Г. Филиной, под чьим руководством был получен первый практический опыт работы с сейсмологическими данными.

Автор благодарен к.г.-м.н. П.Г. Дядькову, д.т.н. Ю.И. Колесникову, д.г.-м.н., чл.-корр. РАН И.Ю. Кулакову, к.ф.-м.н. О.А. Кучай, к.г.-м.н. Е.А. Мельник, д.г.-м.н. В.Д. Суворову и прочим сотрудникам ИНГГ СО РАН, а также директору СЕФ ФИЦ ЕГС РАН д.г.-м.н. В.С. Селезневу и сотруднику ИГМ СО РАН д.г.-м.н. И.С. Новикову за поддержку и плодотворные обсуждения работы.

Нельзя не упомянуть и о подобном же вкладе со стороны коллектива ФИЦ ЕГС РАН, в особенности д.т.н., чл.-корр. РАН А.А. Маловичко, к.ф.-м.н. Р.А. Дягилева и к.ф.-м.н. Н.В. Петровой.

Кроме того, автор искренне признателен В.И. Самойловой за всестороннюю поддержку, содействие и методические рекомендации на этапе подготовки текста диссертации.

Глава 1. ИЗУЧЕННОСТЬ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН

1.1. Изученность известных примеров наведенной сейсмичности при добыче твердых полезных ископаемых

Наведенная сейсмичность при разработке полезных ископаемых изучалась во многих регионах мира [Адушкин и др., 2000; Барабанов, 1994; Дягилев и др., 2009; Еманов А.Ф. и др, 2007; Еманов А.Ф. и др, 2009; Еманов А.Ф. и др, 2010; Еременко и др., 2010; Козырев и др., 2002а; Маловичко и др., 2005; Мирзоев и др., 2009; Нестеренко Ю.М, Косолапов, Нестеренко М.Ю., 2010; Николаев, 1994; Опарин и др., 2004; Опарин и др., 2008; Пономарев, Ромашов, Турунтаев, 1994; Пономарев, 2008; Соболев и др., 2010; Холуб, 2007; Foulger et al, 2018; Luo, Creighton, Gouch, 2010; Mendecki and Lotter, 2011 и др.] Сейсмические процессы возникают как при добыче нефти и газа, так и при добыче твердых полезных ископаемых. Чаще всего сейсмические активизации в местах добычи полезных ископаемых возникают в виде роевой сейсмичности, сформировавшейся из землетрясений малой энергии, но иногда техногенные землетрясения имеют магнитуду больше четырех [Козырев и др., 2002б], что при малой глубине техногенных событий представляет серьезную опасность.

Под наведенной сейсмичностью подразумеваются землетрясения, вызванные техногенным воздействием человека. По сути своей это есть реакция земной коры на воздействия различного вида. Это могут быть воздействия динамического характера, либо длительные и медленно развивающиеся нагружения, которые изменяют геодинамический и флюидодинамический режим [Адушкин, 2015]. В условиях постоянно растущих масштабов воздействия человека на геологическую среду соответственно возрастает масштаб отклика среды на воздействие.

Наведенная сейсмичность может быть условно разделена на две разновидности по источнику ее возникновения: индуцированная и триггерная. Индуцированная, или вынужденная, сейсмичность проявляется обычно в виде

относительно слабых толчков при техногенных воздействиях в породах с невысоким уровнем напряженного состояния. Триггерная сейсмичность возникает вследствие высвобождения собственных запасов энергии в геологической среде под воздействием внешних источников возмущений. Характерным ее признаком является тот факт, что энергия сейсмических событий может существенно превышать энергию техногенного воздействия. Техногенное воздействие в данном случае лишь ускоряет или запускает процесс высвобождения собственных запасов упругой энергии в массиве, вызывает срабатывание практически готового очага землетрясения [Николаев, 1994; Адушкин, 2015]. Соответственно триггерная сейсмичность по потенциальным масштабам последствий превосходит сейсмичность индуцированную.

Обе эти категории сейсмичности следует рассматривать применительно к конкретным источникам: горным работам, созданию и заполнению водохранилищ, разработкам углеводородов и подземным взрывам. Различные источники обуславливают различные механизмы возникновения техногенных землетрясений. В зависимости от естественного напряженного состояния вмещающих пород варьирует мощность возможного отклика среды на инженерное воздействие.

Что касается сейсмических явлений, непосредственно связанных с добычей твердых полезных ископаемых, то в этом случае наиболее опасны горные и горно-тектонические удары, которые приводят к крупным авариям, значительному материальному ущербу и человеческим жертвам. В частности, горно-тектонические удары, как правило, не обладают явной пространственно-временной связью с горными работами. Сейсмическая энергия этих событий в основном выше, чем у горных ударов, гипоцентры как правило находятся на значительном расстоянии от выработок и обычно приурочены к геологическим нарушениям [Адушкин, 2016].

Деятельность человека по добыче твердых полезных ископаемых уже привела к ряду мощных землетрясений. Среди сильнейших сейсмических событий подобного генезиса, помимо исследуемого в данной работе Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г. ($ML=6.1$) в Кузбассе [Еманов А.Ф. и др., 2016],

следует отметить горно-тектонические удары на Кольском полуострове: на Кировском руднике ОАО «Апатит» 16 апреля 1989 г. ($M=4.8-5.0$) и на руднике «Умбозеро» Ловозерского редкоземельного месторождения 17 августа 1999 г. ($M=4-4.4$) [Козырев и др., 2002б; Козырев и др., 2009]. Для исследования указанных сейсмических процессов действует система мониторинга, состоящая из семи трёхкомпонентных станций с аналоговой системой регистрации и девяти сейсмометров, размещенная непосредственно в шахтном поле. Также исследована техногенная сейсмичность в районе освоения Воркутинского угольного месторождения, проявившаяся серией землетрясений, наиболее мощные из которых произошли в 1961, 1995, 2005 и 2012 гг. Интенсивность сотрясений, вызванных этими землетрясениями, в г. Воркута достигала 4–5 баллов по шкале MSK-64 [Змушко, Турунтаев, Куликов, 2011]. Кроме того, из месторождений, разработка которых сопровождается многочисленными сейсмическими событиями, следует отметить Соликамский рудник: извлечение больших объемов породы привело к значительному изменению напряженного состояния горного массива [Маловичко и др., 2005]. Сейсмические события, спровоцированные данным изменением, имели магнитуду до $m_b=4.7$ (5 января 1995 г.). Также известно своими проявлениями техногенной сейсмичности Южноуральское бокситовое месторождение (ЮУБР). В частности, 28 мая 1990 г. на шахте «Кургазакская» была зафиксирована серия из трех сейсмических событий, магнитуда максимального из которых достигала $M=4.5-4.7$ [Адушкин, Турунтаев, 2015]. На границе между Пермским краем и Свердловской областью 30 марта 2010 г. произошло землетрясение с $ML=4.4$. На территории данного района функционирует не менее 30 разрезов и шахт, таким образом процесс формирования очага этого землетрясения происходил в условиях техногенного воздействия на природные геодинамические и флюидодинамические режимы. Поэтому, несмотря на совпадение эпицентра с известными глубинными разломами и существенную глубину гипоцентра очага (21 км), специалисты [Дягилев, Голубева, 2010] считают, что оно может быть отнесено к проявлениям триггерной сейсмичности.

Из наиболее характерных примеров зарубежных проявлений наведенной сейсмичности при добыче твердых полезных ископаемых заслуживает внимания рудник Mount Charlotte в Западной Австралии. Разработка золотосодержащих кварцитовых жил привела к рою сейсмических событий с максимальной магнитудой $M=3$ [Lee, Beer, Windsor, 1990]. В золотоносных рудниках ЮАР (Witswatersrand, Kloof, Western Deep Levels) разработки ведутся на больших глубинах, свыше 3000 м. При этом образуются пустоты в породе, простирающиеся на несколько километров в ширину с начальной толщиной выработки около метра. Здесь зафиксированы землетрясения вплоть до магнитуды $M=4.2$ [Brink, 1990]. Медные рудники Польши (Легницко-Глоговский бассейн), расположенные в районе крупного тектонического нарушения, характеризуются максимальными магнитудами сейсмических событий $M=4.5$ [Адушкин, Турунтаев, 2015]. На руднике по добыче калия в Германии 13 марта 1989 г. произошло техногенное землетрясение с $M=5.4$. Данное событие предположительно было инициировано закачкой жидких отходов в массив пород недалеко от места проведения горных работ в течение продолжительного времени, а также динамической нагрузкой вследствие взрывных работ [Knoll and Kuhnt, 1990]. Из сейсмических активизаций, сопровождающих добычу угля, рассмотрен сейсмический процесс в рудниках Острава-Карвинского угольного бассейна (Чехия), характеризующийся роем мелких сейсмических событий, тесно увязанных в пространстве с текущим положением очистного забоя. При этом практически все гипоцентры зарегистрированных сейсмических событий находятся перед забоем [Холуб, 2007]. Данный сейсмический процесс исследуется локальной сетью, состоящими из 10 вертикальных сейсмоприемников, 3 из которых размещены непосредственно в выработках.

Таким образом, мониторинг наведенной сейсмичности чрезвычайно важен. Исследование наведенной сейсмичности в наши дни становится одним из важнейших и ему уделяется много внимания как в прикладной, так и в фундаментальной сейсмологии.

Общей отличительной особенностью изучения вышеописанных примеров техногенной сейсмичности при добыче полезных ископаемых является ориентированность на безопасность ведения горных работ. Системы наблюдения нацелены на выявление горных ударов и акустической эмиссии непосредственно на участках ведения горных работ. Используемые в диссертации данные трехкомпонентных сейсмических датчиков с плотных сетей наблюдения цифровых станций совместно с региональной сетью широкополосных станций, а также выполняемое в несколько итераций уточнение полученных параметров гипоцентров землетрясений с использованием скоростной модели, полученной в результате экспериментальных исследований непосредственно в районе работ [Еманов А.Ф. и др., 2012а], дают возможность также исследовать сейсмические процессы, происходящие вне пределов горных выработок, но по ряду признаков связанных с ними. Это позволяет говорить о том, что описываемые в данной работе плотные сети наблюдения совместно с региональной сетью ориентированы на обеспечение безопасности всего региона.

1.2. Развитие методики мониторинга наведенной сейсмичности на примере Кузбасса

Одним из сейсмически активных районов добычи твёрдых полезных ископаемых является Кузбасс, в котором природная сейсмичность фиксировалась ещё до начала промышленной добычи угля. Природная сейсмичность приурочена в основном к горному обрамлению Кузнецкой котловины, в то время как наведённая сейсмичность – непосредственно к местам добычи угля, то есть к самой впадине. Региональные сети сейсмологических станций располагаются в горных массивах, поэтому техногенная сейсмичность во впадине, сложенной осадками с соответствующими скоростями распространения упругих волн [Соловьев и др., 2003] долгое время оставалась вне поля зрения сейсмологов. Фиксировались только наиболее крупные техногенные землетрясения, а учитывая, что их

гипоцентры находятся на малых глубинах, затруднительно отличить их по форме записи от промышленных взрывов [Еманов А.Ф. и др., 2015б].

1.2.1. Сеть сейсмологических станций

В первую очередь усилия были направлены на создание сети стационарных сейсмологических станций, способной осуществлять непрерывный мониторинг территории, охваченной шахтами и карьерами. Дополнительно организовывались экспериментальные работы с плотными сетями временных сейсмологических станций для детального изучения особенностей техногенных землетрясений в районе шахт и карьеров. Ко времени начала развития сети станций в Кузбассе сформировалось мнение, что обработка любой локальной сети более эффективна, когда она проводится совместно с региональными станциями, расположенными на большой территории. Исходя из этого, сейсмологическая сеть Кузбасса формируется как двухуровневая: первый уровень имеет своей целью обнаружение техногенных сейсмических активизаций, второй – исследование конкретной активизированной зоны [Еманов А.Ф. и др., 2015б].

Задачи, решаемые сетью первого уровня (стационарные станции):

- обнаружение сейсмических активизаций в районах добычи угля;
- в случае выявления активизации, вышедшей на определенный энергетический уровень – контроль за сейсмической активностью и её параметрами;
- определение триггерных механизмов формирования наведённой сейсмичности в окрестности шахт и разрезов (влияние взрывов, вибрации, других техногенных и природных воздействий);
- определение балльности в пунктах размещения сейсмостанций сразу после землетрясения;
- осуществление контроля за сейсмическим эффектом от промышленных взрывов [Еманов А.Ф. и др., 2015б].

Данная сеть на территории Кемеровской области представлена 22 станциями; они передают волновые формы в автоматическом режиме, близком к реальному

времени, в Центр сбора и обработки сейсмологических данных (далее – Центр) в Новосибирске (Рисунок 1.1). При этом следует отметить вклад угледобывающих предприятий, заинтересованных в информации о сейсмической обстановке на вверенной им территории, в развитие сети сейсмологического мониторинга.

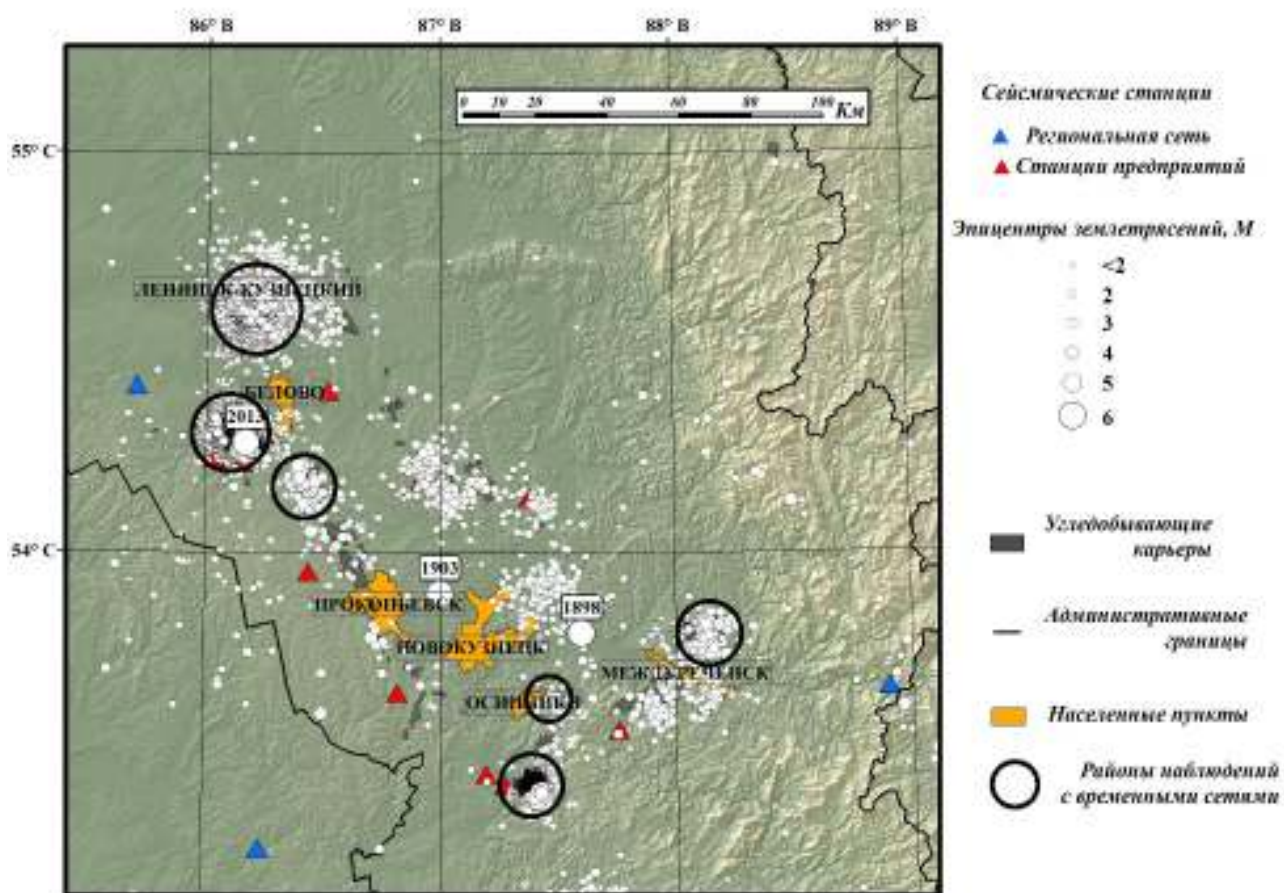


Рисунок 1.1 – Сейсмичность за период 1761-2018 гг., сеть сеймостанций и районы исследования техногенных сейсмических активизаций в Кузбассе

Сеть второго уровня (временные станции) ориентирована на решение следующих задач:

- изучение выявленных сейсмических активизаций в местах добычи угля наземным и подземным способом на уровне сейсмических событий малых энергий;
- изучение пространственно-временных связей в развитии процесса наведённой сейсмичности;
- определение степени сейсмической опасности добычи угля на угледобывающих предприятиях;

- прогноз развития сейсмического процесса в зоне выявленной сейсмической активизации.

Для решения данных задач разворачиваются временные (от 1 месяца до нескольких лет) плотные сети наблюдения, состоящие из 10–40 автономных пунктов регистрации. В течение 2005–2018 гг. в Кузбассе выполнено свыше десятка наблюдений с временными сетями станций, наиболее значимые из которых показаны на рисунке 1.1.

1.2.2. Центр сбора и обработки сейсмологических данных

Автоматизированная система (Центр сбора и обработки данных, далее Центр) в АСФ ФИЦ ЕГС РАН начала развиваться в 1998 г. с появлением первых цифровых сейсмологических станций [Еманов А.А. и др., 2013]. Была создана сейсмологическая база данных, за основу которой взята широко известная схема баз данных сейсмологических исследований CSS 3.0 [Anderson et al, 1990], модернизированная в соответствии с требованиями Центра в АСФ ФИЦ ЕГС РАН [Еманов А.А., 2006]. Появление новых технологий передачи данных, методов их обработки, непрерывная модернизация аппаратного комплекса привели к существенному повышению качества, объемов и оперативности поступления данных и их обработки. Кроме того, разработана система контроля качества данных в архивах волновых форм. Она выполняет анализ и контроль таких параметров, как промежутки в волновых формах, наложения в данных, качество привязки времени, количество одиночных выбросов в данных волновых форм, постоянное смещение, уровень среднеквадратического значения, его суточные и сезонные вариации. Данная система контроля реализована в виде дополнительного программного обеспечения, использующего возможности системы PQLX [MacNamara and Boaz, 2011]. Центр в АСФ ФИЦ ЕГС РАН состоит из нескольких десятков виртуальных машин, которые занимаются сбором, обработкой и контролем качества поступающих с сейсмологических станций региональной сети волновых форм [Еманов А.Ф. и др., 2015б].

Подавляющее большинство станций сейсмической сети АСФ ЕГС РАН (около 50) передает информацию в непрерывном режиме, близком к реальному времени. Задержки в передаче не превышают значения, необходимого для формирования пакетов seedlink. Для этого используются технологии ADSL, GPRS, 3G и спутниковой связи. В Центр поступают данные с приблизительно 300 станций, расположенных как на территории РФ, так и за ее пределами. Для обработки данных используется функциональный пакет программ Seismic Handler [Stammler, 1993]. Обработка ведется в два потока, один из которых настроен на автоматическое определение параметров телесеismicких событий, другой ориентирован на региональную сейсмичность [Еманов А.А. и др., 2018].

В целом, система регистрации и обработки землетрясений базируется на следующих положениях:

- обеспечение единого международного формата для всех поступающих данных;
- пакет SeisComP3 принят в качестве основной системы регистрации и обработки;
- непрерывные волновые форм с сейсмических станций передаются в Центр с помощью: телеметрических систем на основе DSL (передача данных по телефонным линиям), GPRS и CDMA (передача данных по сотовой связи), VSAT (передача данных через спутниковые терминалы), а также по кабельным системам;
- в Центре расположен двухуровневый (А и Б) файловый архив, созданный для хранения волновых форм с соответствующими реляционными базами данных. Для данных, поступивших в Центр постфактум (в ручном режиме в случае, если данные не были переданы в режиме реального времени), разработано программное обеспечение, обеспечившее их автоматическую синхронизацию с уже имеющимися в архиве данными;
- реализован блок контроля качества работы сети сейсмологических станций;
- создана система, позволяющая пополнять Центр волновыми формами с сетей сейсмостанций соседних регионов РФ и других государств.

Преимуществом описанной системы являются высокая скорость определения параметров региональных сейсмических событий (1-2 мин) и возможность быстро вносить мануальные коррективы в результаты автоматической обработки.

1.2.3. Первичная обработка сейсмологических данных

Стандартная обработка сейсмологических данных в Центре АСФ ЕГС РАН проводилась в рамках двухслойной скоростной модели ($V_P=6.1$ км/с, $V_S=3.5$ км/с в верхней части разреза, $V_P=8.1$ км/с, $V_S=4.6$ км/с в земной коре) с фиксированной глубиной (15 км) [Жалковский, Цибульчик Г.М., Цибульчик И.Д., 1965]. Для уточнения скоростной модели непосредственно по техногенным сейсмическим активизациям в Кузбассе, представленным мелкофокусными землетрясениями, использовались данные о временах пробега сейсмических волн от взрывов в карьере Моховский. Для первого этапа обработки данных была обоснована однослойная модель строения среды со скоростью продольных волн $V_P=3.7$ км/с и поперечных $V_S=1.9$ км/с.

Определение энергетических характеристик и положений эпицентров сейсмических событий проводилось с использованием программы LocSat [Bratt and Bache, 1988] в рамках глобальной скоростной модели IASPEI91 [Kennett, 1991]. Уточнение положения эпицентров и расчет глубин событий проводится с использованием программного комплекса HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002].

1.2.4. Применение метода двойных разностей для уточнения координат гипоцентров сейсмических событий

Для техногенных землетрясений на глубинах 1–2 км точность определения глубин достаточна, чтобы утверждать, что они происходят глубже, чем работающие лавы, а вот для землетрясений на глубинах 400–700 метров требуется высокоточное определение глубин. Достижение увеличения точности определения глубин гипоцентров обеспечивается применением метода двойных разностей

[Waldhauser and Ellsworth, 2000; Еманов А.А., Валдхаузер, Лескова, 2003]. Суть метода заключается в вычислении двойной разности между наблюдаемой и рассчитанной разницей времен вступления для пары событий на одной станции. Точность абсолютного определения положения гипоцентров контролируется такими факторами, как геометрия сети станций, доступные к обработке фазы, точность снятия времен прихода волн, достоверность структуры среды прохождения волн в земной коре. В случае использования одномерной скоростной модели точность определения положения гипоцентров землетрясений ограничена, тогда как трехмерные вариации скоростной модели могут вносить систематические смещения в оценку времен пробега волн. Вариации скоростей могут быть учтены путем включения в процедуру расчета станционной поправки и/или поправки на источник, или же совместным инвертированием данных времен пробега волн для гипоцентров и скоростной структуры (Рисунок 1.2).

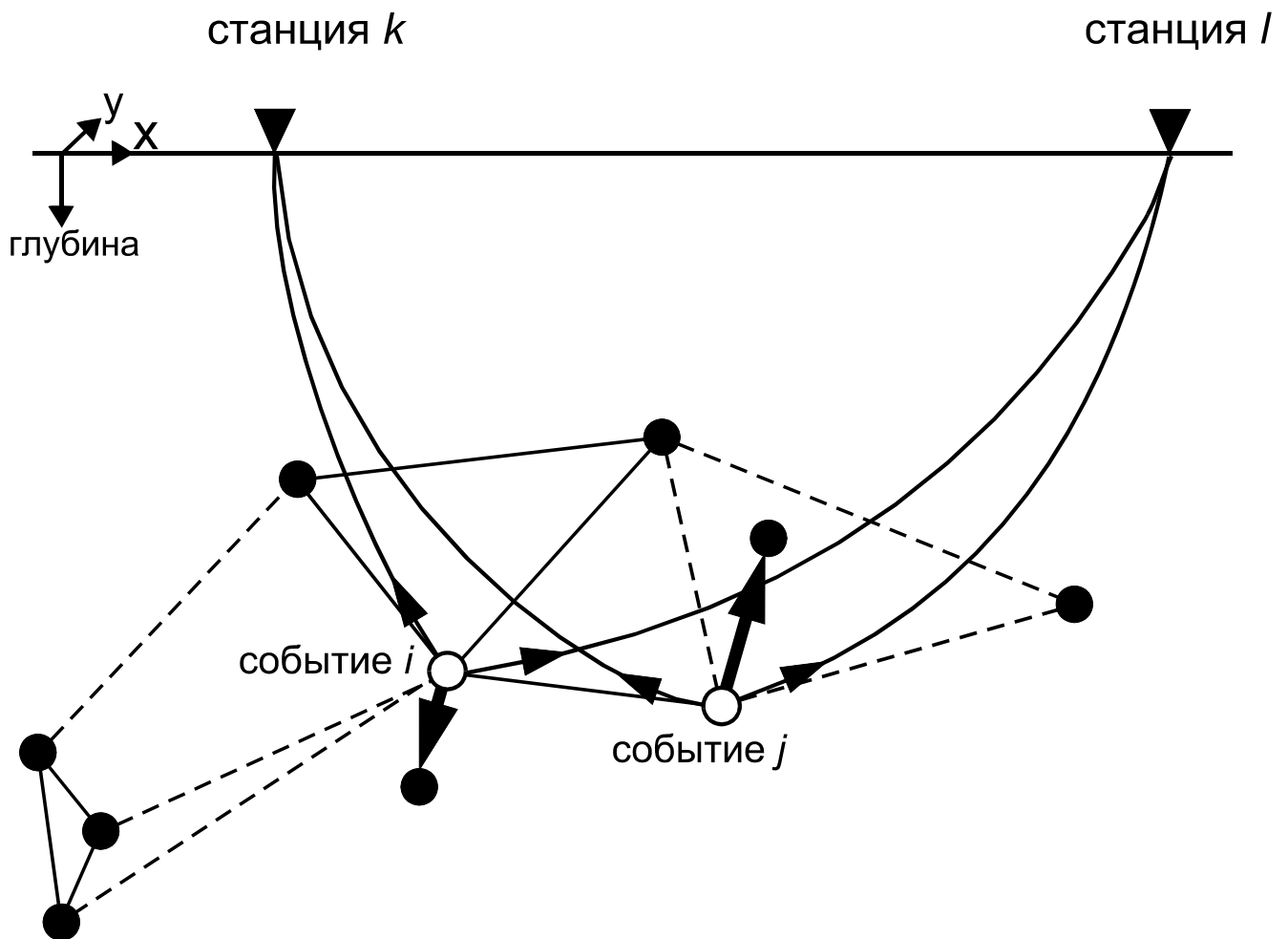


Рисунок 1.2 – Иллюстрация алгоритма уточнения положения гипоцентров землетрясений методом двойных разностей. Черные и белые круги обозначают обрабатываемые гипоцентры,

связанные с соседними событиями кросскорреляционными данными (сплошные линии) или данными каталога (прерывистая линия). Для двух событий, i и j показаны начальные определения (белые круги) и соответствующие векторы замедления относительно двух станций, k и l . Обозначены пути прохода лучей от источников до станций. Толстые стрелки показывают векторы уточнения (переопределения) положения гипоцентров для событий i и j

Влияние неточностей определения скоростной структуры может также быть эффективно минимизировано с помощью использования методов относительного определения положения гипоцентра землетрясения. В случае, если гипоцентральное расстояние между двумя землетрясениями мало по сравнению с расстоянием «событие-станция» и размерами скоростных неоднородностей, пути пробега лучей между источниками и общей станцией совпадают на протяжении почти всей длины пробега луча. Тогда разница времен пробега для двух исследуемых событий может быть с высокой точностью отнесена к пространственному расстоянию между ними. Это происходит вследствие принадлежности абсолютных ошибок к общему событию, не считая того небольшого региона, где пути лучей отличаются в источниках.

Метод двойных разностей [Еманов А.А., 2006] позволяет эффективно переопределять положение большого количества гипоцентров землетрясений на значительных удалениях одновременно. Путем объединения разности времен пробега P - и S -волн, полученных из кросскорреляционных данных, с разностями времен пробега, полученными из каталога данных, а также минимизируя остаточные (или двойные) разности для пар землетрясений, можно регулировать векторную разницу между их гипоцентрами. Таким образом, появляется возможность определения расстояния между коррелированными событиями, образующими простой мультиплет с точностью кросскорреляционных данных, в то время как одновременно определяются относительные положения других

мультиплетов и некоррелированные события с точностью данных абсолютных времен пробега волн без использования станционных поправок.

1.2.5. Сейсмическая томография с двойными разностями

Локальная сейсмическая томография (Local earthquake tomography, LET) является относительно популярным приложением для использования в сейсмически активных регионах, покрытых плотной сетью сейсмологических станций. Тем не менее, распространенные алгоритмы LET не используют преимущества большого количества новых разработок в методиках локализации гипоцентров землетрясений. Большинство подобных разработок имеют своей целью улучшение относительной и/или абсолютной точности локализации гипоцентров.

Точность определения гипоцентров событий зависит от ряда факторов, таких как геометрия сети, доступные фазы и точность времен вступлений. Вследствие присутствующего шума времена вступлений волн, снимаемые вручную оператором либо автоматически, как правило содержат ошибки. Проведенные исследования показали значимые улучшения точности определения координат землетрясений и взрывов с помощью использования кросскорреляции волновых форм и методик кластеризации сейсмических событий для улучшения точности оценок времен вступлений волн или определения высокоточных относительных времен вступлений волн [Waldhauser and Ellsworth, 2000; Zhang and Thurber, 2003a].

Метод сейсмической томографии с двойными разностями (DD-томографии) [Zhang and Thurber, 2003б] позволяет определить трехмерную скоростную модель с одновременным использованием абсолютных и относительных времен вступлений волн.

Апробация метода DD-томографии на синтетических и реальных данных выполнена в работе [Zhang and Thurber, 2003a]. Проведено сравнение методик стандартной и DD-томографии; показано, что DD-томография позволяет осуществить более точные определения скоростной модели и положения

гипоцентров сейсмических событий, чем стандартная томография. Программная реализация данного метода описана в [Zhang and Thurber, 2003б].

В районах техногенных активизаций Кузбасса для вычислений задавалась сетка с шагом 2 км по горизонтали и 0.5 км по вертикали, в узлах которой вычисляются скорости распространения продольной волны. В качестве референтной была взята скорость $V_p=3.7$ км/с для продольной волны. Скорости между узлами модели определялись трилинейной интерполяцией. При вычислениях скорость в определенном узле референтной модели изменялась только в том случае, если показатель количества лучей при инверсии скорости данного узла (распределенная взвешенная сумма) превышал 5. Следовательно, гарантировалось изменение модели только в случае существования некоторого количества осреднений.

Таким образом, в течение 2005–2018 гг. сформирована система мониторинга наведенной сейсмичности в Кузбассе. Она дает возможность отслеживать возникновение техногенных сейсмических активизаций и увязывать их появление с работой угледобывающих предприятий в режиме, близком к реальному времени. Для углубленного понимания физики процессов около сейсмически активизированных горных выработок разворачиваются дополнительные временные станции. Методика получения данных о параметрах очагов сейсмических событий подразумевает обработку первичных данных в несколько этапов, с уточнением относительного положения гипоцентров и совершенствованием скоростного разреза района исследований.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ УГЛЯ В КУЗБАССЕ И ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЕЕ РАЗВИТИИ

Кузбасс является районом умеренной природной сейсмичности и зоной большого количества промышленных взрывов. Слабая техногенная сейсмичность, хоть и частично регистрировалась региональной сетью станций, но была квалифицирована чаще всего как взрывы. Экспериментальные работы с временными сетями сейсмологических станций в окрестности шахт дали принципиально новую информацию о наведенной сейсмичности в Кузбассе [Еманов А.Ф. и др., 2012а]; они были проведены в нескольких районах добычи угля подземным способом (Рисунок 2.1): около г. Осинники; около г. Полысаево; район от г. Кемерово до г. Анжеро-Судженска; поле шахты «Распадская».

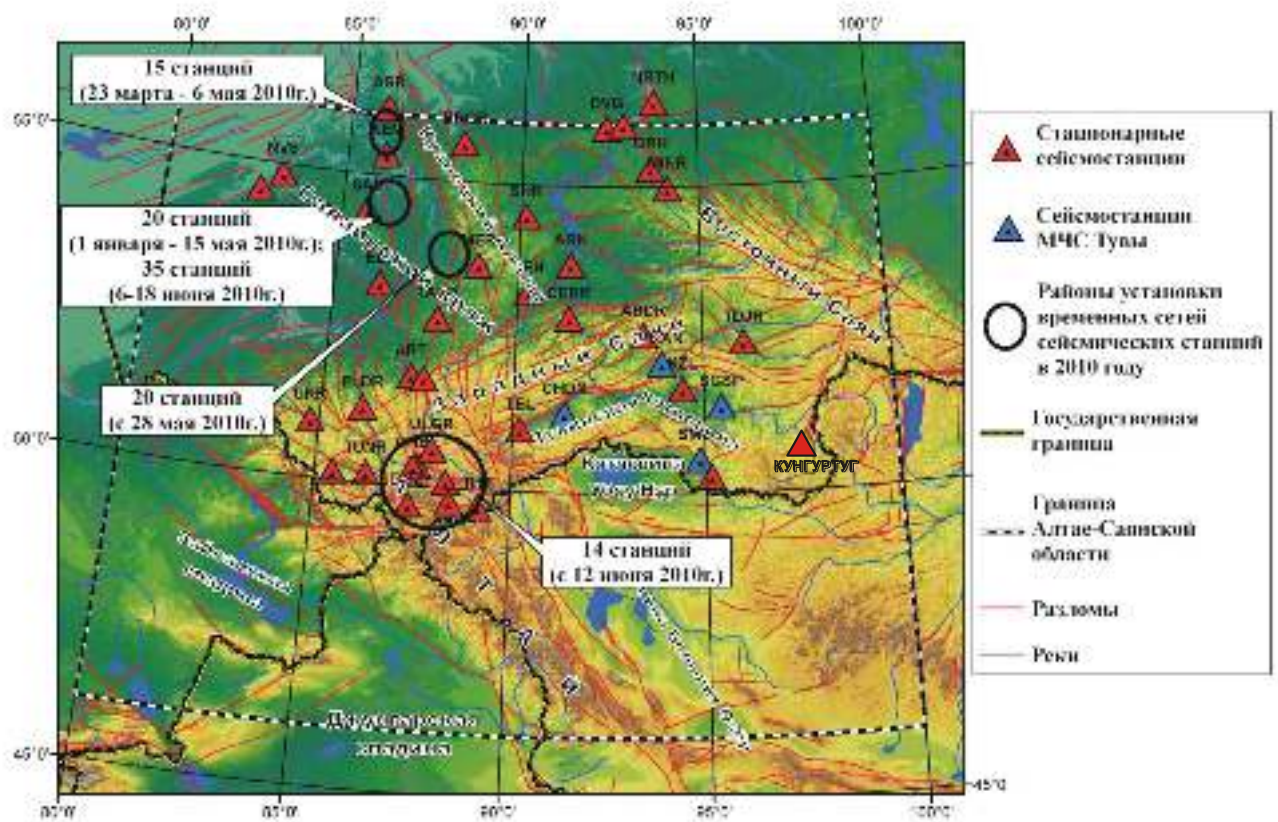


Рисунок 2.1 – Районы исследования сейсмических активизаций в Алтае-Саянском регионе

Исследования охватывают локальные участки в различных частях Кузбасса. Особенностью экспериментальных работ с временными сетями было использование большого числа станций на малой площади, когда обеспечивается высокая точность определения как координат эпицентров, так и глубин очагов.

2.1. Изучение техногенной сейсмичности около г. Осинники

Около г. Осинники изучалась наведенная сейсмичность в угольном бассейне в ноябре – декабре 2005 г. [Еманов А.Ф. и др., 2007, Еманов А.Ф. и др., 2008]. В данной работе будут даны только основные результаты этих исследований. На рисунке 2.2 представлена карта эпицентров землетрясений сейсмической активизации, зарегистрированной около г. Осинники, а на рисунке 2.3 – гистограмма глубин этих землетрясений.

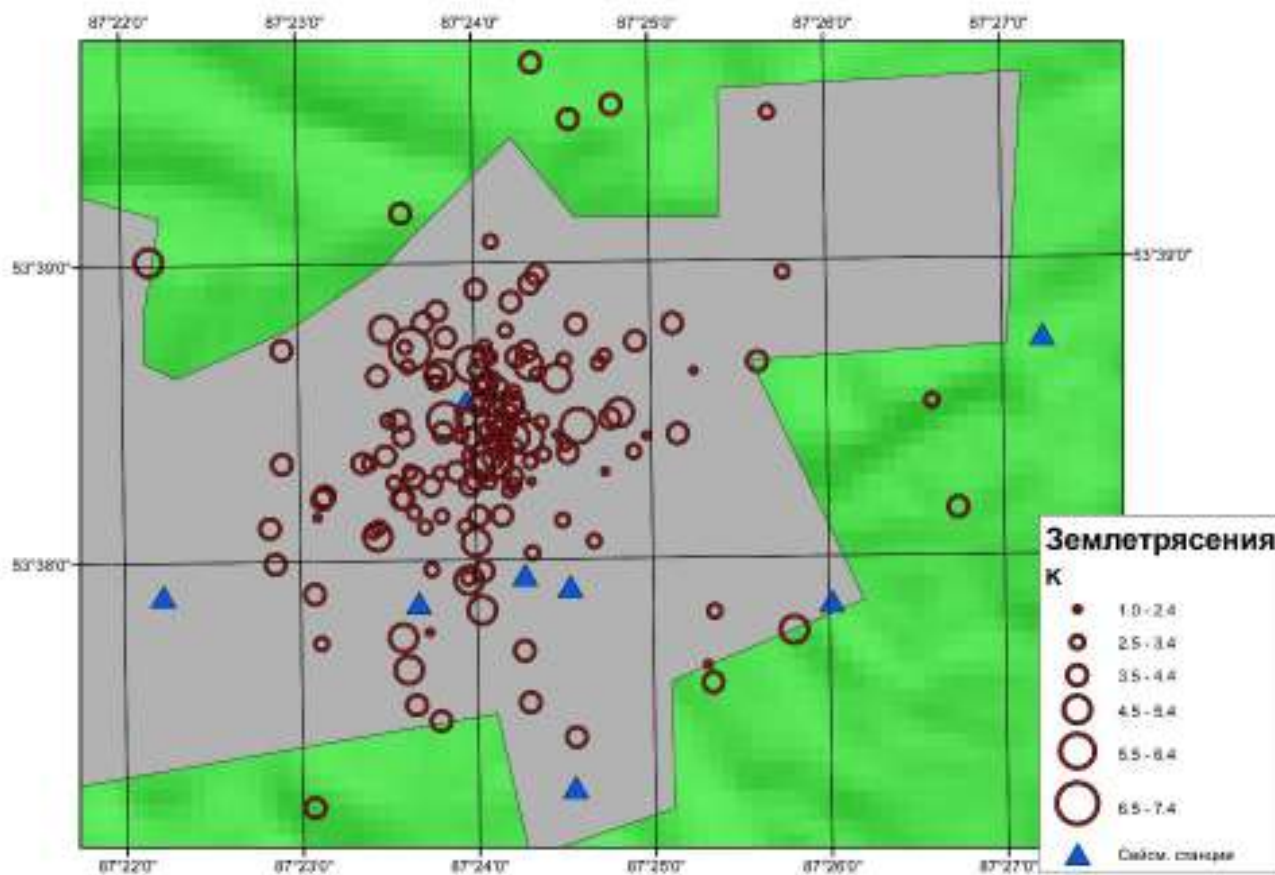


Рисунок 2.2 – Карта эпицентров землетрясений сейсмической активизации, зарегистрированной около г. Осинники. К – энергетический класс землетрясений. Серым цветом отмечены контуры г. Осинники

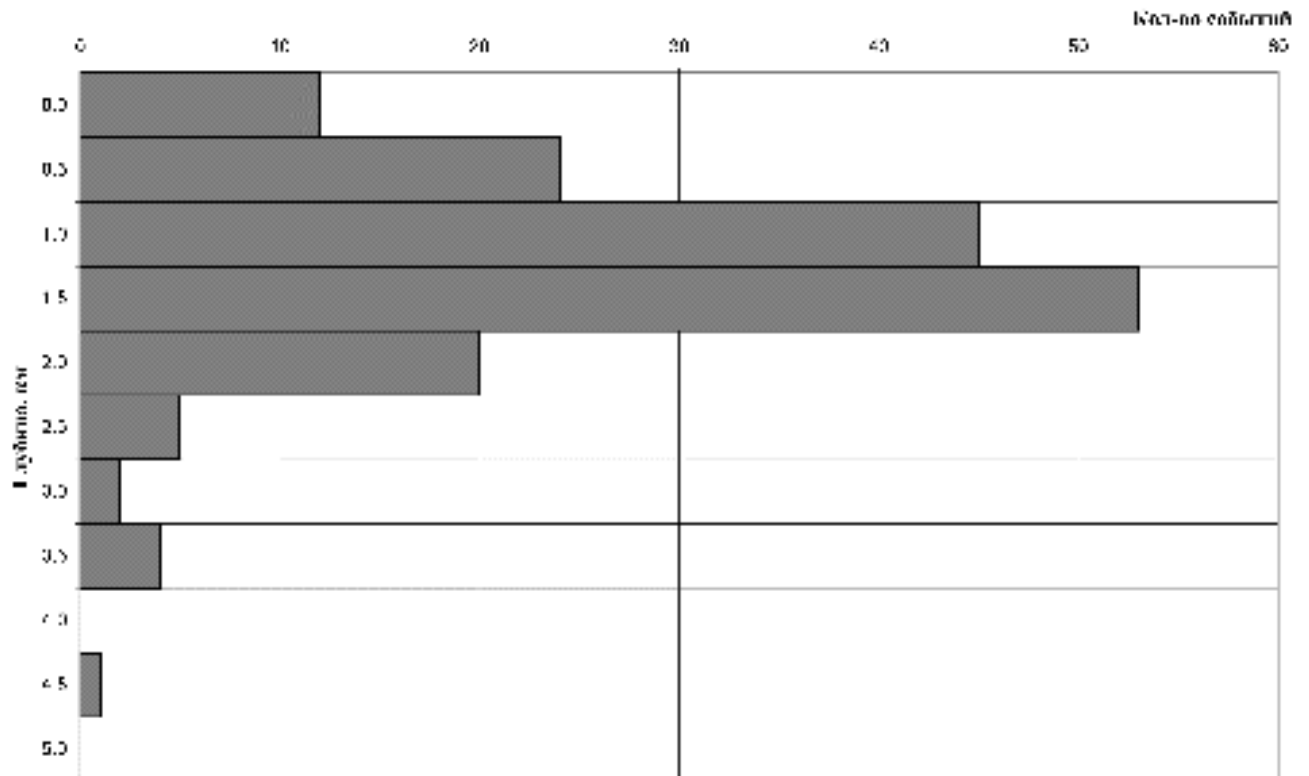


Рисунок 2.3 – Гистограмма глубин землетрясений около г. Осинники

Самые сильные землетрясения данной активизации относятся к седьмому энергетическому классу. Представительная регистрация временной сетью станций осуществлялась с четвертого энергетического класса. Максимальное количество землетрясений происходило на глубинах 1–2 км с разбросом от сотен метров до 5 км. Действующие угольные выработки в этом районе залегают на глубинах около 200 м и значительно удалены от города. Таким образом, зафиксированная сейсмическая активизация пространственно не привязана ни к одной действующей выработке.

2.2. Мониторинг техногенной сейсмичности в районе г. Полысаево

Около г. Полысаево выполнено наибольшее число экспериментов по изучению техногенной сейсмичности в Кузбассе [Еманов А.Ф. и др., 2009а; Еманов А.Ф. и др., 2009б; Еманов А.Ф. и др., 2010; Еманов А.Ф. и др., 2012а]. Экспериментальные работы проводились в 2007–2010 годах с эпизодическим разворачиванием сетей сейсмологических станций. Именно эти

экспериментальные работы позволили хотя бы фрагментарно исследовать развитие техногенной сейсмичности во времени и пространстве.

В 2007 году временная сеть в данном районе выставлялась дважды. Первый эксперимент проведен с 13 августа по 11 сентября 2007 г. На участке размером 10×14 км были выставлены 24 цифровые сейсмологические станции, зарегистрировано 428 техногенных землетрясений. Вторым экспериментом был выполнен с 1 ноября 2007 г. по 31 января 2008 г. фактически на той же площади, но с размещением уже 36 цифровых сейсмологических станций, зафиксировано 1461 землетрясение. Количество станций было увеличено с целью высокоточного определения глубины событий, построения механизмов очагов, томографического исследования скоростного строения. Третий эксперимент в данном районе охватывал период с 3 июня по 3 июля 2008 г., было установлено 19 цифровых станций, 357 землетрясений. Четвертый эксперимент – с 5 октября по 24 декабря 2009 г., 34 станции, 1718 землетрясений.

На рисунке 2.4 представлена сеть станций около г. Полысаево в 2007 г. Она была ориентирована на представительную регистрацию колебаний от слабых по энергии источников. В момент проведения этого эксперимента не было информации о том, что в данном районе формируются сейсмические процессы. Имелись только жалобы местного населения на ощутимые сейсмические колебания в ночное время.

Первым же экспериментом обнаружил техногенную сейсмичность, пространственно примыкающую к угледобывающим лавам (Рисунок 2.4). Они разрабатывают угольные пласты «Бреевский» и «Толмачевский» (обозначения см. рисунок 2.6). Средняя глубина залегания данных пластов составляет 410 и 440 м соответственно. Скорость движения лавы для пласта «Бреевский» составляет около 5 м в сутки, угледобывающий комбайн работает в возвратно-поступательном режиме. Лава в пласте «Толмачевский» движется также со скоростью около 5 м в сутки, но при этом угледобывающий комбайн работает в поступательном режиме, обратный ход – холостой. Скорость движения комбайна в обеих лавах составляет

порядка 100 м в час; ширина лавы в пласте «Бреевский» 220 м, в пласте «Голмачевский» – 260 м [Опарин и др., 2013].

Определение глубин землетрясений указывало на то, что они происходят глубже выработок. Отметим, что в целом чаще регистрируются случаи, когда сейсмический процесс концентрируется выше горных выработок [Адушкин и др., 2000; Дягилев и др, 2009], когда идет процесс просадки.

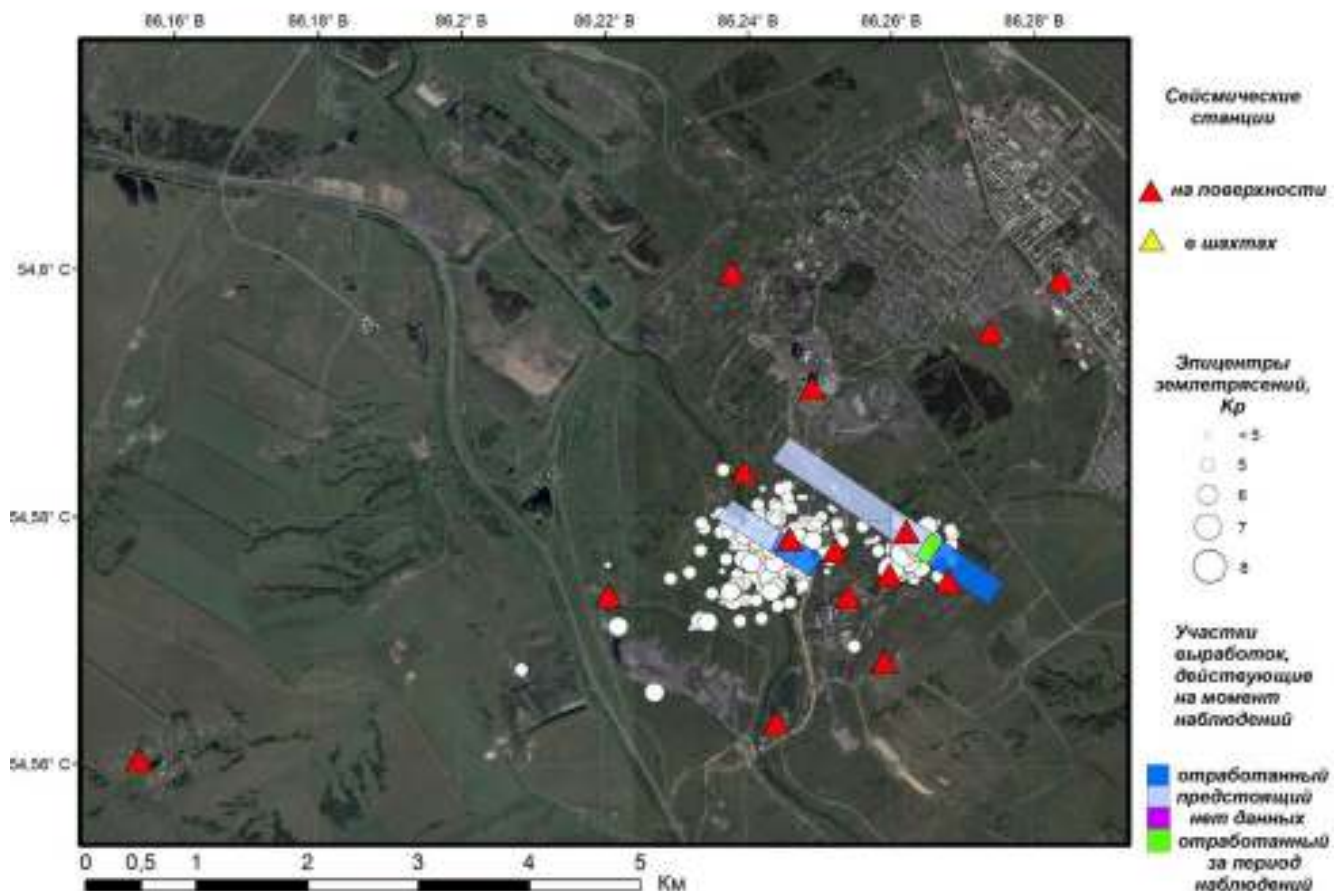


Рисунок 2.4 – Фрагмент сети временных станций в августе–сентябре 2007 г. (этап 1) в районе г. Полысаево и карта эпицентров техногенных землетрясений

Вопрос о глубине техногенных землетрясений очень важен, при том что достаточно трудно достичь хорошей точности. Второй эксперимент был нацелен на значительное увеличение точности определения глубины. Чем меньше глубина землетрясения в пределах локальной сети, тем меньше точность ее определения. Для техногенных землетрясений на глубинах 1–2 км точность определения глубин достаточна, чтобы утверждать, что они происходят глубже, чем работающие лавы,

а вот для землетрясений на глубинах 400–700 метров требуется более высокая точность определения глубин.

Повышение точности определения глубин обеспечивалось следующими мерами: увеличением числа станций в сети; уточнением скоростной модели района исследований; размещением некоторых станций в подземные выработки; использованием метода двойных разностей для относительного уточнения координат гипоцентров техногенных землетрясений [Waldhauser and Ellsworth, 2000]; применением метода сейсмической томографии с двойными разностями [Zhang and Thurber, 2003б], позволяющего итерационно с каждым новым событием уточнять и скоростную модель, и координаты всех событий.

На рисунке 2.5 представлена сеть станций во время второго эксперимента. Увеличенное (с 24 до 36) количество станций и наличие подземного датчика позволили не только получить более точные результаты во время этого эксперимента, но и обработать материалы первого эксперимента на новом уровне точности.

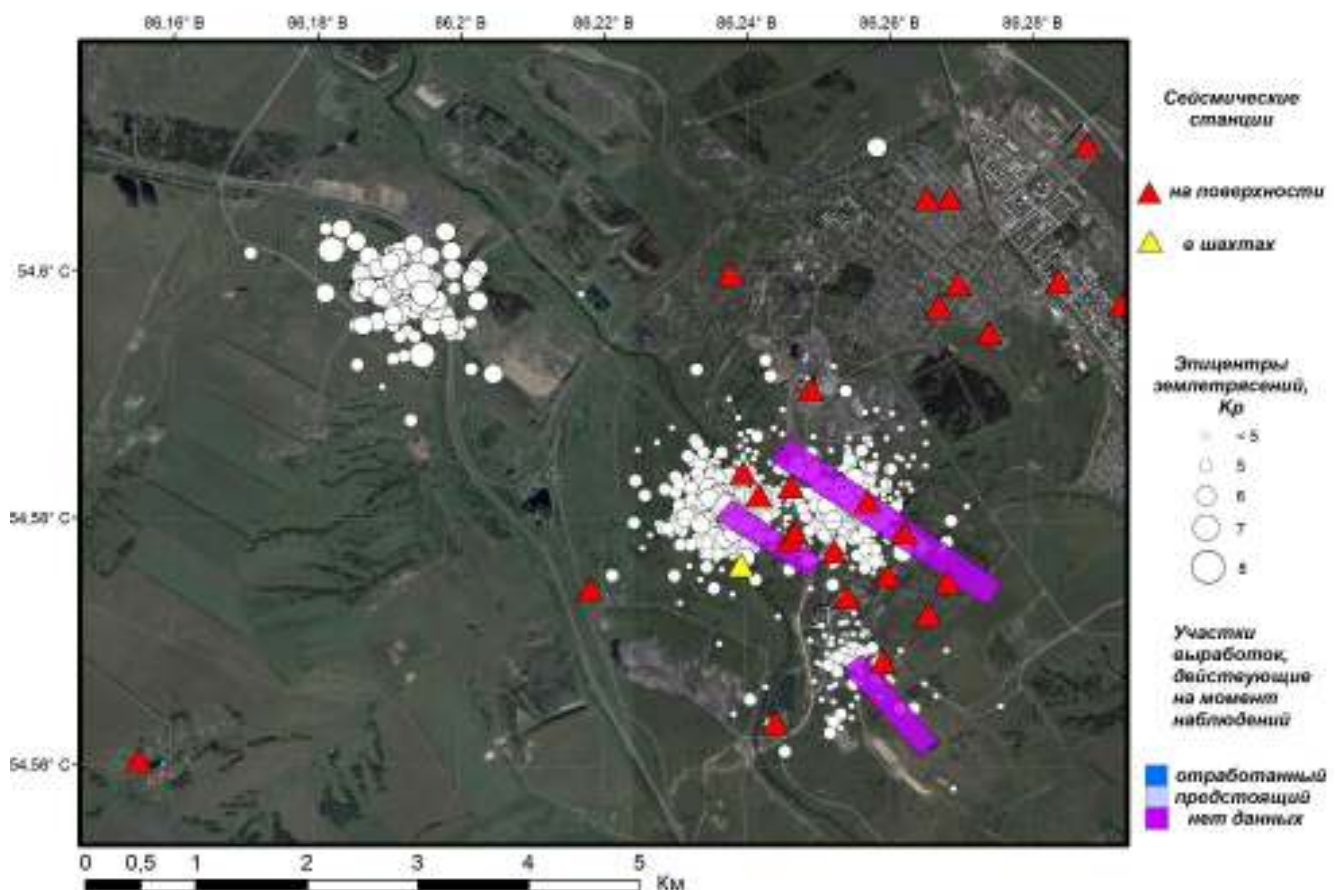


Рисунок 2.5 – Фрагмент сети временных станций в ноябре 2007 – январе 2008 гг. (этап 2) в районе г. Полысаево и карта эпицентров техногенных землетрясений

Для уточнения скоростной модели использовались данные о временах пробега сейсмических волн от взрывов в карьере «Моховский», проводившихся на удалении около 5 км от выставленной сети станций. Основываясь на результатах данного эксперимента, для первого этапа обработки данных была принята однослойная модель строения среды со скоростью продольных волн 3.7 км/с и поперечных – 1.9 км/с.

Сейсмические сети первых двух экспериментов регистрировали сейсмические события с энергетическими классами $2 \leq Kp \leq 7$. В первом эксперименте, длившемся 30 дней, зафиксировано и обработано 428 событий, а во втором (92 дня) – 1461 событие. Наиболее сильные из техногенных землетрясений регистрировались станциями региональной сети, в частности сейсмостанцией «Салаир» на расстоянии около 40 км от локальной сети.

На рисунке 2.6 дана карта эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных во втором эксперименте. Отличительной чертой результатов является возникновение новых очагов сейсмических активизаций. Начала работать Надбайкаимская выработка, и в ее районе начал фиксироваться сейсмический процесс. На рисунке 2.6 мы видим три работающие лавы и три очага привязанной к ним сейсмической активности. Кроме них, во втором эксперименте зафиксирована еще одна активизация, не привязанная к горным выработкам (назовем ее Северо-Западной). Она характеризуется большими глубинами гипоцентров событий, чем в трех других и большими энергиями землетрясений (см. рисунок 2.6).

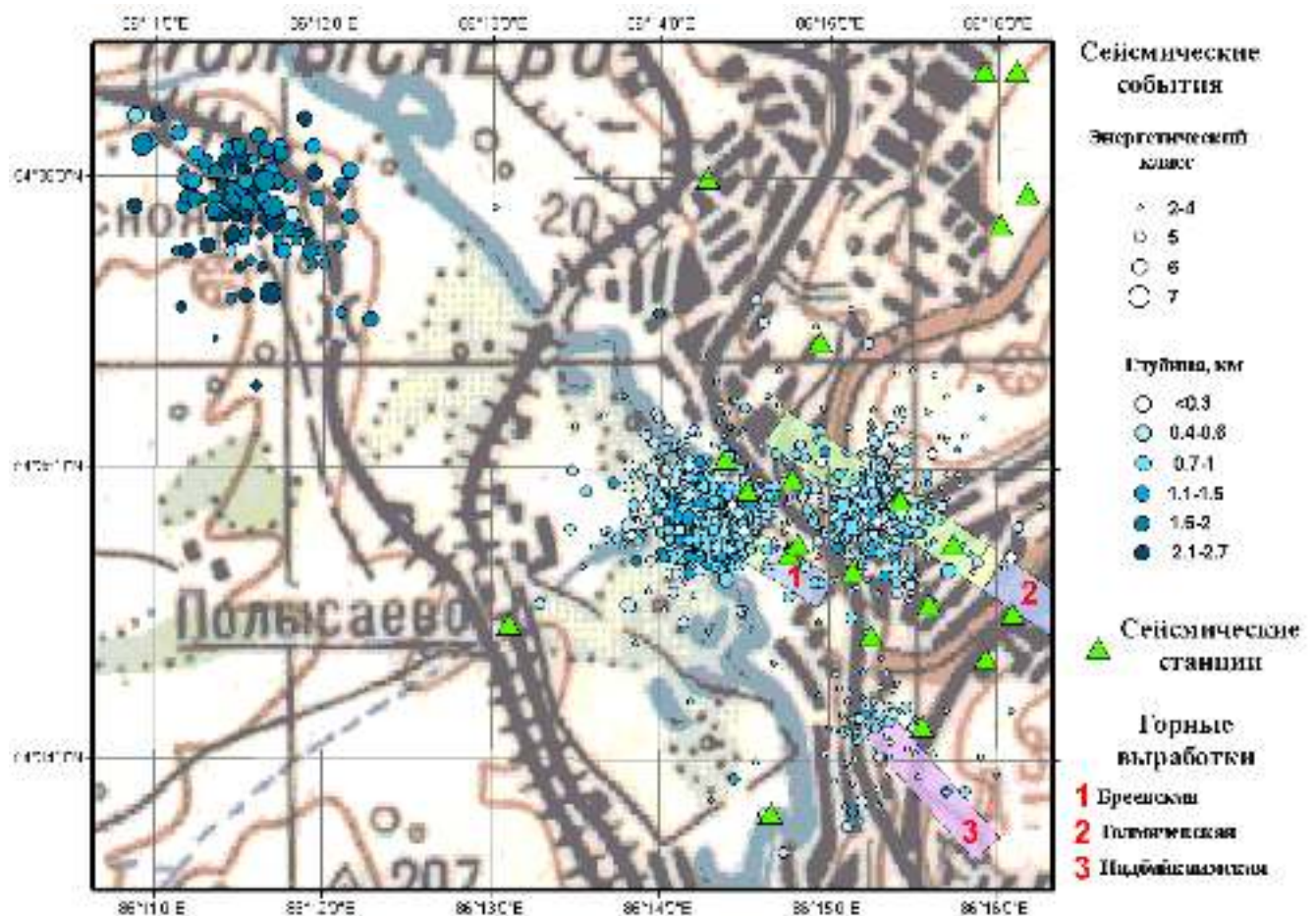


Рисунок 2.6 – Расположение гипоцентров техногенных землетрясений в ноябре 2007 – январе 2008 гг. в районе г. Полысаево. В качестве подложки использована топографическая карта местности.

Рисунок 2.7 иллюстрирует развитие сейсмического процесса во времени. Эпицентральная зона в районе Толмачевской выработки активна в течение всего периода наблюдений с постепенным смещением эпицентров с юго-востока на северо-запад. Эпицентры Бреевской зоны смещаются во времени в том же направлении, наблюдается резкое снижение сейсмической активности к январю 2008 г., когда добыча угля в данной выработке была завершена. В районе Надбайкаимской выработки в ноябре – декабре 2007 г. зафиксировано небольшое количество сейсмических событий; эпицентральная зона к северо-западу от города была активна начиная с ноября 2007 года и до конца второго эксперимента (см. рисунок 2.7).

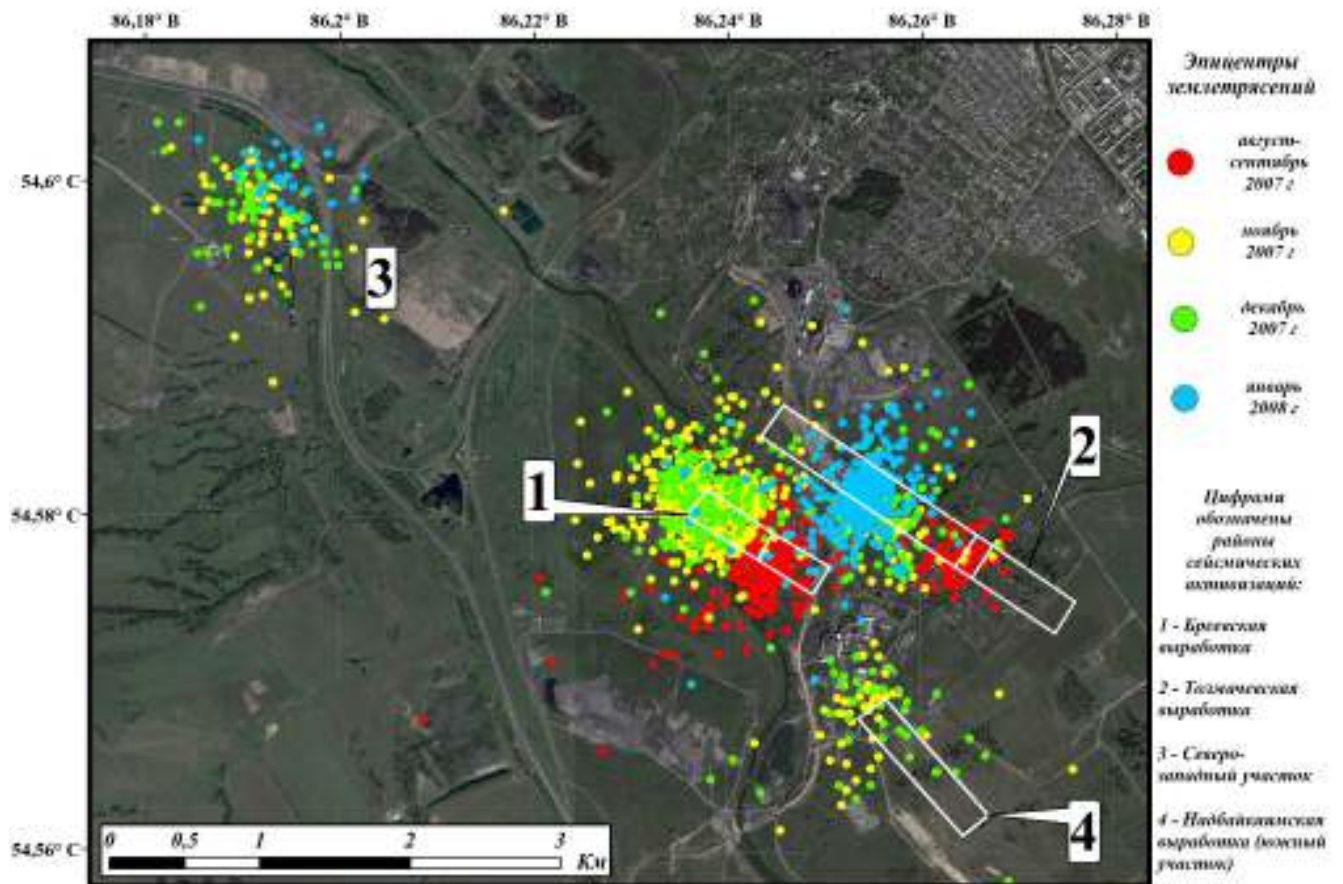


Рисунок 2.7 – Развитие сейсмического процесса во времени с августа 2007 г. по январь 2008 г.

Два эксперимента, проведенных в разное время на одной и той же территории, убедительно доказали, что техногенные активизации смещаются вместе с забоем вдоль выработки.

На рисунке 2.8 представлены гистограммы глубин землетрясений в районе г. Польшаево. Все землетрясения Северо-Западной активизации выделяются среди других отсутствием приуроченности событий к горным выработкам и значительной глубиной гипоцентров – около 2–3 км. Сейсмические события трех других эпицентральных зон имеют глубины от первых сотен метров до 1.5 км. Их техногенная природа очевидна, гипоцентры почти всех событий расположены под лавами. Наиболее интенсивно сейсмический процесс происходит на глубинах 700–900 м, при этом глубина выработок составляет немногим более 400 м.

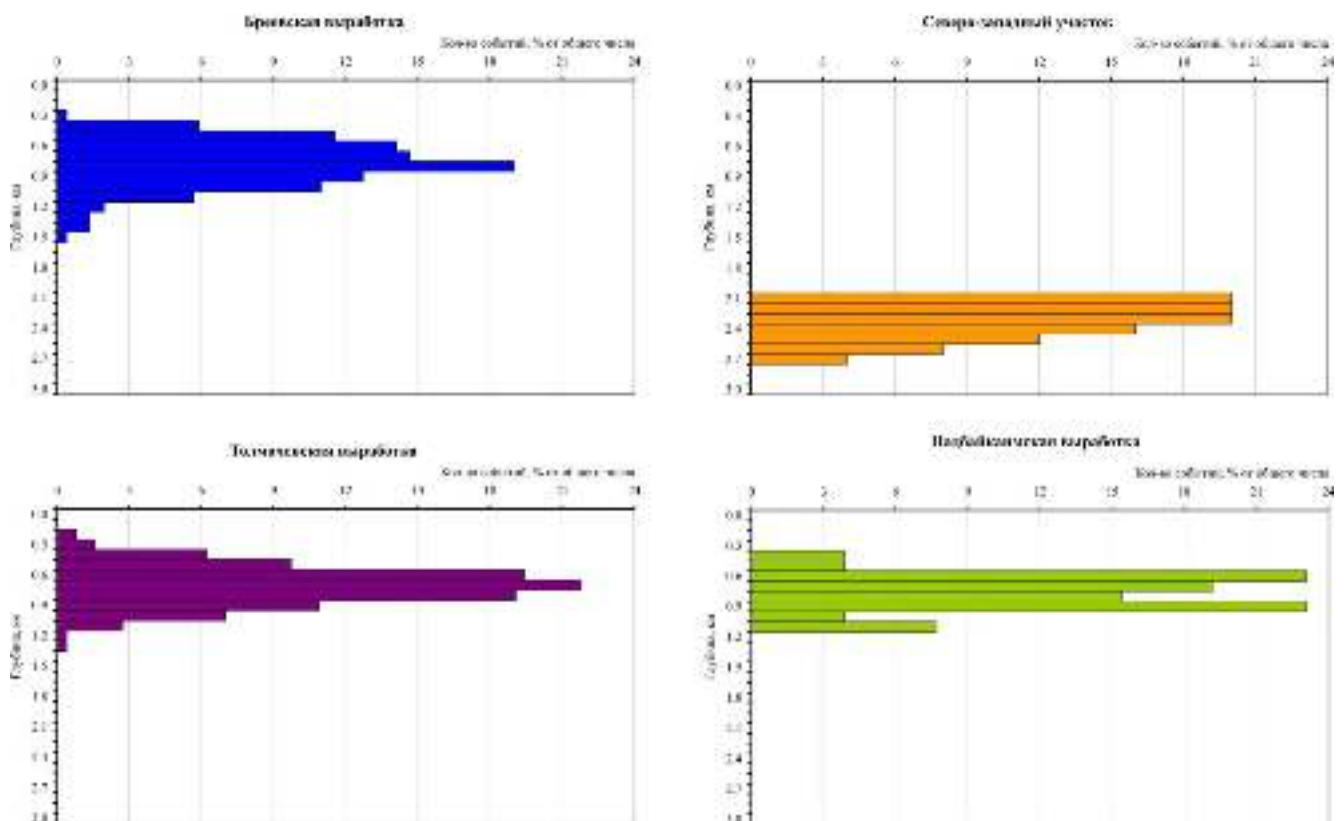


Рисунок 2.8 – Гистограммы глубин техногенных землетрясений

Известно, что горный массив вследствие высокой скорости движения забоя оказывается в существенно неравновесном и неустойчивом состоянии в первую очередь в кровле [Макаров и др., 2009]. Тем не менее полученные значения глубин гипоцентров помимо прочего исключают возможность того, что данные сейсмические события вызваны обрушениями кровли над полым пространством пройденного участка выработки.

Таким образом, исходя из наблюдаемого облака афтершоков, приблизительные линейные размеры активизированных областей, вызванных деятельностью по добыче угля подземным способом, составляют примерно 1-2 км в диаметре и до 1,5 км в глубину.

Для ряда техногенных событий построены механизмы очагов с использованием программы FPFIT [Reasenberг and Oppenheimer, 1985]. На рисунке 2.9 на карте представлены результаты для Бреевской и Толмачевской выработок, а на рисунке 2.10, б – в разрезе для Толмачевской лавы. По фокальным механизмам

Бреевской выработки можно сделать вывод, что одна из нодальных плоскостей событий близвертикальна. Механизмы группы сейсмических событий в районе Толмачевской выработки представлены главным образом взбросами (см. рисунок 2.9, а), причем линия событий явно смещена относительно выработки. Механизмы большинства сейсмических событий в этой линии подобны. Это свидетельствует об общих для данного участка изменениях в процессе разрушения, а не об отдельных локальных подвижках. Вертикальная проекция нодальных плоскостей (см. рисунок 2.10, б) показывает, что данная линия событий представляет собой наклонную плоскость сходных по виду механизмов; при этом на глубине около 800 м линия изменяет свое направление. Интересно, что оси сжатия группы событий Толмачевской лавы в основном близгоризонтальные и преимущественно направлены север-юг (см. рисунок 2.10, а), что совпадает с общерегиональным направлением сейсмотектонических деформаций. Подобное субмеридиональное направление укорочения характерно для всего Алтае-Саянского региона, в том числе явно выделяется в сейсмотектонических деформациях Чуйского землетрясения, произошедшего 27 сентября 2003 года ($M_s=7.3$). Данный факт свидетельствует о том, что характер деформаций в исследуемом районе может в значительной степени определяться региональными напряжениями укорочения север-юг, а не напряжениями, возникающими в ходе проведения угледобывающих работ.

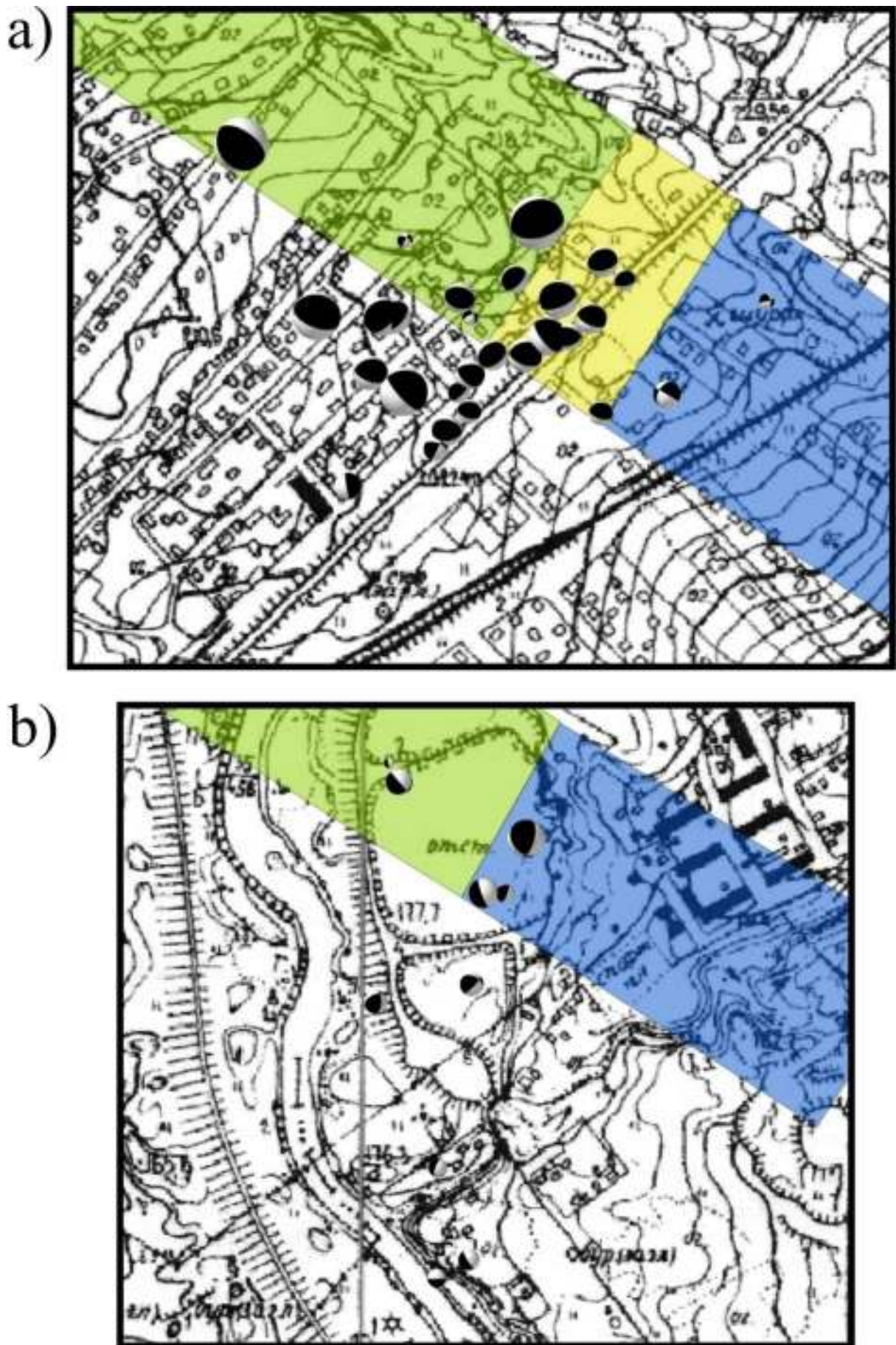


Рисунок 2.9 – Фокальные механизмы техногенных землетрясений: а – Толмачевская выработка, б – Бревевская выработка

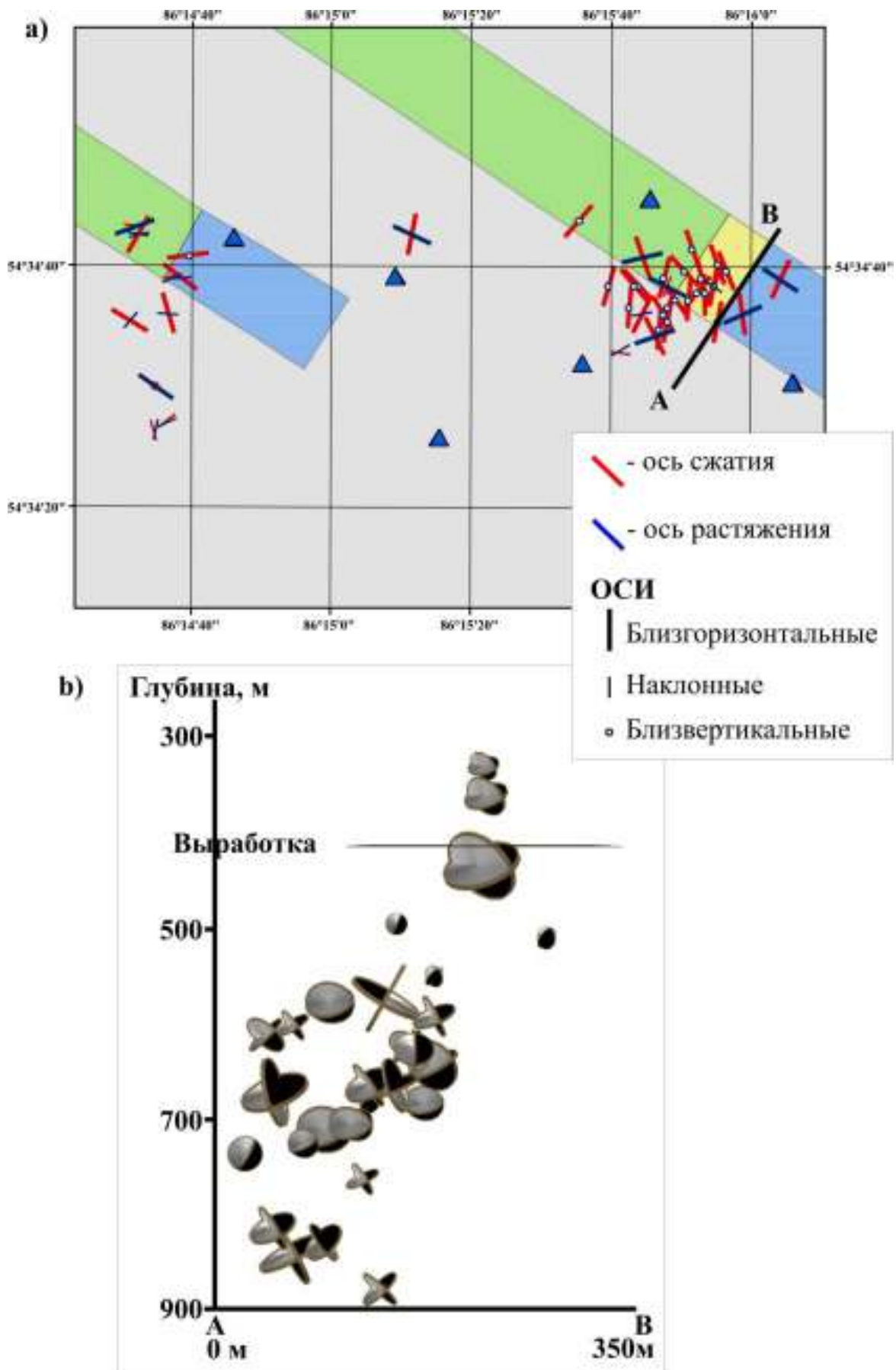


Рисунок 2.10 – Ориентация осей главных напряжений (сжатия и растяжения): а – карта событий с определенной ориентацией осей; б – проекция нодальных плоскостей гипоцентров на вертикальную плоскость по линии АВ

Итерационные алгоритмы определения положения гипоцентров и уточнения скоростей распространения сейсмических волн (double-difference tomography) [Zhang and Thurber, 2003б] позволили уточнить скоростное строение района исследований и расположения очагов землетрясений.

Характеристики каталога событий, обработанных методом томографии с двойными разностями: всего событий – 1890; событий подходящих для метода двойных разностей – 1886; центроид кластера событий: широта 54.580711, долгота 86.241570, глубина 0.781889 (относительно поверхности); всего времен вступлений *P*-волн – 55165; всего времен вступлений *S*-волн – 29336; двойных разностей для *P*-волн – 111756; двойных разностей для *S*-волн – 127389; связанных событий – 11647; среднее число связей у пары событий – 18; среднее расстояние между связанной парой событий – 181 м; количество заведомо сомнительных фаз с большой невязкой, исключенных из вычислений – 243; для сейсмической томографии использовались 40 станций.

Данный каталог содержит большое число событий и пунктов регистрации для относительно небольшой площади. Поскольку качество регистрации времен вступлений продольных волн заведомо выше, чем поперечных, время пробега поперечных волн было исключено из томографической инверсии. Таким образом, исключалась ошибка определения вступления поперечной волны и при этом оставалось достаточное для уверенной томографической инверсии число фаз *P*-волн.

Для вычислений была задана сетка с шагом 2 км по горизонтали и 0.5 км по вертикали, в узлах которой вычислялись скорости распространения продольной волны; в качестве референтной была взята скорость 3.7 км/с для продольной волны. Скорости между узлами модели определялись трилинейной интерполяцией. При вычислениях скорость в определенном узле референтной модели изменялась только в том случае, если показатель количества лучей при инверсии скорости данного узла (распределенная взвешенная сумма) превышал 5. Таким образом, гарантировалось изменение модели только случае наличия некоторого количества осреднений.

На рисунке 2.11 приведены уточненные данные первых двух экспериментов (август 2007 г. – январь 2008 г.). Итерационная обработка обеспечила более выраженную привязанность техногенных землетрясений к забою. Забой в каждом из двух экспериментов имеет свое положение, и пространственное смещение событий вдоль выработки отчетливо видно (см. рисунок 2.11).

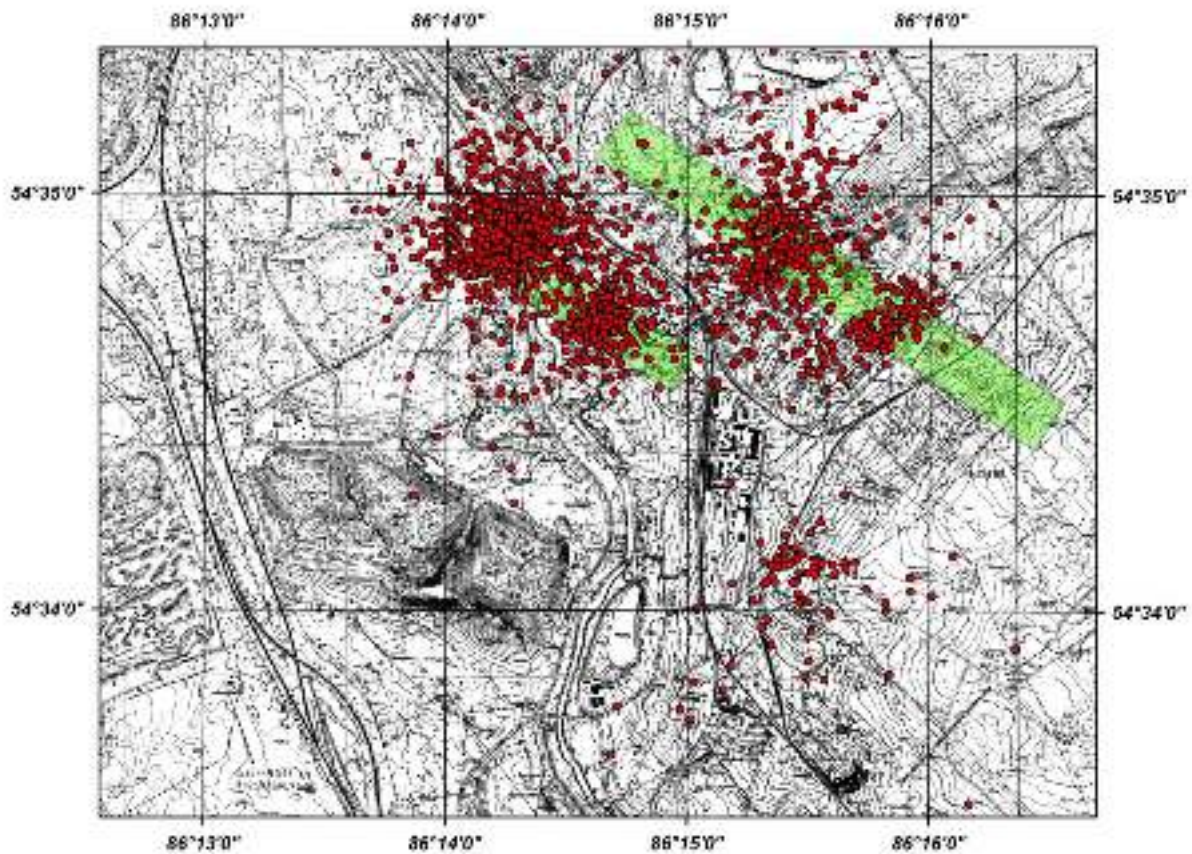


Рисунок 2.11 – Результат уточнения эпицентров сейсмических событий алгоритмом томографии с двойными разностями

На рисунке 2.12 показан пример определения одной из групп гипоцентров (с 1-го по 200-е событие из каталога) методом двойных разностей с оценками ошибки определения. Средняя ошибка определения координат методом двойных разностей по горизонтали в рамках скоростной модели составляет 25-35 м (см. рисунок 2.12).

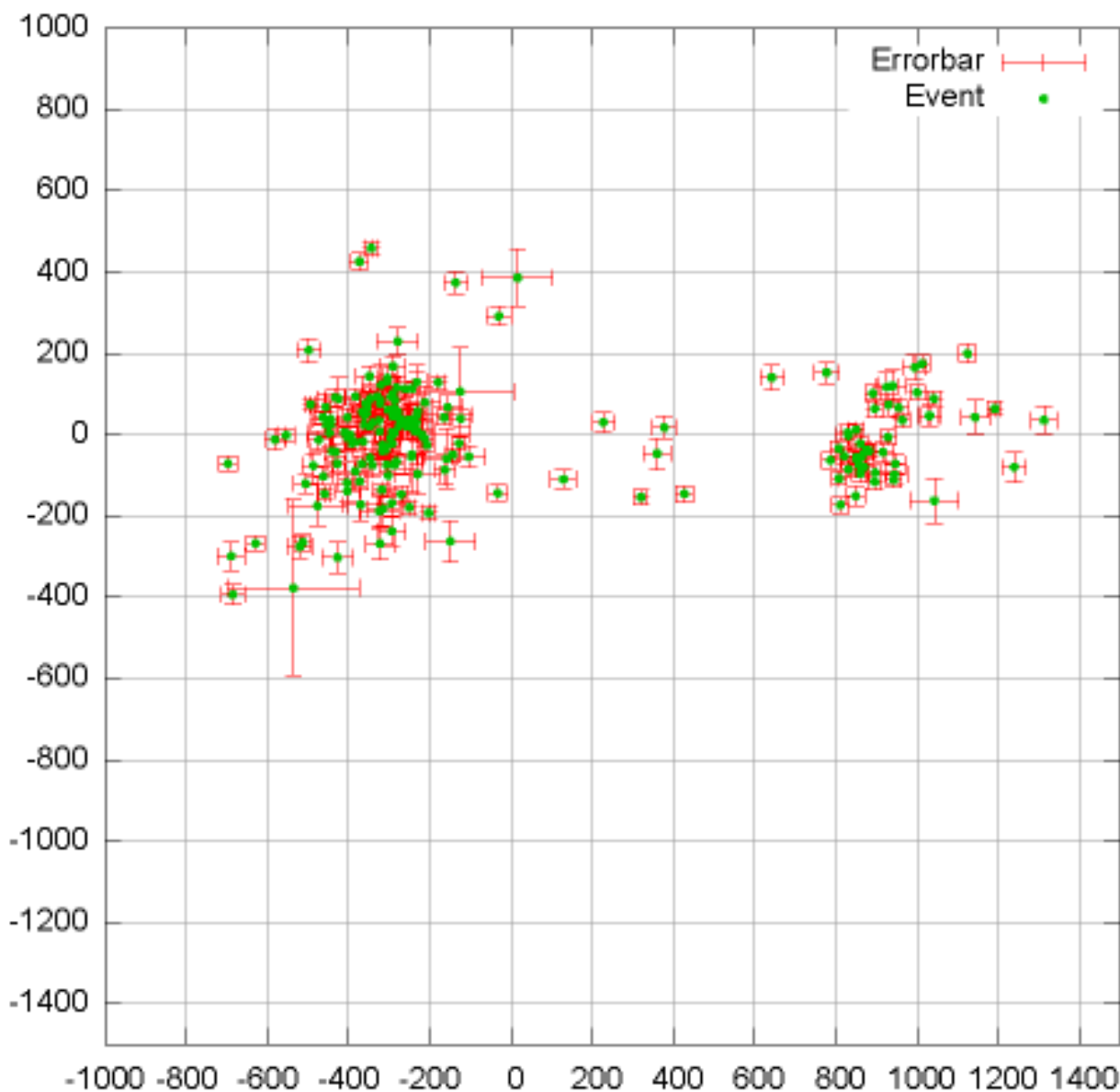


Рисунок 2.12 – Проекция на горизонтальную плоскость гипоцентров сейсмических событий, определенных методом двойных разностей. Красными линиями показаны ошибки определения. Расстояния даны в метрах относительно центра кластера.

На рисунке 2.13 тот же пример определения гипоцентров методом двойных разностей с оценками ошибки определения снесен на вертикальную плоскость. Глубина, равная нулю, соответствует дневной поверхности. Средняя ошибка определения координат методом двойных разностей по вертикали в рамках скоростной модели составляет 50-60 м (см. рисунок 2.13).

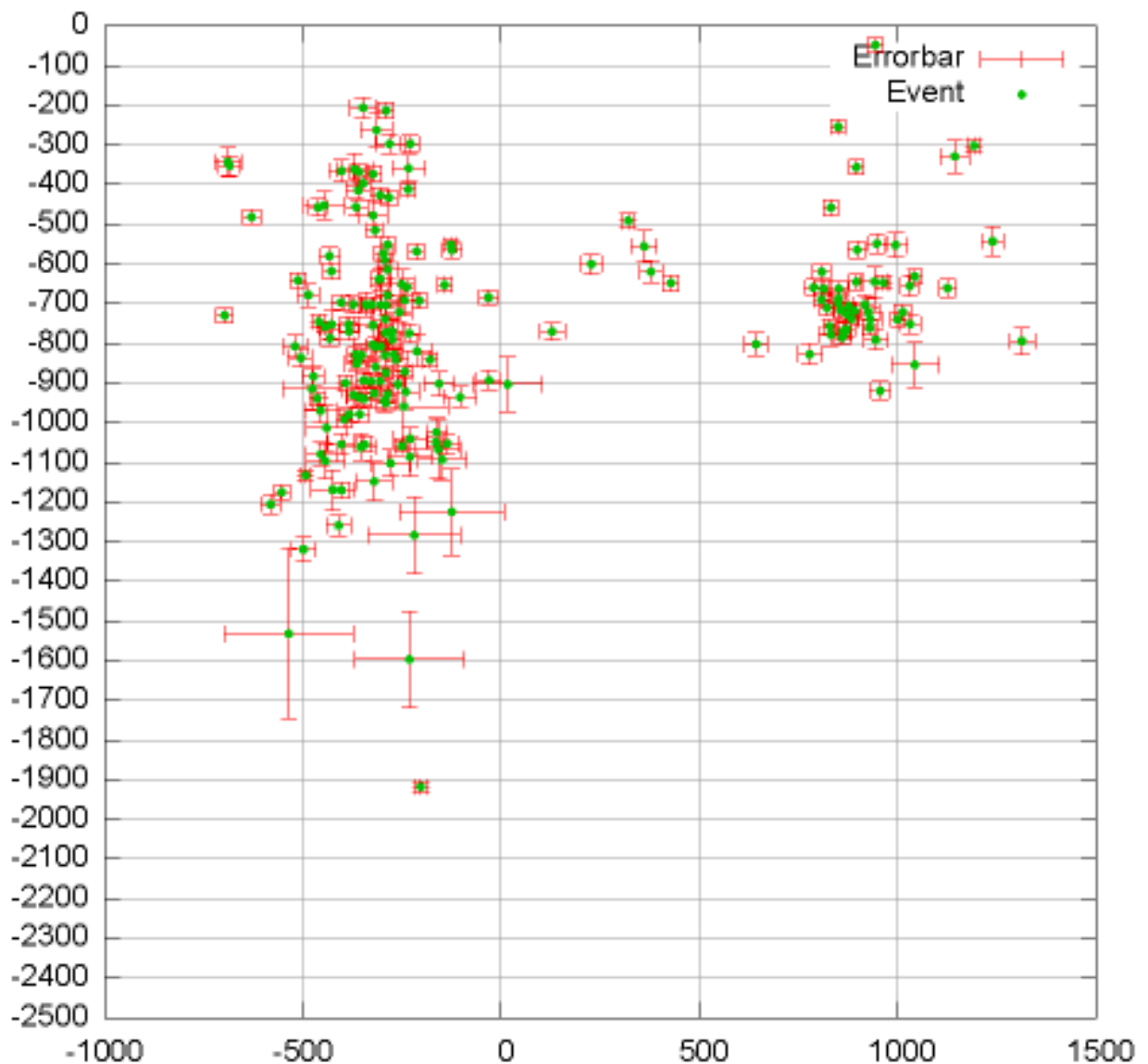


Рисунок 2.13 – Проекция на вертикальную плоскость гипоцентров сейсмических событий, определенных методом двойных разностей. Красными линиями показаны ошибки определения. Расстояния даны в метрах относительно центра кластера.

Результаты исследования скоростной структуры района сейсмических активизаций около г. Польшаево отражены в виде послойных срезов на рисунках 2.14, 2.16 и 2.18. Обоснованность полученных результатов представлена в виде распределенных взвешенных сумм количества лучей в слое на рисунках 2.15, 2.17 и 2.19. На рассматриваемых рисунках техногенные землетрясения обозначены черными точками, поэтому видно положение активизированных участков относительно скоростной модели рассматриваемого участка среды.

Большое количество зарегистрированных сейсмических событий позволяет обоснованно строить детальную скоростную модель активизированной области.

Для скоростной модели среды выше выработок (глубина 200 м) каждое определение скорости получено при осреднении 1000–6000 определений (см. рисунок 2.15). Для среза скоростей по глубине 700 м осреднение выполнялось по 1000–10000 определениям (см. рисунок 2.17). Именно для этой глубины составлена максимальная по площади и наивысшая по точности карта скоростей (см. рисунок 2.16). На глубине 1200 м осреднение проводилось по 500–2500 определениям (см. рисунок 2.19). Даже для этой глубины скорости продольных волн определены достаточно надежно.

На срезах по глубине, представленных на рисунках 2.14, 2.16 и 2.18, определяется блочное строение среды; для блоков с пониженной скоростью распространения *P*-волн характерно значение 3.6–3.7 км/с, для блоков с повышенной скоростью – 3.75–3.9 км/с. Большинство сейсмических событий фиксируется вблизи границ блоков с разными скоростями. Необходимо отметить, что выделенные по скоростям распространения продольных волн блоки имеют наклонные границы, вследствие этого аномалии скорости на срезах по разной глубине смещаются.

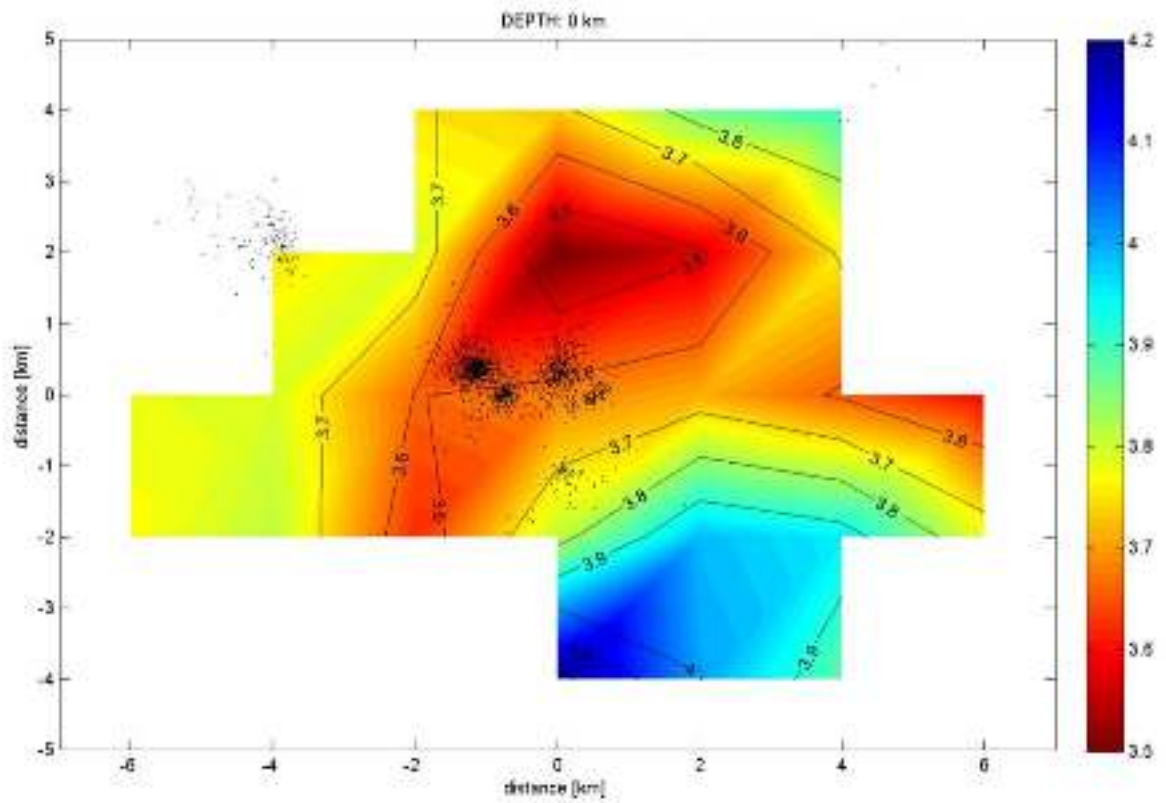


Рисунок 2.14 – Скорости распространения продольных волн в слое на глубине 200 м

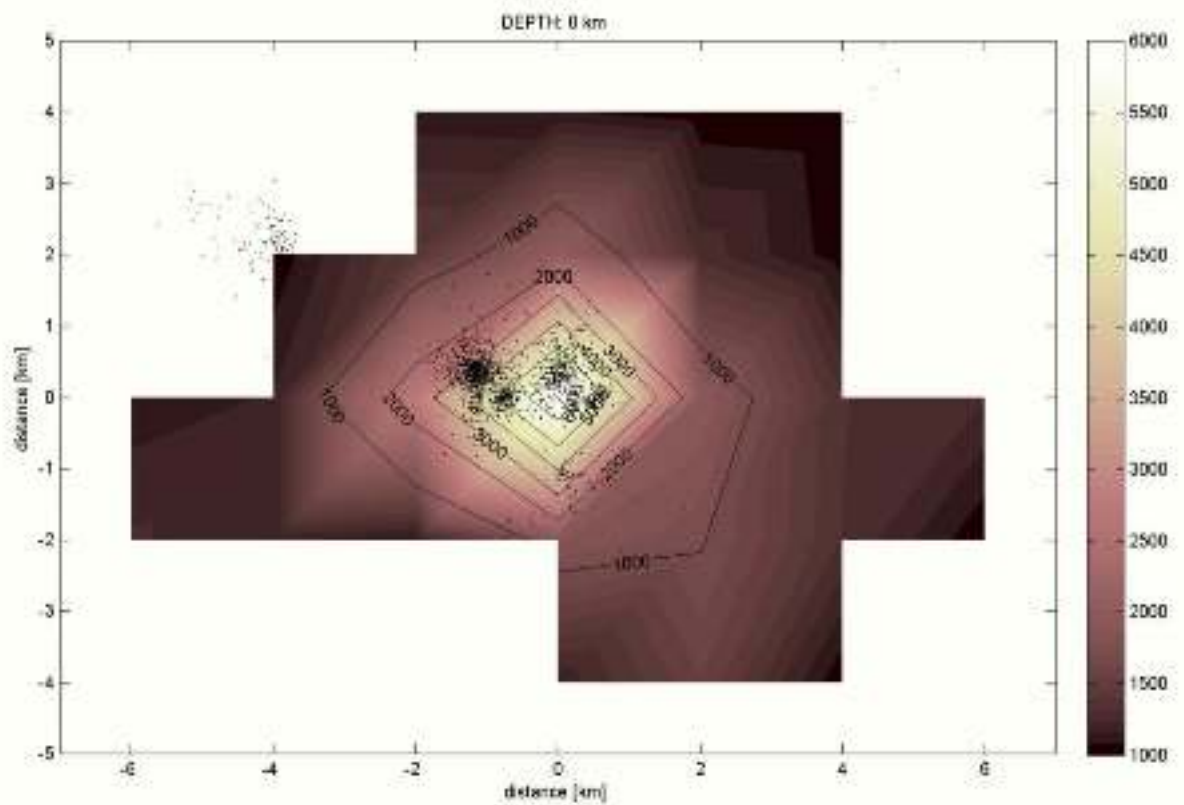


Рисунок 2.15 – Распределенная взвешенная сумма количества лучей в слое на глубине 200 м

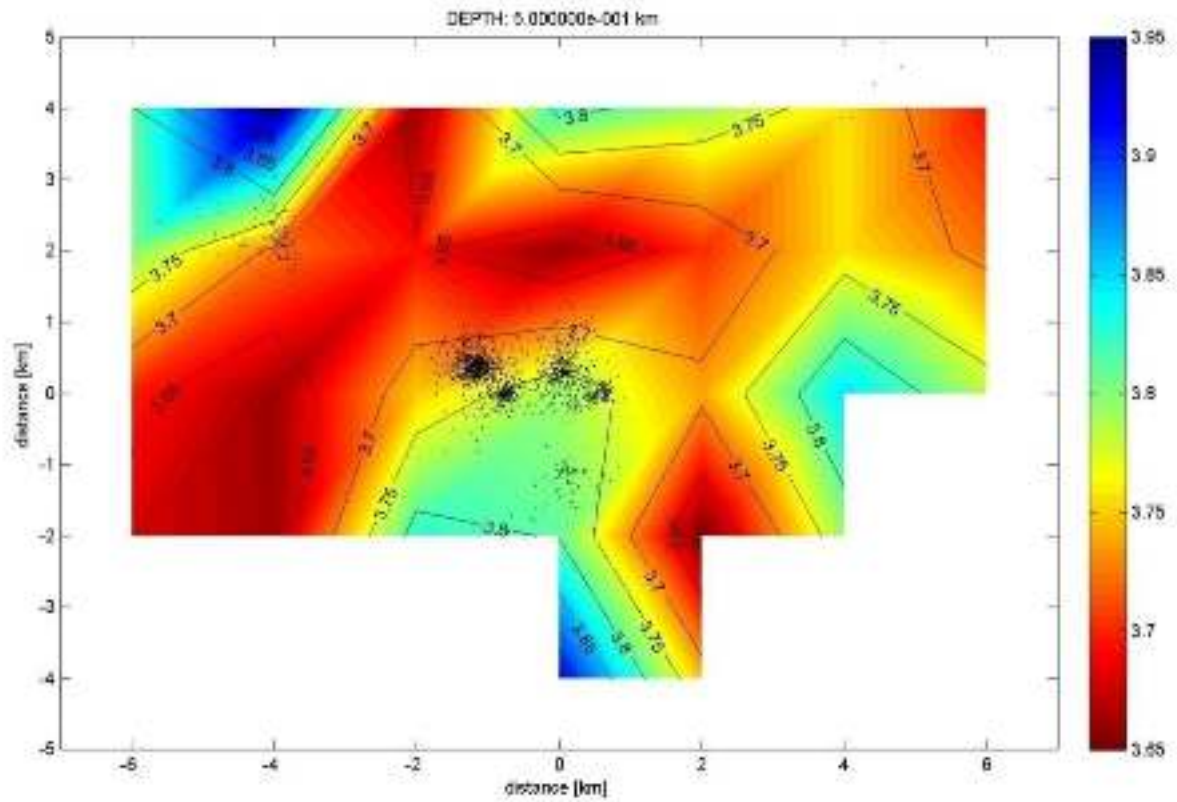


Рисунок 2.16 – Скорости распространения продольных волн в слое на глубине 700 м

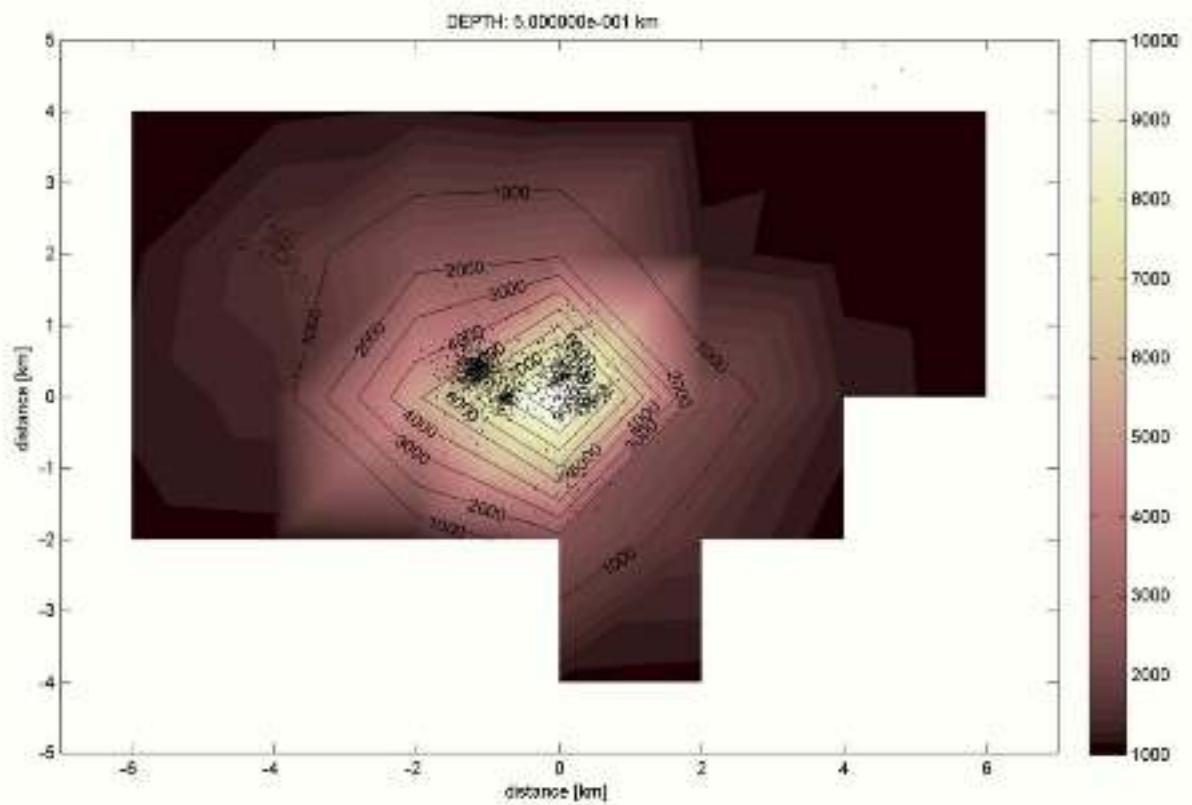


Рисунок 2.17 – Распределенная взвешенная сумма количества лучей в слое на глубине 700 м

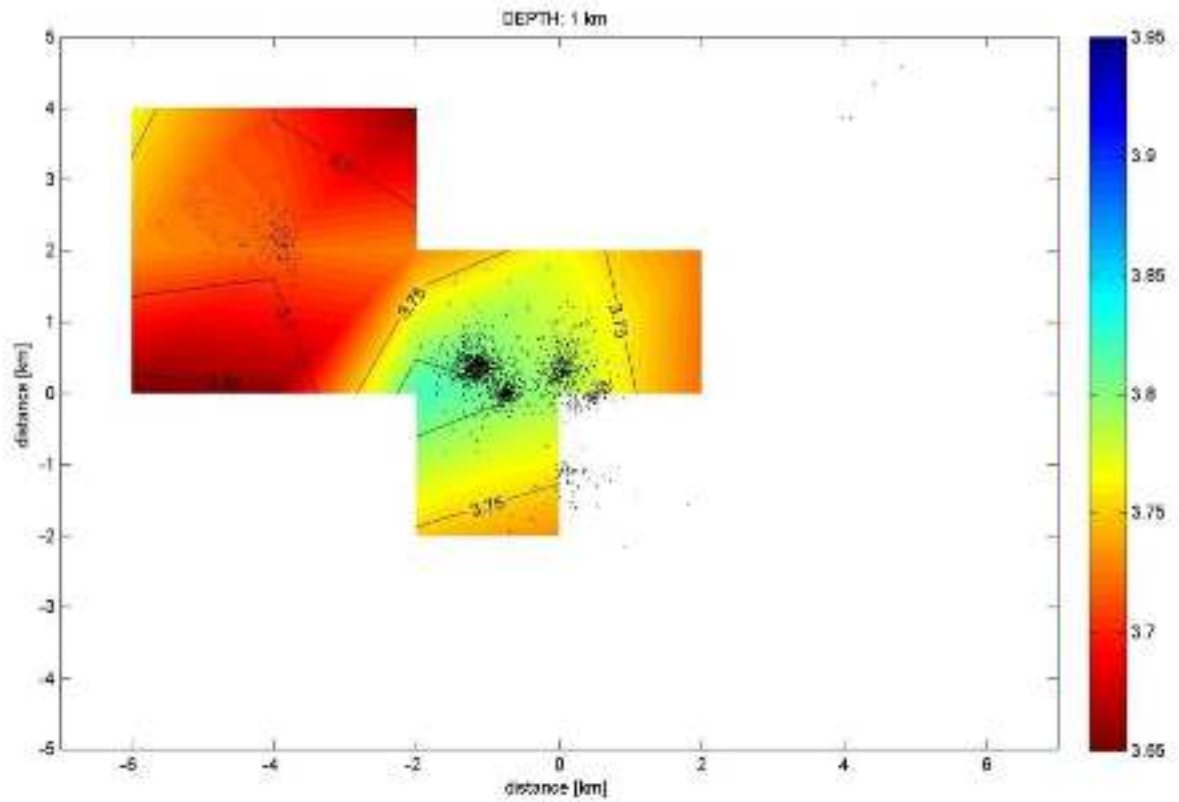


Рисунок 2.18 – Скорости распространения продольных волн в слое на глубине 1200 м

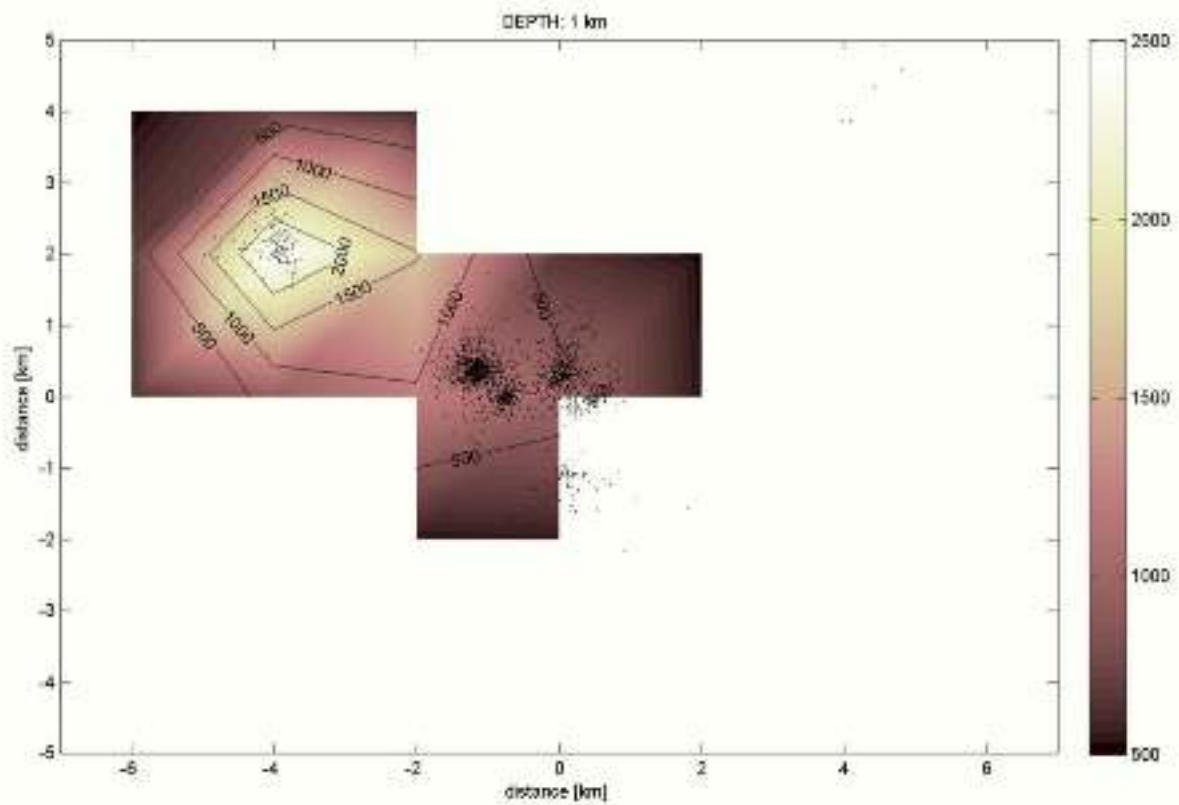


Рисунок 2.19 – Распределенная взвешенная сумма количества лучей в слое на глубине 1200 м

Скоростная модель для глубины 700 м обоснованно сопоставляется с сейсмическими активизациями, приуроченными к горным выработкам. Эта модель (см. рисунок 2.16) показывает строение пространства под выработками, где и находятся активизированные области.

Можно дополнительно отметить, что по данным о глубинном строении Алтае-Саянского региона, полученным в результате профильных вибросейсмических исследований с мощными виброисточниками, скорости распространения упругих волн в районе г. Полысаево составляют 6.15–6.2 км/с (для *P*-волн) и 3.5–3.55 км/с (для *S*-волн) для глубины 10 км [Соловьев и др., 2003].

Также установлена надежная связь между просадками рельефа и сейсмическими событиями в зоне добычи угля подземным способом, наблюдаемыми одновременно с помощью космической радарной интерферометрии и сети сейсмологических станций [Эпов и др., 2012]. Явления проседания поверхности наблюдаются главным образом в районе действующих горных выработок. Они, как правило, сопровождаются сейсмическими событиями. В ряде случаев деформации рельефа поверхности в зонах без выработок могут быть индикатором обрушения старых неизвестных выработок, вызванного, например, движением поездов по железной дороге.

Сейсмические активизации в районе г. Полысаево удалены на расстояние 1.5–3 км к северо-востоку от системы поверхностных нарушений, выявленных и изученных в ходе полевых сеймотектонических исследований [Овсяченко и др., 2010а; Рогожин, Овсяченко, Ларьков, 2017]. Но в то же время рисунок 2.20 свидетельствует о приуроченности техногенных активизаций к зоне, выраженной в рельефе местности в виде Татарского лога, который, вероятно, является границей блоков высокого уровня.

Известно, что Кузбасс имеет блоковое строение и рассечен зонами смятия и слабо выраженными разломами. В районе г. Полысаево структура Кузнецкого бассейна сформирована в основном за счет надвигания складчатых толщ каледонид-герцинид Салаирского кряжа на верхнепалеозойские угленосные отложения, образуя тем самым узкие асимметричные складки и взбросо-надвиги.

Коренные отложения района г. Полысаево представлены ритмично переслаивающимися песчаниками, алевролитами, аргиллитами и углями (преобладают песчаники – до 65% разреза). Непосредственно в районе исследований расположена Кильчигизско-Журинская новейшая флексурно-разрывная зона, на отдельных своих участках наследующая зоны палеозойских разломов, таких как Кильчигизский и Журинский взбросы [Овсюченко и др., 2010а].

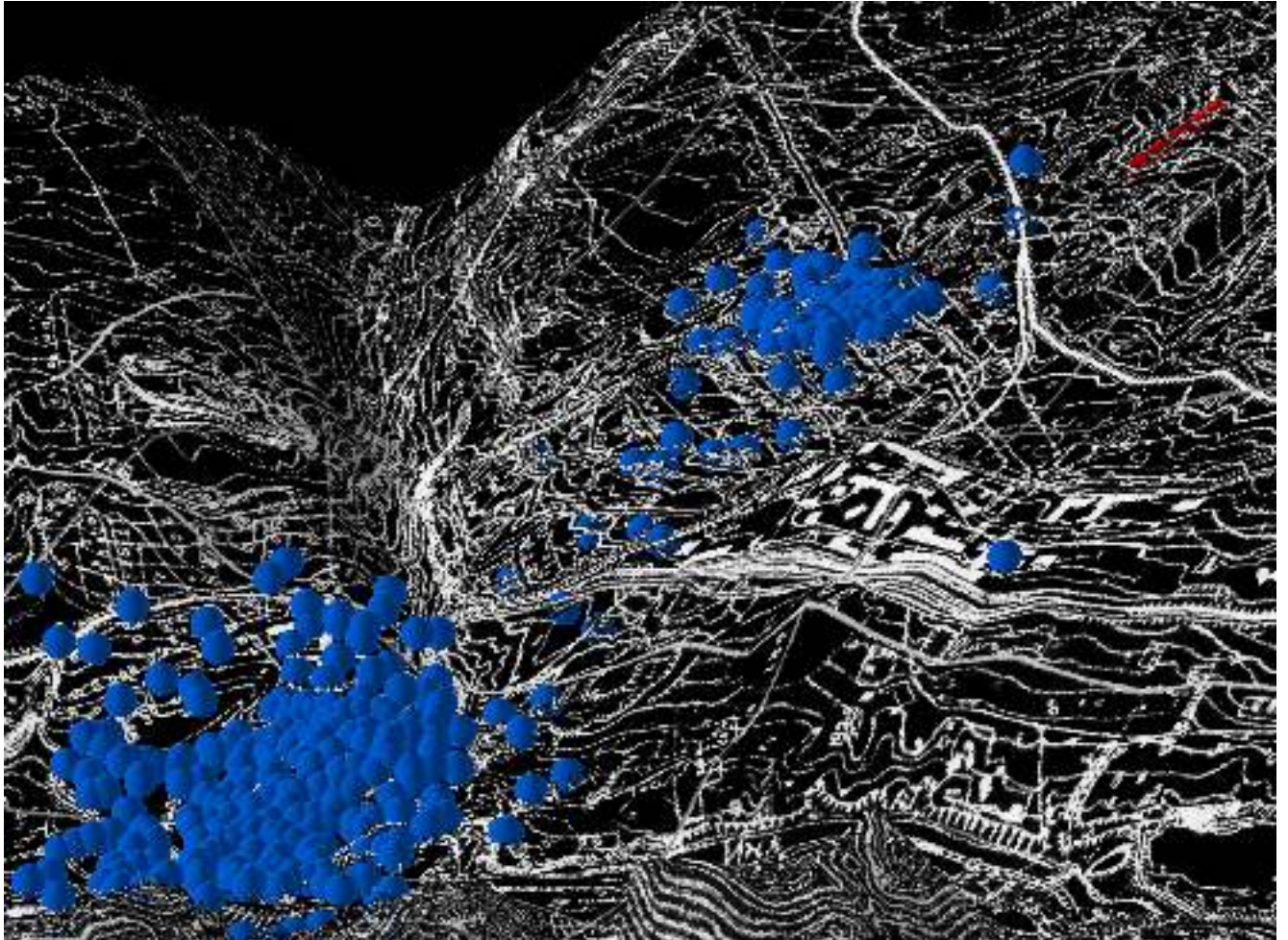


Рисунок 2.20 – Сопоставление рельефа активизированной области и техногенных землетрясений.

Использована цифровая модель превышений по данным SRTM [SRTM...]: вид с юго-запада. Вертикальный масштаб увеличен относительно горизонтального в 10 раз. Синие шары – проекции гипоцентров землетрясений на земную поверхность

В дальнейшем были проведены ещё два этапа экспериментального мониторинга в районе г. Полысаево. Обработка данных этих экспериментов существенно дополняет представления о техногенных активизациях в данном районе.

На рисунке 2.21 представлены результаты третьего этапа (июнь-июль 2008 г.). Особенностью таких эпизодических экспериментов является то, что меняется число работающих горных выработок и положение забоев действующих лав.

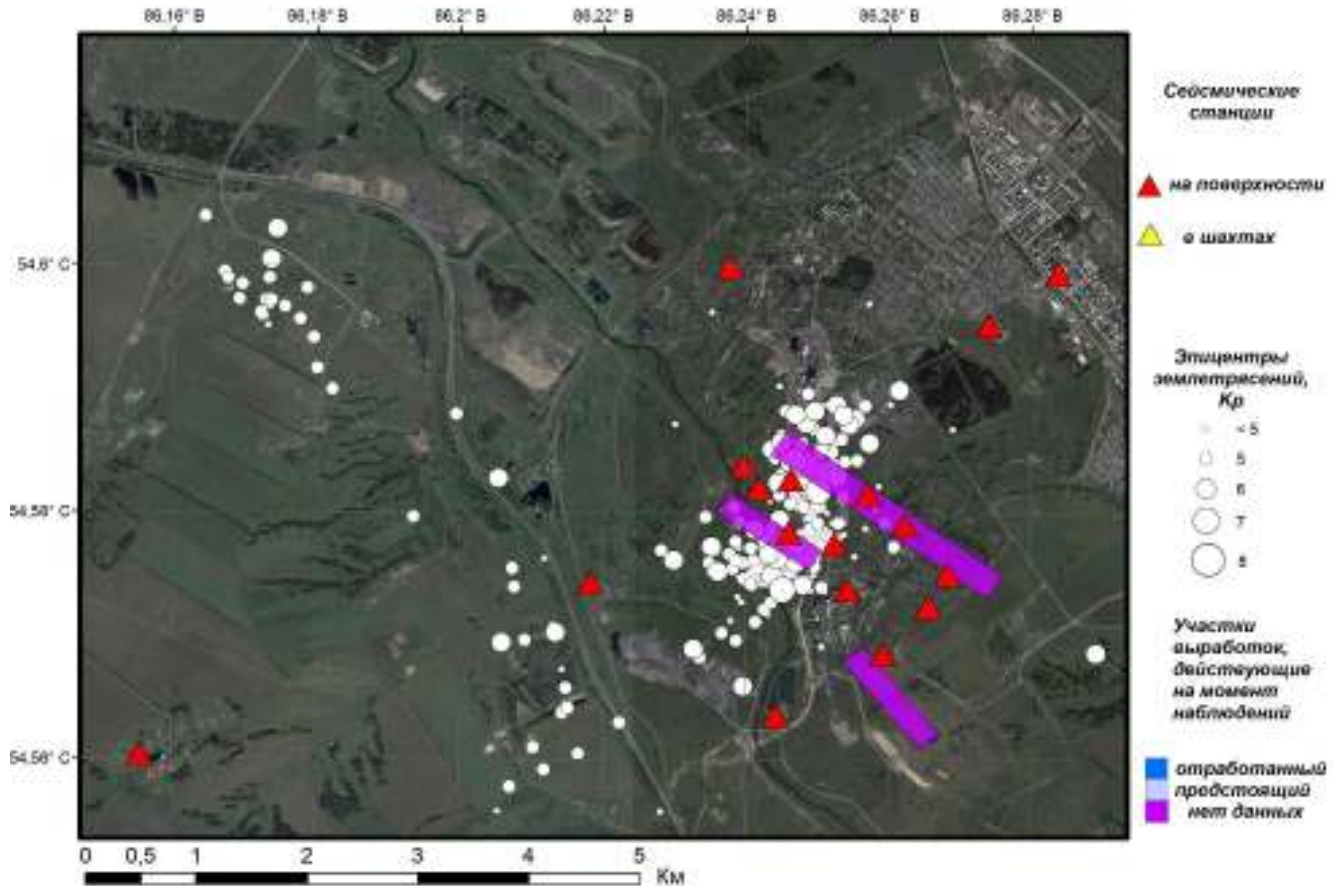


Рисунок 2.21 – Фрагмент сети временных станций в июне – июле 2008 г. (этап 3) в районе г. Полысаево и карта эпицентров техногенных землетрясений

Летом 2008 года продолжила свою работу Толмачевская лава (см. рисунок 2.7) и к ней примкнуло облако эпицентров техногенных землетрясений, сместившееся вместе с забоем вдоль выработки. В Надбайкаимской выработке период выполнения данного эксперимента совпал с приостановкой работ по добыче угля; наведенная сейсмичность около этой выработки не зафиксирована.

Во время предыдущего эксперимента добыча угля на Бреевской выработке (см. рисунок 2.7) была завершена к концу декабря 2007 г. и интенсивность сопровождающего добычу угля сейсмического процесса в январе 2008 г. снизилась от десятков событий в день до одного-двух. В рассматриваемом эксперименте практически через полгода появляется сейсмическая активизация с другого конца

Бреевской выработки. Наиболее вероятно, что лава вновь начала свою работу, сместившись в пространстве, и активизировалась область нового забоя лавы.

Значительные изменения произошли в техногенной сейсмичности, не увязанной с работающими лавами. В первом эксперименте (лето 2007 г.) такие активизации не фиксировались, во втором эксперименте (ноябрь 2007г. – январь 2008 г.) была зафиксирована компактная активизация, состоящая из событий с повышенной относительно других активизаций энергией и повышенной глубиной гипоцентров. В ходе третьего этапа (июнь – июль 2008 г.) зафиксированы землетрясения в вытянутой почти линейно области с невысокой концентрацией числа событий на единицу площади (см. рисунок 2.21). Активизированная прежде область оказалась немного в стороне от активизации, зафиксированной в ходе 2 этапа.

На рисунке 2.22 представлены результаты четвертого этапа (октябрь – декабрь 2009 г.). Перерыв между этим экспериментом и предыдущим составил более года. За это время существенно изменилось количество лав, работающих на исследуемой территории. К каждой действующей выработке примыкают облака сейсмических событий. Кроме того, видно, что лавы, работавшие на предыдущих этапах, сместились в пространстве. Например, Бреевская лава существенно сместилась относительно Толмачевской. Именно этот эксперимент указывает на относительно быстрое изменение во времени и пространстве активизированных областей и их зависимость от развития подземных горных работ [Еманов А.Ф. и др., 2011б].

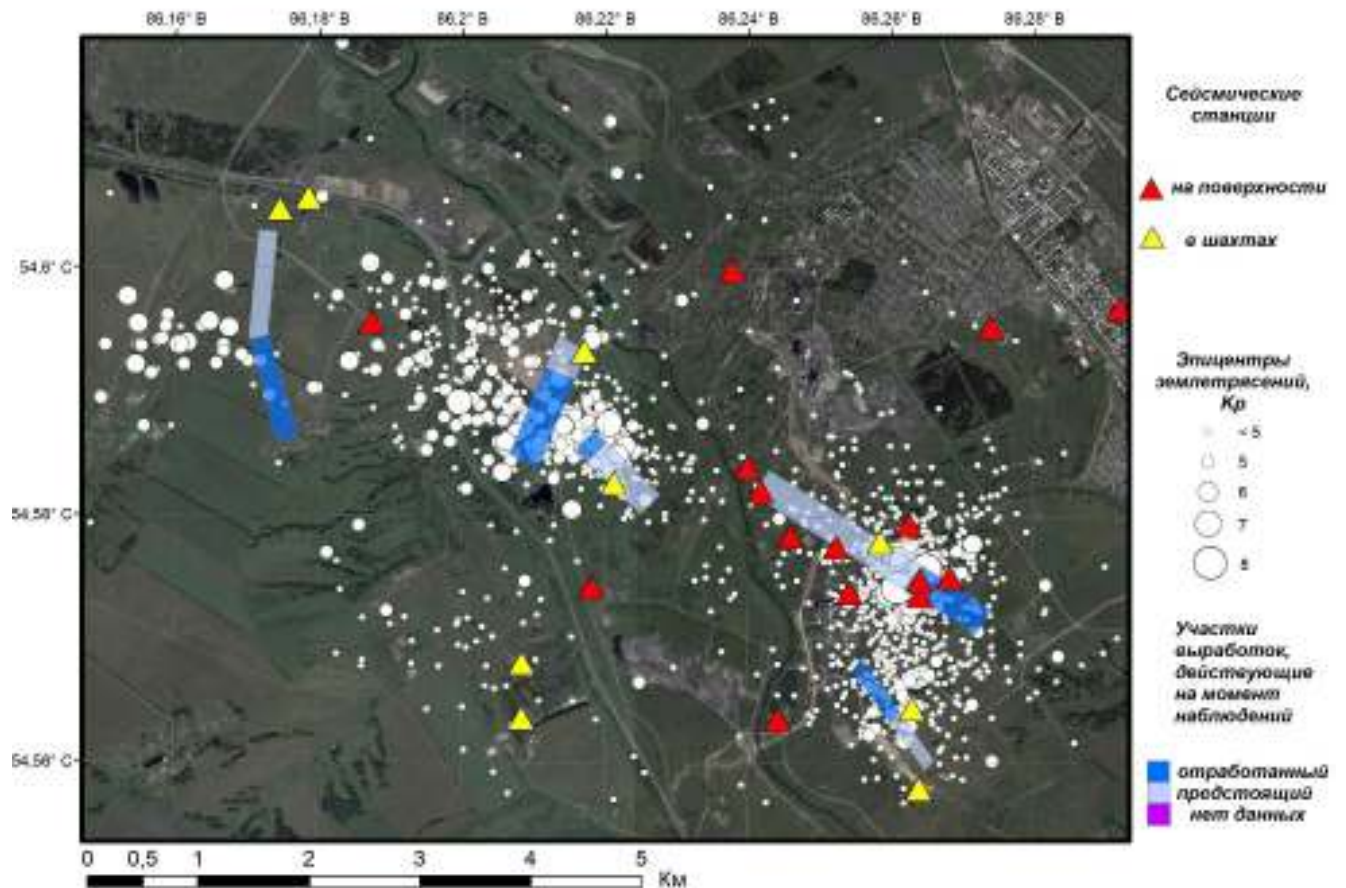


Рисунок 2.22 – Фрагмент сети временных станций в октябре – декабре 2009 г. (этап 4) в районе г. Полысаево и карта эпицентров техногенных землетрясений

2.3. Наведенная сейсмичность на севере Кузбасса

Одним из важных вопросов является изучение области существования наведенной сейсмичности в Кузбассе. Всюду ли формируется наведенная сейсмичность или она приурочена лишь к некоторым напряженным участкам земной коры? Ответ на этот вопрос можно получить, проводя исследования в местах добычи угля в разных районах Кемеровской области.

На севере Кузбасса была выставлена сеть станций с целью проверить существование сейсмических событий в районе шахт с разной интенсивностью добычи угля. Сеть была разбита на три группы по пять станций (Рисунок 2.23): одна группа (BR361–BR365) – около шахты «Березовская» (рядом с г. Кемерово), другая (BE351–BE355) – около шахты «Первомайская» и третья группа (AN341–AN345) – около г. Анжеро-Судженск (Рисунок 2.23).

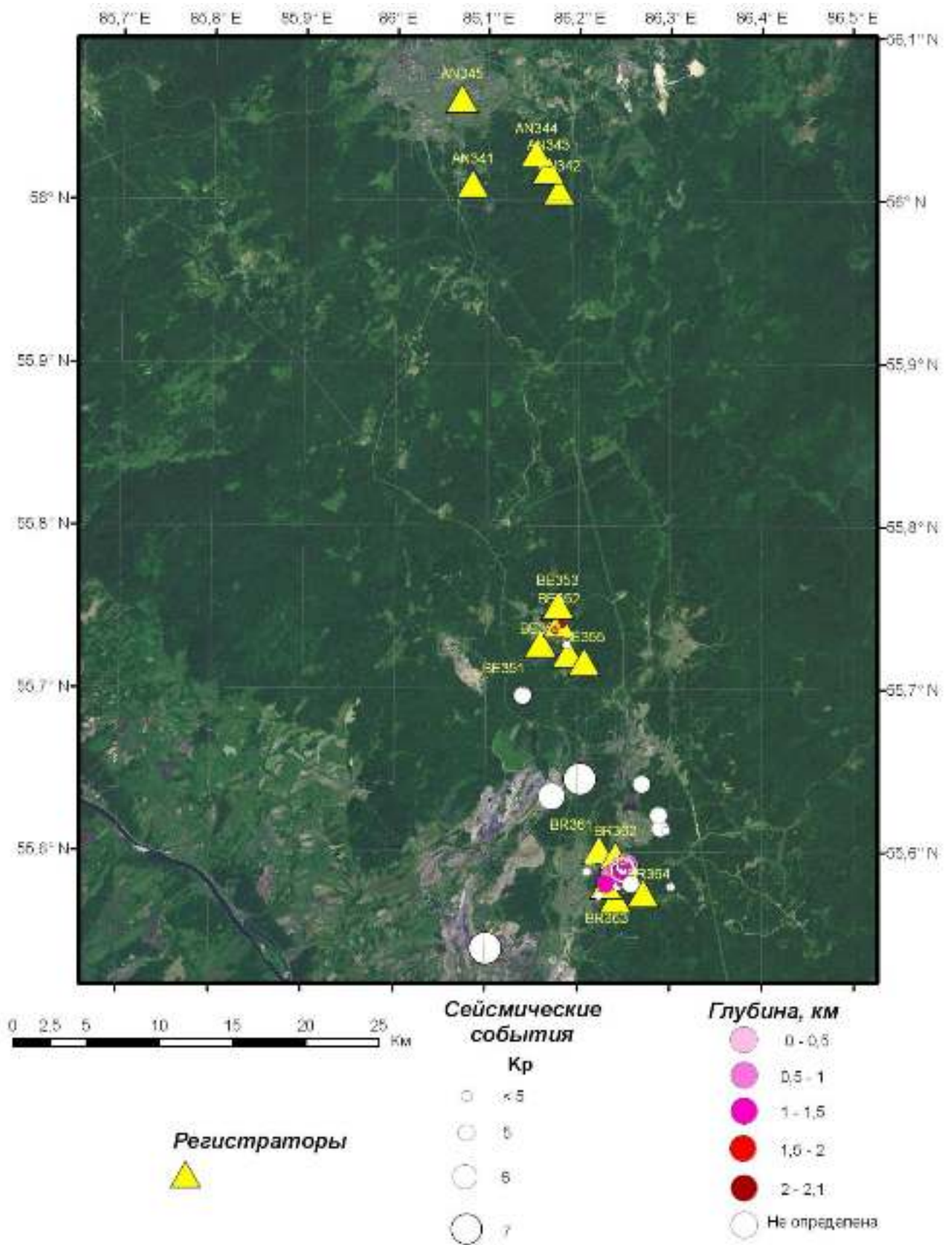


Рисунок 2.23 – Сеть станций и эпицентры техногенных землетрясений около шахт на севере Кузбасса

Эксперимент проводился с 24 марта по 6 мая 2010 г. [Фатеев и др., 2012]. В это время в районе г. Анжеро-Судженск работ по добыче угля не велось и здесь не зарегистрировано не одного техногенного землетрясения. В районе шахты «Первомайская» добыча угля проводилась без применения высокопроизводительного оборудования лав, и за чуть более чем за месячный период около нее зарегистрировано несколько событий третьего энергетического класса. Можно считать, что и около этой шахты сейсмической активизации недр практически не было.

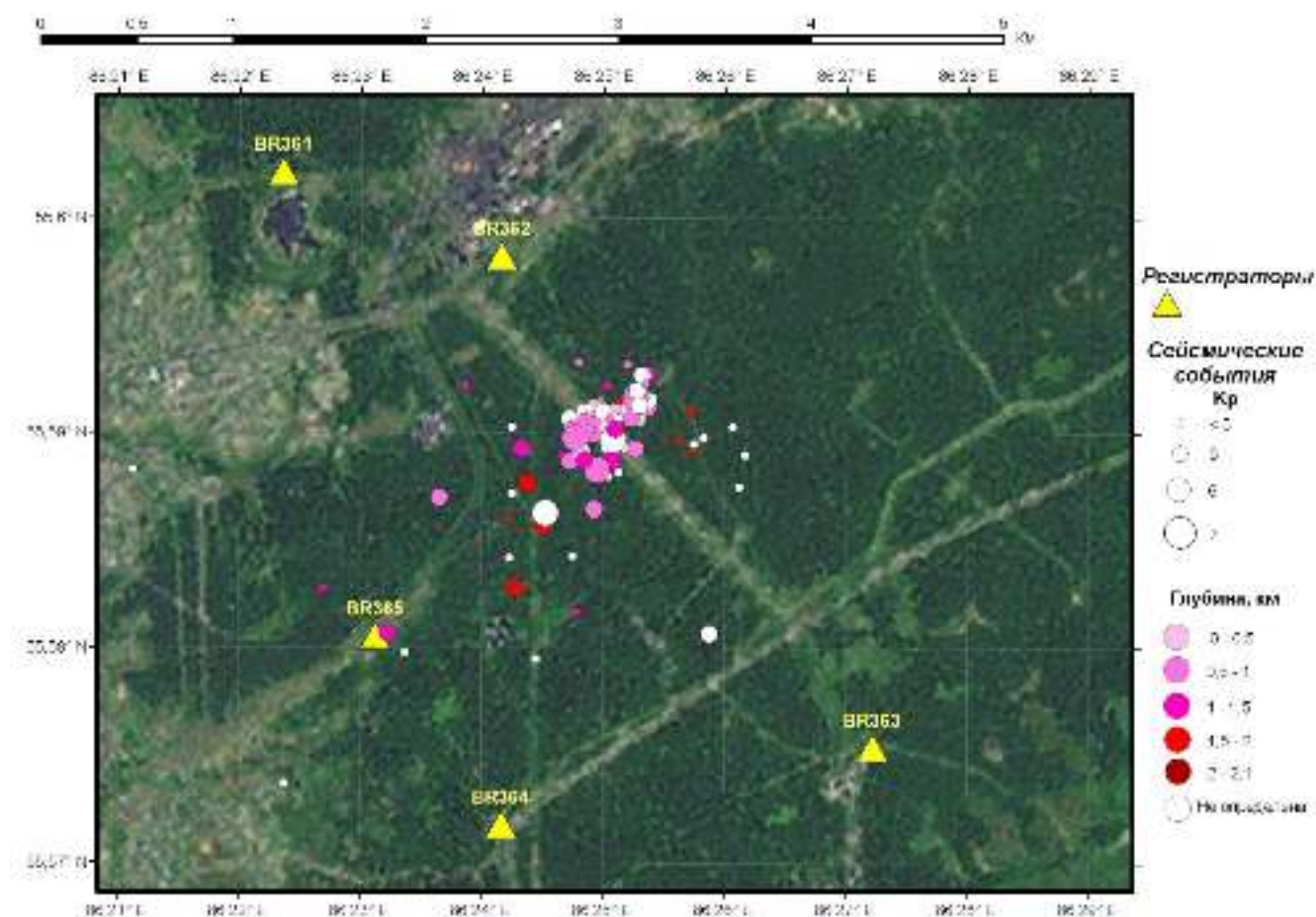


Рисунок 2.24 – Наведенная сейсмичность в районе шахты «Березовская»

Иная ситуация около шахты «Березовская» (Рисунок 2.24). Здесь зарегистрировано более ста техногенных землетрясений. Именно на ней ведется добыча угля лавами.

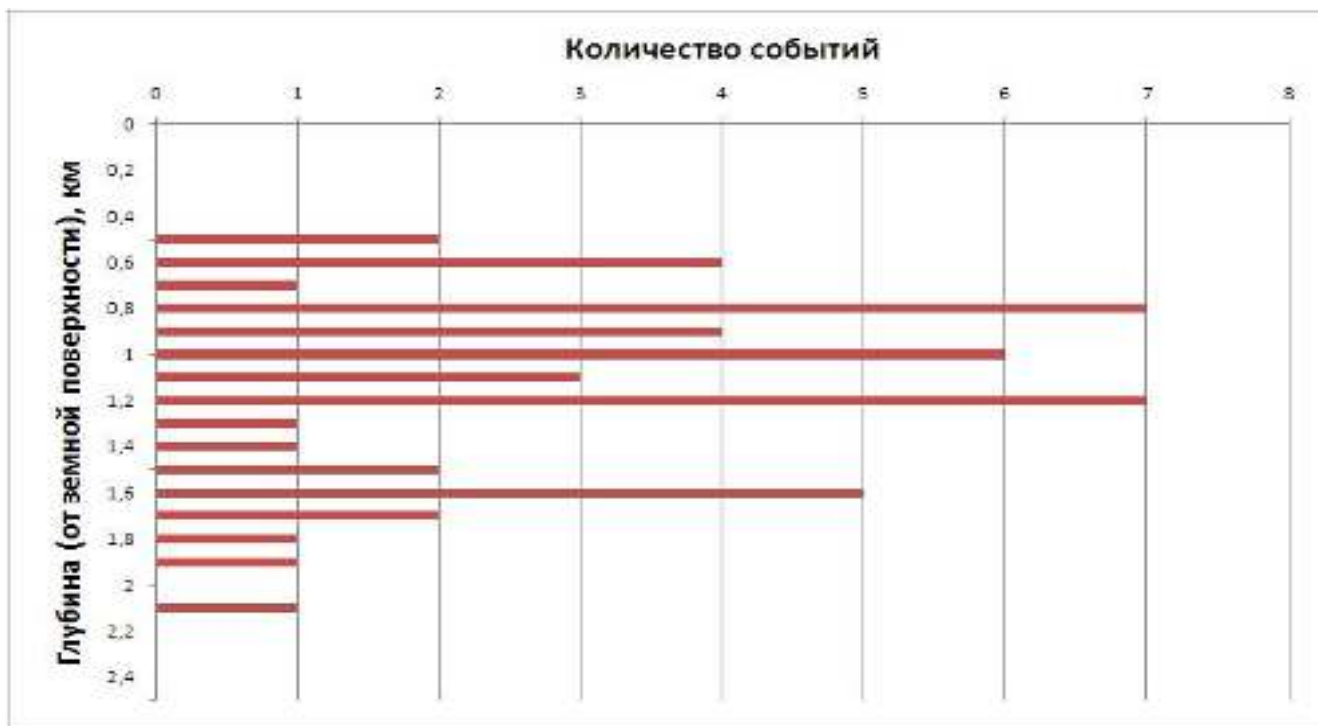


Рисунок 2.25 – Гистограмма глубин техногенных землетрясений в районе шахты «Березовская»

Рисунки 2.24 и 2.25 показывают, что, как и в Полысаево, мы имеем дело с техногенной активизацией, увязанной с забоем лавы и протекающей под выработкой. Глубины очагов – от 500 до 2100 м.

2.4. Эксперимент с локальной сетью станций в районе шахты «Распадская»

Экспериментальные работы с временными сетями станций на шахте «Распадская» выполнены уже после аварии (имеется в виду серия подземных взрывов 8-9 мая 2010 г.). Сеть станций состояла из 20 пунктов регистрации, выставленных в конце мая – начале июня 2010 г. (Рисунок 2.26).

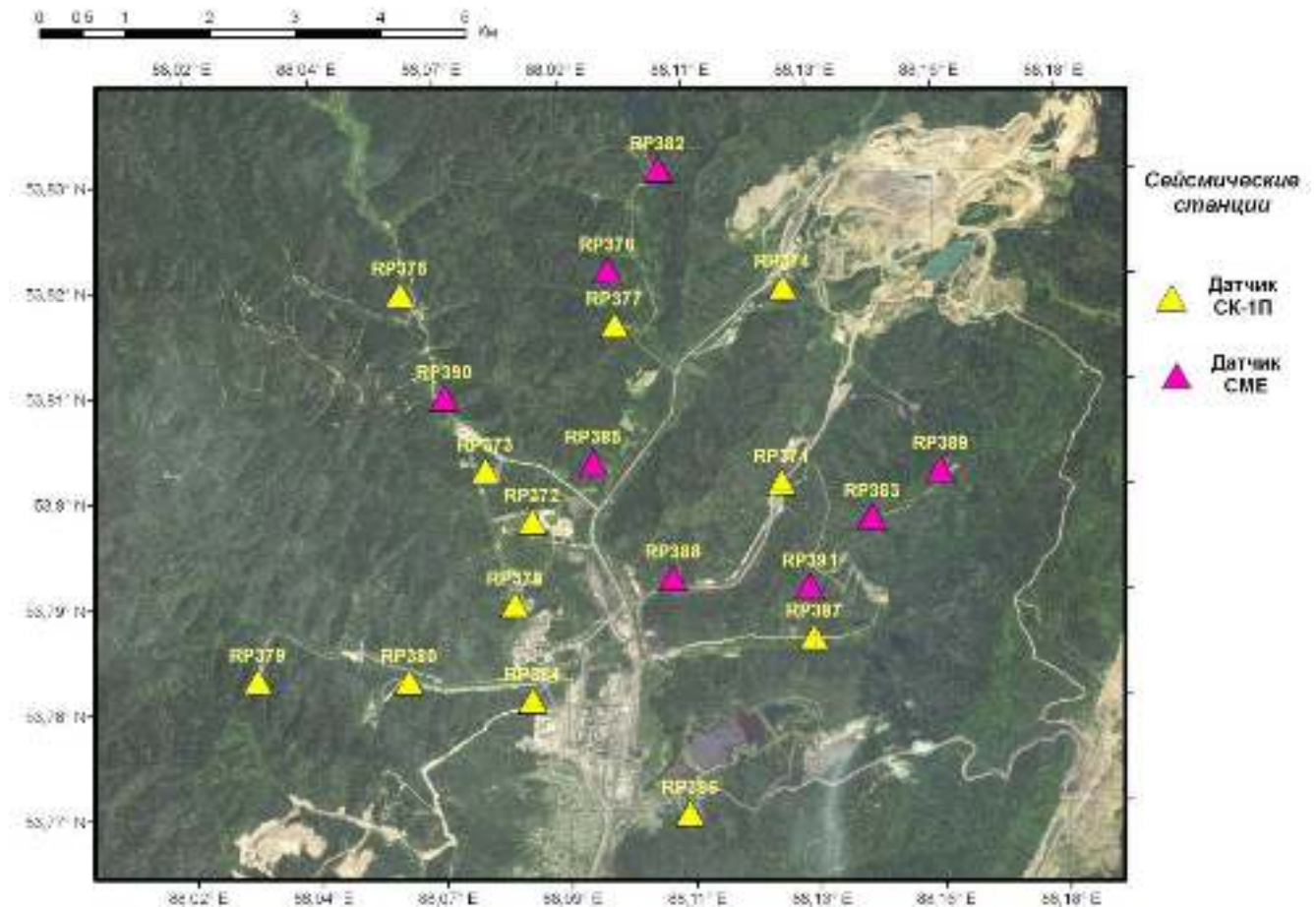


Рисунок 2.26 – Сеть станций в районе шахты «Распадская»

Использовались портативные регистраторы «Байкал АС-75» с двумя типами сейсмографов СК-1П и СМЕ-4111: первый – короткопериодный электродинамический датчик скорости смещения, а второй – жидкостный (молекулярный) широкополосный прибор. Сейсмостанции выставлялись на дневной поверхности в районах угледобывающих работ [Еманов А.Ф. и др., 2012б; Еманов А.А. и др., 2018].

На рисунке 2.27 приведены все сейсмические события, зарегистрированные сетью станций: техногенные землетрясения и промышленные взрывы. События, зафиксированные к юго-западу от сейсмической сети в районе г. Междуреченск, предположительно относятся к промышленным взрывам.

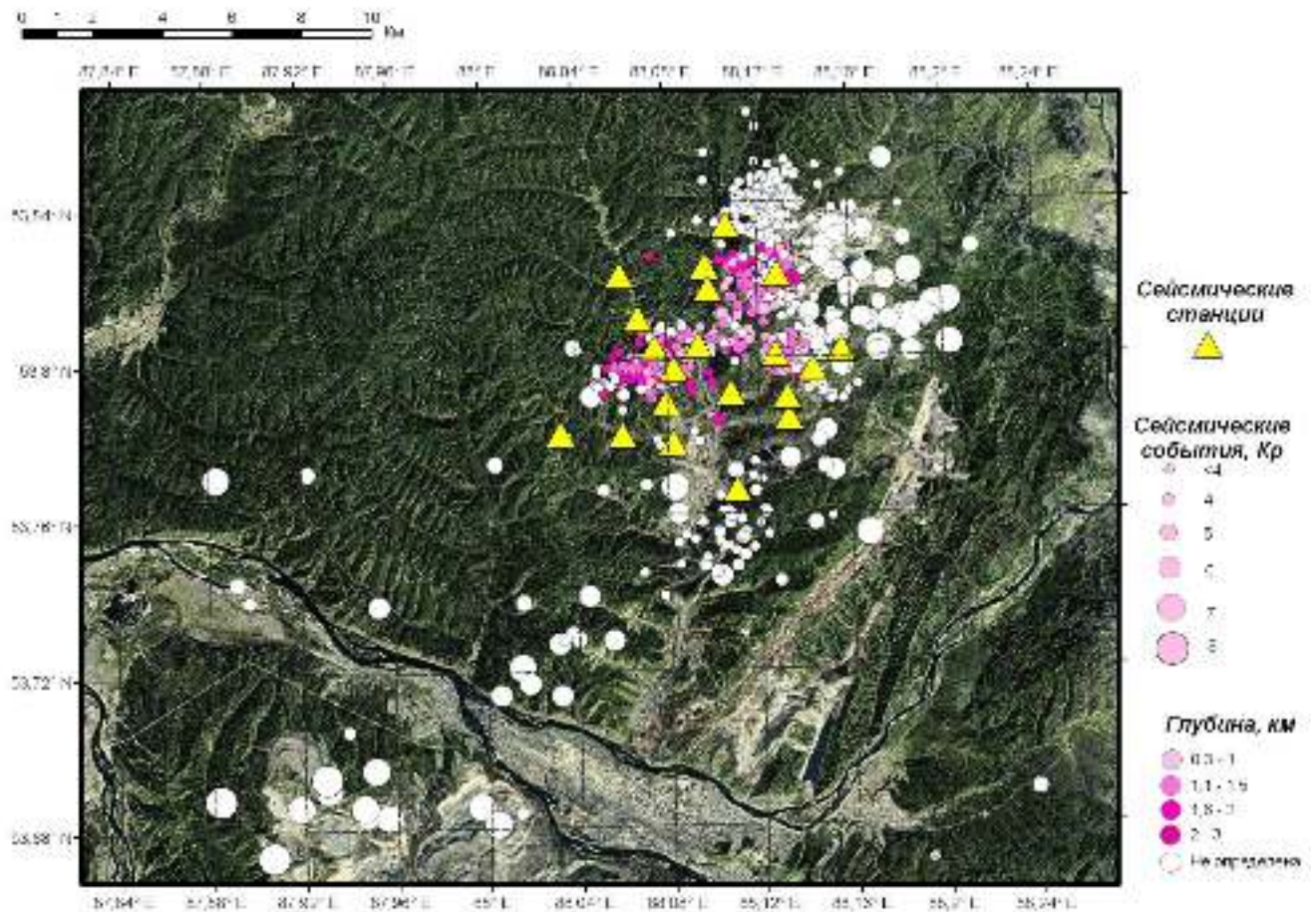


Рисунок 2.27 – Карта эпицентров сейсмических событий в районе шахты «Распадская», зарегистрированных с 5 июня по 31 августа 2010 г.

События к востоку от сети станций также являются промышленными взрывами на разрезах «Глуховский» и «Ольжерасский». Промышленные взрывы порождают сейсмические волны с заметно большей энергией, чем техногенные землетрясения. Следует отметить, что недра в районе шахты «Распадская» находятся под воздействием как механической добычи в шахтах, так и массовых взрывов на разрезах.

В районе шахты «Распадская» обнаружены три сейсмически активизированных участка (Рисунок 2.28). Глубины гипоцентров – от первых сотен метров до 3 км.

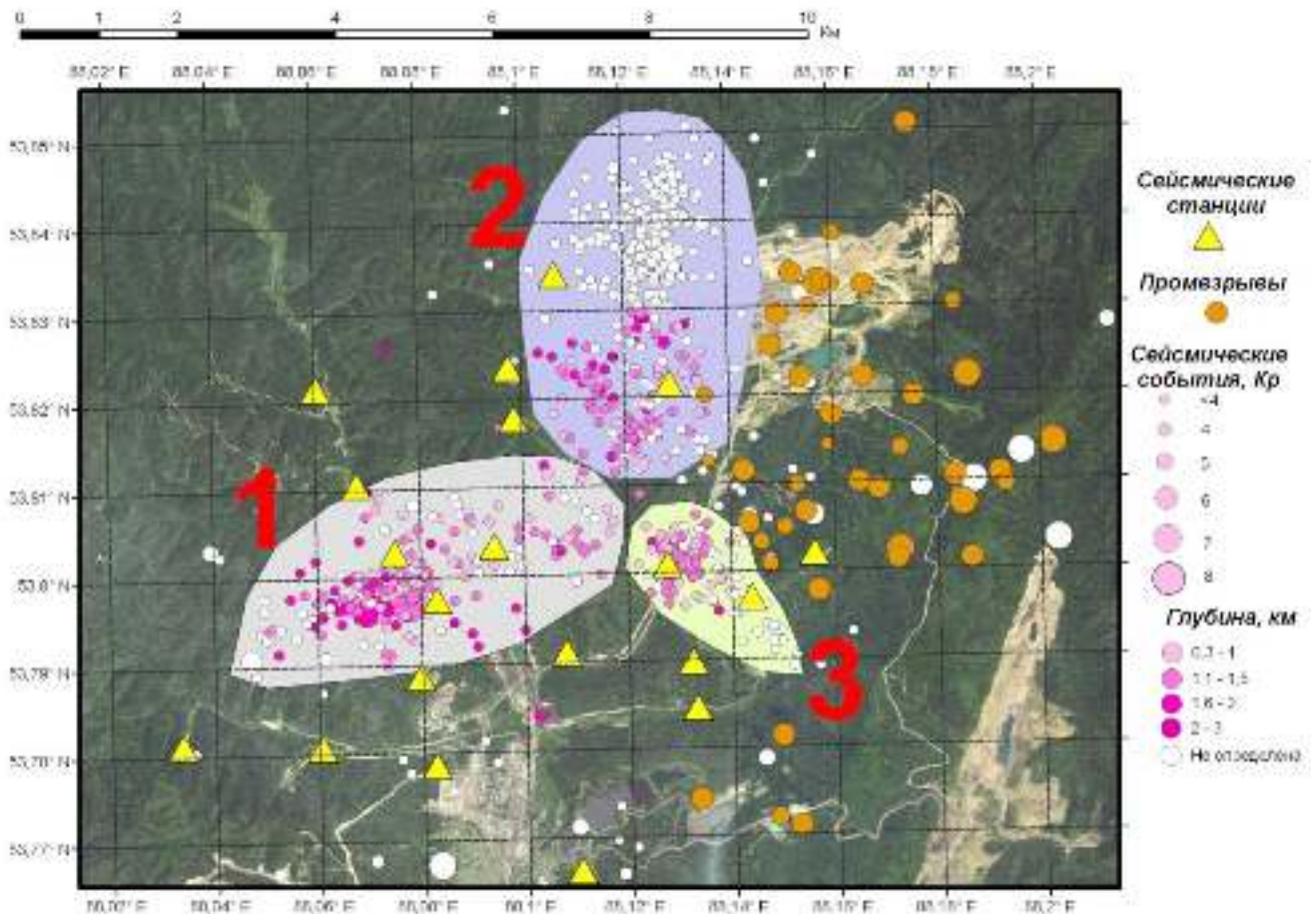


Рисунок 2.28 – Карта эпицентров сейсмических событий в районе шахты «Распадская» с разбиением на сейсмически активизированные зоны

Непосредственно к шахтным полям ОАО «Распадская» пространственно приурочена сейсмическая активизация (или сейсмическая зона) 1 (см. рисунок 2.28). Именно в этой зоне 8-9 мая 2010 г. произошла известная авария. В данном случае мы имеем дело с наведенной сейсмичностью.

На рисунке 2.29 представлены эпицентры сейсмических событий и положение забоев для добычи угля лавами на шахте «Распадская». В период наблюдений добыча угля на шахте не велась; представленные забои были остановлены после аварии 8-9 мая 2010 г. Нет данных о том, как развивалась сейсмическая активизация в период до аварии и была ли она связана пространственно с действующими лавами, но после аварии обнаружен активизированный массив. Положение очистных забоев таково, что они готовятся войти с разных сторон в сейсмически активизированный блок (см. рисунок 2.29).

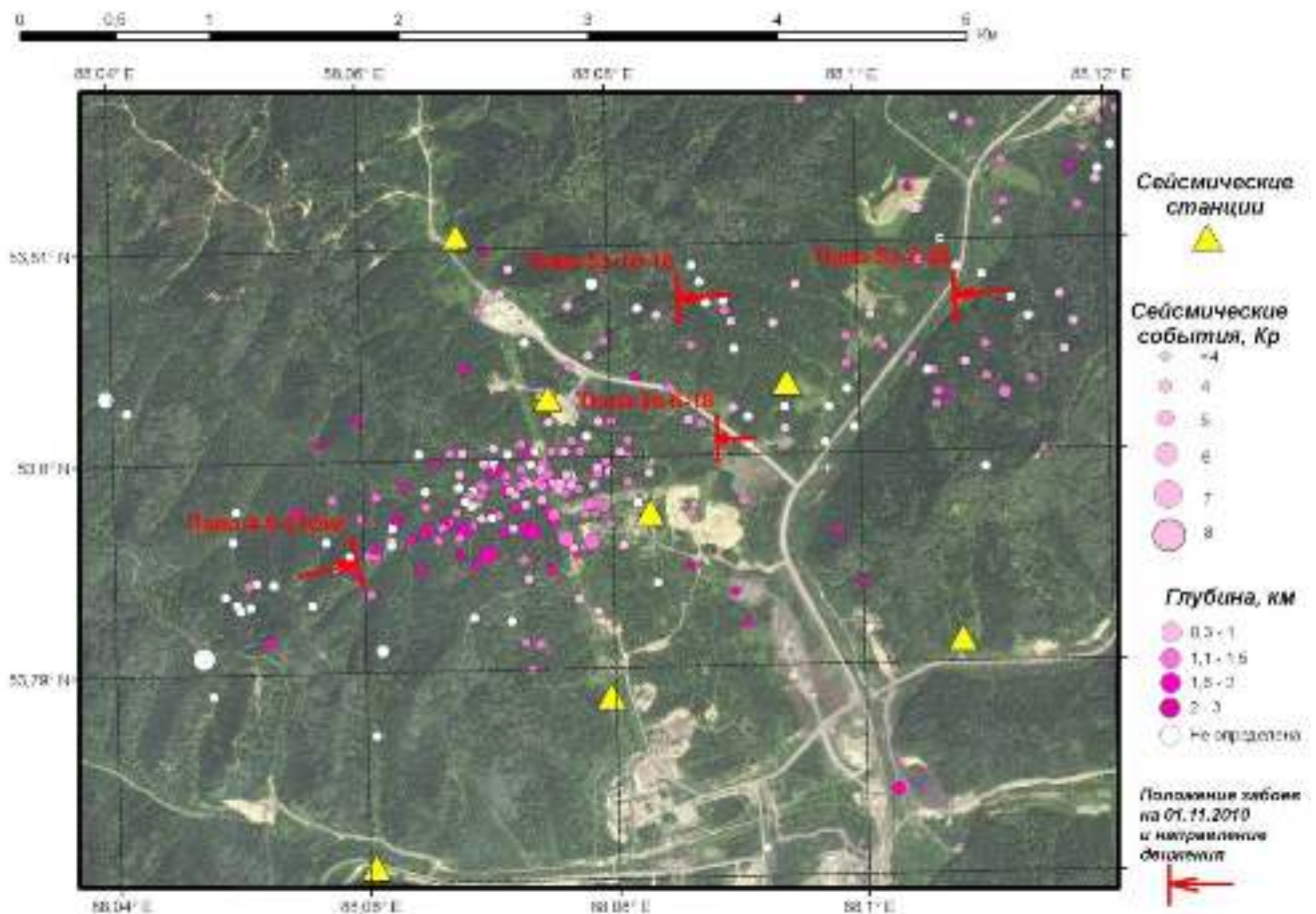


Рисунок 2.29 – Сейсмическая активизация в районе ОАО «Распадская»

Зоны 2 и 3 (см. рисунок 2.28) также имеют ярко выраженные признаки наведенной сейсмичности. Они находятся на сопредельных с ОАО «Распадская» территориях, но из-за отсутствия конкретных данных об угледобывающих лавах в этих районах невозможно более точно привязать эти активизации к процессу добычи полезных ископаемых. В период с 5 июня по 31 августа 2010 г. в зоне 1 зафиксировано 240 событий, в зоне 2 – 331 событие, в зоне 3 – 137 событий.

На рисунке 2.30 представлены данные о глубине гипоцентров сейсмических толчков на выделенных активизированных участках в районе шахты «Распадская». Во всех трех зонах землетрясения лоцированы ниже выработок и их максимальное количество приходится на глубины 1 ÷ 1.5 км. Редкие события происходят на глубине около 2.5 км.

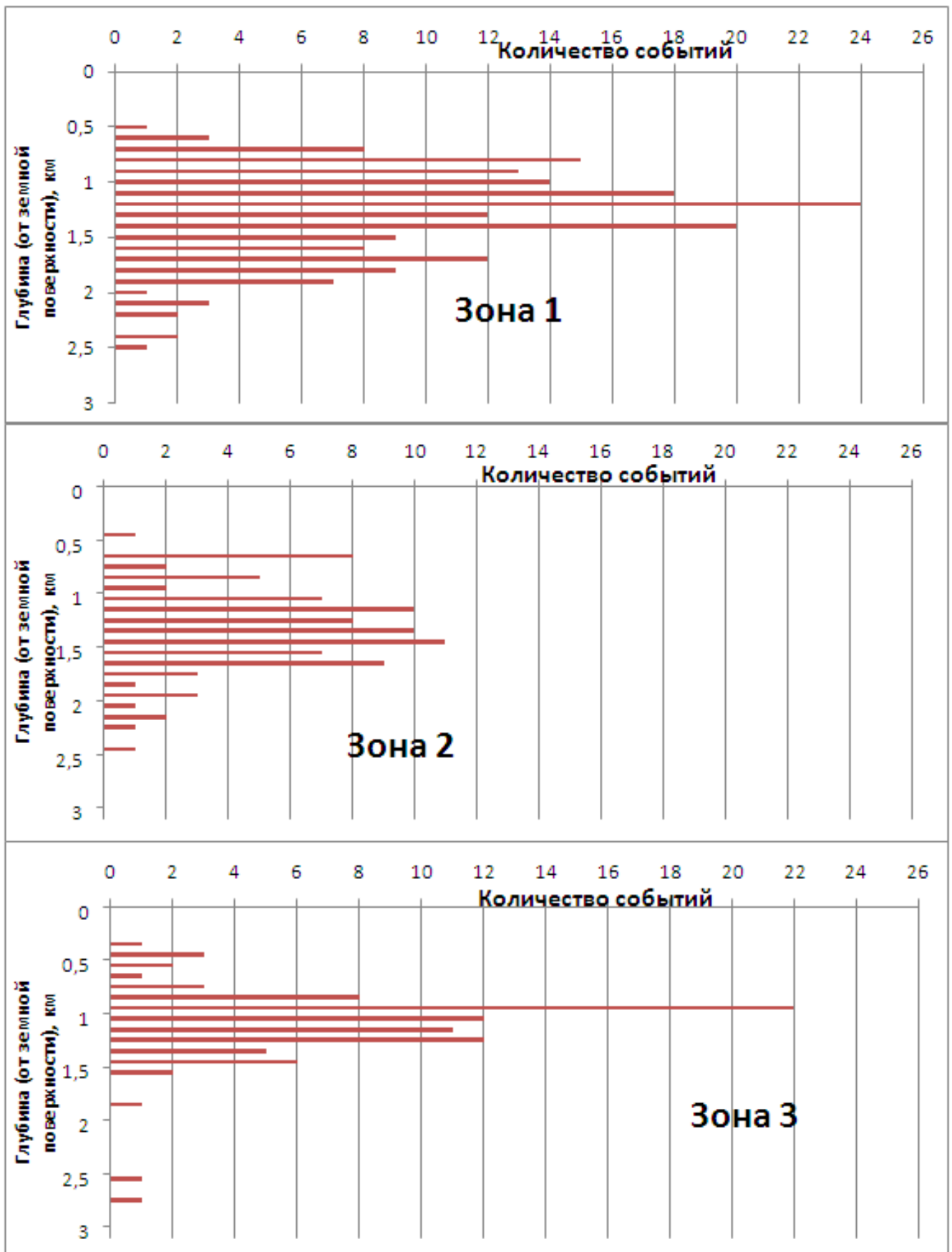


Рисунок 2.30 – Гистограммы глубин техногенных землетрясений в районе шахты «Распадская»

На рисунке 2.31 показаны фокальные механизмы некоторых событий в трех активизированных зонах в районе шахты «Распадская».

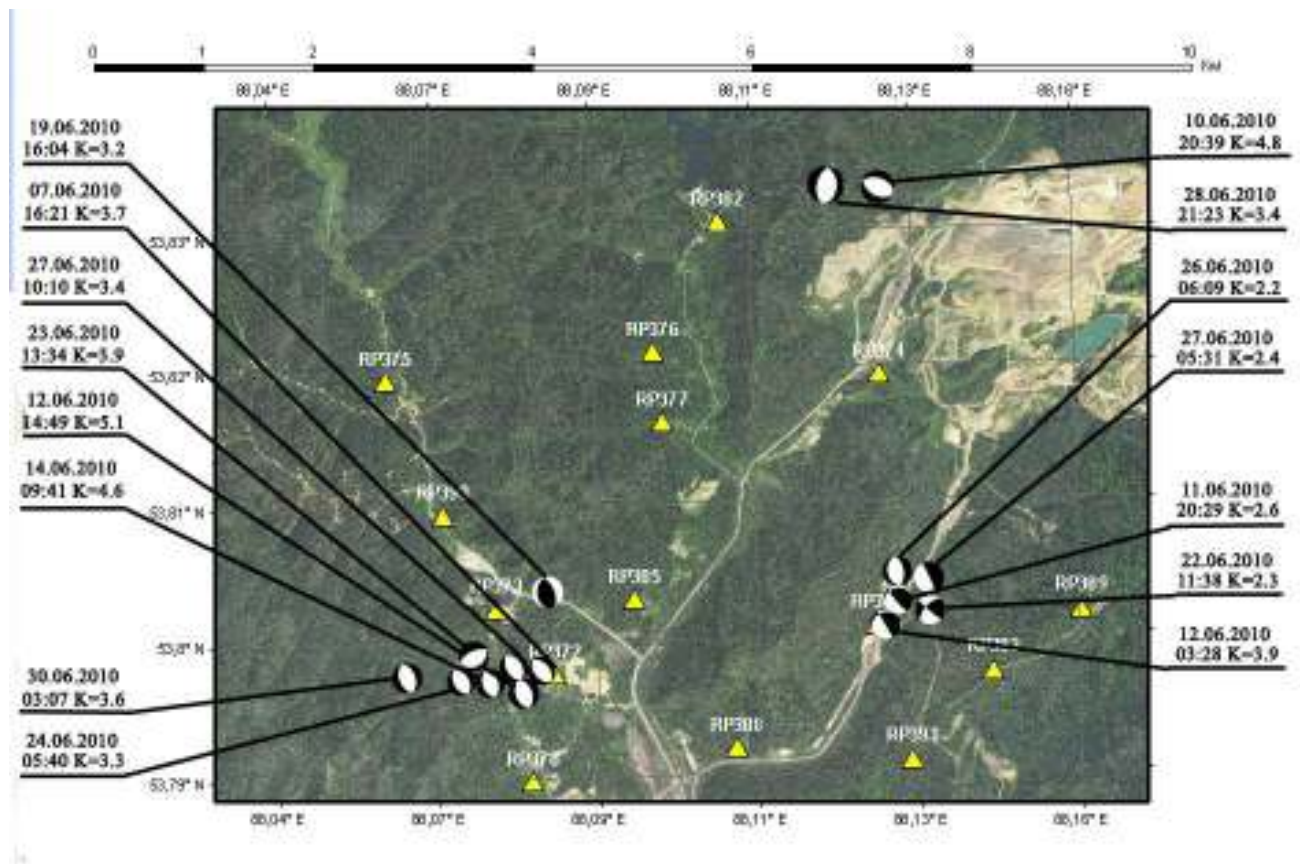


Рисунок 2.31 – Механизмы очагов техногенных землетрясений в районе шахты «Распадская»

Зона 1 (охватывает шахтные поля ОАО «Распадская», см. рисунок 2.28) представлена преимущественно сбросовым характером очагов северо-западной ориентации. Зона 2 (см. рисунок 2.28) также отличается сбросовым характером очагов. Преимущественную ориентацию фокальных плоскостей выделить не удастся из-за малой величины выборки. Зона 3 представлена в основном сдвиго-взбросовым характером очагов северо-западной ориентации. Помимо прочего, изучение механизмов очагов в трех сейсмоактивных зонах позволяет уверенно говорить о невзрывном характере данных активизаций. Даже при малом числе определений фокальных механизмов очагов обнаруживаются различия в напряженном состоянии разных участков данного угольного месторождения.

2.5. Триггерные эффекты в развитии наведенной сейсмичности Кузбасса

В главах 2.1–2.4 выделены сейсмически активизированные структуры, рядом с которыми расположены карьеры, где проводятся массовые взрывы с зарядами в десятки и сотни тонн взрывчатых веществ. Здесь же работают мощные лавы по добыче угля с сильным вибрационным воздействием на среду. Возможность воздействия со стороны на активизированную область в случае наведенной сейсмичности обосновано и рассмотрено в работе [Мирзоев и др., 2009]. Суть разработанного метода состоит в нагнетании жидкости в напряженные среды в определенные периоды при дополнительном вибровоздействии. Это приводит к плавному снятию тектонических напряжений, накопленных в земной коре и предотвращает сильные землетрясения.

Также было изучено инициирование сейсмичности при воздействии на среду в виде закачивания воды [Соболев и др., 2010]. Возможность влияния сильных взрывов на региональную сейсмичность проанализирована в [Турунтаев, Петрович, 2007]. Кроме того, существует гипотеза, что постоянное воздействие взрывных работ на недра приводит к некоторой разрядке существующих напряжений и как следствие к уменьшению вероятности возникновения сильных землетрясений [Брыксин, Селезнев, 2012]. Данную работу можно рассматривать как развитие упомянутых исследований.

Анализируя полученные материалы о техногенной сейсмичности в районах добычи угля шахтным способом в Кузбассе, попытаемся найти ответы на следующие вопросы:

1. Какими общими чертами и различиями обладают техногенные активизации, изученные в некоторых районах Кузбасса?
2. Какие техногенные процессы вызывают активизацию геологической среды?
3. Можно ли воздействовать на активизированную область со стороны с целью изменения ее сейсмического режима?

Отвечая на первый вопрос, можно сказать следующее. В осадочном бассейне Кузнецкой впадины обнаружены и изучены два типа наведенной сейсмичности. Техногенные активизации, связанные напрямую с добычей угля лавами, и наведенная сейсмичность, пространственно не увязанная с работающими горными выработками.

Наведенная сейсмичность, напрямую не связанная с горными выработками, зафиксирована около г. Осинники, около г. Ленинск-Кузнецкий и в районе шахты «Распадская». В последнем случае регистрация проводилась после аварии, когда не велась добыча угля. Здесь мы имеем дело с роевой сейсмичностью, пространственно приуроченной к участку диаметром до 5 км. Гипоцентры сейсмических событий фиксируются на глубинах 1–5 км. В активизированных зонах происходит до нескольких десятков землетрясений в день. Периодические мониторинговые наблюдения показали, что роевая сейсмичность со временем меняет свое пространственное положение.

В результате анализа ряда техногенных активизаций, приуроченных к лавам около г. Полысаево (Толмачевская, Полысаевская, Надбайкаимская, Байкаимская и др.), а также около г. Кемерово (шахта «Березовская»), установлено, что сейсмический процесс со временем смещается в пространстве вместе с горными работами. Большинство гипоцентров событий происходит под выработками – ниже 1 км, иногда 1.5 км. Механизмы событий – преимущественно взбросы. Максимальная интенсивность процесса составляет до 25 землетрясений в день.

Что касается второго вопроса, следует отметить, что земные недра в районах добычи угля находятся под воздействием ряда факторов: выкачивание флюидов из горных выработок, работа угледобывающих комбайнов в лавах (вибрация), сейсмические волны от промышленных взрывов.

Поперечные размеры горных выработок при добыче угля существенно меньше размеров сейсмически активизированных областей снизу от них. Изменение напряженного состояния горных пород вокруг выработок на удалении одного километра и более может быть обусловлено выкачиванием флюида. Однако вряд ли это является определяющим фактором для формирования сейсмической

активизации. Об этом свидетельствуют эксперименты на шахтах около г. Анжеро-Судженск и на шахте «Первомайская». Здесь есть воздействие на недра из-за откачивания флюида, но нет добычи угля лавами. В результате сейсмических активизаций не обнаружено.

Исследование роли вибрации и сейсмических воздействий от промышленных взрывов на наведенную сейсмичность выполнено в ходе экспериментальных работ около г. Полысаево в период с 4 ноября по 24 декабря 2009 г. На рисунке 2.32 представлены данные о техногенных землетрясениях, зарегистрированных локальной сетью.

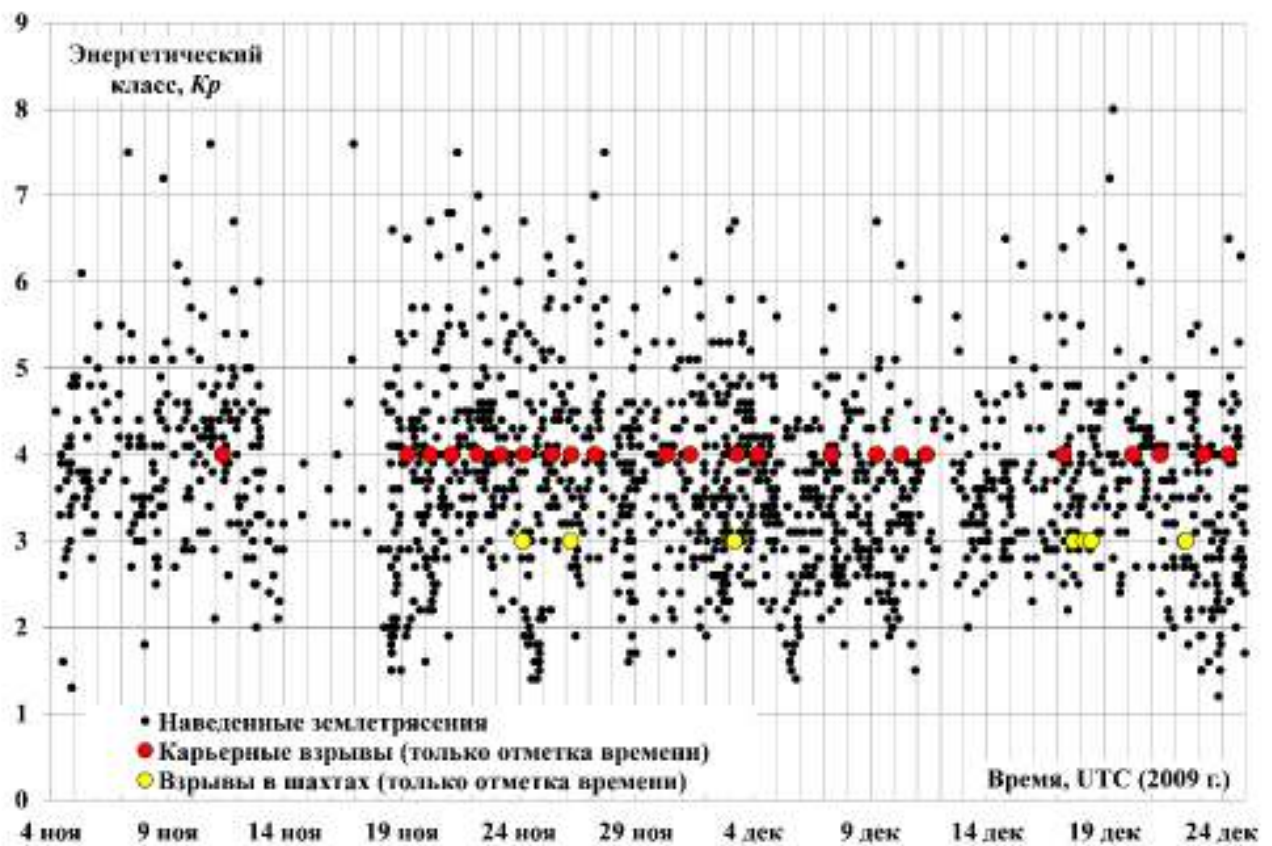


Рисунок 2.32 – Диаграмма распределения сейсмических событий в районе г. Полысаево

С 13 по 18 ноября 2009 г. по приказу губернатора Кемеровской области работы по добыче угля в рассматриваемом районе были полностью приостановлены. Фактор мощного вибрационного воздействия на недра отсутствовал. Отчетливо виден интервал (см. рисунок 2.32), когда не работали лавы. Сейсмический режим активизированного района значительно изменился, количество сейсмических событий уменьшилось в разы. Карьер «Моховский»

находится на удалении около 6 км от активизированной зоны. Промышленные взрывы оказывают кратковременное интенсивное воздействие на область наведенной сейсмичности. В данный период производились взрывы с энергетическим классом 4÷5. Заметного изменения сейсмического режима активизированной области под действием промышленных взрывов не наблюдалось.

На рисунке 2.32 представлен сейсмический режим всего района. Рассмотрим влияние вибрации и промышленных взрывов на отдельные активизированные зоны. На рисунке 2.33 выделены зоны, для которых выполнен отдельный анализ сейсмичности. В зоне 2 работает две лавы, в остальных – по одной лаве. В зоне 2 забой двух лав расположен так близко, что сейсмически активизированные области сливаются в одну.

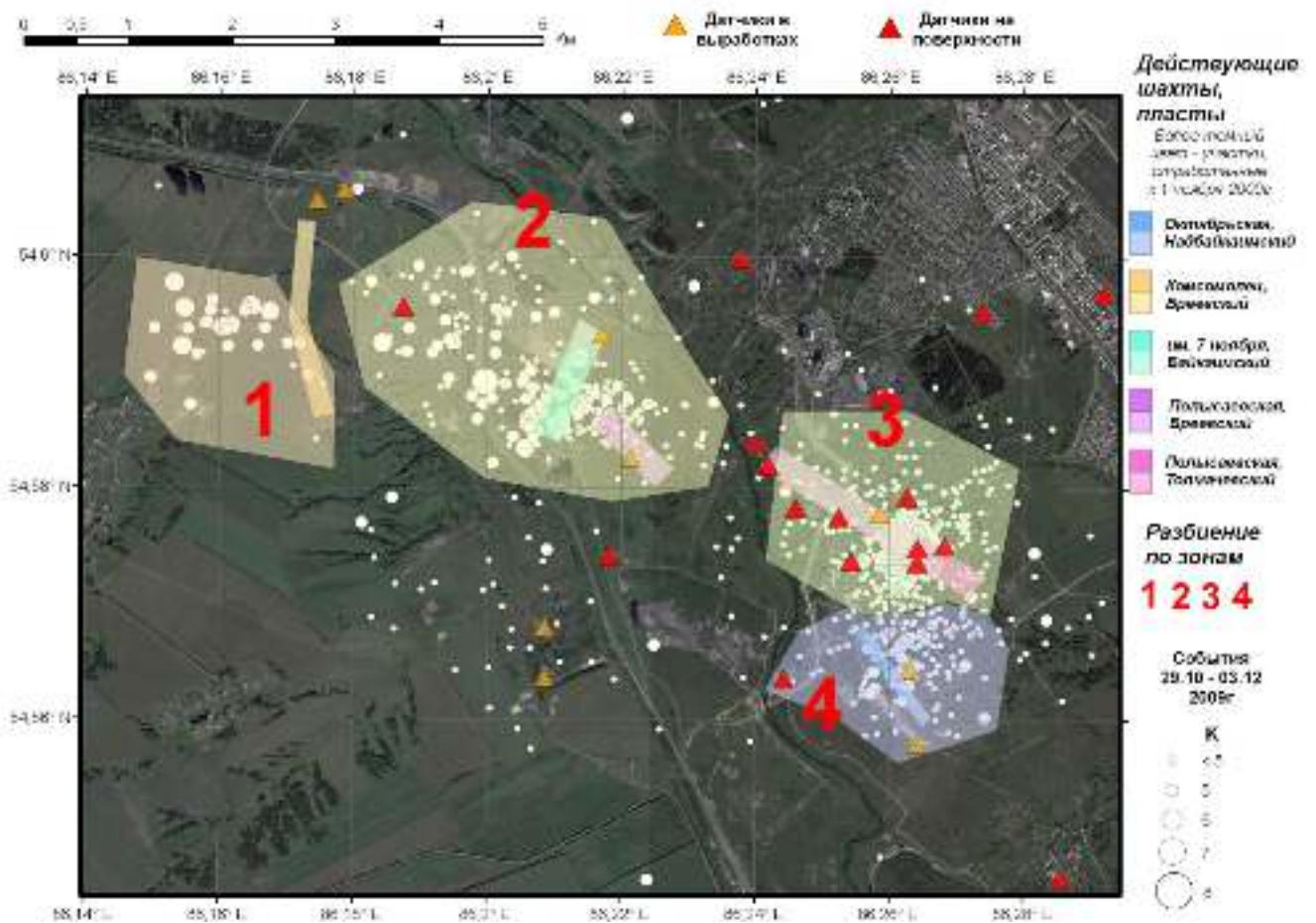


Рисунок 2.33 – Разделение активизированного района на зоны 1–4

На рисунке 2.34 представлено развитие во времени сейсмического режима каждой из выделенных зон. Во всех без исключения зонах остановка работы лав проявилась в изменении сейсмического режима.

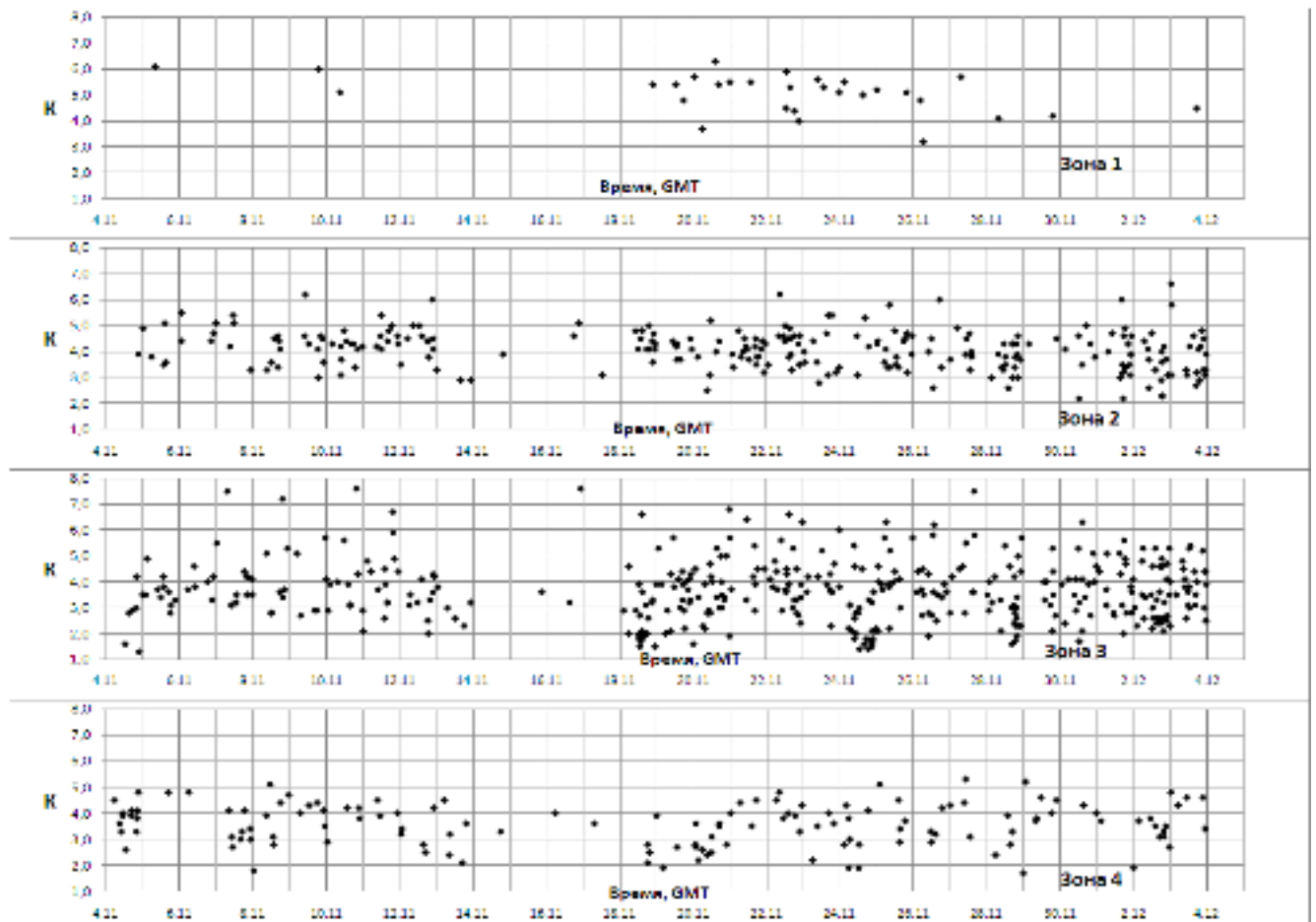


Рисунок 2.34 – Диаграмма распределения сейсмических событий по зонам 1–4 (см. рисунок 2.33)

Обращает на себя внимание тот факт, что выключение вибрации практически мгновенно изменяет режим развития наведенной сейсмичности и так же быстро он восстанавливается при возобновлении добычи угля лавами.

Данный эксперимент единственный. Большая удача, когда работающая локальная сеть станций фиксирует активизацию и по инициативе руководства области временно приостанавливается работа всех угледобывающих предприятий.

Описанный эксперимент повторить сложно, тем не менее есть возможность проверить обнаруженный эффект влияния вибрации на развитие техногенной сейсмичности иным способом. В режиме добычи угля существуют ежедневные технологические смены для профилактического обслуживания оборудования – с 8 до 14 часов. В это время добыча угля лавами не ведется, т.е. имеет место перерыв

в вибрационном воздействии на недра. Поскольку остановка и запуск добычи угля в рассмотренном ранее эксперименте довольно быстро изменяли сейсмический режим, то реально ожидать, что и присутствие технологической смены соответствующим образом проявится в развитии техногенной сейсмичности. Для доказательства влияния вибрации на техногенную сейсмичность применим интегральный подход. Поскольку технологическая смена работает в одни и те же часы каждый день, оценим распределение техногенных землетрясений по времени суток.

На рисунке 2.35 представлены гистограммы распределения числа сейсмических событий по времени суток для двух этапов эксперимента в районе г. Полысаево, проведенных с разницей в год. В обоих случаях во время технологической смены количество событий резко уменьшается. Гистограммы рассчитаны за месячный период, что дает вполне представительное усреднение результата.

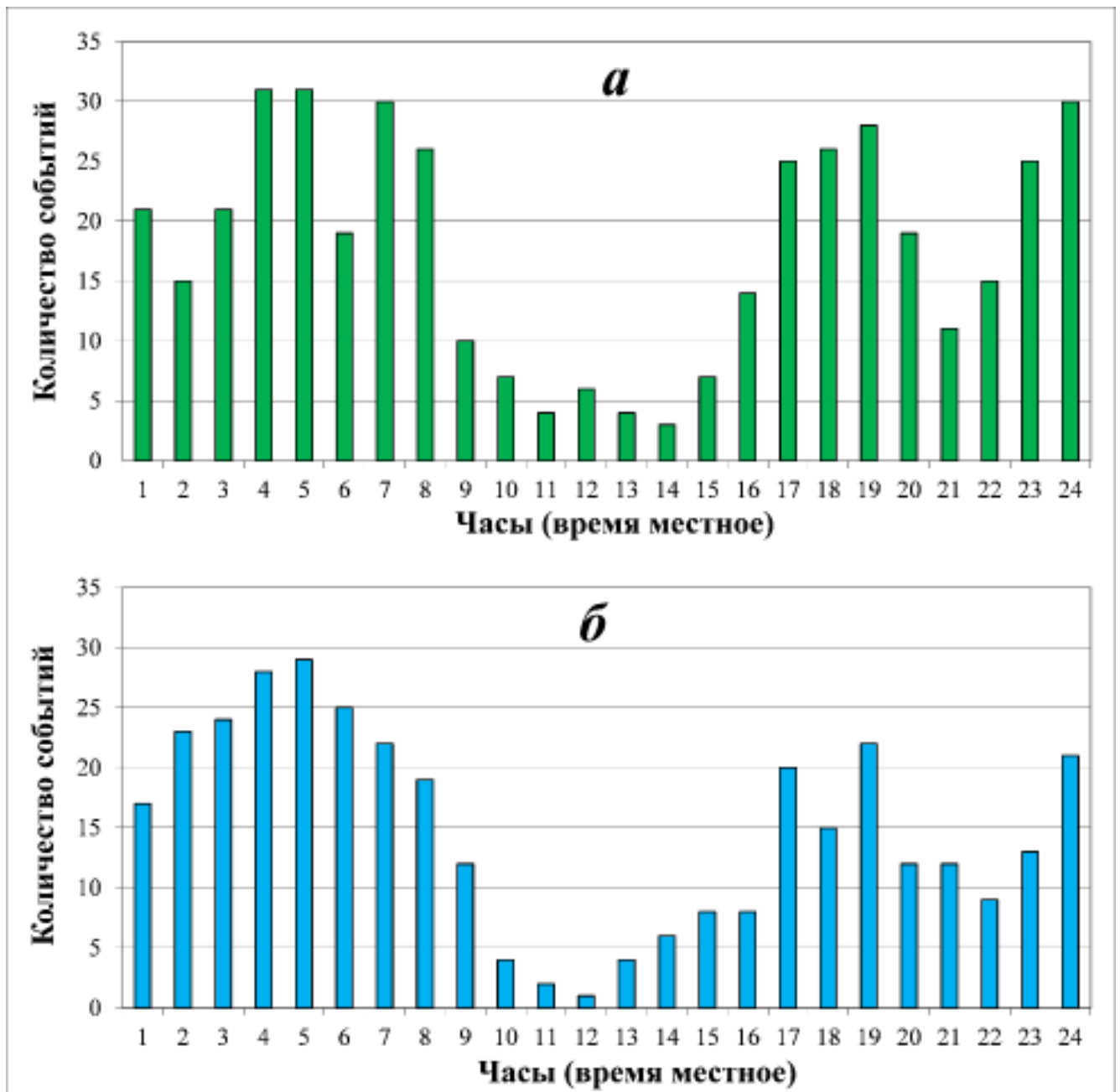


Рисунок 2.35 – Распределение сейсмических событий в районе г. Полысаево по времени суток.

Условные обозначения: а – первый этап (13 августа – 11 сентября 2007 г.); б – третий этап (3 июня – 3 июля 2008 г.)

На рисунке 2.36 представлена гистограмма, аналогичная рассмотренным ранее, но для добычи угля в совсем ином районе на севере Кузбасса. Здесь также во время технологической смены фиксируется снижение числа сейсмических событий.

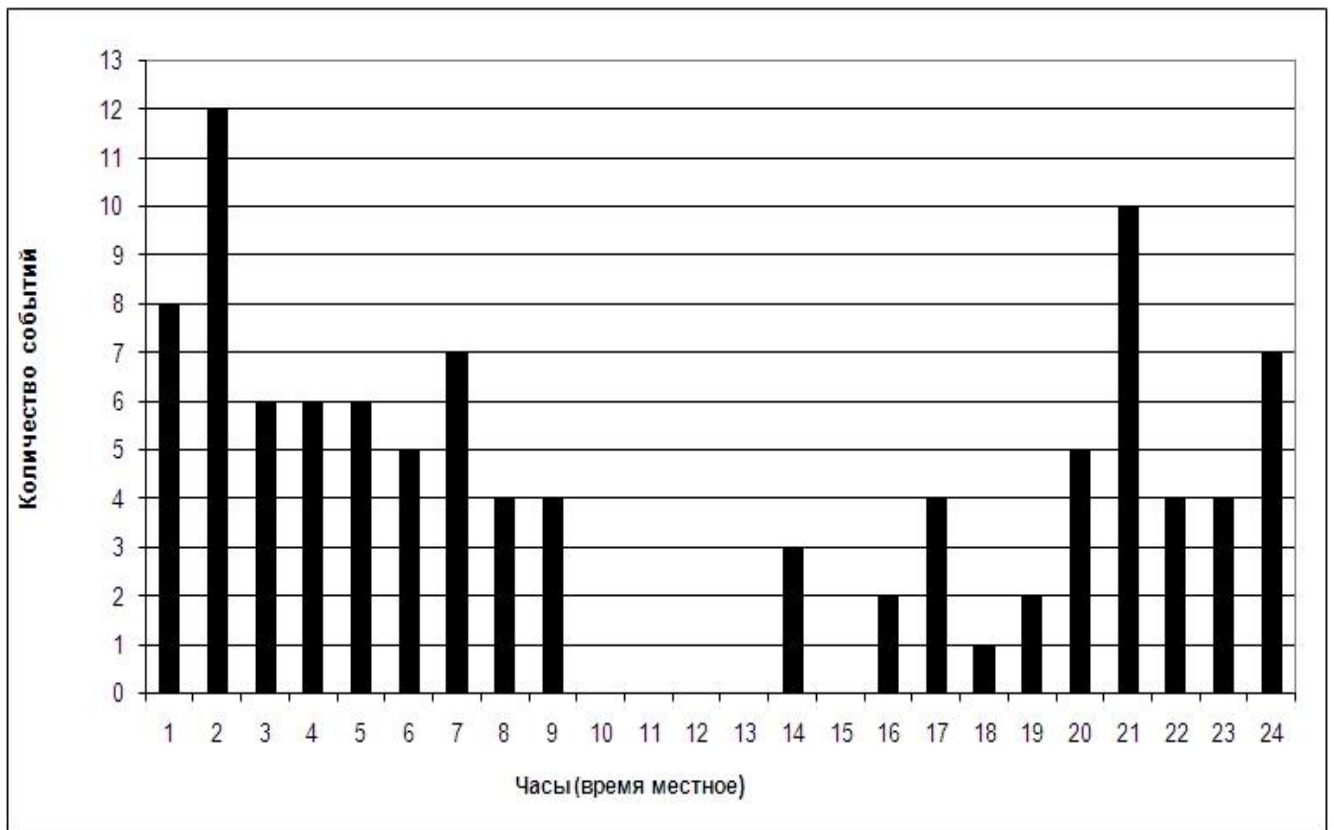


Рисунок 2.36 – Распределение сейсмических событий по времени суток в районе шахты «Березовская»

Для шахты «Распадская» аналогичная гистограмма интересна тем, что активизированная область находится в зоне аварии, где добыча угля в период проведения эксперимента не проводилась – зона 1 на рисунке 2.37. Соответственно, на гистограмме отсутствует характерный провал, соответствующий времени технологической смены. В зоне 3 также нет этого провала, так как в ней не ведется добыча угля. В зоне 2 отмечается небольшое ослабление техногенной сейсмичности в период с 9 до 13 часов. В этой зоне имеются горные выработки, но нет информации о работе лав. Судя по гистограмме, добыча угля в зоне 2 в течение эксперимента проводилась (см. рисунок 2.37).

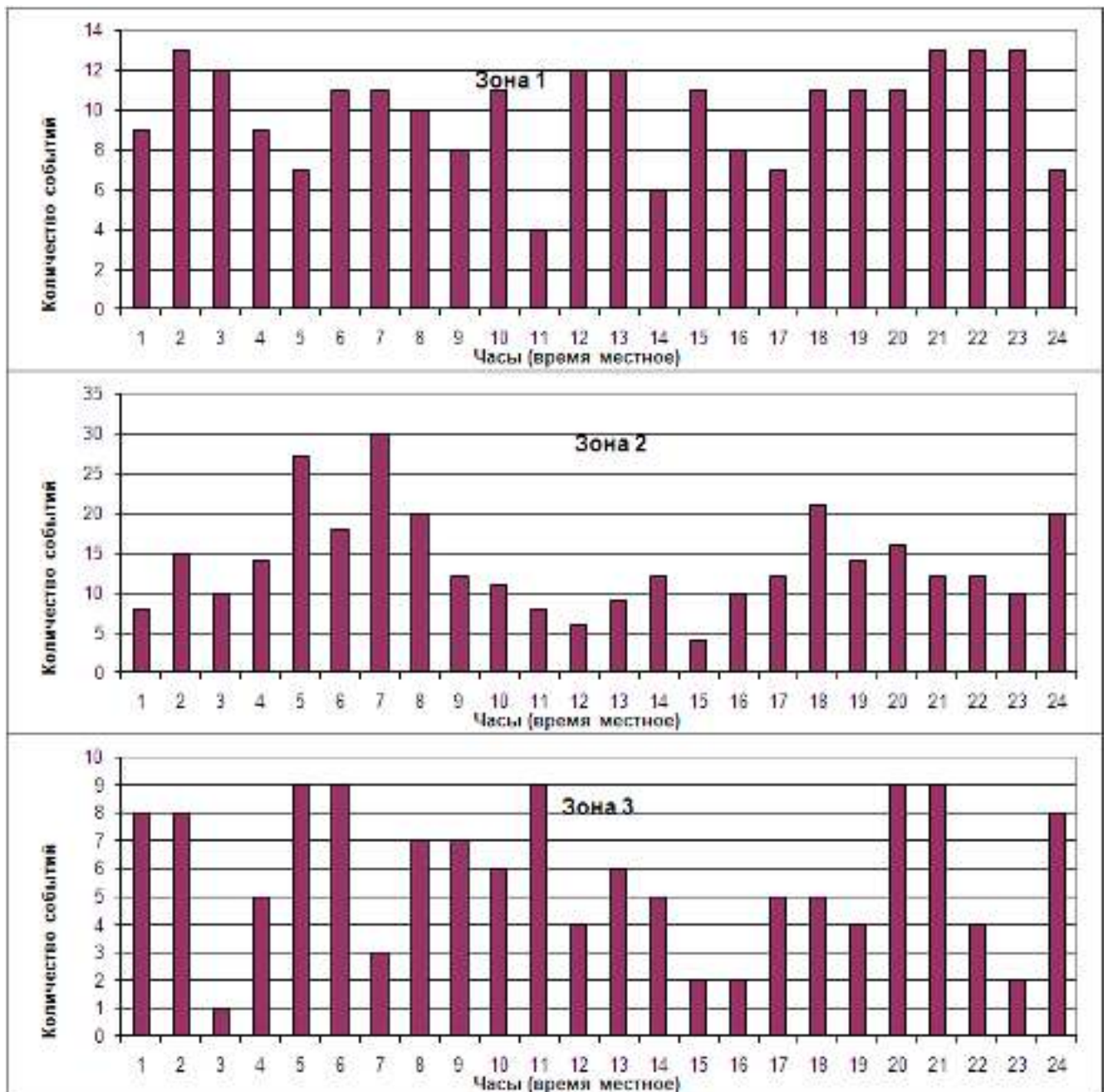


Рисунок 2.37 – Распределение сейсмических событий по времени суток в районе шахты «Распадская» (зоны соответствуют рисунку 2.28)

Выше приведены два варианта доказательства влияния сильной вибрации при добыче угля подземным способом на режим развития техногенной сейсмичности. В обоих случаях вибрационное воздействие (влияние горных работ) значительно изменяет сейсмический режим активизированной зоны.

Следует отметить, что влияние активной добычи твердых полезных ископаемых на уровень наведенной сейсмичности отмечалось и в других регионах. К примеру, фиксировалось уменьшение количества сейсмических событий в выходные дни и в Рождественский перерыв в золотодобывающем руднике ЮАР

[Mendecki and Lotter, 2011]. Также отмечалась высокая корреляция индуцированной сейсмичности с активностью добычи угля подземным способом в шахтах Юты, США [Arabacz et al, 2005]. На рудниках Североуральского Бокситового месторождения фиксируется рост количества слабых сейсмических событий в часы проведения взрывных работ [Пономарев и др., 1992]. Подобная же зависимость отмечается и на Таштагольском железорудном месторождении на юге Кемеровской области [Адушкин, Турунтаев, 2015]. На полиметаллических рудниках Талнахско-Октябрьского месторождения (Норильск) фиксировалась взаимосвязь сейсмоактивности с объемами бурения разгрузочных скважин и количеством добываемой горной массы [Опарин и др., 2008]. Высокая степень приуроченности сейсмических событий ко времени работы угледобывающего комбайна (а именно резкое снижение количества событий в период профилактики оборудования и иных перерывов в его работе) зафиксирована на шахтах Воркутинского угольного бассейна [Змушко, Турунтаев, Куликов, 2011]. Хорошая корреляция распределения сейсмических событий по часам дня и дням недели с режимом горных работ отмечается и в работе [Gibowicz, 1990].

Сейсмические активизации вблизи шахт явно связаны с опасными явлениями. Возможность управлять сейсмической активностью в таких зонах – это новый уровень безопасности добычи угля. Теперь рассмотрим третий вопрос: можно ли «со стороны» оказывать воздействие на сейсмический процесс около лавы.

На рисунке 2.38 представлено распределение количества техногенных землетрясений в день. Бреевская и Толмачевская лавы расположены параллельно и отстоят друг от друга примерно на 500 м (см. рисунок 2.6). Бреевская лава закончила свою работу к концу декабря 2007 г. Это значительно ослабило техногенную сейсмичность около нее, но в тоже время существенно усилило сейсмическую активность около Толмачевской лавы [Еманов А.Ф. и др., 2009а]. При этом режим работы на Толмачевской лаве в ноябре 2007 г. – январе 2008 г. существенно не менялся. Следовательно, работы на Бреевской лаве снижали интенсивность сейсмического процесса в районе Толмачевской лавы. Фактически

начиная с удаления около 500 метров оказывается воздействие на техногенную сейсмичность около работающей лавы. Рассмотренный эксперимент доказывает возможность создания воздействия «со стороны» на активизированную зону с целью ослабления техногенной сейсмичности (см. рисунок 2.38).

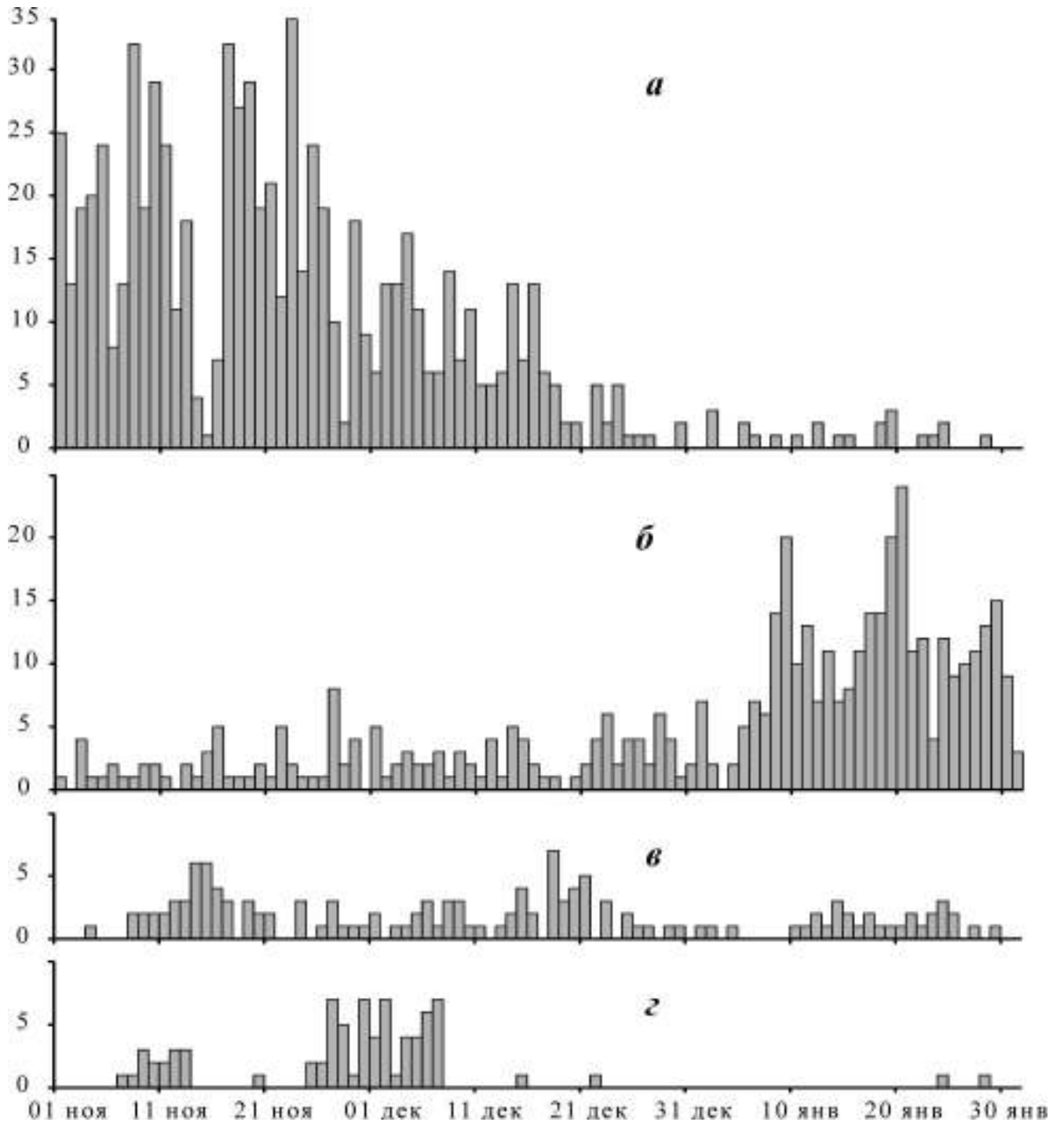


Рисунок 2.38 – Развитие сейсмического процесса во времени в районе г. Полысаево в течение 2 этапа – с 1 ноября 2007 г. по 31 января 2008 г. (карту эпицентров см. на рисунке 2.6).

Горные выработки: *а* – Бреевская, *б* – Толмачевская, *в* – Северо-Западная, *г* – Надбайкаимская. По вертикали – количество событий

2.6. Выводы

Существование ярко выраженных сейсмических активизаций непосредственно в осадочном бассейне Кузнецкой впадины – факт новый. Возникает вопрос об условиях их возникновения. Экспериментальные работы, описанные в данной главе, выполнены в четырех достаточно удаленных друг от друга районах Кузбасса, и во всех районах обнаружена наведенная сейсмичность. При этом разработка угля в ряде случаев происходит без возникновения сейсмических активизаций. Также обращает на себя внимание наличие в осадочном бассейне активизаций, которые не имеют явной пространственной связи с горными выработками. Подобных активизаций в других межгорных впадинах Алтае-Саянского региона не фиксируется. Возможно, напряженное состояние осадочного бассейна Кузнецкой впадины отличается от других впадин и немалую роль играет многократная подработка с целью добычи угля в прошлые годы. Осадочные породы Кузнецкой впадины в значительной степени деформированы [Дудушкина, Бобров, 1974] и фактически техногенное воздействие при добыче осуществляется в условиях напряженной среды. Наведенная сейсмичность, существующая отдельно от горных выработок, в работе [Пономарев, 2008] объяснена как сейсмичность, зародившаяся около выработки и пространственно сместившаяся от нее. Однозначного экспериментального доказательства этой гипотезы пока не получено. Ответ на данный вопрос могли бы дать эксперименты по непрерывному мониторингу зон техногенных активизаций.

При достижении горнодобывающими работами больших глубин, когда достигаются предельно-прочностные характеристики горных пород, отмечаются несоответствия между принятыми представлениями и фактическим состоянием горных пород вокруг подземных выработок. В работе [Курленя, Опарин, 1999] в качестве причины такого несоответствия указывается явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. Суть этого явления заключается в том, что вокруг подземных выработок, расположенных на глубине, при которой гравитационная составляющая напряжений близка к пределу

прочности пород на одноосное сжатие либо превышает его, возникают кольцеобразные чередующиеся зоны ненарушенных и разрушенных пород. В работе [Курленя, Сердюков, 1999] показано, что вибросейсмических колебаний малой интенсивности достаточно для возникновения на глубинах до нескольких километров нелинейной реакции массивов горных пород, обусловленную их блочно-иерархическим строением.

Техногенные активизации при добыче угля подземным способом возникали и в других регионах мира. В частности, в Чехии [Холуб, 2007] сейсмическая активность контролируется локальной сетью станций, но ее детальность недостаточна для определения глубин сейсмических событий. В Кузбассе же удалось получить детальную информацию о нескольких техногенных сейсмических активизациях при добыче угля подземным способом. Примечателен тот факт, что как правило активизирована область под выработкой на глубину до 1 км. Это позволяет сделать определенные выводы о механизмах активизаций. Маленькая подземная выработка способна активизировать довольно большую область во вмещающей среде. Такая ситуация возможна, когда изменяются свойства среды, находящейся в и без того напряженном состоянии. Возможно, триггером является изменение состояния наполнения горных пород флюидами в значительной области. В такой ситуации сравнительно маленькая по размерам горная выработка может создать условия для возникновения техногенной сейсмической активизации в существенно большем объеме вмещающих горных пород.

Сведения о блочном строении осадочных пород, полученные по данным сейсмической томографии, позволяют говорить о модели, описывающей возникновение сейсмических активизаций, их приуроченность к границам блоков. Однако имеющихся фактов пока недостаточно для однозначных выводов о роли блочной структуры осадков Кузнецкой впадины в процессе формирования сейсмических активизаций.

Экспериментально доказана значительная роль вибрационного воздействия при ведении горных работ в развитии техногенного сейсмического процесса.

Одного изменения флюидного режима без наличия вибрации недостаточно для начала заметного техногенного сейсмического процесса. Это подтвердилось в ходе экспериментов в районе г. Анжеро-Судженск и шахты «Первомайская», где не работало мощное угледобывающее оборудование и соответственно не зафиксировано сейсмических активизаций. Во всех же случаях, когда сети сейсмологических станций разворачивались около выработок с работающими лавами, фиксировались сопровождающие процесс добычи сейсмические активизации. По-видимому, высокопроизводительное угледобывающее оборудование одновременно оказывает мощное вибрационное воздействие на вмещающую среду совместно с изменением флюидного режима. Оно способно индуцировать сейсмичность около выработок. В качестве способа воздействия на сейсмичность активной зоны обосновано изменение флюидного состояния недр [Мирзоев и др., 2009]. Представленные эксперименты демонстрируют эффективность воздействия на сейсмичность с помощью вибрации от угледобывающего оборудования на фоне откачки флюидов.

Вибрация, безусловно, является мощным триггером в развитии наведенной сейсмичности. Ее появление или исчезновение практически сразу отражается на сейсмическом режиме активизированной области. Воздействие на активизированную область промышленных взрывов с удаления около 6 км, напротив, не оказывает заметного влияния.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В РАЙОНЕ БАЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 18 ИЮНЯ 2013 Г., СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН

3.1. История сейсмичности в очаговой зоне

Ощутимые землетрясения в Кузбассе известны как в поздне-инструментальный, так и в ранне-инструментальный периоды регистрации. При этом наиболее мощные из известных – Кузнецкое-1 и Кузнецкое-2, произошли в доинструментальный период, в 1898 и 1903 гг. ($M=5.7$ и 6.1 соответственно) вблизи г. Новокузнецка [Лаврентьев, 1971] (Рисунок 3.1). Данные землетрясения вызвали сотрясения с интенсивностью до 7 баллов в ближайших деревнях и поселках.

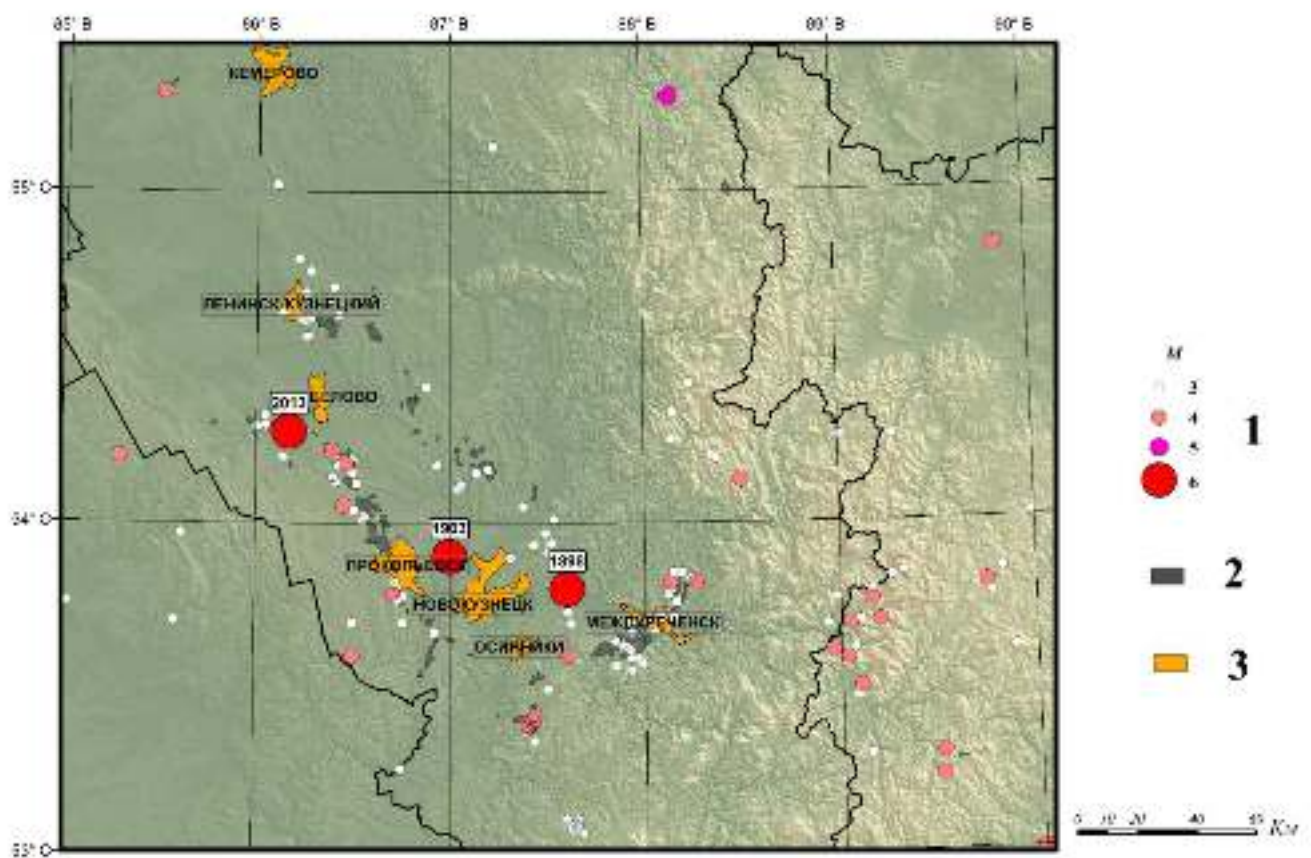


Рисунок 3.1 – Карта эпицентров землетрясений Кузбасса с $M>2$ за период 1734–2018 гг.

Условные обозначения: 1 – магнитуда; 2 – угледобывающие карьеры; 3 – населенные пункты

Сейсмичность вблизи разреза «Бачатский» изучалась и до Бачатского землетрясения [Еманов А.Ф. и др., 2012а; Еманов А.Ф. и др., 2014б; Еманов А.Ф. и др., 2014в; Еманов А.Ф. и др., 2014г; Еманов А.Ф. и др., 2016; Рогожин, Овсяченко, Ларьков, 2017]. До 2012 г. в районе разреза «Бачатский» региональной сетью сейсмостанций были зафиксированы 6 землетрясений (с 1992 по 2011 гг., $1.3 \leq ML \leq 2.0$); все относительно крупные землетрясения ($ML > 2$) фиксировались, начиная с 2012 г. (Рисунок 3.2). По данным региональной сети сейсмических станций произошли землетрясения 9 февраля 2012 г. ($ML=4.3$) и 4 марта 2013 г. ($ML=3.9$), вызвавшие ощутимые колебания в ряде городов Кемеровской области (см. рисунок 3.2). Плотная сеть из 25 временных автономных комплексов регистрации, работавшая в период 2 марта – 15 мая 2012 г. в окрестностях угольного разреза [Еманов А.Ф. и др., 2014б; Еманов А.Ф. и др., 2014в], зафиксировала 42 сейсмических события с глубинами гипоцентров $h=1-3$ км, не являющихся промышленными взрывами и пространственно увязанных с разрезом.

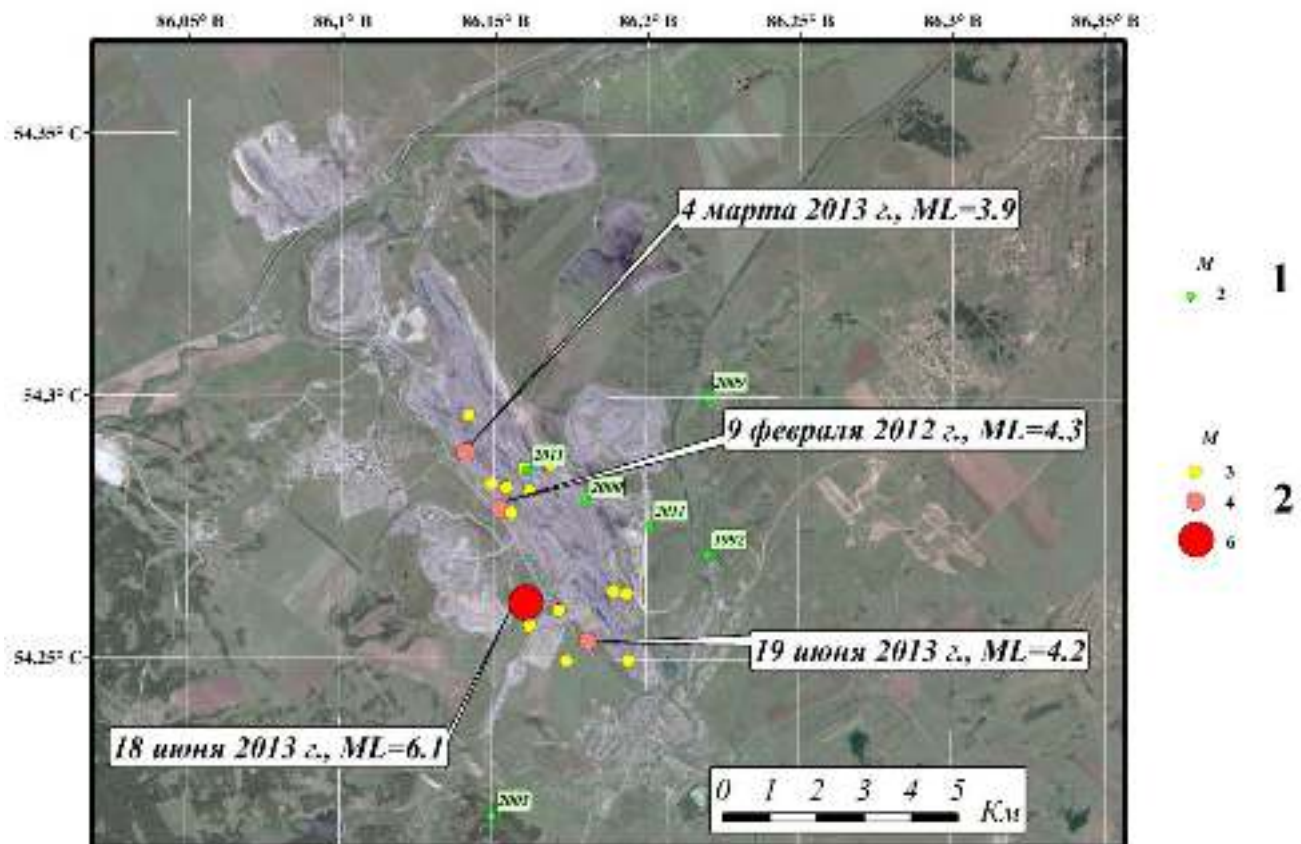


Рисунок 3.2 – Карта эпицентров землетрясений в районе угольного разреза «Бачатский».

Условные обозначения: 1 – магнитуа, период до 2012 г.; 2 – магнитуа (только события с $M > 2$), период 2012–2019 гг.

3.2. Исследование сейсмического процесса, сопровождавшего землетрясение 9 февраля 2012 г.

Основанием для исследований в окрестности открытых горных выработок послужило крупное землетрясение в Кузбассе, произошедшее 9 февраля 2012 г. в 13^h24^m UTC (20^h24^m местного времени) с магнитудой $M_L=4.3$ и координатами эпицентра ($\varphi_{и}=54.28^\circ\text{N}$, $\lambda_{и}=86.15^\circ\text{E}$), попадающими на территорию разреза «Бачатский» (Рисунок 3.3). Данное событие ощущалось во многих городах Кемеровской области. Это вызвало большой общественный резонанс и послужило основанием для детального изучения сейсмичности данного разреза.

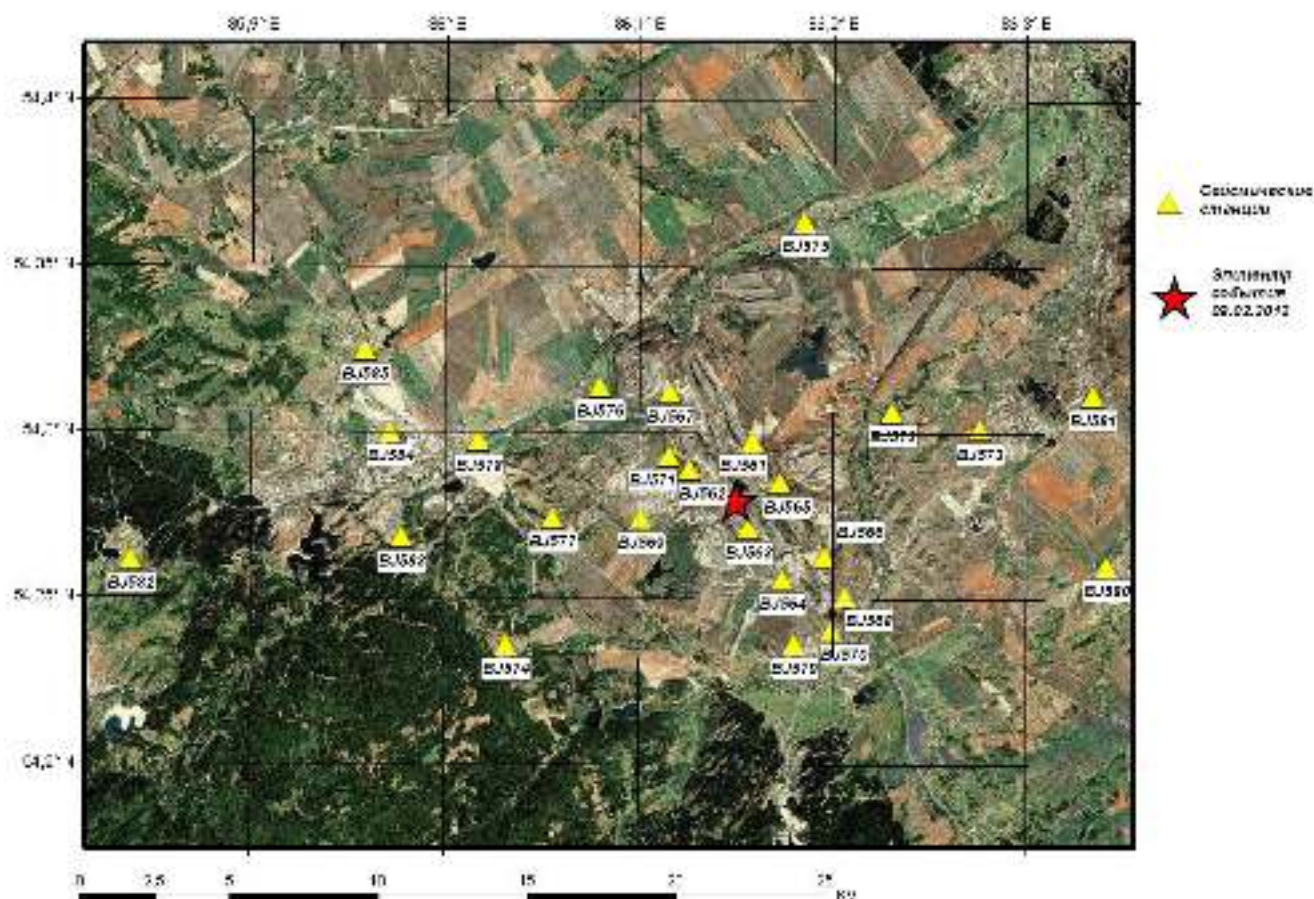


Рисунок 3.3 – Расположение эпицентра землетрясения 9 февраля 2012 г. и сейсмостанций временной сети (2 марта – 15 мая 2012 г.)

Взрывные работы на разрезе проводятся только в светлое время суток. Данное событие произошло в запрещенное для взрывов время, однако по наличию мощных поверхностных волн на сейсмограммах сети региональных станций можно говорить о расположении гипоцентра вблизи поверхности. Руководство угольного разреза «Бачатский» факт проведения взрыва отрицало. Кроме того, магнитуда данного события как минимум на единицу превышает магнитуду наиболее крупных промышленных взрывов, проводимых в данном разрезе. Если это не взрыв, то есть основания предполагать, что добыче угля в разрезе сопутствует опасный сеймотектонический процесс, который можно отследить, регистрируя землетрясения малых энергий.

Наблюдения временной локальной сетью из 25 станций в районе разреза «Бачатский» и его окрестностях проводились в период 2 марта – 15 мая 2012 г. [Еманов А.Ф. и др., 2014б]. Сейсмостанции, состоящие из автономных цифровых комплексов регистрации сейсмических сигналов «Байкал АС-75» [Семибаламут, Рыбушкин, 2003] и короткопериодных сейсмодатчиков СК-1П, были расположены на дневной поверхности и непосредственно в районе проведения угледобывающих работ, и в жилых районах на территории приблизительно 30×15 км (см. рисунок 3.3). Столь плотная система наблюдений позволяет детально изучить сейсмический режим активизированной области и ее строение [Арефьев, 2003].

За период работы временной сети станций (73 дня) было зарегистрировано 193 сейсмических события в пределах координат 54°–54°30'N, 85°30'–86°30'E. Короткозамедленные промышленные взрывы (Рисунок 3.4) и техногенные землетрясения (Рисунок 3.5) отчетливо диагностировались по форме записи, но детальное исследование природы событий опиралось не только на результаты, полученные сейсмологическими методами, но и на точную информацию от взрывников разреза.

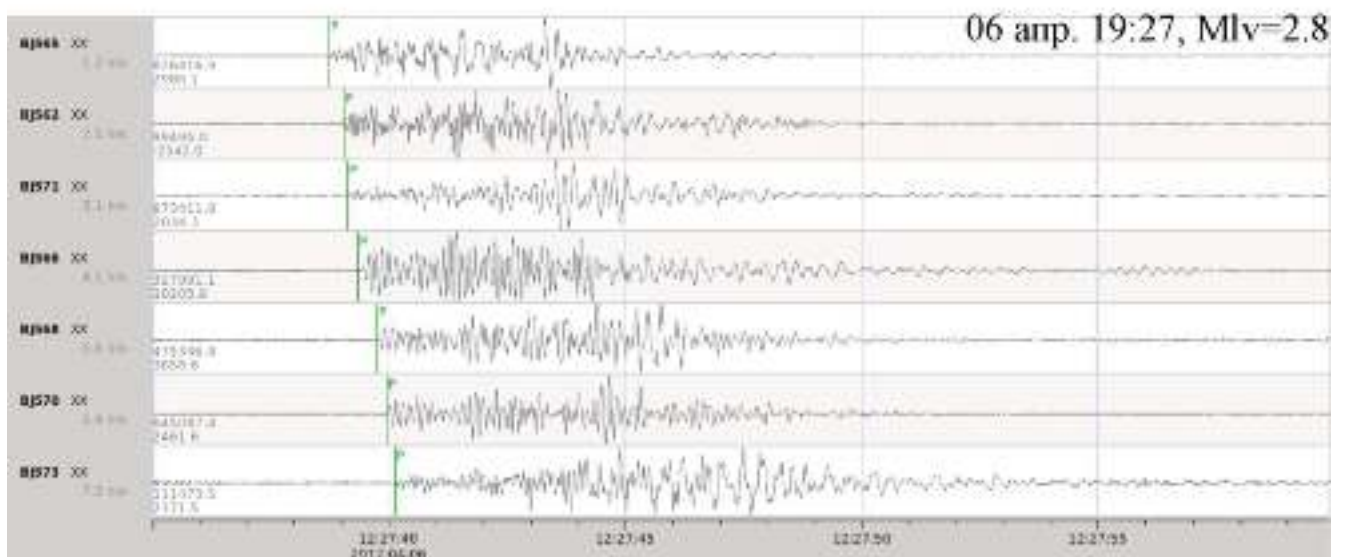
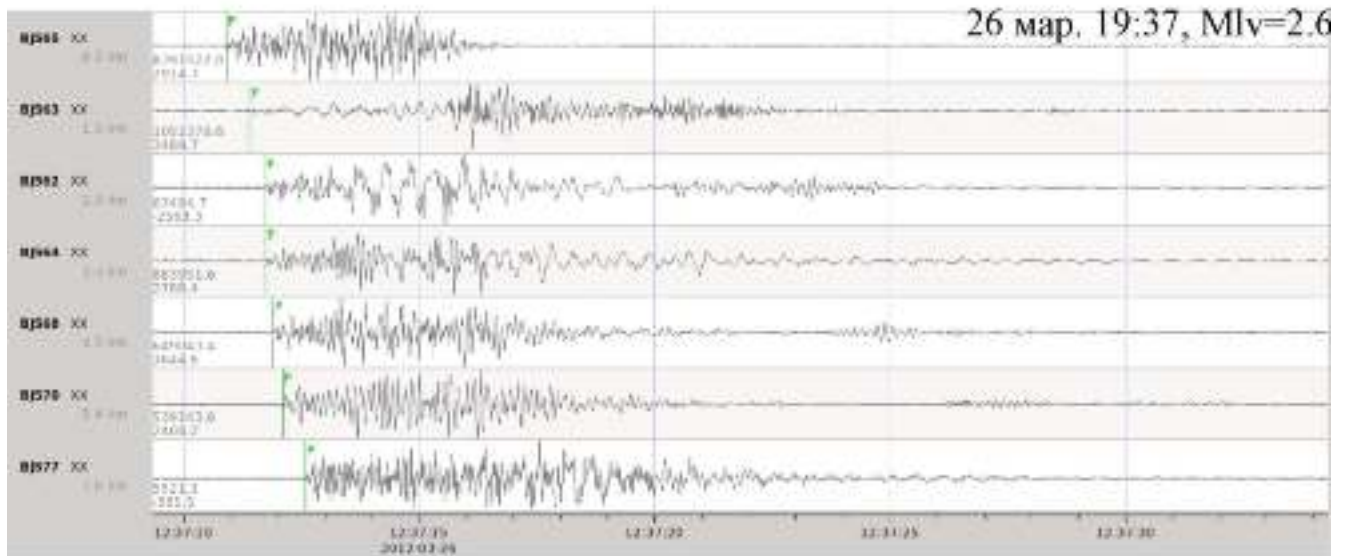
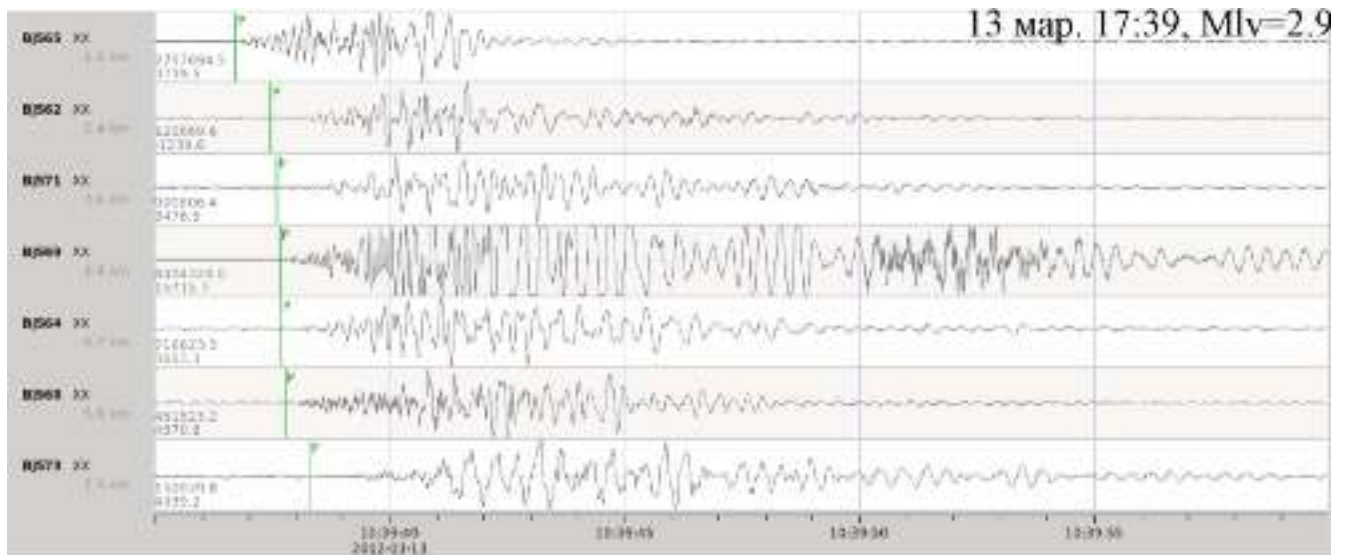


Рисунок 3.4 – Примеры записей промышленных взрывов на разрезе «Бачатский» сейсмостанциями временной сети, 2012 г.

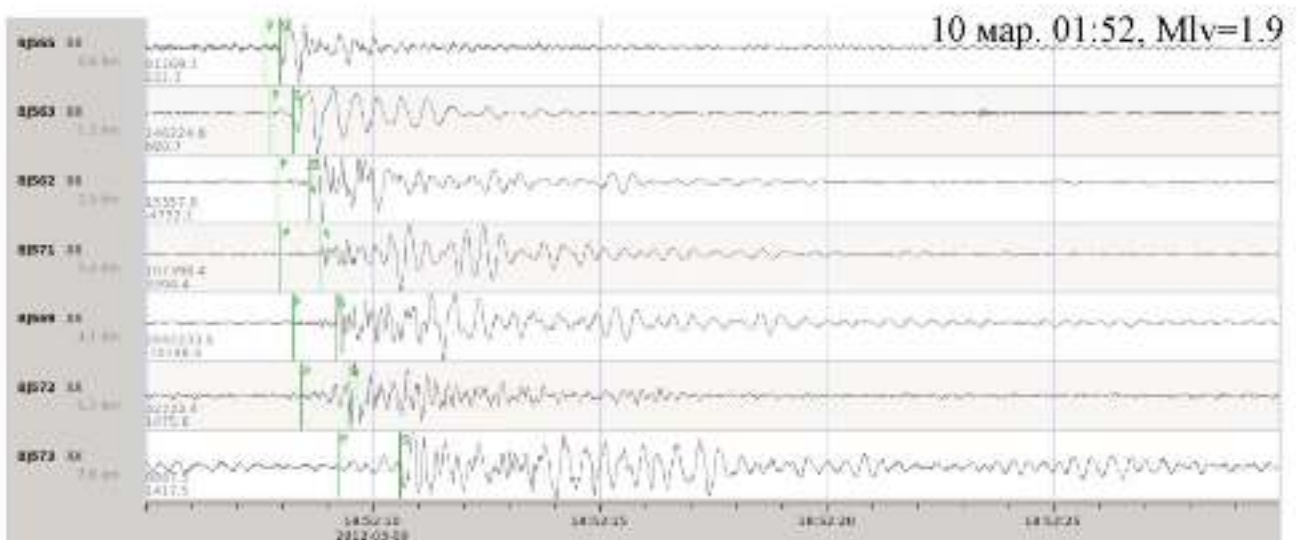
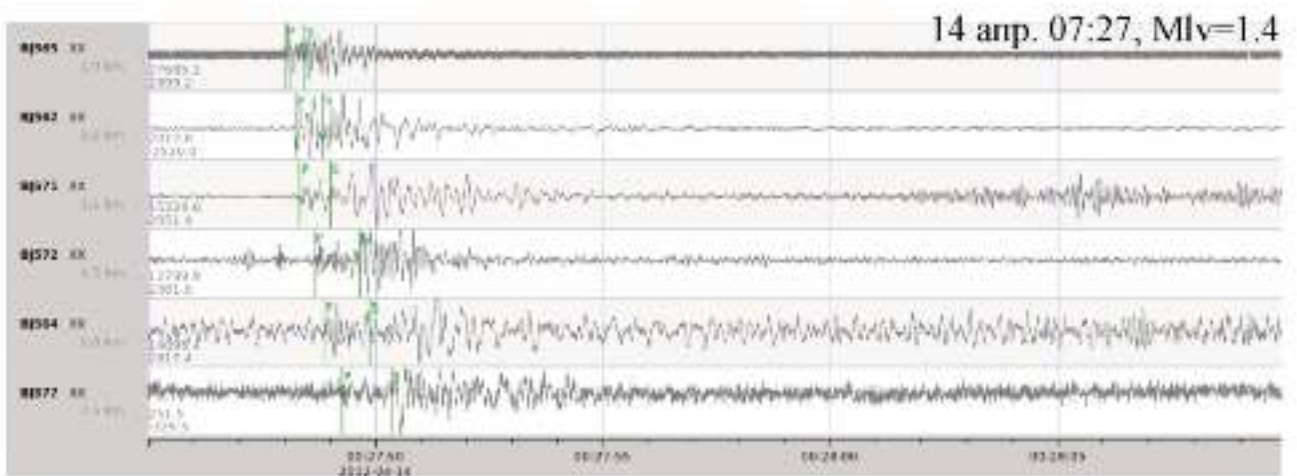
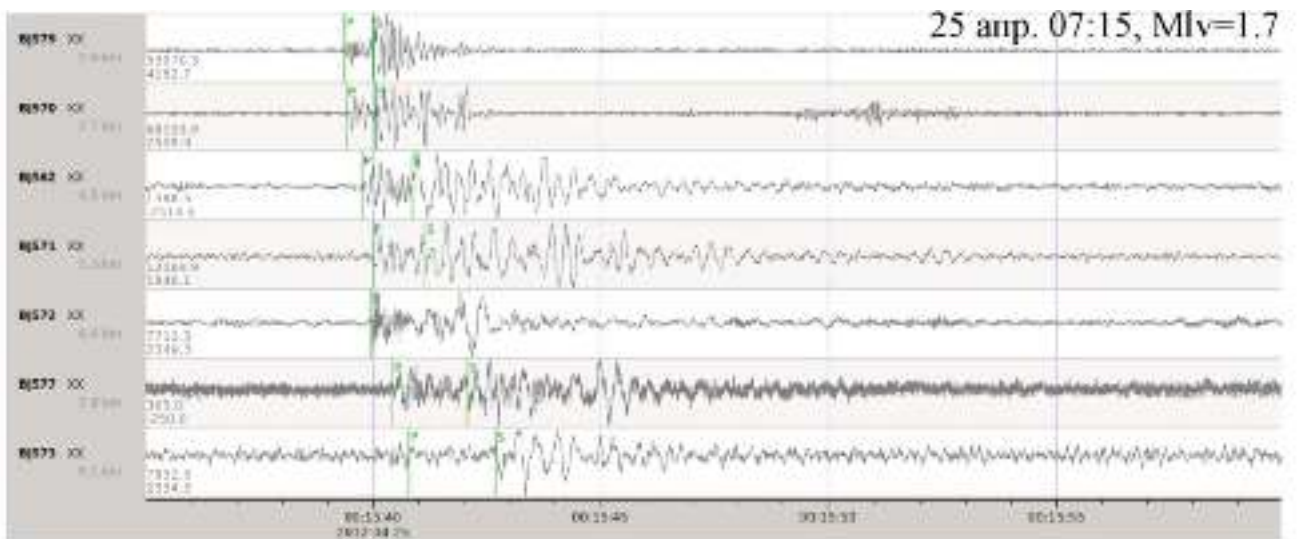


Рисунок 3.5 – Примеры записей техногенных землетрясений на разрезе «Бачатский» сейсмостанциями временной сети, 2012 г.

На рисунке 3.4 представлены записи промышленных взрывов на близких станциях временной сети. Короткозамедленный характер процесса взрывов

обеспечивает малую разрешенность сейсмограмм. Фактически поле продольных волн маскирует вступление поперечных волн, при этом ярко выражены цуги поверхностных волн. Сейсмограммы техногенных землетрясений (см. рисунок 3.5) более разрешены во времени. Хорошо выделяются вступления поперечных волн, поверхностные волны от землетрясений по интенсивности незначительно уступают поверхностным волнам на записях промышленных взрывов.

Для землетрясений, зарегистрированных в центре сети станций, а точнее, лоцированных в районе разреза «Бачатский» и северо-западной окраины Гурьевского рудника, для уточнения положения гипоцентра применялся пакет программ HYPOINVERSE-2002 [Klein, 2002] с использованием локальной скоростной модели. Энергетические характеристики событий представлены в единицах локальной магнитуды ML , которая связана с объемной магнитудой MS эмпирическим соотношением (3.1), полученным для Алтае-Саянского региона и, соответственно, может быть переведена в единицы выделившейся сейсмической энергии E_S (джоули) по формуле (3.2) [Bormann, 2002]:

$$MS = 1.27 \cdot (ML - 1) - 0.016 \cdot ML^2, \quad (3.1)$$

$$\text{Log} E_S = 4.4 + 1.5 \cdot (1.27 \cdot (ML - 1) - 0.016 \cdot ML^2). \quad (3.2)$$

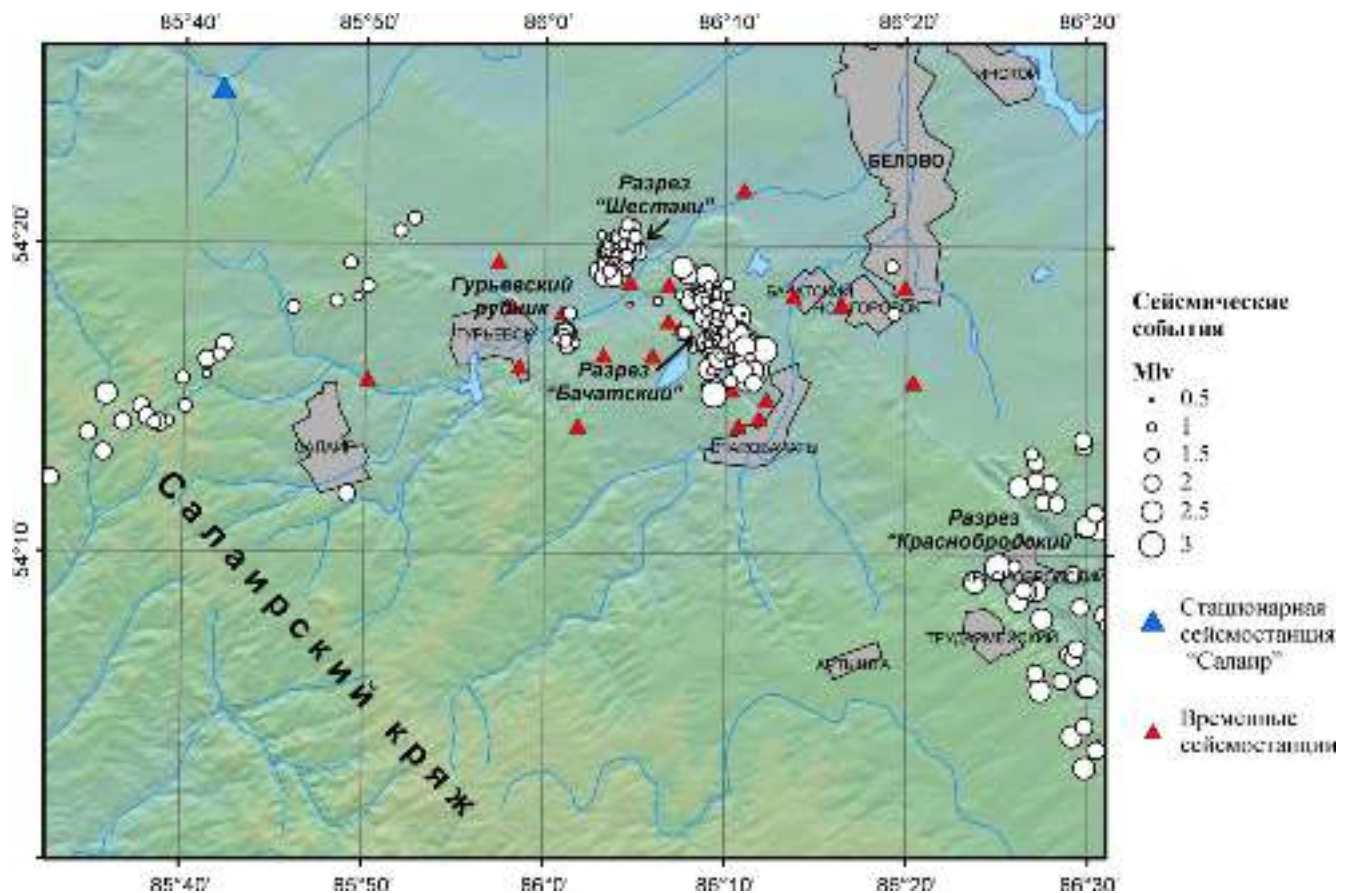


Рисунок 3.6 – Карта эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных временной сетью сейсмостанций в период 2 марта – 15 мая 2012 г.

На рисунке 3.6 представлены эпицентры сейсмических событий, зарегистрированных временными станциями. Расстановка станций такова, что наибольшая точность определения положения эпицентров достигается в районе разрезов «Бачатский» и «Шестаки», что заметно отражается на количестве зарегистрированных сейсмических событий в районе этих разрезов. Небольшое количество событий фиксируется около Гурьевского рудника и достаточно много – в районе разреза «Краснобродский». Кроме того, выделяется линейная цепь событий, которая не увязана с горными предприятиями. Относительно последних можно высказать предположение, что эти события можно отнести к природной сейсмичности без выраженной связи с техногенными процессами. По событиям в районе разреза «Краснобродский», который находится на удалении от станций, не представляется возможным с хорошей точностью определить глубины, а кроме того, нет информации о проводимых на разрезе промышленных взрывах.

Проанализируем распределение сейсмических событий в окрестности разрезов «Бачатский» и «Шестаки» по энергии и во времени (Рисунок 3.7). Большая

часть событий зарегистрирована в светлое время суток (см. рисунок 3.7, а), а именно, с 13 до 19 ч местного времени, что позволяет косвенно отнести эти события к промышленным взрывам. Эти же события имеют более высокую сейсмическую энергию (в основном $ML=1.5-3.3$) (см. рисунок 3.7, б).

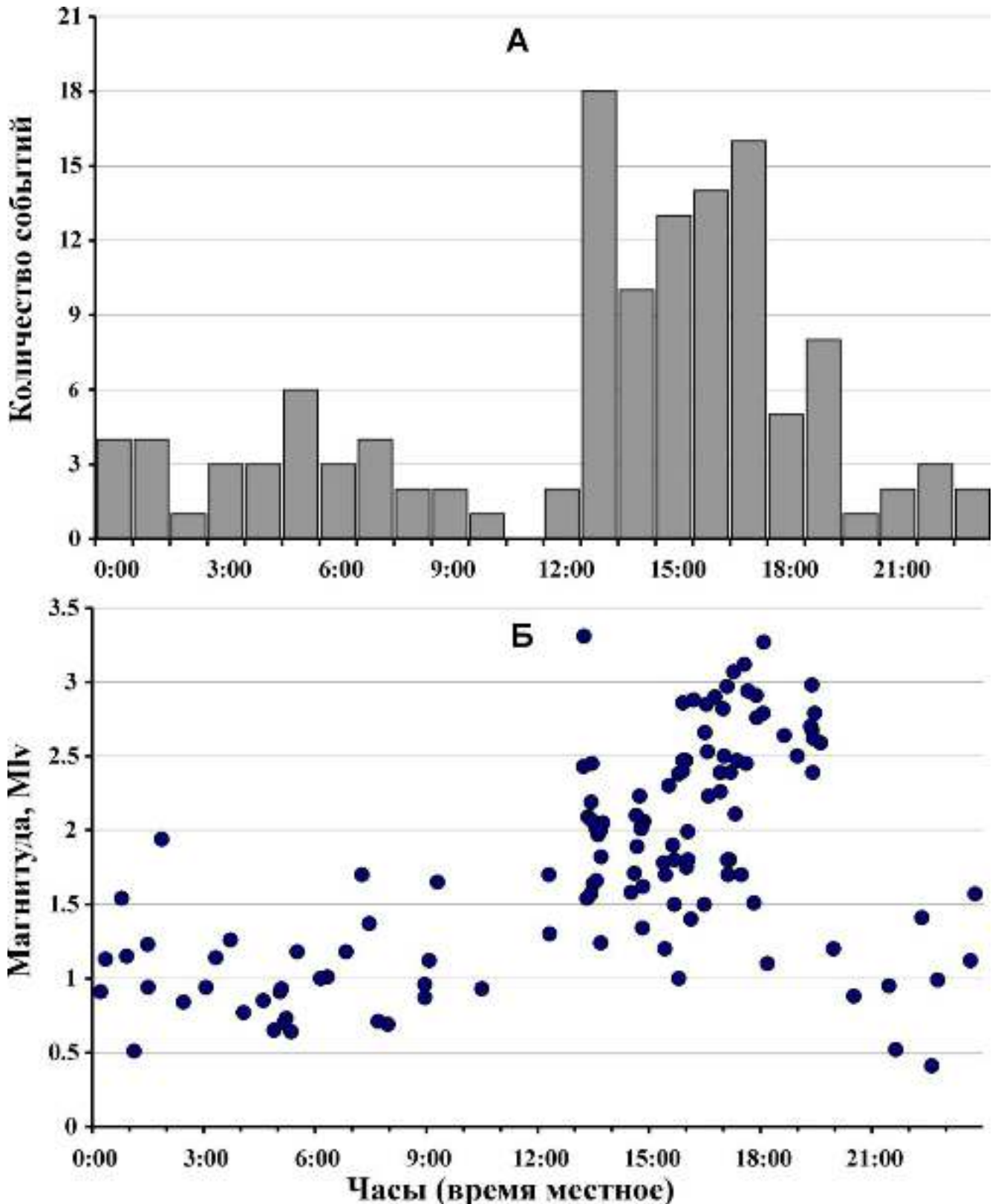


Рисунок 3.7 – Распределение количества событий в зависимости от времени суток (а) и их

развертка по выделенной энергии (б) в окрестностях разрезов «Бачатский» и «Шестаки» за период 2 марта – 15 мая 2012 г.

Положение эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных в период работы локальной сети в районе угольного разреза «Бачатский», показано на рисунке 3.8. В нашем распоряжении имелись акты выполненных взрывных работ на Бачатском угольном разрезе, поэтому события были строго идентифицированы по типу. Для разреза «Шестаки» и Гурьевского рудника такой информации не было, поэтому типы событий определены по косвенным признакам: времени суток и виду записи на сейсмостанциях.

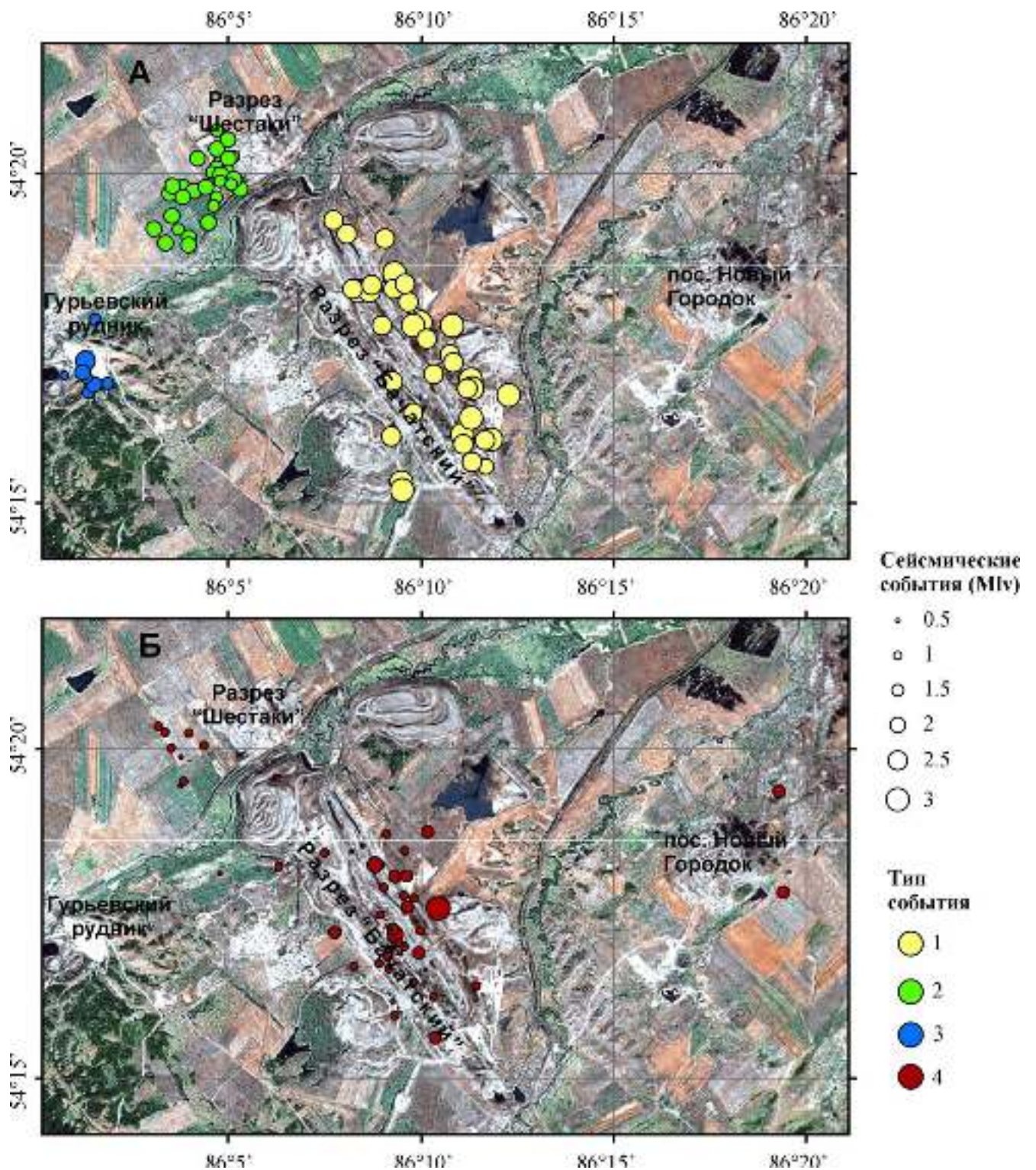


Рисунок 3.8 – Положение эпицентров сейсмических событий (а – промышленные взрывы; б – техногенные землетрясения) в районе разреза «Бачатский», зарегистрированных локальной сетью сейсмостанций в период 2 марта – 15 мая 2012 г.

Условные обозначения: 1 – подтвержденные горняками взрывы в районе разреза «Бачатский»; 2 – предполагаемые взрывы в районе разреза «Шестаки» (нет информации); 3 – предполагаемые взрывы в районе Гурьевского рудника (нет информации); 4 – техногенные землетрясения

Всего за время работы временной сети зафиксировано 42 техногенных землетрясения, 38 из которых — непосредственно в разрезе «Бачатский».

На картах, представленных на рисунке 3.8, видно, что наиболее сильные ($ML=2.2-3.3$) события являются промышленными взрывами, произведенными в разрезе «Бачатский». Основная часть событий, обозначенных как «предполагаемый взрыв» в районе разреза «Шестаки» и Гурьевского рудника, имеют магнитуды в пределах $ML=1.5-2.3$, отмечаются события и меньшей энергии ($ML=1.0-1.3$). Техногенные землетрясения, за исключением одного, находятся в более низком ($ML=0.4-2.0$) диапазоне энергий, чем промышленные взрывы.

Учитывая формулу пересчета магнитуд ML в сейсмическую энергию ES (3.2), получаем, что при техногенных землетрясениях в фоновом режиме выделяется сейсмическая энергия порядка 10^4-10^5 Дж, в то время как для промышленных взрывов характерны энергии порядка 10^7-10^8 Дж. Можно сделать вывод, что в районе разреза «Бачатский» фиксируются землетрясения фонового уровня, в общей массе слабее промышленных взрывов на 2–3 порядка. Такая же энергия землетрясений фиксируется около разреза «Шестаки».

На записях техногенных землетрясений отчетливо выделяются как P -, так и S -волны, что, скорее всего, связано с положением очага на некоторой глубине относительно дневной поверхности. Для 31 землетрясения были рассчитаны глубины: их значения варьируют в интервале 1.2–3.1 км с максимумом на глубине около 2 км (Рисунок 3.9). При регистрации события с высоким соотношением сигнал/шум всей сетью локальных станций ошибка по глубине составила 0.2 км.

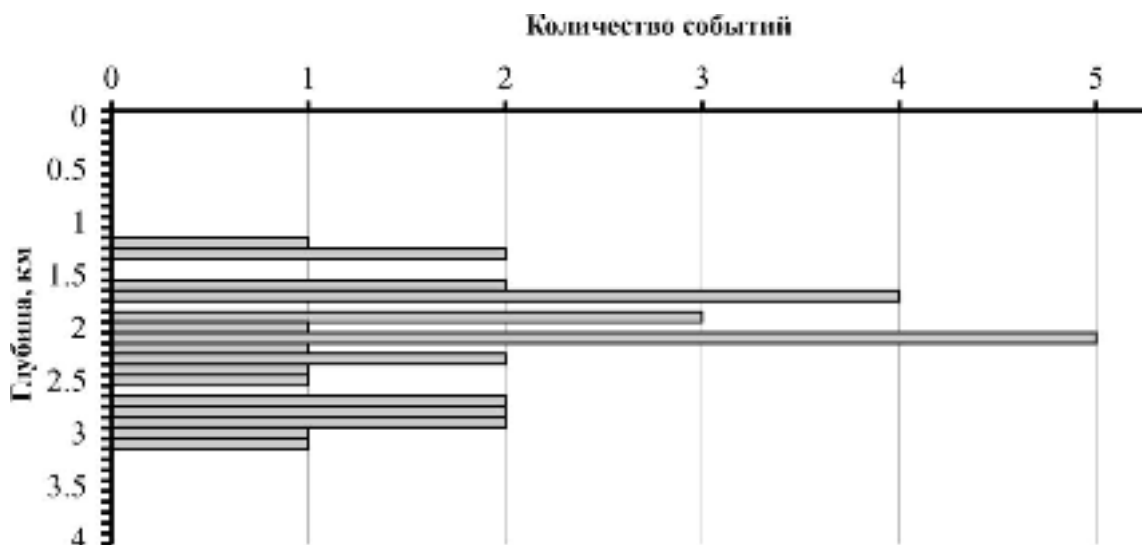


Рисунок 3.9 – Гистограмма глубин техногенных землетрясений, зарегистрированных временной сетью станций в период 2 марта – 15 мая 2012 г.

Самое сильное техногенное землетрясение, зарегистрированное за время работы локальной сети, имело магнитуду $ML=2.9$ и произошло 5 марта 2012 г. в 09^h46^m UTC. В 2012 г. – первой половине 2013 г. в районе разреза «Бачатский» регулярно происходили ощутимые землетрясения, наиболее значимое из которых (4 марта 2013 г. в 17^h30^m UTC) имело магнитуду $ML=3.9$ и вызвало заметные колебания в населенных пунктах центральной части Кузбасса.

Несмотря на рекомендации осуществлять постоянный контроль за наведенной сейсмичностью в районе разреза «Бачатский», сети станций здесь до Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г. не существовало, а региональная сеть фиксировала сейсмические события только с $ML=2$ и выше.

3.3. Бачатское землетрясение 18 июня 2013, $ML=6.1$

18 июня 2013 г. в 23^h02^m (19 июня 2013 г. в 06^h02^m местного времени) в районе угледобывающего разреза «Бачатский» в Кемеровской области произошло ощутимое землетрясение с $ML=6.1$, $mb=5.5$, $\varphi_{и}=54.261^{\circ}N$, $\lambda_{и}=86.161^{\circ}E$, $h_{и}=4$ км. По своему местоположению данное сейсмическое событие было названо Бачатским.

Угледобывающий разрез «Бачатский», заложенный в 1948 г., — один из крупнейших в Кузбассе. Его размеры: 10 км в длину, 2.2 км в ширину и 320 м в глубину. Среднегодовая добыча угля на разрезе — более 9 млн т.

3.3.1. Инструментальные и региональные данные

Сейсмограммы землетрясения уверенно регистрировались всеми станциями региональной сети (Рисунок 3.10).

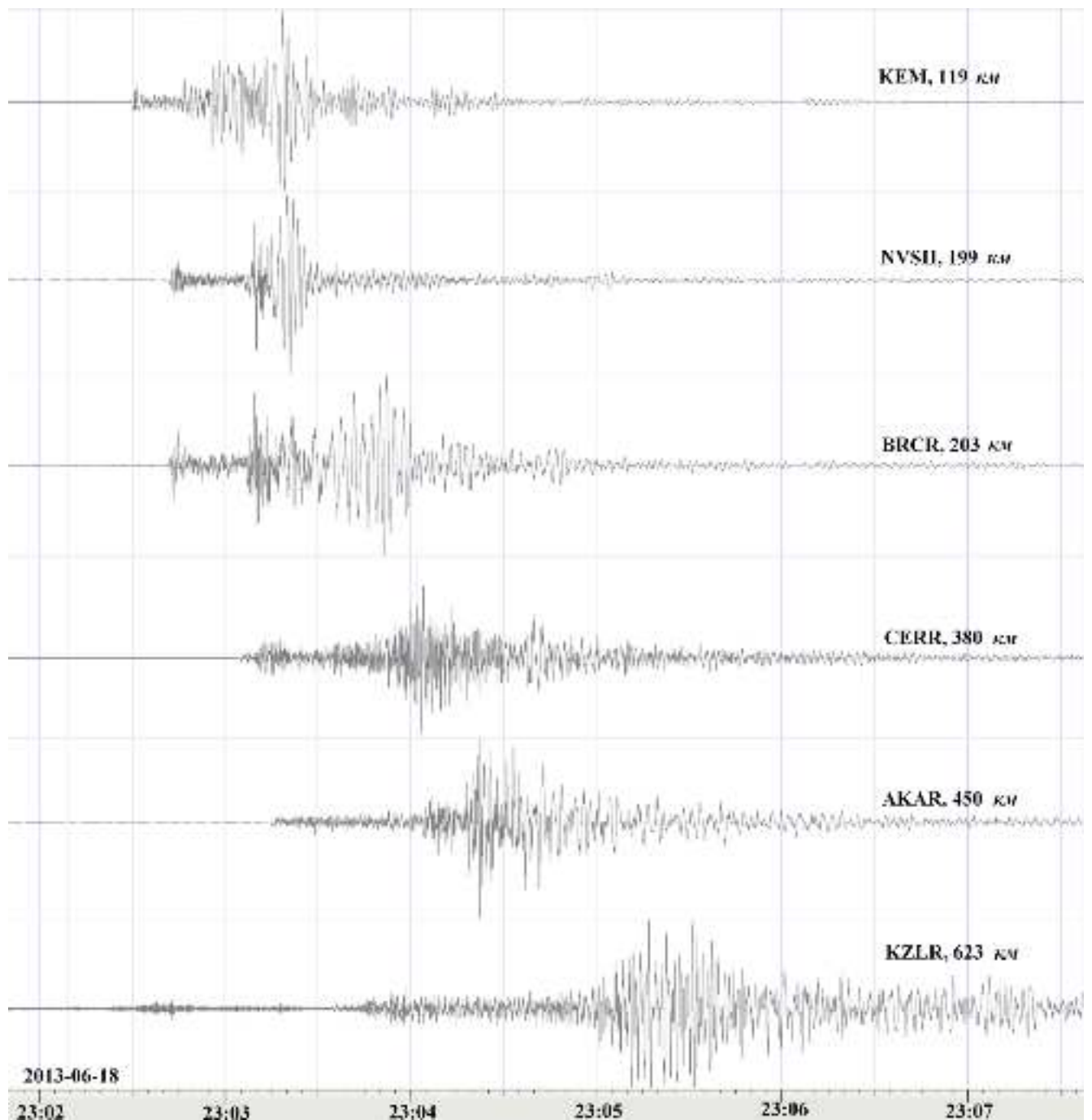


Рисунок 3.10 – Примеры записей Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г. на региональных станциях Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН (z-компоненты велосиметров). На рисунке подписаны коды станций и удаление от эпицентра

Обработка данных проводилась с использованием системы SeisComP3 [Weber et al, 2007; Hanka et al, 2010]. Определение положения гипоцентров рассчитывалось с помощью программы LocSat [Bratt and Bache, 1988] в рамках глобальной скоростной модели IASPEI91 [Kennett, 1991]. Энергия событий оценивается локальными магнитудами *ML* [Bormann, 2002].

3.3.2. Механизмы очагов

Для ряда сильных афтершоков рассчитаны механизмы очагов с использованием программы FPFIT [Reasenberg and Oppenheimer, 1985]. Рассчитанный механизм очага главного толчка (Рисунок 3.11) представляет собой практически чистый взброс с нодальными плоскостями, одна из которых является плоскостью разрыва, расположенной вдоль простирания разреза. Данный результат может являться одним из доказательств техногенной природы этого землетрясения. Кроме того, в пользу техногенной природы Бачатского землетрясения свидетельствует и сила толчка – $ML=6.1$ соотносится с размерами очага порядка 10 км [Wells and Coppersmith, 1994]. Это значение сопоставимо с длиной угольного разреза и общей протяженностью области, на которой фиксируется афтершоковый процесс. Эпицентры большинства сейсмических событий локализованы в пределах угледобывающего разреза. Отметим, что механизмы большинства афтершоков отличаются от механизма главного толчка. Принимая также во внимание результаты оценки напряженного состояния [Куприш О.В. и др., 2019], есть основания полагать, что Бачатское землетрясение обеспечило кардинальную перестройку всего поля напряжений в районе разреза.

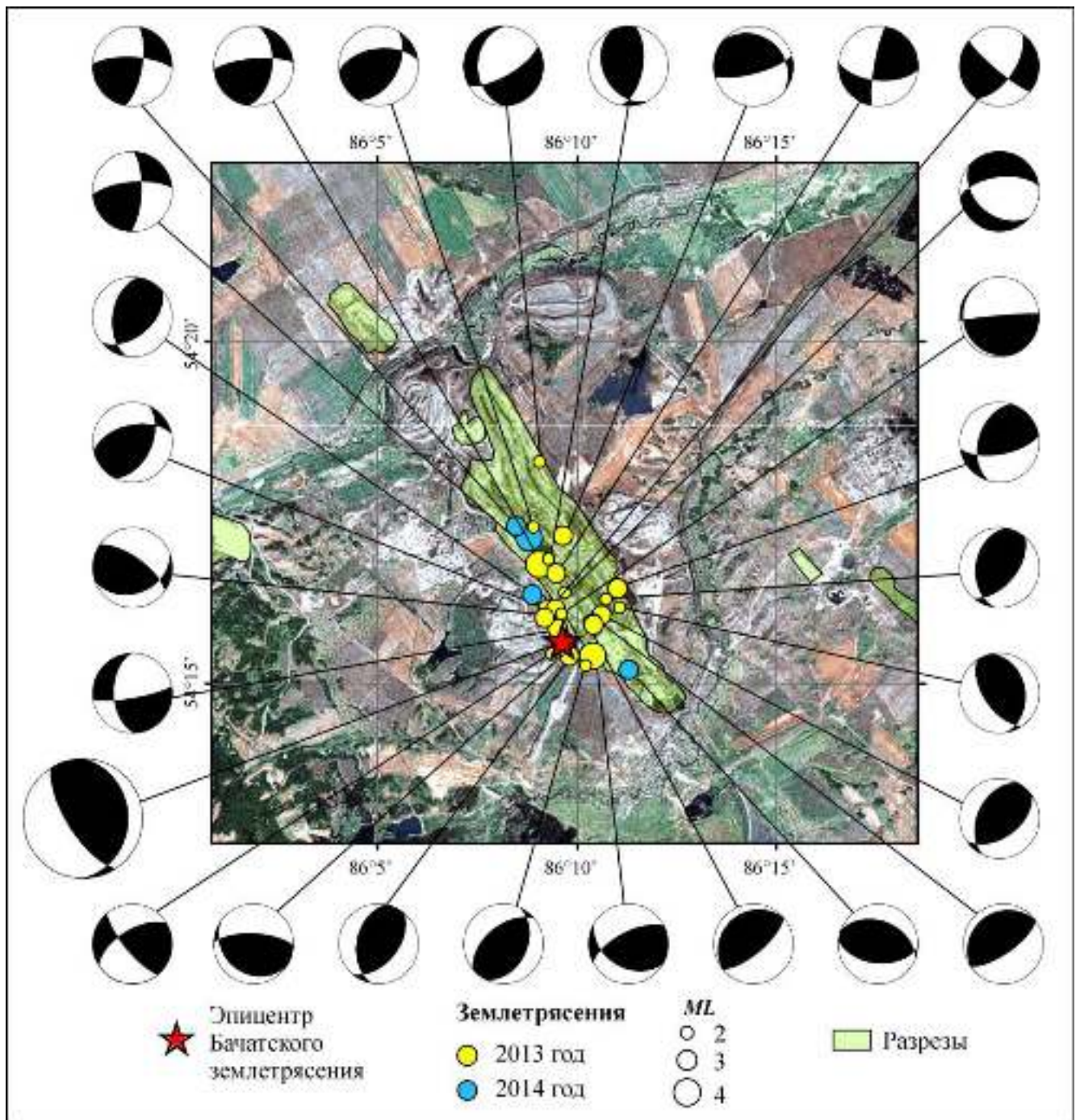


Рисунок 3.11 – Механизмы очагов Бачатского землетрясения и крупных афтершоков

Фокальные механизмы, рассчитанные для землетрясений с $ML > 2$, свидетельствуют о преобладании вертикальных подвижек в очагах. Наиболее распространенный тип механизмов – это взбросы с разноориентированными нодальными плоскостями. Также среди механизмов встречаются сбросы и сдвиго-взбросы (см. рисунок 3.11).

3.3.3. Макросейсмические данные

Результаты макросейсмического обследования территории [Еманов А.Ф. и др., 2015а] показали, что в ближайших к эпицентру населенных пунктах интенсивность сотрясений составляла до 7 баллов. Были отмечены разрушения зданий в ряде близлежащих поселков. В пятибалльную зону попали некоторые относительно крупные города Кузбасса (Гурьевск, Белово, Киселевск и др.), а ощущалось землетрясение и за пределами Кемеровской области (Рисунок 3.12).

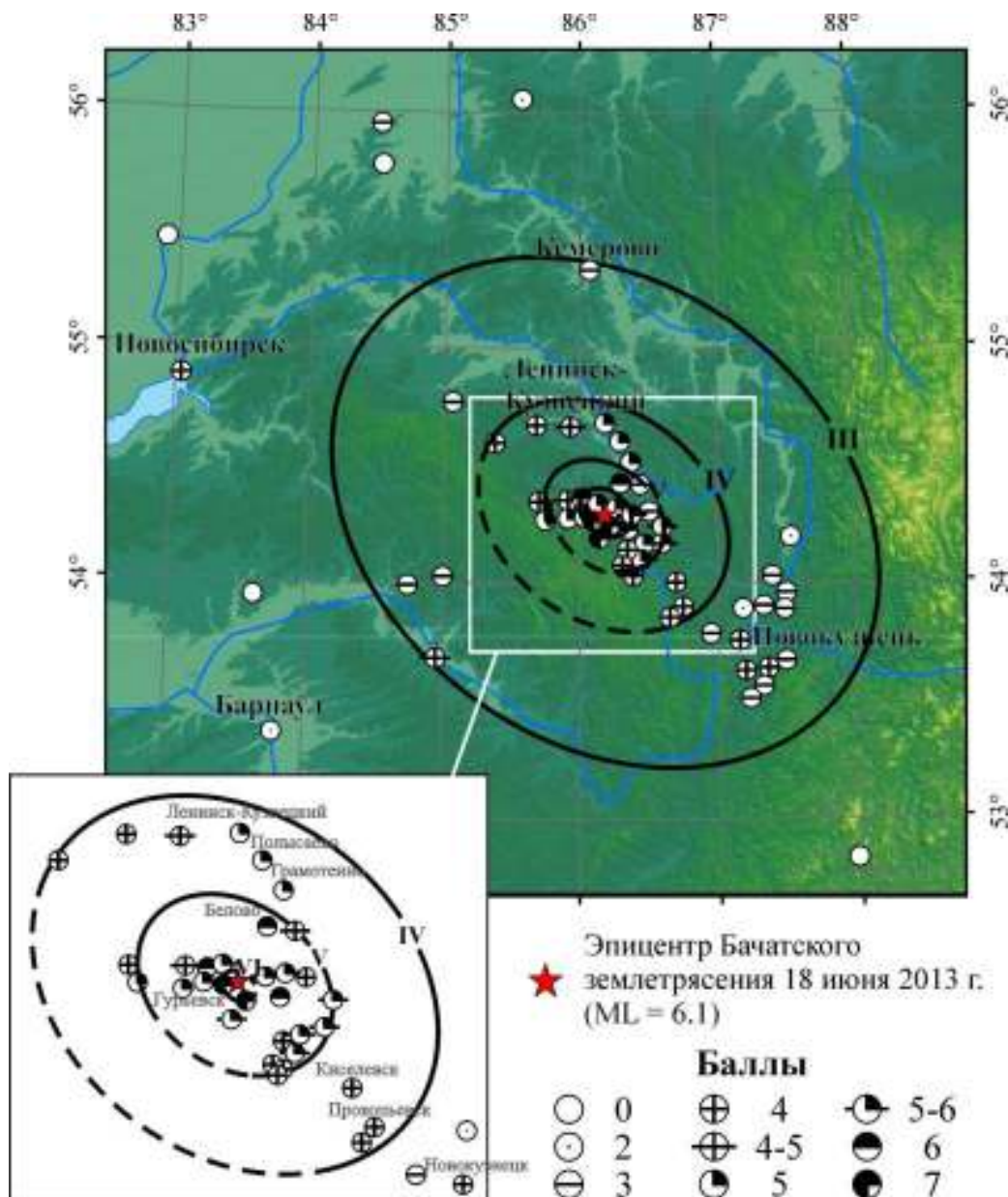


Рисунок 3.12 – Карта изосейст Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г.

На рисунке 3.13 представлены фотографии разрывов, зафиксированных вдоль разреза на всем его протяжении (около 10 км). Фотографии сделаны в первые дни после землетрясения. Позже разрывы заровняли с помощью бульдозеров. След от работы бульдозера виден на рисунке 3.13, а. На рисунке 3.14 представлены фотографии характерных разрушений зданий вследствие Бачатского землетрясения. В близкой к эпицентру области большую часть строений составляют одноэтажные дома. Данное землетрясение вызвало разрушения разной степени в сотнях домов.



Рисунок 3.13 – Фотографии разрывов, сформировавшихся вдоль бортов угольного разреза «Бачатский» при основном толчке Бачатского землетрясения



Рисунок 3.14 – Разрушения зданий при Бачатском землетрясении

3.3.4. Сейсмичность очаговой области Бачатского землетрясения

Для регистрации афтершокового процесса Бачатского землетрясения вблизи карьера была выставлена сеть из 10 автономных комплексов регистрации и одной станции с прямой передачей данных [Еманов А.Ф. и др., 2016]. Первые сейсмические станции были выставлены уже спустя несколько часов после главного толчка, полностью сеть была сформирована к 21 июня 2013 г. Общее количество мест установки для локальной сети за период 2013–2014 гг. в результате сезонных перемещений составило 20 пунктов, при этом количество станций равнялось 11 и в течение этого времени не менялось. Расположение станций показано на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Конфигурация локальной сети наблюдений за афтершоковым процессом Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г.

Условные обозначения: 1 – эпицентр Бачатского землетрясения; 2 – автономные комплексы регистрации (показана расстановка на лето 2013 г); 3 – станция с прямой передачей данных

Через шесть дней после землетрясения (24 июня) в эпицентральной области была выставлена первая сейсмостанция с передачей данных в Центр в режиме реального времени с целью получения оперативных сведений о сильных землетрясениях в районе карьера. Сейсмостанция с прямой передачей данных оснащена широкополосным велосиметром СМЕ-6211 с регистратором «Байкал 8.1», а на временных станциях установлены сейсмографы СК-1П и регистраторы «Байкал АС-75».

Наблюдения с временной сетью станций — эффективный, но затратный процесс. К тому же данные поступают в Центр только спустя 2-3 мес. В конце 2014 – начале 2015 г. в рамках расширения сети станций на Кузбассе [Еманов А.Ф. и др., 2015в] в районе разреза «Бачатский» установлены 4 сейсмостанции с передачей данных в Центр в режиме реального времени. Небольшая мониторинговая сеть

успешно работает как элемент региональной сети станций, обеспечивая на локальном участке повышенную чувствительность и точность. Помимо этого, продолжает регистрацию сейсмических событий временная сеть из 4 станций с автономными комплексами регистрирующей аппаратуры (Рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Конфигурация сети наблюдений за афтершоковым процессом в районе Бачатского землетрясения по состоянию на 2019 г.

Обработка событий ведется в одной системе с региональными станциями и станциями мониторинга Кузбасса в целом [Еманов А.А. и др., 2018]. Использование автоматических станций позволило вывести оперативность контроля за активизированной зоной разреза «Бачатский» на новый уровень. Время обработки событий в автоматическом режиме редко превышает 1 мин. Данные временных станций, которые ведут запись информации без ее передачи в Центр по каналам связи, используются для последующей уточняющей обработки.

Стационарные сейсмические станции сети мониторинга оснащены широкополосными велосиметрами Guralp CMG-6T и акселерометрами Guralp CMG-5TC, в качестве регистраторов используются современные высокоточные

комплексы «Байкал 8.1». На временных станциях установлены сейсмографы СК-1П и регистраторы «Байкал АС-75». Важность осуществления мониторинга связана с тем, что добыча угля в данном разрезе постоянно растет, а техногенное воздействие на сейсмически активизированную область соответственно увеличивается.

На рисунке 3.17 представлена карта эпицентров землетрясений за период с 18 июня 2013 г. до 31 августа 2016 г. Район развития сейсмического процесса совпадает с расположением разреза «Бачатский» и небольшого разреза «Шестаки», расположенного к северу от разреза «Бачатский». Положение эпицентров землетрясений в основном соответствует плану разреза, и лишь на юго-восточном его окончании фиксируется ответвление сейсмического процесса к востоку за его пределы; в этом месте зафиксированы события с магнитудами 1–2. Максимальные по магнитуде события, в том числе и главный толчок, произошли в районе западного борта Бачатского разреза и на его южном окончании (см. рисунок 3.17).

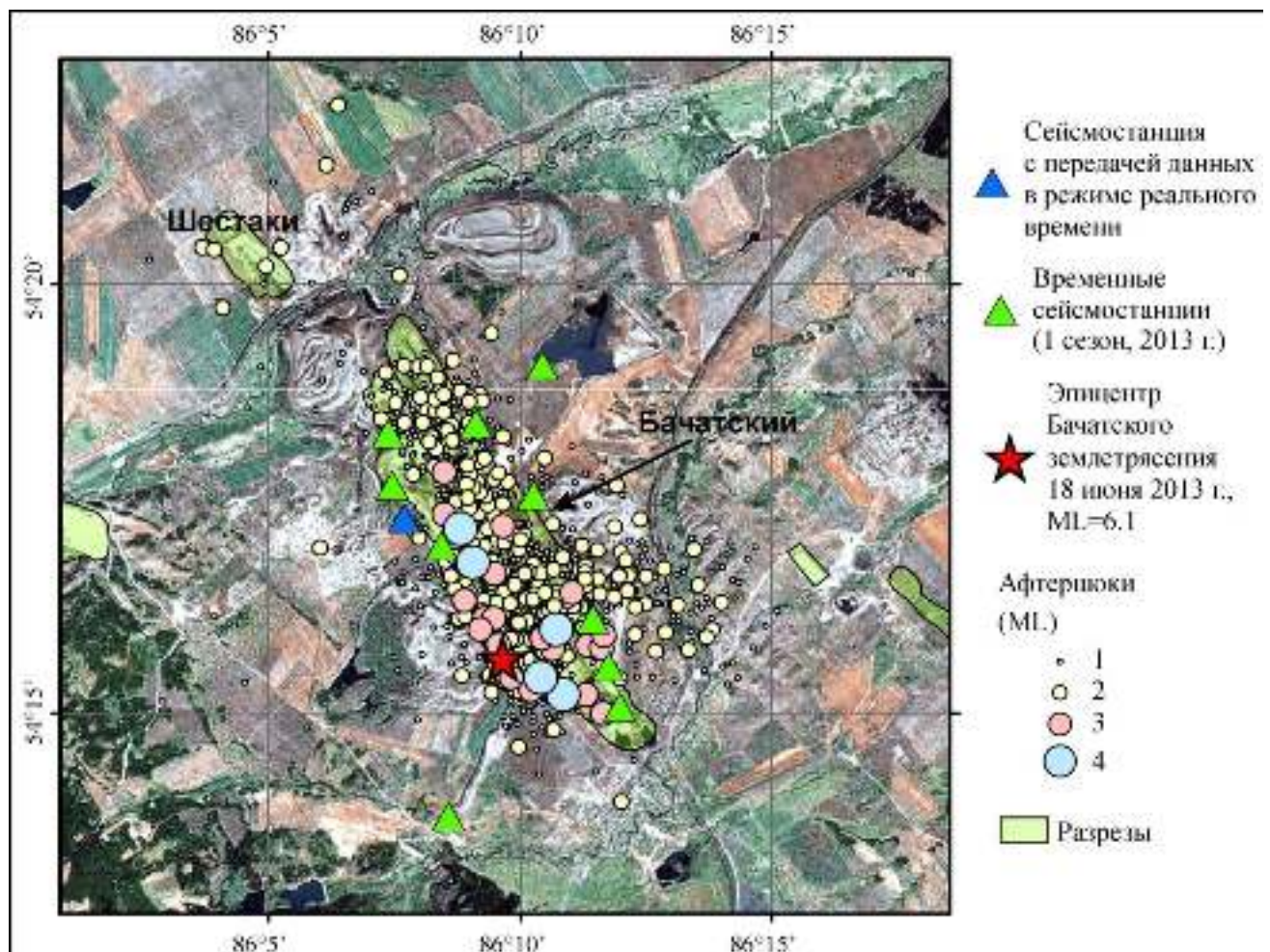


Рисунок 3.17 – Расположение эпицентров землетрясений в районе разреза «Бачатский»

Для ряда сильных землетрясений 2013–2014 гг. осуществлена уточняющая обработка с определением глубин с использованием пакета программ HYPOINVERSE-2000 [Klein, 2002] с использованием локальной скоростной модели. На рисунке 3.18 представлена карта глубин гипоцентров событий, а также разрез вдоль линии АВ. Эпицентры большинства крупных событий фокусируются в районе эпицентра Бачатского землетрясения. При этом они локализуются на значительных глубинах (большая часть гипоцентров зафиксирована на глубинах 2–4 км, ещё некоторое их число – до 5 км). Вдоль разреза по направлению на северо-запад значения глубин гипоцентров землетрясений уменьшаются. На северном окончании разреза «Бачатский» сейсмические события фиксируются непосредственно под ложем разреза (глубины от сотен метров до 2 км). В районе разреза «Шестаки» значения глубин гипоцентров вновь возрастают до значений 2–4 км (см. рисунок 3.18).

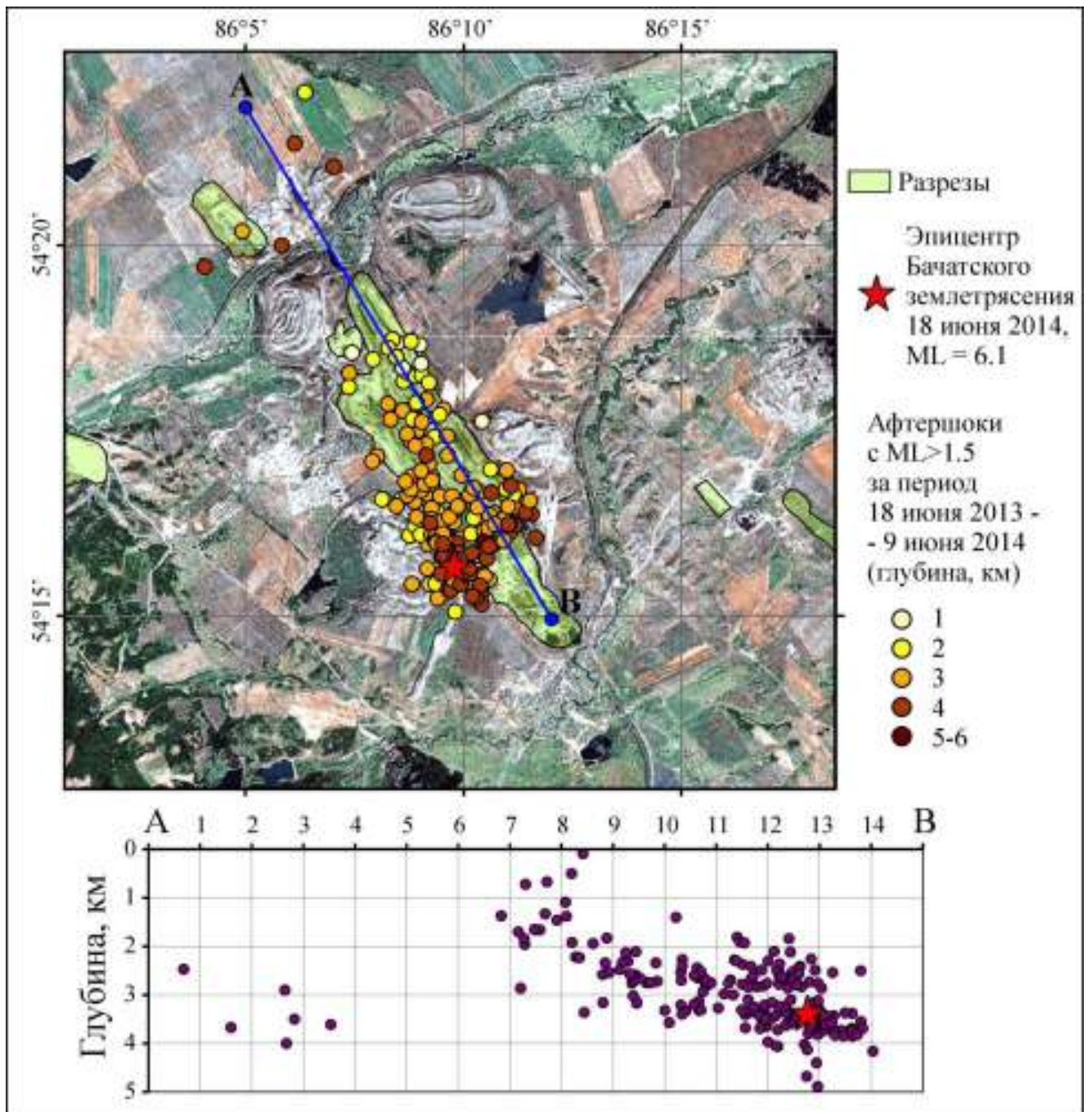


Рисунок 3.18 – Глубины афтершоков Бачатского землетрясения

Сравнивая данные временных сетей 2012 г. и 2013–2014 гг. (см. рисунки 3.9 и 3.18), можно отметить соответствие техногенных землетрясений по глубине до Бачатского землетрясения и после него. В обоих случаях активизирована область под разрезом: до глубин 3–3.5 км в 2012 г. и до глубин 4–5 км в 2013–2014 гг. Примечательно, что во втором случае активизация, приуроченная к более мощному основному сейсмическому событию ($ML=6.1$ против $ML=4.3$), распространяется на существенно бóльшую глубину.

Сопоставляя данный факт с глубиной гипоцентра основного толчка, получаем дополнительное свидетельство того, что Бачатское землетрясение является неотъемлемой частью сейсмической активизации, вызванной деятельностью по добыче полезных ископаемых. Без сомнения, мы имеем дело с техногенной активизацией недр в окрестности выработки.

3.3.5. Мониторинг развития сейсмического процесса во времени

В очаговой области в 2013 г. зарегистрировано около 1000 сейсмических событий с $ML=0.1-4.2$. Афтершоковая активность продолжалась и в последующие годы. К концу 2018 г. в районе активизации Бачатского землетрясения зафиксировано около 2500 техногенных землетрясений. На рисунке 3.19 представлена диаграмма распределения техногенных землетрясений в районе разреза «Бачатский» в плоскости «время – магнитуда», пространственные координаты исключены. Сравнивая результаты обработки по станциям региональной сети (2, 3) и уточненной обработки с использованием временных станций (1), видим, что обработка без участия плотных временных сетей станций представляет сейсмический процесс в несколько обедненном виде. Такие данные полезны: они хорошо определяют верхний энергетический уровень сейсмической активности разреза, оперативно дают информацию о координатах наиболее опасных событий, позволяют делать заключения о сейсмической опасности добычи угля на разрезе. Данные, полученные по плотной локальной сети с последующей уточняющей обработкой, являются основой для анализа с целью прогноза возможных новых техногенных активизаций. Кроме того, хорошо заметна разница в представительности регистрации между данными региональной сети (3) и данными с этой же сети, но дополненной локальными станциями непосредственно в районе угольного разреза «Бачатский» (2), выставленными в 2014 г. [Еманов А.Ф. и др., 2016] (см. рисунок 3.19).

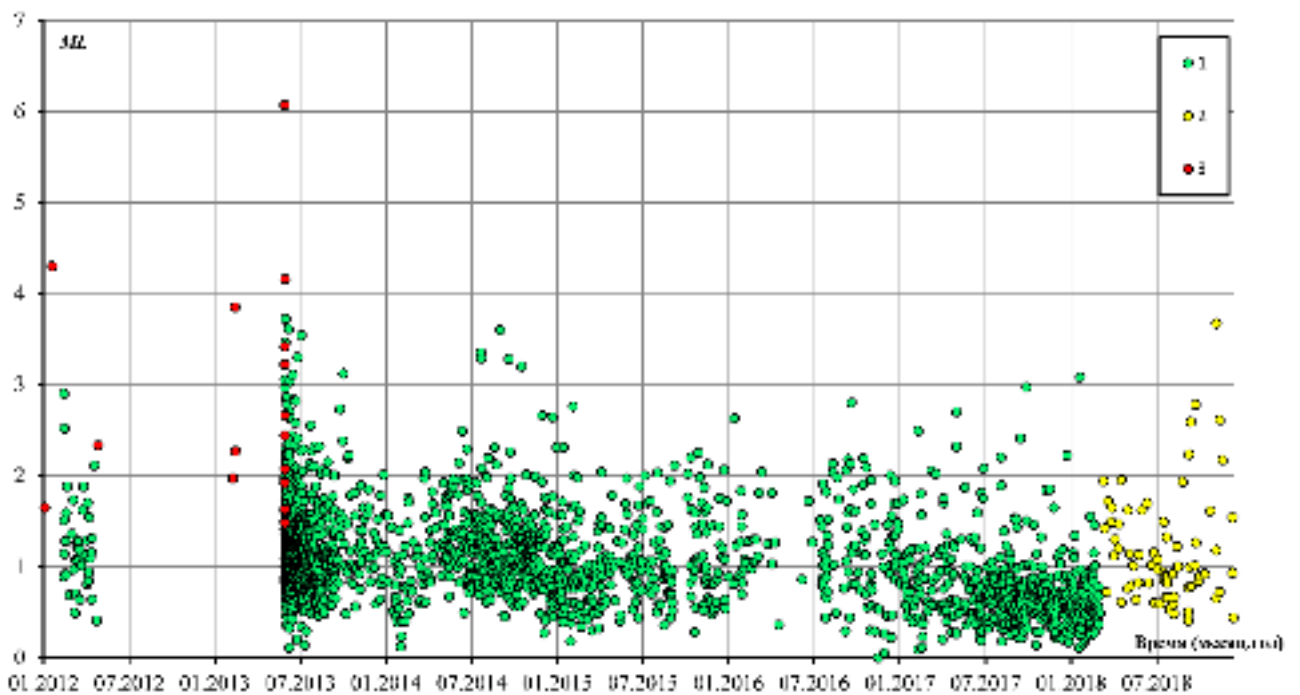


Рисунок 3.19 – Диаграмма распределения землетрясений в районе разреза «Бачатский» в плоскости «время – магнитуда» за период 2012–2018 гг.

Условные обозначения: 1 – данные обработки с использованием станций детальной временной сети; 2 – данные обработки по станциям региональной сети с использованием локальной сети в районе Бачатского разреза; 3 – данные обработки по станциям региональной сети

Данные, представленные на рисунке 3.19, показывают, что сейсмический процесс протекает весьма неоднородно. Максимальная сейсмическая активность наблюдалась в первые месяцы после главного толчка с 18 июня по начало октября 2013 г. Затем до мая 2014 г. интенсивность сейсмического процесса снизилась. С мая 2014 г. количество техногенных землетрясений увеличилось, а с сентября 2014 г. фиксируются землетрясения с $ML > 3$. Такая ситуация наблюдается до марта 2015 г.; начиная с этого момента и до конца августа 2016 г. землетрясений с $ML > 2.1$ вновь не зарегистрировано. Начиная с августа 2016 г. вновь периодически (с интервалом в 3–5 месяцев) фиксируются события с $ML > 2.2$. В области малых энергий по данным станций временной сети начиная с июня–июля 2017 г. наблюдается увеличение количества землетрясений с $ML < 1$. Начиная с апреля 2018 г. обработка землетрясений проведена только по данным региональной сети, без станций временной локальной сети. Конфигурация региональной сети

позволяет без пропусков регистрировать землетрясения с $K_{\min} \geq 5$ ($ML_{\min} \geq 1.5$). В связи с отсутствием обработки по локальной сети число слабых землетрясений в правой части диаграммы (см. рисунок 3.19) резко уменьшилось, но судя по наличию событий с $ML > 2$, сейсмическая активность в районе Бачатского угольного разреза оставалась высокой.

Для более детального анализа рассмотрим карты эпицентров землетрясений по определенным периодам (Рисунок 3.20). На рисунке 3.20, а видно, что бóльшая часть эпицентров землетрясений в первые, наиболее насыщенные по уровню выделившейся сейсмической энергии 4 месяца сосредоточена на южном окончании разреза. Именно здесь зафиксированы самые сильные афтершоки и наблюдается наибольшая концентрация эпицентров сейсмических событий. С октября 2013 г. по апрель 2014 г., в период относительного затишья (см. рисунок 3.20, б) интенсивность сейсмического процесса и пространственное положение эпицентров подобны таковым за период работы временной сети в 2012 г. (см. рисунок 3.8): 3–4 землетрясения в неделю с магнитудами $ML = 1–2$. Увеличение количества событий в период времени с мая 2014 г. по март 2015 г. сопровождалось смещением основного облака эпицентров землетрясений всего энергетического спектра в направлении северного окончания разреза (см. рисунок 3.20, в).

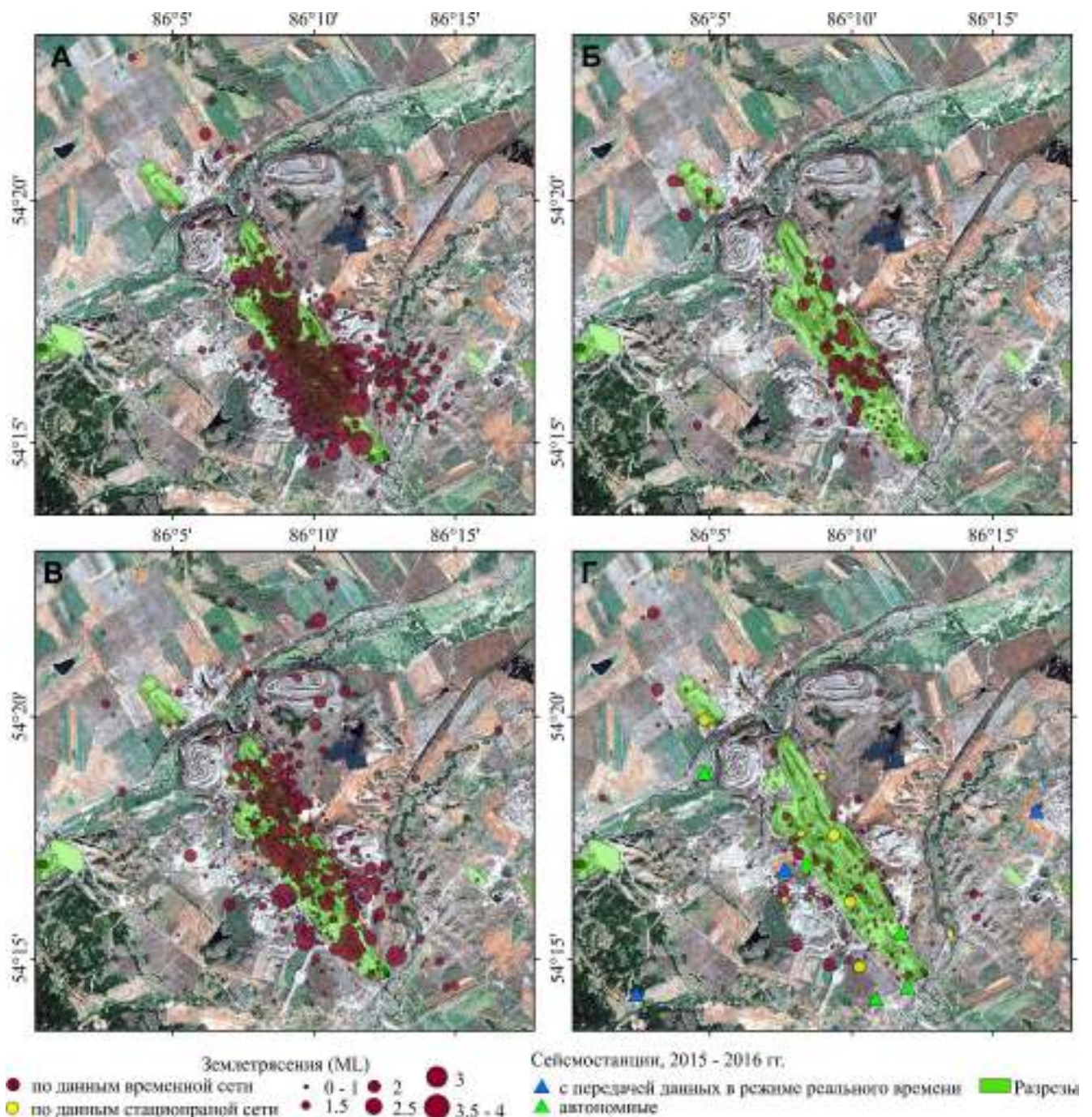


Рисунок 3.20 – Карты эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе Бачатского землетрясения в различные периоды времени.

Условные обозначения: а – землетрясения за период 18 июня – 9 октября 2013 г.; б – землетрясения за период 10 октября 2013 г. – 30 апреля 2014 г.; в – землетрясения за период 1 мая 2014 г. – 31 марта 2015 г.; г – землетрясения за период 1 апреля 2015 г. – 23 августа 2016 г. и положение сейсмостанций стационарной и временной сетей в 2015–2016 гг.

В последующий период – с апреля 2015 г. по август 2016 г. (см. рисунок 3.20, г) – вновь фиксируется сейсмическое затишье. Большую часть (~94%) землетрясений, зарегистрированных в этот период, составляют события с магнитудами $ML \leq 1.5$. По интенсивности сейсмический процесс становится

сопоставим с таковым в 2012 г. и с другим периодом затишья – с октября 2013 г. по апрель 2014 г. (см. рисунок 3.20, б).

За все периоды наблюдений отмечается наличие сейсмичности вблизи соседнего с Бачатским разреза «Шестаки» на уровне землетрясений с магнитудами, не превышающими $ML=2$ (см. рисунки 3.8, 3.20).

Основные сведения о наведенной сейсмичности, полученные в районе разреза «Бачатский» за время наблюдений, можно изложить следующим образом:

- первое ощутимое землетрясение произошло 19 февраля 2012 г. с $ML=4.3$, детальной информации о нем нет;

- эксперимент с временной сетью 2 марта – 15 мая 2012 г. выявил фоновый режим сейсмичности с $ML \leq 2$ и интенсивностью 3–4 события с $ML=1-2$ в неделю;

- землетрясение 4 марта 2013 г. с $ML=3.9$ – второе сильное землетрясение. На сегодняшний день нельзя сказать определенно, форшок это или самостоятельная активизация области разреза;

- Бачатское землетрясение 19 июня 2013 г. с $ML=6.1$ – одно из крупнейших в мире техногенных землетрясений с мощным афтершоковым процессом. Магнитуда афтершоков достигает $ML=3.5-4$. Повышенное количество слабых землетрясений фиксировалось вплоть до октября 2013 г.;

- с октября 2013 г. по апрель 2014 г. сейсмический режим вышел на уровень фонового с $ML \leq 2$ и с такой же плотностью событий, как в 2012 г.;

- с мая 2014 г. по март 2015 г. уровень выделившейся сейсмической энергии существенно увеличился. Фиксируется ряд землетрясений с $ML \geq 3$, четыре из них имеют $ML=3.5$, при этом в разы увеличивается число слабых землетрясений;

- с июня 2015 по август 2016 г. сейсмический режим по максимальной энергии событий ($ML \leq 2$) выходит на уровень фонового режима для данного разреза;

- начиная с августа 2016 г. вновь периодически (с интервалом в 3–5 месяцев) фиксируются события с $ML > 2.2$. В области малых энергий по данным станций временной сети начиная с июня–июля 2017 г. наблюдается увеличение количества землетрясений с $ML < 1$.

К сожалению, нет полной информации о землетрясениях малых энергий в окрестностях разреза, что важно для более обоснованного вывода о фоновом режиме сейсмичности и прогноза дальнейшего развития сейсмического процесса в разрезе «Бачатский». Эксперименты по сейсмическому мониторингу разрезов достаточно эффективно выполняются и в других регионах [Козырев и др., 2009]. Выполнение мониторинговых исследований на горных предприятиях становится обязательной процедурой обеспечения безопасности горных работ.

3.4. Тектоническая позиция очага и природа Бачатского землетрясения

Вопрос о природе любых крупных землетрясений в Кузбассе является спорным с первого дня после события, поскольку сразу же встает вопрос об ответственности за последствия землетрясения. Руководителей добывающих уголь предприятий устраивает формулировка «природное землетрясение». И до тех пор, пока определение координат событий выполнялось по редкой региональной сети и не было возможности относить землетрясения к конкретным предприятиям, а также определять их глубины, можно было объявлять землетрясение тектоническим, а предприятиям уходить от ответственности за его последствия.

Развитие сети сейсмологических станций в Кузбассе обеспечило новый уровень точности определения координат событий [Еманов А.Ф. и др., 2015б]. Благодаря этому можно с высокой степенью уверенности говорить о том, что очаги повышенной сейсмичности укладываются в участки ведения горных работ и не связаны с разломной тектоникой. Это позволяет сделать вывод о доминировании наведенной сейсмичности в Кузбассе над природной [Еманов А.Ф. и др., 2015б].

В работе [Яковлев, Лазаревич, Цирель, 2013] предлагается выделять новый класс землетрясений – техногенно-тектонические. Один из критериев выделения такого класса событий – их энергия. В работах [Адушкин, 2015, 2016; Адушкин, Турунтаев, 2015] особенности техногенно-тектонических землетрясений описываются более конкретно:

- это сильные землетрясения с магнитудами более 2.8 и энергетическим классом более 9;
- подобные землетрясения возникают в энергонасыщенных средах с высоким сейсмическим потенциалом;
- триггерный характер этих землетрясений связан с воздействием внешних техногенных источников;
- очаги подобных землетрясений образуются в верхних слоях земной коры, и при этом реализация очага не имеет очевидной связи с временем и местом техногенных воздействий;
- непосредственным триггером таких землетрясений, имеющих тектоническую природу очага, может стать длительное техногенное воздействие, более слабое, чем ответная реакция среды;
- скрытый саморегулируемый механизм подготовки таких землетрясений при одновременном участии, но различном вкладе природной энергонасыщенности массива и внешних техногенных воздействий существенно осложняет выяснение причин и выяснения механизмов их появления;
- определение таких землетрясений как техногенно-тектонические отражает двойственную природу их возникновения, когда в процессе подготовки очага участвуют одновременно два фактора: основной – в виде естественного напряженного состояния и инициирующий – в виде внешнего техногенного воздействия, при отсутствии которого такое землетрясение не состоялось бы [Адушкин, Турунтаев, 2015].

Возможно, подобные, произвольно происходящие техногенно-тектонические землетрясения катастрофического характера представляют в определенной степени самостоятельный вид землетрясений, который появился в системе «природа-человек» с ростом масштабов и глубины извлечения твердых полезных ископаемых. В таком случае количество и значения магнитуд такого вида землетрясений будут увеличиваться со временем из-за возрастающей интенсивности эксплуатации недр.

Особенности техногенно-тектонических землетрясений приведены в сокращенном варианте относительно оригинала [Адушкин, Турунтаев, 2015]. Здесь не рассматривается вопрос о справедливости выделения класса техногенно-тектонических землетрясений из общей массы событий, речь идет о конкретном Бачатском землетрясении, о его природе и особенностях протекающей в районе разреза сейсмической активизации. Особенности техногенно-тектонических землетрясений изложены для того, чтобы удобнее сравнивать данную сейсмическую активизацию с выделенным классом событий и обоснованно относить данное землетрясение к тому или иному классу.

Прежде чем рассуждать о природе Бачатского землетрясения, необходимо рассмотреть условия, в которых оно произошло, и вспомнить закономерности природной сейсмичности Алтае-Саянской горной области в целом и данной геологической структуры в частности.

Разрез «Бачатский» расположен в Кузнецкой впадине, являющейся тектонической структурой Алтае-Саянской горной области. Надежные данные о скоростном строении впадины получены по данным ГСЗ на двух профилях, один из которых выполнен вдоль [Крылов и др., 1974], а другой поперек [Крылов и др., 1970; Крылов и др., 1971] нее. При обобщении результатов ГСЗ в Западной Сибири [Пузырев, Крылов, 1971] отмечается блоковое строение земной коры Алтае-Саянской горной области; Кузнецкая впадина выделяется как отдельный блок, в котором мощность земной коры составляет 38–41 км, т.е. она на 5–10 км меньше, чем в прилегающих горных районах, сочленение с которыми происходит по зонам глубинных разломов. Поверхность интенсивно метаморфизованного складчатого основания впадины находится на глубинах 7–14 км, а граничная скорость вдоль нее меняется в интервале 6.1–6.5 км/с. Осадки – градиентная среда с увеличением скорости с глубиной от 4.0–4.5 км/с сверху до 6.0 км/с внизу. По геологическим данным [Васильев и др., 2011], мощность осадков в Кузнецкой впадине около 9 км. Осадочная толща перемята в складки [Угольная..., 2003; Новиков и др., 2008; Новиков и др., 2013]. Особенно велики амплитуды складок со стороны Салаирского кряжа, где и находится разрез «Бачатский». В районе разреза

угольные пласты имеют близвертикальное залегание, и поэтому добыча угля идет по пласту сверху вниз. Если сейчас глубина разреза около 350 м, то по проекту добычи она достигнет 550 м.

Сейсмически активизированная область в районе Бачатского разреза расположена в каменноугольно-пермских (глубина по разрезу приблизительно 0–3 км) и девонско-нижнекаменноугольных (3–5 км) отложениях. Она приурочена к зоне Кутоновского взбросо-надвига, разделяющего Беловский и Чертинский блоки. Сместитель этого крупноамплитудного разлома имеет запад-юго-западное падение и северо-запад-юго-восточное простирание [Kocharyan et al, 2019].

Молодые разрывы отмечены в зоне Афонинско-Киселевского (Салаирского) взброса, расположенного в непосредственной близости от Бачатского разреза. Они смещают среднепозднеплейстоценовые бурые глины с вертикальной амплитудой смещения до 2.5 м [Овсяченко и др., 2010а].

В геоморфологическом плане Кузнецкая впадина имеет блоковое строение [Новиков и др., 2013], а разрез «Бачатский» находится внутри одного из блоков впадины. Интересен отмеченный в работе [Белицкий, 1959] факт наличия мелкой трещиноватости, ранжируемой по длине нарушений в зависимости от их структурного положения. Согласно результатам тектонических исследований [Овсяченко и др., 2010б], блоковая структура впадины может отражаться на процессах наведенной сейсмичности. Кроме того, на южной оконечности впадины присутствуют разрывные нарушения, к которым приурочены крупные Кузнецкие землетрясения 1898 и 1903 годов [Жалковский, Мучная, 1975]. Эти события были явно природными землетрясениями и укладываются в закономерности развития сейсмического процесса в Алтае-Саянской горной области.

Общие закономерности природной сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области можно сформулировать следующим образом [Еманов А.Ф. и др., 2005]:

– определяющее влияние на ход сейсмического процесса оказывает блочное строение Алтае-Саянской горной области. Ячеистая структура данного региона в виде сочетания приподнятых горных массивов с межгорными впадинами

оказывает упорядоченное сопротивление коллизионному воздействию с юга, со стороны Джунгарской впадины;

- в сейсмическом режиме региона выделяется фоновая сейсмичность и сейсмические активизации, связанные, как правило, с крупными землетрясениями;

- фоновая сейсмичность, на первый взгляд хаотичная, со временем упорядочивается в соответствии с блоковой структурой Алтае-Саянской горной области, концентрируясь преимущественно в горном обрамлении впадин. Впадины представляют собой более крупные, чем блоки раздробленных горных хребтов, прочные блоки. Они оказывают сопротивление коллизионным процессам, при этом фоновая сейсмичность фиксируется в основном в районе разрушающихся горных обрамлений впадин;

- сейсмические активизации проявляют себя как нестационарный режим определенной геологической структуры. Сейсмические активизации структур Алтае-Саянской области как правило фиксировались в районах крупнейших землетрясений, формируя афтершоковые процессы. При этом все крупные землетрясения Алтае-Саянской горной области происходили в горном обрамлении впадин.

Данные свойства сейсмичности Алтае-Саянской горной области сформулированы на основе обработки рядов наблюдений более чем за 50 лет, и справедливость их обоснована для всех геологических структур, включая Кузнецкую впадину и ее горное обрамление.

Кузнецкая впадина заполнена более мощным слоем осадков, чем другие впадины Алтае-Саянской области, и при горизонтальном сжатии должна проявляться концентрация фоновой сейсмичности в горном обрамлении впадины. На рисунке 3.21 приведены эпицентры сейсмических событий, зарегистрированных в 2013 г. в Кузбассе.

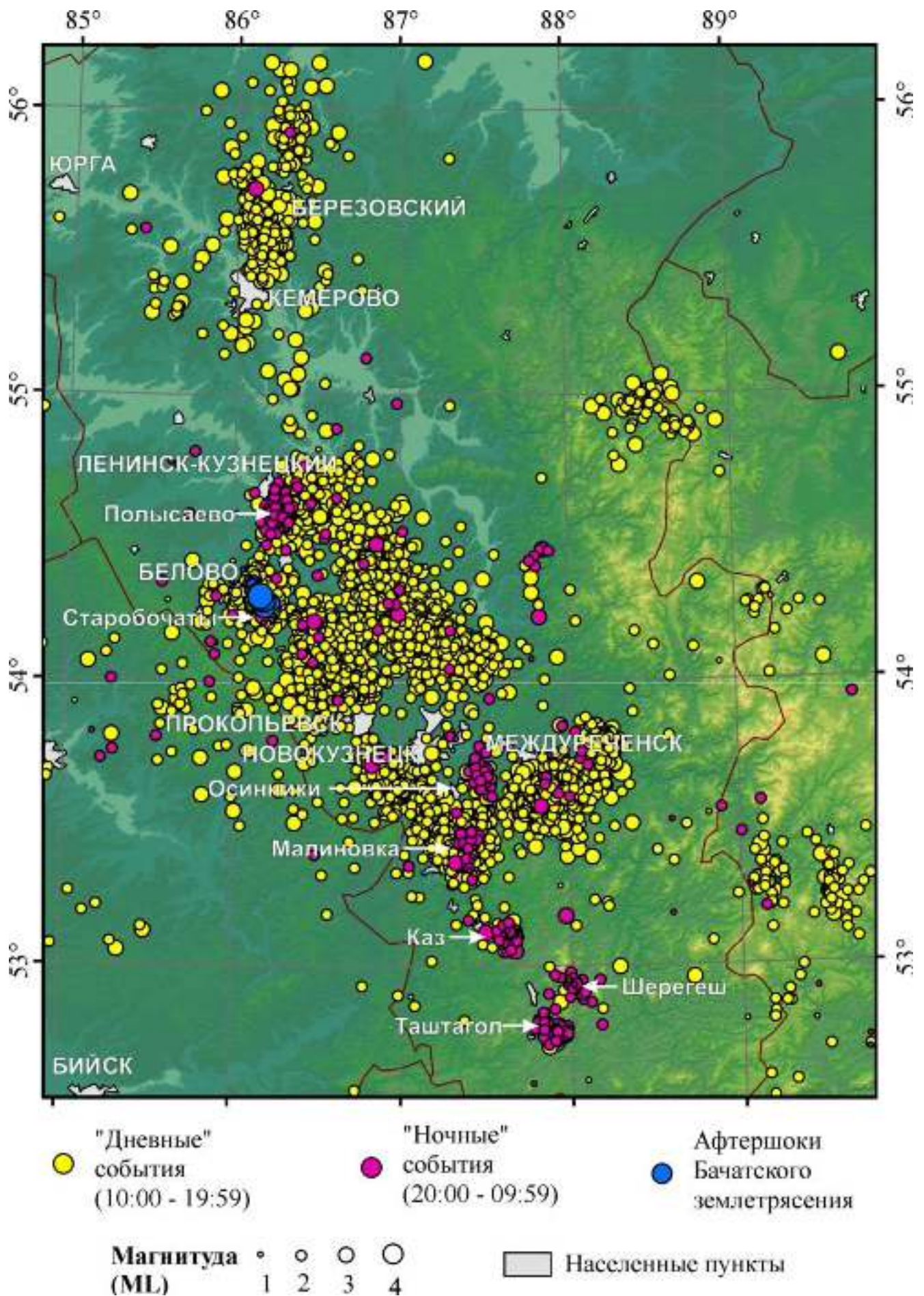


Рисунок 3.21 – Карта эпицентров сейсмических событий Кузбасса в 2013 г.

На рисунке 3.21 видно, что почти вся территория покрыта «дневными» событиями (днем производят промышленные взрывы). В ночное время промышленные взрывы под запретом, который неукоснительно исполняется, поэтому «ночные» события группируются в локальных зонах, известных сейсмической активностью горных предприятий: район шахт около г. Польшаево, разрез «Бачатский», район г. Осинники, разрез около пос. Малиновка, шахта «Распадская» около г. Междуреченск и др. В большинстве этих районов проведены эксперименты с локальными сетями станций и доказана техногенная природа землетрясений [Еманов А.Ф. и др., 2007; Еманов А.Ф. и др., 2008; Еманов А.Ф. и др., 2009а; Еманов А.Ф. и др., 2009б; Еманов А.Ф. и др., 2012б; Еманов А.А. и др., 2017]. Одиночные ночные события во впадине свидетельствуют, скорее всего, о существовании техногенной сейсмичности более низкого энергетического уровня на части горных предприятий. В Кузнецком Алатау и Салаире также фиксируются редкие одиночные события в ночное время. В иерархии структур по проявлению в сейсмической активности в Алтае-Саянской области Кузнецкая впадина и ее горное обрамление характеризуется медленным тектоническим процессом по сравнению с другими впадинами региона [Еманов А.Ф. и др., 2005].

Таким образом, следует вывод, что в Кузбассе наведенная сейсмичность, концентрирующаяся в местах добычи полезных ископаемых, доминирует над природной. Район разреза «Бачатский» – лишь одна из техногенных активизаций, хотя и энергетически наиболее сильная. Природная сейсмичность, концентрирующаяся в горном обрамлении, за год не проявляет себя в виде структур сейсмических событий.

Крупнейшие землетрясения в Алтае-Саянской горной области приурочены к горным обрамлениям впадин. Наиболее точные и детальные исследования выполнены для Чуйского землетрясения 2003 г. [Еманов А.А. и др., 2009; Еманов А.А. и др., 2015]. Афтершоковый процесс протекал с выходом за пределы горного обрамления вдоль окраин впадин. Данная особенность соответствует взглядам на горообразование на Алтае, когда горы расширяются за счет разрушения впадин [Флоренсов, 1978].

3.5. График повторяемости землетрясений для района Бачатского разреза в сравнении с природными и техногенными сейсмоактивными зонами Алтае-Саянской горной области

С 18 июня 2013 г. до 31 декабря 2018 г. в районе Бачатского разреза зарегистрировано 2482 землетрясения в диапазоне магнитуд $0 \leq ML \leq 6.1$. Их распределение по энергии представлено в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Количество зарегистрированных землетрясений в районе Бачатского разреза за период 18 июня 2013 г. – 31 декабря 2018 г.

<i>ML</i>	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0	Всего
Кол-во землетрясений	1	0	0	0	1	11	18	38	179	490	1136	580	28	2482

На графике повторяемости, построенном по данным Таблицы 3.1, отмечается его нелинейность (Рисунок 3.22). Она выражена в непропорционально высоком числе землетрясений с $ML=3.5$, четыре из которых произошли спустя год после главного толчка, в августе – сентябре 2014 г. В целом можно утверждать, что представительная регистрация сейсмических событий в районе Бачатского разреза начинается с $ML=1$ (см. рисунок 3.22).

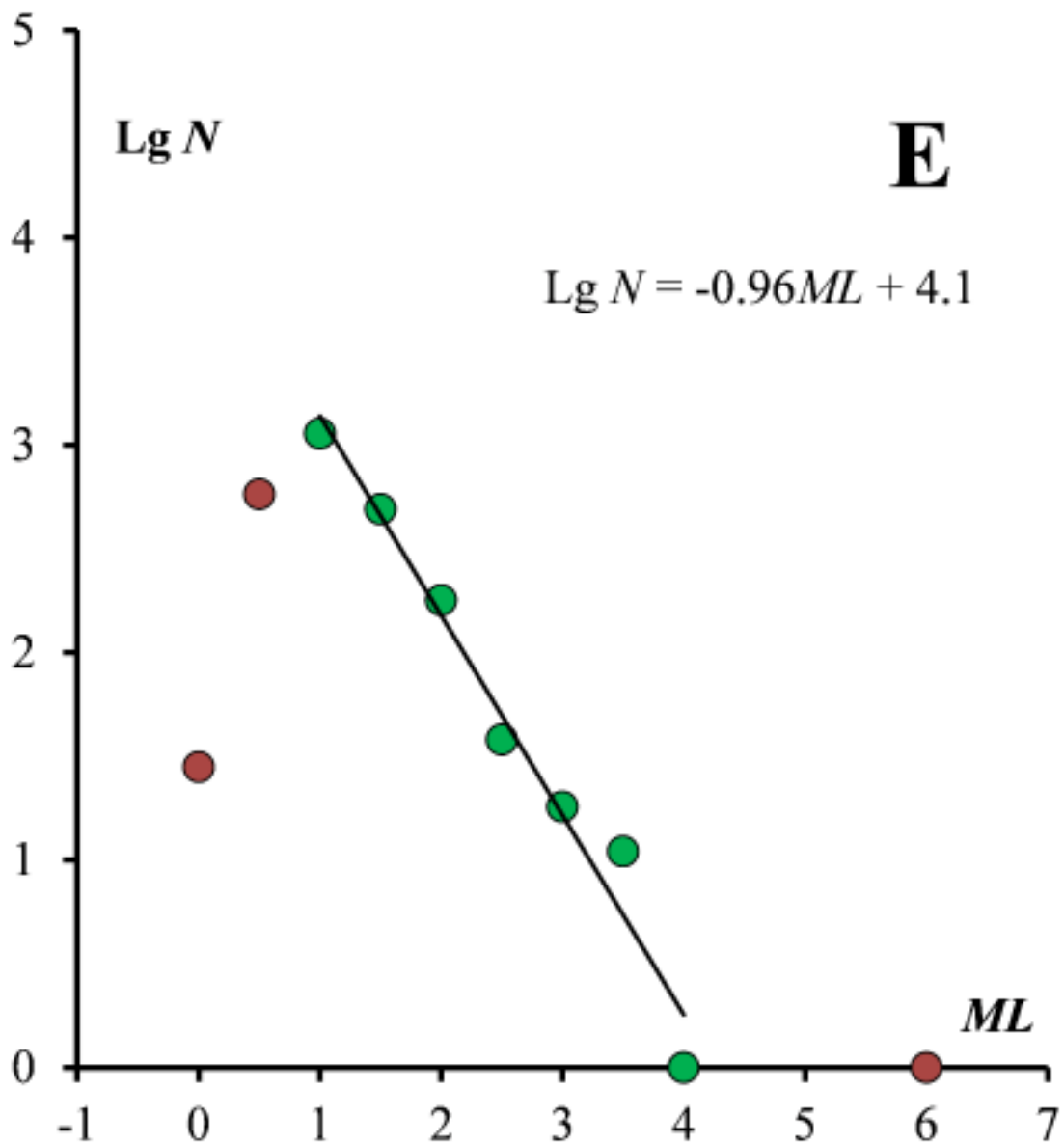


Рисунок 3.22 – График повторяемости землетрясений в районе разреза «Бачатский» за период 18 июня 2013 г. – 31 декабря 2018 г.

Условные обозначения: 1 – все данные; 2 – представительные данные

Для интервала магнитуд $ML=1-4$ выполнена линейная аппроксимация с определением параметров графика повторяемости:

$$LgN = -0.96 \cdot ML + 4.1. \quad (3.3)$$

Для сравнения характеристик сейсмического режима эпицентральной области Бачатского землетрясения с другими природными и техногенными активизациями в Алтае-Саянском регионе были построены графики повторяемости по данным локальных наблюдений с временными сетями станций с привлечением данных со станций региональной сети [Гольдин и др., 2004; Еманов А.А. и др., 2015; Еманов А.Ф. и др., 2014а]. Для возможности сопоставления данных разных периодов наблюдений значения магнитуд MS приведены к локальным магнитудам ML по формуле (3.1). Данные для построения графиков получены по результатам обработки наблюдений как детальными временными сетями, так и региональной сетью сейсмических станций сотрудниками АСФ ФИЦ ЕГС РАН и организаций-предшественников.

График повторяемости землетрясений для всей территории Алтае-Саянского региона построен по данным за длительный временной интервал (1734–2014 гг.), который включает в себя информацию за различные периоды наблюдений: исторический (до начала XX в.), инструментальный с редкими удаленными станциями (с начала XX в. до 1962 г.) и инструментальный с региональной сетью с аналоговой (1963–2000 гг.) и цифровой (начиная с 2000 г.) регистрацией. Несмотря на то, что представительность регистрации землетрясений в последние 15 лет довольно высокая [Фатеев, Филина, Кабанник, 2003], график повторяемости линейен только начиная с $ML=3$ (Рисунок 3.23).

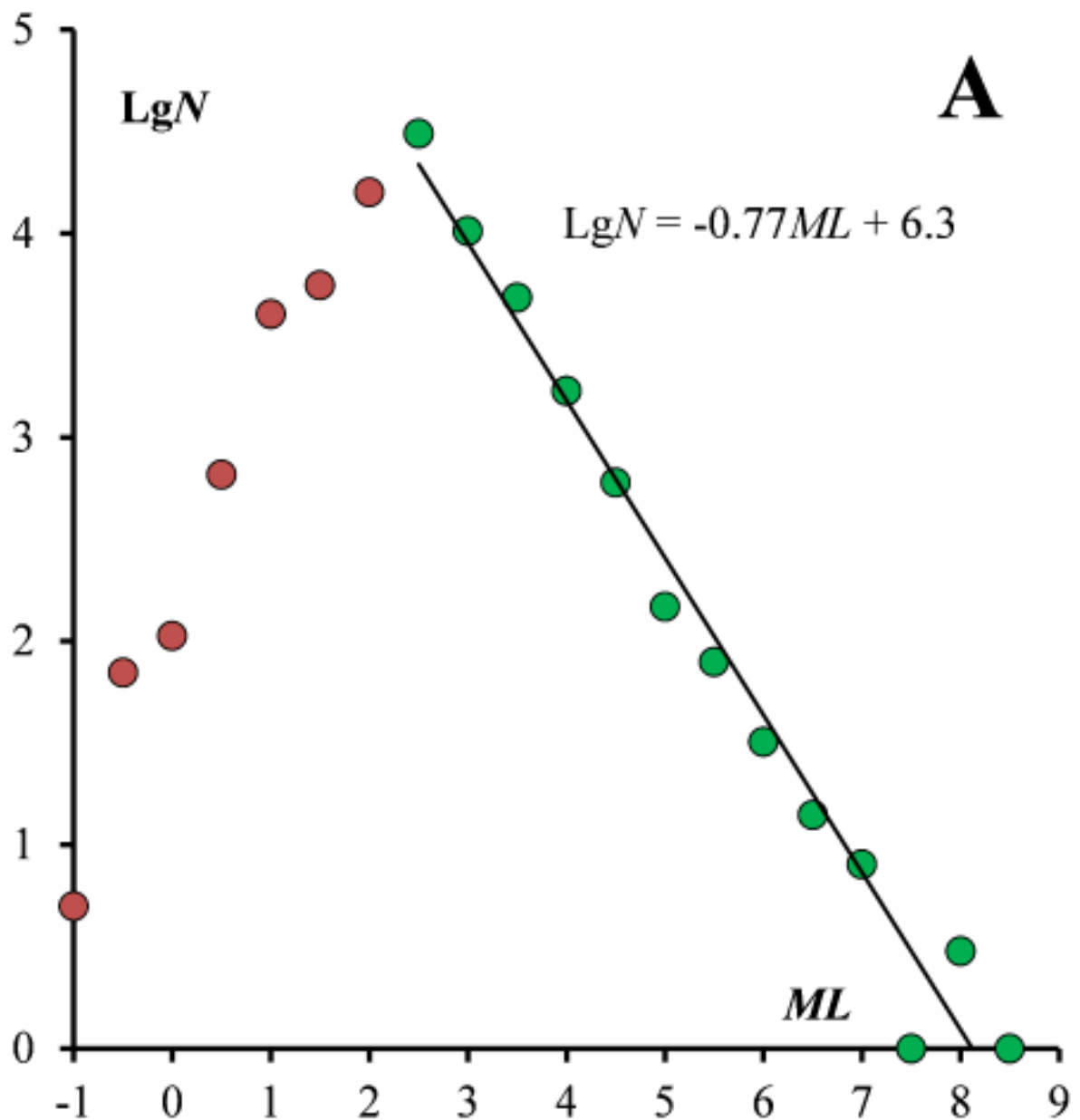


Рисунок 3.23 – График повторяемости землетрясений Алтае-Саянской складчатой области за период 1734–2014 гг.

Для Алтае-Саянской горной области в целом повторяемость землетрясений соответствует углу наклона $b=0.77$ (Рисунок 3.23), что ниже той же характеристики для землетрясений района Бачатского землетрясения – $b=0.96$ (см. рисунок 3.22). Отличия угла наклона графика повторяемости наведенной сейсмичности в районе разреза «Бачатский» от такового природной сейсмичности довольно значимые.

В последнее десятилетие локальные сети сейсмических станций использовались как для исследования афтершоков природных землетрясений, так и для изучения наведенной сейсмичности около разрезов и рудников Кузбасса. В частности, график повторяемости природной сейсмичности построен для эпицентральной зоны Чуйского землетрясения 2003 г., которая изучалась с использованием детальных наблюдений в этой зоне более 15 лет [Еманов А.А. и др., 2009; Еманов А.Ф. и др., 2011а; Лескова, 2013; Еманов А.А. и др., 2015]. Далее приведены графики повторяемости для сейсмических активизаций природного и техногенного происхождения (Рисунок 3.24).

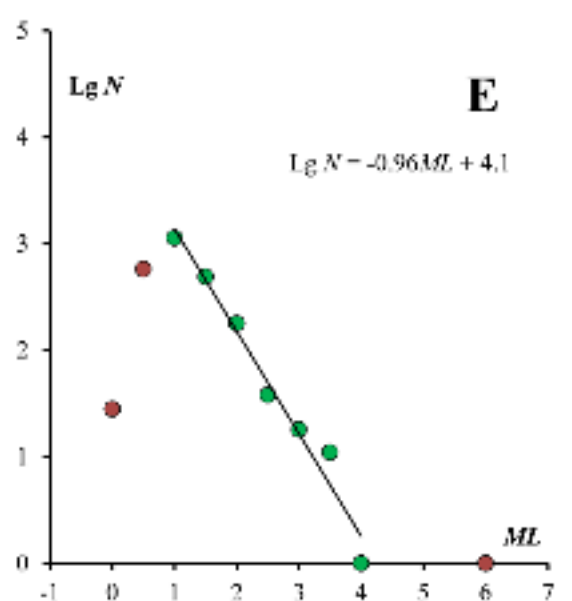
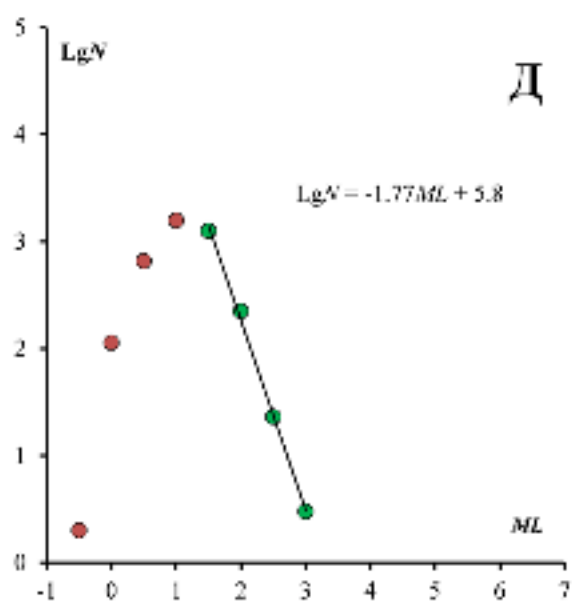
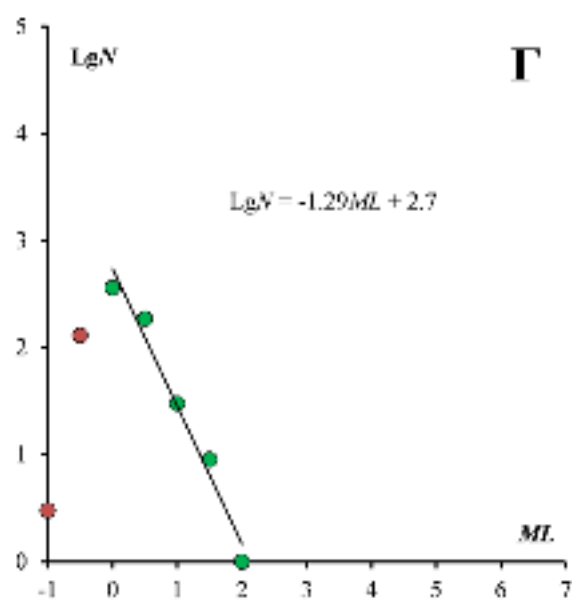
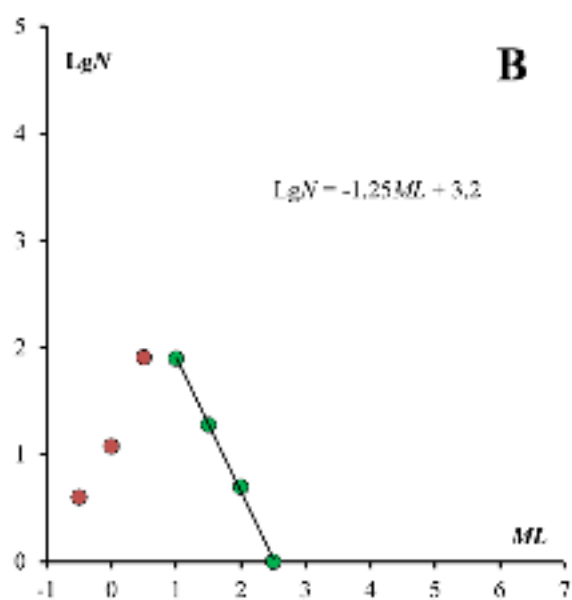
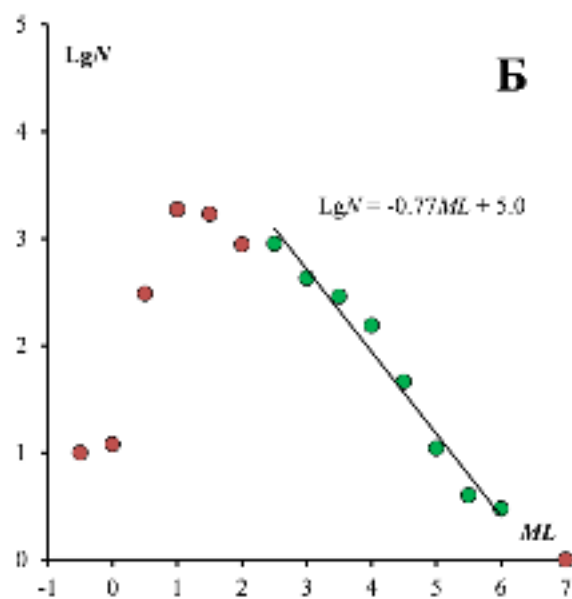
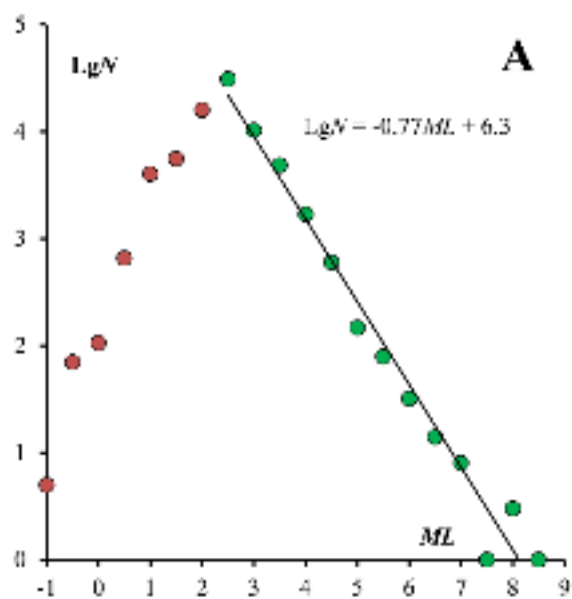


Рисунок 3.24 – Графики повторяемости землетрясений для сейсмически активизированных зон Алтае-Саянской области.

А – Алтае-Саянская область в целом; Б – природная сейсмичность, Чуйско-Курайская зона; В–Е – районы техногенной сейсмичности: В – г. Осинники, 2005 г.; Г – шахта «Распадская», 2010 г.; Д – г. Полысаево, 2007–2009 гг.; Е – разрез «Бачатский», 2013–2015 гг.

Графики повторяемости наведенной сейсмичности построены по материалам исследования локальными сетями станций в Кемеровской обл.: около г. Осинники в 2005 г. [Еманов А.Ф. и др., 2007] (см. рисунок 3.24, в); после крупной аварии на шахте «Распадская» в 2010 г. [Еманов А.Ф. и др., 2012б] (см. рисунок 3.24, г); в районе г. Полысаево в 2007–2009 гг. [Еманов А.Ф. и др., 2009б] (см. рисунок 3.24, д); в районе разреза «Бачатский» после Бачатского землетрясения [Еманов А.Ф. и др., 2016].

В Таблице 3.2 приведены обобщенные сведения об использованных данных (количество событий) и полученных характеристиках графика повторяемости для всех рассматриваемых территорий. Видно, что наклон графика повторяемости для всех техногенных активизаций имеет более высокое значение, чем для природных активизаций: Чуйско-Курайской зоны и региона в целом. Также заметна разница в уровнях представительной регистрации землетрясений для природных и техногенных сейсмоактивных зон. Она обеспечена как раз высокой детальностью временных сетей, используемых при наблюдениях за техногенными сейсмическими активизациями.

Таблица 3.2 – Сведения об используемых в определении графика повторяемости данных и его характеристиках для различных территорий

Территория	Период наблюдений	Количество событий	Коэффициент наклона графика, b	Представительная магнитуда, ML
Алтае-Саянская область	1734–2014	74992	0.77	2.5
Чуйско-Курайская зона	1734–2014	6617	0.77	2.5
Город Осинники	2005	201	1.25	1
Шахта «Распадская»	2010	721	1.29	0
Город Полысаево	2007–2009	3851	1.77	1.5

Разрез «Бачатский»	2013–2018	2482	0.96	1
-----------------------	-----------	------	------	---

Из приведенных техногенных активизаций сейсмичность разреза «Бачатский» характеризуется наиболее низким значением коэффициента наклона графика повторяемости. При этом другие рассмотренные активизации приурочены к районам подземных выработок. Увеличение данного значения означает большее количество землетрясений малых энергий в общем числе событий. Иначе говоря, большее значение коэффициента наклона графика повторяемости соответствует большему времени на подготовку более крупных землетрясений при одной и той же активности по числу землетрясений. В соответствии с полученными данными для разреза «Бачатский» доля крупных землетрясений в сейсмическом процессе выше, чем в изученных активизациях около подземных выработок. Можно предположить, что данное различие связано с разной глубиной залегания гипоцентров: при добыче угля закрытым способом в Кузбассе сейсмический процесс протекает в менее плотных средах, что в свою очередь обуславливает повышенную долю слабых землетрясений.

Наклон графика для близких друг к другу активизаций в г. Осинники и на шахте «Распадская» примерно одинаков, что говорит о подобии их сейсмических режимов. Наибольшее значение данного коэффициента отмечается для событий в районе г. Полысаево. В целом это достаточно уникальная сейсмически активизированная зона с числом техногенных землетрясений до 70 в сутки и более, но при этом энергия событий здесь существенно меньше, чем в районе разреза «Бачатский».

3.6. Выводы

Результаты сейсмологических исследований на разрезе «Бачатский» позволяют сделать следующие выводы об особенностях сейсмической активизации и природе ее возникновения и развития.

1. Сейсмический процесс по площади тесно связан с открытой горной выработкой, а в глубину он распространяется от ложа разреза до 4–5 км. Активизированы прилегающие к разрезу осадочные породы впадины.

2. Сейсмический режим техногенной активизации в районе разреза «Бачатский» непрерывен и не стационарен: выделяются периоды фоновое уровня сейсмичности, пониженного по энергии сильнейших землетрясений и с разреженной частотой слабых событий, и периоды активизаций с сильными землетрясениями и увеличенной частотой слабых событий. Длительность сейсмических активизаций – 1–3 мес. За пять последних лет зафиксировано 4 активизации, 3 из которых генерировали крупные землетрясения: 19 февраля 2012 г. с $ML=4.3$; 04 мая 2013 г. с $ML=3.9$; 18 июня 2013 г. с $ML=6.1$. Последняя активизация завершилась серией ощутимых землетрясений с локальной магнитудой 3.0–3.5. Пульсирующий характер сейсмической активности недр разреза является следствием работ по добыче угля вообще и в частности перемещения больших масс породы. Накопленные напряжения периодически разряжаются, но ввиду продолжающегося и растущего техногенного воздействия возникают вновь. Это свидетельствует о повышенной сейсмической опасности в данной части Кузбасса и необходимости инструментального контроля за развитием процесса.

3. Крупные землетрясения и слабые события образуют единый в пространстве процесс с отличающимся от природной сейсмичности наклоном графика повторяемости.

4. Механизм очага Бачатского землетрясения – взброс с ориентировкой одной из нодальных плоскостей вдоль длинной оси разреза. Ориентировка соответствует техногенному воздействию.

5. На основе сравнительного анализа материалов эпицентральных работ в зонах крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области установлено отличие в параметрах графиков повторяемости техногенных сейсмических активизаций от природных активизированных зон.

Анализируя Бачатское землетрясение, следует обратиться к классическому определению наведенной сейсмичности: «наведенная сейсмичность – усиление сейсмической активности, связанное с инженерной деятельностью человека» [Николаев, 1994]. Без сомнения, Бачатское землетрясение и вся активизация разреза «Бачатский» подпадают под определение наведенной сейсмичности. Следует отметить, что наведенная сейсмичность всегда возникает в среде, находящейся в напряженном состоянии; при этом любая геологическая среда имеет свое напряженное состояние. В отличие от случаев, когда землетрясение происходит в стороне от техногенного воздействия или на большой глубине, в данном случае имеет место активизация, тесно связанная с объектом, вызвавшим техногенное воздействие на среду. Понятно, что большая энергия Бачатского землетрясения выделяет его из рядовых техногенных землетрясений. Трудно представить, что добыча полезных ископаемых может создать столь сильные напряжения в земной коре. С другой стороны, отмечается большой рост добычи угля в Кузбассе; если в 1950 г. добывалось 37 млн тонн угля и из них 1 млн тонн – открытым способом, то в 2013 г. – 203 млн тонн и из них 126 млн тонн – открытым способом. В целом в Кузбассе добыто более 8 млрд тонн угля. Добавив к этому перемещение породы в отвалы, можно понять, насколько велико техногенное воздействие на недра Кузнецкой впадины.

В Кузбассе не только разрез «Бачатский» является столь масштабным предприятием. На Кедровском, Моховском, Талдинском, Калтанском, Краснобродском и других разрезах добыча угля ведется в сопоставимых количествах с Бачатским. В районе других разрезов столь крупных землетрясений, как на Бачатском, не зафиксировано, а слабая сейсмичность не исследовалась. Следует отметить, что до 2012 г. и о наведенной сейсмичности на разрезе «Бачатский» ничего известно не было.

Бачатское землетрясение является уникальным по энергии, но оно пространственно увязывается с разрезом, ориентировка механизма очага соответствует ориентировке длинной оси разреза. Землетрясение произошло в отложениях, заполняющих Кузнецкую впадину; оно имеет малую глубину очага;

сейсмическая активизация на уровне более слабых землетрясений пространственно связана с Бачатским землетрясением, график повторяемости имеет наклон, отличный от природной сейсмичности. Пульсирующий режим наведенной сейсмичности разреза «Бачатский» является характерным для техногенных сейсмических активизаций при добыче твердых полезных ископаемых [Опарин и др., 2005; Адушкин, Опарин, 2016].

Перечисленные факты указывают на техногенную природу Бачатского землетрясения и сейсмической активизации, в пространственно-временных рамках которой оно произошло. Столь мощное сейсмическое событие, по-видимому, вызвано техногенным воздействием, связанным с перемещением масс при добыче угля открытым способом. При этом, безусловно, весьма значим и вклад от воздействия природных условий Кузнецкой котловины. В частности, авторы работы [Kocharyan et al, 2019] по результатам проведенных расчетов приходят к подобному выводу. Выемка и перемещение горной породы, судя по всему, явились триггером Бачатского землетрясения, напряженное состояние недр для которого уже было подготовлено естественной эволюцией коры [Kocharyan et al, 2019]. В работе [Батугин, 2018] отмечено, что региональные участки предельно напряженного состояния массива, формируемые в результате взаимодействия блоков земной коры, создают среду для возникновения опасных геодинамических явлений в горнопромышленных районах. А поскольку зона предельно напряженного состояния расположена вблизи земной поверхности, этим объясняется провоцирование горными работами землетрясения с гипоцентром на глубине в несколько километров.

Кузнецкая впадина по мощности осадков превосходит остальные впадины Алтае-Саянской складчатой области. Горизонтальное сжатие, как и во всем регионе, обеспечивает развитие сейсмического процесса в ее горном обрамлении. Сейсмичность же в виде пятен около горных выработок является еще одним доказательством техногенной природы землетрясений Кузнецкой впадины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой проведенного исследования в первую очередь являются наблюдения за природными и техногенными сейсмическими активизациями с временными сетями станций. В данной работе автор представляет определение всего комплекса основных параметров сейсмических событий: локализация гипоцентров, оценка энергетических характеристик, механизмы очагов землетрясений и др. для двух техногенных сейсмических процессов, а также предлагает их анализ. Первый процесс – это ряд сейсмических активизаций в непосредственной близости от участков добычи угля подземным способом. Второй – пульсирующая сейсмическая активизация, характеризующаяся Бачатским землетрясением 2013 г. и его афтершоковым процессом, происходящим в районе добычи угля открытым способом.

Данное исследование примечательно высокой (по сравнению с данными региональных сетей сейсмических станций) энергетической представительностью (до $M_L=0-0.5$) зарегистрированных сейсмических событий благодаря плотным сетям высокоточных сейсмологических станций (вплоть до 40 станций на площадях менее 100 км²). Полученные данные уточнялись в несколько итераций с использованием современных математических методов обработки данных (уточнение скоростного разреза и положения гипоцентров с применением метода двойных разностей и сейсмической томографии с двойными разностями). Данные сведены в каталог, содержащий параметры десятков тысяч природных и техногенных землетрясений, промышленных взрывов.

В результате описанных высокоточных экспериментов с плотными временными сетями станций в Кемеровской области для активизаций в районе подземной добычи угля установлен факт смещения сейсмического процесса в пространстве вместе с забоем, а также экспериментально доказана значительная роль вибрационного воздействия на развитие техногенного сейсмического процесса. Основное количество событий происходит под выработкой, достигая глубин до километра ниже выработки; механизмы сейсмических событий –

преимущественно взбросы. Выявлен факт взаимного влияния добычи угля на выработках, расположенных на расстоянии в сотни метров друг от друга, на течение процесса наведенной сейсмичности.

Детально изучен сейсмический процесс в районе добычи угля открытым способом (разрез «Бачатский»), где 18 июня 2013 г. произошло одноименное землетрясение с $ML=6.1$, являющееся крупнейшим в мире при добыче твердых полезных ископаемых. Данное сейсмическое событие, по-видимому, инициировано техногенным воздействием в виде перемещения значительных масс горной породы. При этом основным фактором, повлиявшим на процесс подготовки очага, судя по всему является естественное напряженное состояние недр. Установлена тесная пространственная связь сейсмического процесса с открытой горной выработкой; выявлен пульсирующий характер данной сейсмической активизации, обусловленный постоянным техногенным воздействием. На основе сравнительного анализа материалов эпицентральных работ в зонах крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области установлено отличие в значениях наклона графиков повторяемости техногенных сейсмических активизаций от таковых для природных активизированных зон.

Нет сомнений в том, что исследование сейсмических процессов в районах Кузбасса, подверженных техногенному воздействию, должно быть продолжено. Детальное изучение закономерностей сейсмических процессов – тот единственный путь, который способен приблизить нас к знаниям о природе возникновения сейсмических активизаций. Среди первоочередных направлений дальнейших исследований следует отметить техногенные сейсмические активизации, возникающие в зонах совместного влияния добычи угля как открытым, так и подземным способом. Один из подобных примеров в Кузбассе, ярко проявивший себя в последнее время, – техногенная активизация в районе п. Малиновка на юге Кемеровской области, где наблюдаются два смежных сейсмических процесса, предположительно спровоцированных отвалообразованием при разработке карьера и подземной добычей угля [Еманов А.А. и др., 2017; Еманов А.Ф. и др., 2018]. Также не следует забывать об уже исследованных сейсмоактивных

районах. Наличие высокоточной цифровой аппаратуры, апробированной методики и современных комплексов программ цифровой обработки сейсмологических данных позволяет получать все интересующие сведения о техногенных сейсмических процессах. Это также важно при уточнении сейсмической опасности территории и оценки возможного сейсмического риска и последствий от сильных землетрясений в Кемеровской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 11.01.2018 № 12 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года» // Собрание законодательства РФ, 15.01.2018. – № 3. – Ст. 515.
2. Адушкин, В.В. Сейсмичность месторождений углеводородов / В.В. Адушкин [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – Schlumberger, 2000. – Т. 5, № 1. – С. 4–15.
3. Адушкин, В.В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
4. Адушкин, В.В. Триггерная сейсмичность Кузбасса / В.В. Адушкин // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания ИДГ РАН (Москва, 16–19 июня 2015 г.). – М.: ГЕОС, 2015. – С. 8–28.
5. Адушкин, В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. IV / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 3–49.
6. Адушкин, В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения / В.В. Адушкин // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 22–44.
7. Арефьев, С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования / С.С. Арефьев. – М.: Академкнига, 2003. – 375 с.
8. Барабанов, В.Л. Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твердых полезных ископаемых / В.Л. Барабанов // Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – С. 157–165.
9. Батугин, А.С. Бачатское техногенное землетрясение как разрядка предельного напряженного состояния участка земной коры / А.С. Батугин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S49. – С. 487–495.

10. Белицкий, А.А. К разработке методики прогноза нарушенности шахтных полей Кузбасса / А.А. Белицкий // Вопросы геологии Кузбасса. Известия Томского политехнического института. – 1959. – Т. 99, № 2. – С. 280–295.
11. Брыксин, А.А. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал / А.А. Брыксин, В.С. Селезнев // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 3. – С. 399–405.
12. Васильев, Б.Д. О времени заложения межгорных прогибов Алтае-Саянской складчатой области / Б.Д. Васильев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 1. – С. 5–7.
13. Гольдин, С.В. Чуйское землетрясение и его афтершоки / С.В. Гольдин, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Докл. РАН. – 2004. – Т. 395, №4. – С. 534–536.
14. Дудушкина, К.И. Деформационные свойства пород глубоких горизонтов / К.И. Дудушкина, Г.Ф. Бобров. – М.: Недра, 1974. – 129 с.
15. Дягилев, Р.А. Наблюдения с временными сетями. Карстовые процессы в опасной зоне рудника БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» на Верхнекамском месторождении калийных солей / Р.А. Дягилев [и др.] // Землетрясения России в 2007 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 94–98.
16. Дягилев, Р.А. Параметры Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. по инструментальным данным / Р.А. Дягилев, И.В. Голубева // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы V международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 89–93.
17. Еманов, А.А. Применение метода двойных разностей для уточнения координат сейсмических события / А.А. Еманов, Ф. Валдхаузер, Е.В. Лескова // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции (Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 161–168.
18. Еманов, А.А. Сейсмические активизации блоковой структуры в условиях сжатия (на примере Алтае-Саянской области): Дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.10: защищена 15.03.2006 / Еманов Алексей Александрович. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2006. – 157 с.

19. Еманов, А.А. Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения / А.А. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 29–36.
20. Еманов, А.А. Развитие программно-аппаратного комплекса автоматизированного сбора, хранения и обработки сейсмологических данных сети станций Алтае-Саянского региона: ретроспектива, анализ и перспективы / А.А. Еманов [и др.] // 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, г. Новосибирск, Академгородок, 21–25 октября 2013 г. – Новосибирск: Полиграфика, 2013. – С. 48–53.
21. Еманов, А.А. Эпицентральная область Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. с $M=7.3$. Наблюдения 2012–2013 гг. / А.А. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 99–102.
22. Еманов, А.А. Одновременное воздействие открытых и подземных горных работ на недра и наведенная сейсмичность / А.А. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44, № 4. – С. 51–62.
23. Еманов, А.А. Мониторинг наведенной сейсмичности в Кузбассе / А.А. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах / Отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – Том 1. – Разд. 7. – С. 419–439.
24. Еманов, А.Ф. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны / А.Ф. Еманов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 49–64.
25. Еманов, А.Ф. Сейсмический мониторинг района г. Осинники (Кемеровская область) / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 63–65.
26. Еманов, А.Ф. Геодинамические и техногенные процессы в сейсмичности Алтае-Саянской горной области / А.Ф. Еманов [и др.] // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры,

воздействие на объекты недропользования. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 176–265.

27. Еманов, А.Ф. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009а. – Т. 12, № 1. – С. 37–43.

28. Еманов, А.Ф. Техногенная сейсмичность в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2007 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009б. – С. 86–93.

29. Еманов, А.Ф. Наведенная сейсмичность в районе г. Полысаево (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2008 году. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 101–106.

30. Еманов, А.Ф. Афтершоковый процесс Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** // Динамика физических полей Земли. – 2011а. – С. 173–185.

31. Еманов, А.Ф. Экспериментальные исследования триггерных эффектов в развитии наведенной сейсмичности в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2009 году. – Обнинск: ГС РАН, 2011б. – С. 92–101.

32. Еманов, А.Ф. Экспериментальное исследование наведенной сейсмичности в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** // Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия / Отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012а. – Разд. V. – С. 426–459.

33. Еманов, А.Ф. Техногенная сейсмичность шахты «Распадская» / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2010 году. – Обнинск: ГС РАН, 2012б. – С. 90–95.

34. Еманов, А.Ф. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L=6.7$ и 26.02.2012 г., $M_L=6.8$ и их афтершоки / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** // Докл. РАН. – 2014а. – Т. 456, №2. – С. 223–226.

35. Еманов, А.Ф. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Физико-

технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014б. – № 2. – С. 41–46.

36. Еманов, А.Ф. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатские землетрясения 2012–2013 гг.) / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014в. – С. 104–108.

37. Еманов, А.Ф. Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г., $ML=6.1$ / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.) – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014г. – С. 145–149.

38. Еманов, А.Ф. Эпицентральная область Бачатского землетрясения 18.06.2013 г. с $M=5.1$ (Кузбасс) в 2013–2014 гг. / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск: ГС РАН, 2015а. – С. 103–108.

39. Еманов, А.Ф. Система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса и триггерные эффекты в развитии сейсмического процесса / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания ИДГ РАН (Москва, 16–19 июня 2015 г.) – М.: ГЕОС, 2015б. – С. 190–199.

40. Еманов, А.Ф. Основы системы сейсмологического мониторинга Кузбасса / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. Материалы междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» (г. Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – 2015в. – Т. 2, №2. – С. 68–72.

41. Еманов, А.Ф. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ($ML=6.1$) в Кузбассе – сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43, № 4. – С. 34–60.

42. Еманов, А.Ф. Сейсмический эффект промышленных взрывов и основные закономерности формирования и развития сейсмичности около шахт и

разрезов Кузбасса / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – Кемерово, 2018. – № 3. – С. 57–72.

43. Еременко, А.А. Методологические и методические аспекты развития и применения мониторинговой системы контроля удароопасности и техногенных землетрясений на рудных месторождениях Горной Шории / А.А. Еременко [и др.] // Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов / Под ред. В.Н. Опарина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – Т. 2, гл. 6. – С. 6–65.

44. Жалковский, Н.Д. Годографы сейсмических волн и мощность земной коры Алтае-Саянской складчатой области по данным регистрации промышленных взрывов и местных землетрясений / Н.Д. Жалковский, Г.М. Цибульчик, И.Д. Цибульчик // Геология и геофизика. – 1965. – № 1. – С. 173–179.

45. Жалковский, Н.Д. Некоторые результаты макросейсмических исследований сильных землетрясений Алтае-Саянской области / Н.Д. Жалковский, В.И. Мучная // Сейсмичность Алтае-Саянской области. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975. – С. 28–41.

46. Змушко, Т.Ю. Связь шахтной сейсмичности с режимом горных работ на шахтах г. Воркуты / Т.Ю. Змушко, С.Б. Турунтаев, В.И. Куликов // Динамические процессы в геосферах. – ИДГ РАН, М.: ГЕОС, 2011. – № 2. – С. 75–88.

47. Козырев, А.А. Сейсмичность при горных работах / А.А. Козырев [и др.] // Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002а. – 325 с.

48. Козырев, А.А. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты / А.А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2002б. – № 1. – С. 43–49.

49. Козырев, А.А. Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом / А.А. Козырев [и др.] // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 644–653.

50. Крылов, С.В. Глубинные сейсмические исследования в Кузбассе с применением промышленных взрывов и аппаратуры «Тайга» / С.В. Крылов [и др.] // Глубинные сейсмические исследования в Западной Сибири. – М.: Наука, 1970. – С. 114–123.

51. Крылов, С.В. Глубинные сейсмические исследования в районе Салаирского кряжа / С.В. Крылов [и др.] // Геология и геофизика. – 1971. – № 7. – С. 79–83.

52. Крылов, С.В. Характеристика Западно-Сибирского региона и данных глубинного сейсмического зондирования / С.В. Крылов [и др.] // Строение земной коры в Западной Сибири (по результатам глубинного сейсмического зондирования). – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 7–15.

53. Куприш, О.В. Бачатское техногенное землетрясение $M_L=6.1$: формирование наведенной сейсмичности в эпицентральной зоне, напряженное состояние / О.В. Куприш, ..., **А.В. Фатеев** // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара, г. Москва, 07–12 октября 2019 г. – М: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2019. – С. 132–137.

54. Курленя, М.В. Низкочастотные резонансы сейсмической люминесценции горных пород в вибросейсмическом поле малой энергии / М.В. Курленя, С.В. Сердюков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 1.

55. Курленя, М.В. Проблемы нелинейной геомеханики / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 3.

56. Лаврентьев, А.И. О неотектонических структурах и землетрясениях района Новокузнецка / А.И. Лаврентьев // Геология и геофизика. – 1971. – Т. 12, № 9. – С. 117–122.

57. Лескова, Е.В. Пространственно-временная структура и поле тектонических напряжений афтершоковой области Чуйского землетрясения 2003 г. (по данным мониторинга 2003–2012 гг.): Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10:

защищена 20.08.2013 / Лескова Екатерина Викторовна. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – 154 с.

58. Макаров, П.В. Сценарии эволюции горного массива над выработкой / П.В. Макаров [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 65–82.

59. Маловичко, А.А. Природная и техногенная сейсмичность Урала / А.А. Маловичко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 1. – С. 9–18.

60. Мирзоев, К.М. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре / К.М. Мирзоев [и др.] // Физика Земли. – 2009. – № 10. – С. 49–68.

61. Нестеренко, Ю.М. Сейсмическая активность районов разрабатываемых месторождений углеводородов в Южном Предуралье / Ю.М. Нестеренко, О.В. Косолапов, М.Ю. Нестеренко // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1(5). – С. 1240–1244.

62. Николаев, А.В. Проблемы наведенной сейсмичности / А.В. Николаев // Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – С. 5–15.

63. Новиков, И.С. Пирометаморфические индикаторы кайнозойских орогенных движений: минералогические и геохронологические аспекты на примере зоны перехода от Салаира к Кузбассу / И.С. Новиков [и др.] // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 6. – С. 503–526.

64. Новиков, И.С. Этапы активации и тектоническая делимость Кузнецкого угольного бассейна (южная Сибирь) / И.С. Новиков [и др.] // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 3. – С. 424–437.

65. Овсяченко, А.Н. Природа массового разрывообразования при сейсмической активизации в центральном Кузбассе / А.Н. Овсяченко [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2010а. – Т. 37, № 4. – С. 5–24.

66. Овсяченко, А.Н. Палеогеологические и тектонические исследования сейсмоопасных территорий юга Кузбасса / А.Н. Овсяченко [и др.] // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010б. – №6. – С. 35–45.

67. Опарин, В. Н. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: сейсмический режим / В.Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 4. – С. 3–22.

68. Опарин, В.Н. О пульсирующем режиме сейсмоэнерговыведения из напряженных участков шахтных полей / В.Н. Опарин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 15–22.

69. Опарин, В.Н. Нелинейные геомеханические процессы и индуцированная ими сейсмичность в пределах шахтных полей рудников Норильского месторождения полиметаллов / В.Н. Опарин [и др.] // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 13–74.

70. Опарин, В. Н. О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса / В.Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 4. – С. 3–22.

71. Пономарев, В.С. Исследование режима возбужденной сейсмичности на шахтах СУБРа / В.С. Пономарев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – № 4. – С. 15–22.

72. Пономарев, В.С. Закономерности разрушения энергонасыщенных сред в проявлениях наведенной сейсмичности / В.С. Пономарев, А.Н. Ромашов, С.Б. Турунтаев // Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – С. 73–91.

73. Пономарев, В.С. Энергонасыщенность геологической среды / В.С. Пономарев // Труды Геологического института РАН. – М.: «Наука», 2008. – Вып. 582. – 379 с.

74. Пузырев, Н.Н. Особенности строения земной коры Западной Сибири по данным глубинных сейсмических зондирований / Н.Н. Пузырев, С.В. Крылов // Проблемы нефтеносности Сибири. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 94–113.

75. Рогожин, Е.А. О природе сейсмических активизаций в Кузбассе / Е.А. Рогожин, А.Н. Овсяченко, А.С. Ларьков // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. – РУДН, Москва. – 2017. – С. 554–556.
76. Семибаламут, В.М. Комплекс автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения / В.М. Семибаламут, А.Ю. Рыбушкин // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции (Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 120–128.
77. Соболев, Г.А. Динамика акустической эмиссии при инициировании водой / Г.А. Соболев [и др.] // Физика Земли. – 2010. – № 2. – С. 50–67.
78. Соловьев, В.М. Деформационно-прочностное районирование земной коры Алтае-Саянской складчатой области / В.М. Соловьев [и др.] // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции (Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2003. – С. 332–337.
79. Турунтаев, С.Б. Влияние сильных взрывов на сейсмичность региона их проведения / С.Б. Турунтаев, И.А. Петрович // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер (сборник научных трудов ИДГ РАН). – М.: ГЕОС, 2007. – С. 233–240.
80. Угольная база России. Том 2. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири / Под ред. В.Ф. Череповского. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
81. **Фатеев, А.В.** Представительность и точность определения параметров эпицентров в АСОМСЭ СО РАН / **А.В. Фатеев**, А.Г. Филина, А.В. Кабанник // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции (Новосибирск, 15–19 сентября 2003 г.) – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 145–152.

82. **Фатеев, А.В.** Эксперименты по обнаружению наведённой сейсмичности на севере Кузбасса / **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2010 году. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 87–89.
83. Флоренсов, Н.А. Очерки структурной геоморфологии / Н.А. Флоренсов. – М.: Наука, 1978. – 238 с.
84. Холуб, К. Наведенная сейсмичность при добыче угля лавами в шахтах Чехии / К. Холуб // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 1. – С. 37–44.
85. Эпов, М.И. Наблюдение просадок поверхности Земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR / М.И. Эпов, ..., **А.В. Фатеев** // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №4. – С. 26–29.
86. Яковлев, Д.В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса / Д.В. Яковлев, Т.И. Лазаревич, С.В. Цирель // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. – С. 20–34.
87. Anderson, J. Center for Seismic Studies / J. Anderson [et al.] // Version 3 Database: Schema Reference Manual. Technical Report, 1990. – P. 90–101.
88. Arabacz, W.J. Coal-Mining Seismicity and Ground-Shaking Hazard: A Case Study in the Trail Mountain area, Emery County, Utah / W.J. Arabacz [et al.] // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95, № 1. – P. 18–30.
89. ARCGIS Spatial Analyst User Guide // ESRI Redlands, CA 92373–8100, USA. – 2001.
90. Bormann, P. Magnitude of seismic events / P. Bormann // New manual of seismological observatory practice (NMSOP). – Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2002. – P. 3–16 – 3–49.
91. Brink, A.v.Zyl. Application of a microseismic system at Western Deep Levels / A.v.Zyl Brink // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam, Brookfield. – 1990. – P. 355–361.

92. Bratt, S.R. Locating events with a space network of regional arrays / S.R. Bratt, T.C. Bache // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1988. – Vol. 78. – P. 780–798.
93. Foulger, G.R. Global review of human-induced earthquakes / Gillian R. Foulger [et al.] // *Earth–Science Reviews*. – № 178. – 2018. – P. 438–514.
94. Gibowicz, S.J. The mechanism of seismic events induced by mining. A review / S.J. Gibowicz // *Rockbursts and seismicity in mines*. – Rotterdam, Brookfield. – 1990. – P. 3–27.
95. Hanka, W. GITEWS Seismology Group. Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond / W. Hanka [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. – Vol. 10. – P. 2611–2622.
96. Kennett, B.L.N. (Ed.). IASPEI 1991 Seismological Tables / B.L.N. Kennett // *Research School of Earth Sciences, Australian National University*. – 1991. – 167 p.
97. Klein, F.W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes / F.W. Klein // *U.S. Geol. Surv.*, 2002. – <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-171/>.
98. Knoll, P. Seismological and technical investigations of the mechanics of rockbursts / P. Knoll, W. Kuhnt // *Rockbursts and seismicity in mines*. – Rotterdam, Brookfield. – 1990. – P. 129–138.
99. Kocharyan, G.G. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake / G.G. Kocharyan [et al.] // *Geodynamics&Tectonophysics*. – 2019. – 10 (3). – P. 741–759. doi: 10.5800/GT-2019-10-3-0439.
100. Lee, M.F. Interaction of stopes, stresses and geologic structure at the Mount Charlotte Mine, Western Australia / Lee M.F., Beer G., Windsor C.R. // *Rockbursts and seismicity in mines*. – Rotterdam, Brookfield. – 1990. – P. 337–344.
101. Luo, X. Passive seismic monitoring of mine-scale geothermal activity: A trial at Lihir open pit mine / X. Luo, A. Creighton, J. Gouch // *Monitoring induced seismicity*. Birkhauser/Springer Basel AG. – 2010. – P. 119–130.

102. MacNamara, D.E. PQLX: A seismic data quality control system description, applications, and users manual / D.E. McNamara, R.I. Boaz // U.S. Geological Survey, 2011. – Open-file report 2010–1292. – 41 p. <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1292>
103. Mendecki, A.J. Modelling seismic hazard in mines / A.J. Mendecki, E.C. Lotter // Proceeding of the Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference, 18-20 November, Barossa Valley, South Australia, 2011.
104. Reasenber, P.A. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions / P.A. Reasenber, D. Oppenheimer // U.S. Geological Survey, 1985. – Open-file report 85–739. – 109 p.
105. SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: srtm.csi.cgiar.org.
106. Stammer, K. Seismichandler – Programmable multichannel data handler for interactive and automatic processing of seismological analyses / K. Stammer // Computers & Geosciences, 1993. – Vol. 19 (2). – P. 135–140.
107. Waldhauser, F. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California / F. Waldhauser, W.L. Ellsworth // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2000. – December. – Vol. 90, № 6. – P. 1353–1368.
108. Weber, B. SeisComp3 – automatic and interactive real time data processing / B. Weber [et al.] // Geophysical Research Abstracts In EGU General Assembly, 2007. – Vol. 9. – P. 09219.
109. Wells, D.L. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement / D.L. Wells, K.J. Coppersmith // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – Vol. 84. – P. 974–1002.
110. Zhang, H. Double-Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California / H. Zhang, C.H. Thurber // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2003a. – Vol. 93. – № 5. – P. 1875–1889.
111. Zhang, H. User's manual for tomoDD1.1 (double-difference tomography)

for determining event locations and velocity structure from local earthquakes and explosions / H. Zhang, C.H. Thurber. – Department of Geology and Geophysics University of Wisconsin-Madison. – 20036. – 8 p.