

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Алтае-Саянском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Еманов Александр Федорович**, доктор технических наук.

**Официальные оппоненты:**

**Добрынина Анна Александровна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН, ученый секретарь;

**Хайрегдинов Марат Саматович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, главный научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва.

Защита состоится 19 мая 2021 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3  
факс (8-383) 330-28-07,  
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/fateev2021>

Автореферат разослан 26 марта 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.г.-м.н., доцент



Н.Н. Неведрова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 числе основных угроз среди прочих указаны стихийные бедствия, вызванные активизацией геофизических процессов.

Среди необходимых мероприятий указаны проведение мониторинга и анализа рисков природного и техногенного характера, а также развитие систем контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

**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 АСФ ФИЦ ЕГС РАН и ИНГГ 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 АСФ ФИЦ ЕГС 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, а также высокоточные цифровые модели рельефа, созданные на основе радарной топографической съемки SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 3x3".

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. – это уникальные данные для данного региона в первую очередь по точности и детальности наблюдений. Их использование не ограничивается рамками данной работы. Они уже стали материалом для сопоставления с другими геолого-геофизическими данными по Кузбассу и их верификации. Также эти данные могут быть использованы при изысканиях в связи с капитальным строительством промышленных и гражданских объектов, при определении устойчивости зданий и сооружений, при оценке сейсмического риска 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; Мапати, Филиппины, 2014; Курчатов, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определен объект исследования, обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи, описаны материал и методы исследования. Также сформулированы защищаемые научные результаты, показана их новизна и личный вклад соискателя, обоснованы теоретическая и практическая значимость результатов.

В **первой главе** представлено текущее состояние изученности примеров наведенной сейсмичности при добыче твердых полезных ископаемых. Показано развитие методики мониторинга наведенной сейсмичности на примере Кузбасса [2]. В главе также дается обзор методов исследования состояния очаговых зон, позволяющих определить основные параметры и выявить отличительные особенности сейсмического процесса.



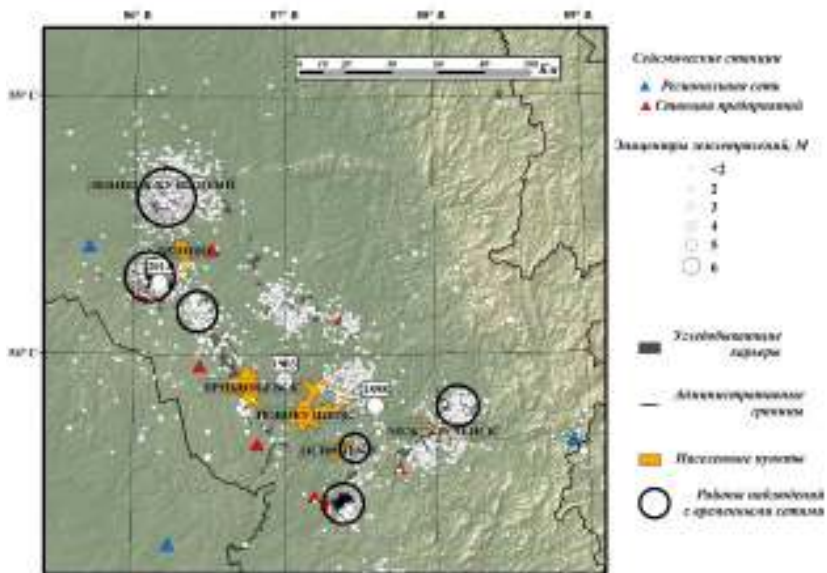


Рисунок 1 – Сейсмичность за период 1761-2018 гг., сеть сейсмостанций и районы исследования сейсмических активизаций в Кузбассе

Кузбасс является районом умеренной природной сейсмичности и зоной большого количества промышленных взрывов. Слабая техногенная сейсмичность фиксировалась и распознавалась региональной сетью станций лишь частично. Экспериментальные работы с плотными сетями сейсмологических станций дали принципиально новую информацию о наведенной сейсмичности в Кузбассе [1]. Они были проведены в нескольких районах, как правило непосредственно подверженных техногенному воздействию угледобывающих предприятий (Рисунок 1).

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям наведенной сейсмичности при **подземной** добыче угля в Кузбассе и триггерным эффектам в ее развитии. Наибольшее внимание уделено экспериментам по исследованию шахтной сейсмичности около г. Польсаево, как наиболее детальным по количеству станций и длительным по времени [4]. Ниже приведены их ключевые параметры: длительность, количество развернутых цифровых комплексов регистрации сейсмических сигналов, количество зарегистрированных землетрясений:

- 13 августа – 11 сентября 2007 г., 24 станции, 428 землетрясений;
- 1 ноября 2007 г. – 31 января 2008 г., 36 станций, 1461 землетрясение;

- 3 июня – 3 июля 2008 г., 19 станций, 357 землетрясений;
- 5 октября – 24 декабря 2009 г., 34 станции, 1718 землетрясений.

В ходе экспериментов были зафиксированы сейсмические активизации, как приуроченные к горным выработкам, так и не имеющие пространственной связи с ними. Механизмы сейсмических событий представлены главным образом взбросами. Выработки в данном районе ведутся на глубинах около 0.4-0.5 км. Глубины гипоцентров фиксировались преимущественно под ними, достигая глубин до 1.5 км, при этом наиболее интенсивно сейсмический процесс происходит на глубинах 0.7-0.9 км (Рисунок 2). В случае с активизацией, не имеющей прямой пространственной связи с действующими горными выработками, гипоцентры фиксировались на глубинах порядка 2-2.7 км.

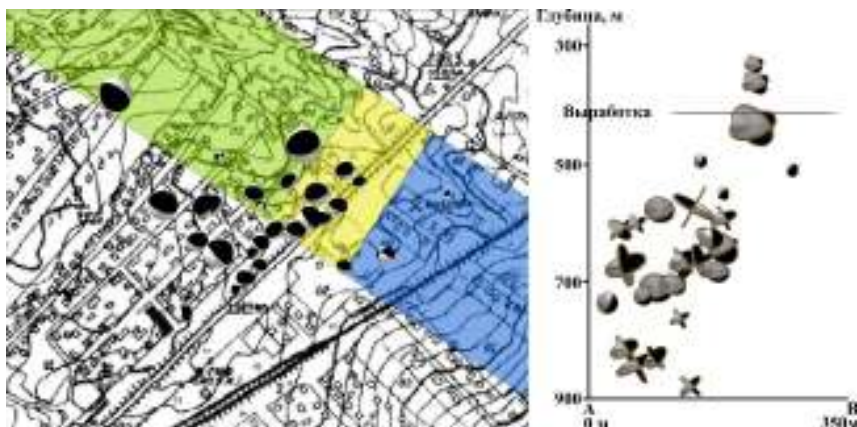


Рисунок 2 – Механизмы и глубины очагов техногенных землетрясений

Активизированная зона в районе Толмачевской выработки в течение первых двух экспериментов (август 2007 г. – январь 2008 г.) постепенно смещалась с юго-востока на северо-запад вместе с продвижением угледобывающего забоя. Эпицентры активизации в районе Бреевской выработки смещаются со временем в том же направлении; наблюдается резкое снижение сейсмической активности к январю 2008 г., когда добыча угля в данной выработке была завершена (Рисунок 3).

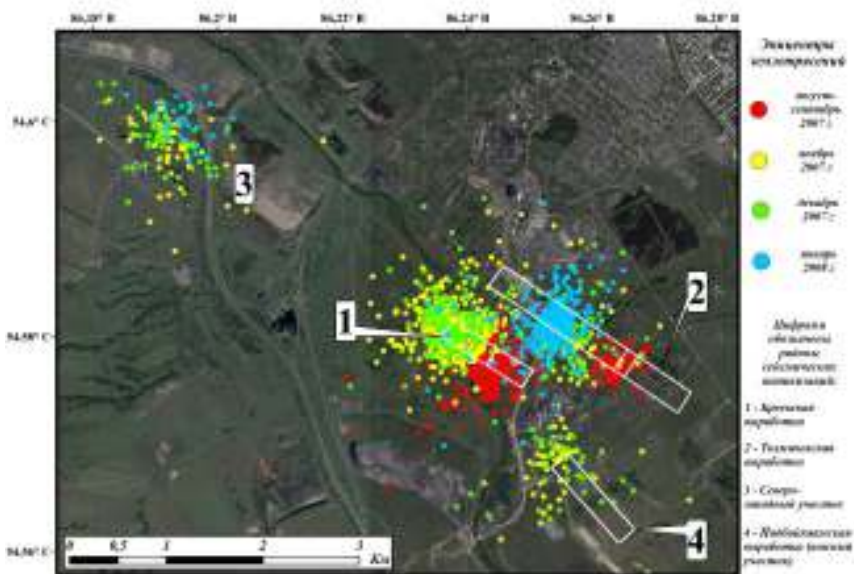


Рисунок 3 – Развитие сейсмического процесса во времени с августа 2007 г. по январь 2008 г.

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

Кроме того, установлена надежная связь между просадками рельефа и сейсмичностью в зоне добычи угля подземным способом, наблюдаемыми одновременно с помощью космической радарной интерферометрии и сети сейсмологических станций [6]. Явления проседания поверхности наблюдаются в основном в районе активно функционирующих горных выработок. Они, как правило, сопровождаются сейсмическими событиями.

Также в ходе экспериментальных работ в районе г. Полысаево выполнено исследование роли вибрации и сейсмических воздействий от промышленных взрывов на наведенную сейсмичность. Представлены данные о техногенных землетрясениях, зарегистрированных локальной сетью (Рисунок 4). В исследуемом районе в угледобывающих шахтах 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. Данный перерыв отчетливо прослеживается на гистограммах

распределения числа сейсмических событий по времени суток для двух этапов эксперимента в районе г. Польшаево, проведенных в 2007 г. (см. рисунок 4а) и в 2008 г. (см. рисунок 4б). Резкое снижение количества сейсмических событий в период профилактики оборудования отмечено также в ходе экспериментальных работ с плотными сетями станций на шахтах «Березовская» и «Распадская» в 2010 г.

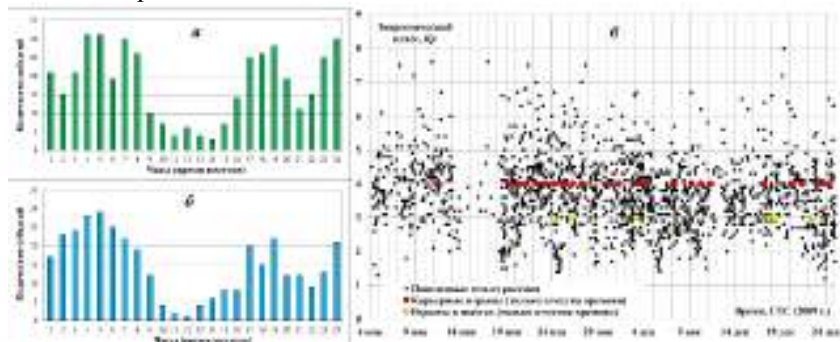


Рисунок 4 – Распределение сейсмических событий в районе г. Польшаево по времени суток в 2007 г. (а) и 2008 г. (б). Диаграмма распределения сейсмических событий в районе г. Польшаево (в)

Эффект влияния вибрации от работающего оборудования в лавах на развитие техногенной сейсмичности был подтвержден в результате анализа данных, полученных в течение четвертого эксперимента с детальными сетями станций в районе г. Польшаево в 2009 г. (см. рисунок 4в). С 13 по 18 ноября 2009 г. по приказу губернатора Кемеровской области работы по добыче угля в исследуемом районе были полностью приостановлены. Этот интервал отчетливо прослеживается: сейсмический режим активизированного района значительно изменился, резко снизилось количество сейсмических событий. Обращает на себя внимание тот факт, что исчезновение и появление фактора мощного вибрационного воздействия на недра практически мгновенно изменяет режим развития наведенной сейсмичности (см. рисунок 4в). При этом заметного изменения сейсмического режима активизированной области под действием промышленных взрывов не выявлено.

Установлен факт влияния интенсивности добычи угля на одной лаве на сейсмический процесс другой, находящейся на расстоянии порядка 500 м [4]. Бреевская и Толмачевская лавы расположены параллельно и отстоят друг от друга примерно на 500 м. 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, режим работы на которой в течение этого времени существенно не менялся (Рисунок 5).

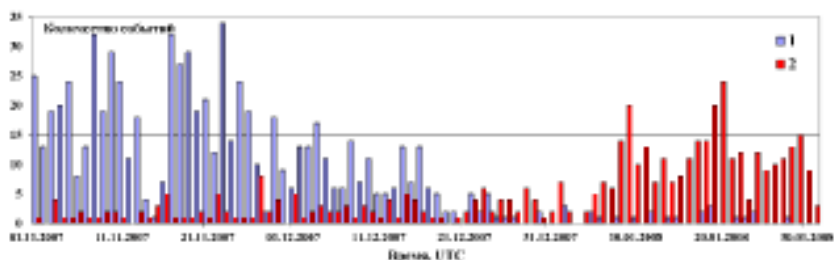


Рисунок 5 – Развитие сейсмического процесса во времени в районе выработок «Бревская» (1) и «Толмачевская» (2). Карту эпицентров см. на рисунке 3.

Таким образом, фактически работы на Бревской лаве с удалением около 500 метров снижали интенсивность сейсмического процесса в районе Толмачевской лавы. Рассмотренный эксперимент доказывает возможность создания воздействия «со стороны» на активизированную зону с целью ослабления техногенной сейсмичности.

**Третья глава** включает в себя результаты экспериментальных исследований сейсмического процесса, возникшего в районе добыче угля **открытым** способом (угольный разрез «Бачатский»). Данный процесс известен Бачатским землетрясением 18 июня 2013 г., которое на данный момент является сильнейшим в мире техногенным землетрясением, связанным с горными работами при разработке месторождения твёрдых полезных ископаемых. Также в этой главе приведены сравнительные характеристики сейсмических режимов природных и техногенных сейсмоактивных зон.

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.

Сейсмичность вблизи разреза «Бачатский» регистрировалась и до Бачатского землетрясения [8, 9]. С 1992 по 2011 гг. в районе разреза «Бачатский» региональной сетью сейсмостанций были зафиксированы 6 землетрясений с  $1.3 \leq ML \leq 2.0$ ; все относительно крупные землетрясения ( $ML > 2$ ) фиксировались, начиная с 2012 г. (Рисунок 6). По данным региональной сети сейсмических станций произошли землетрясения 9 февраля 2012 г. ( $ML=4.3$ ) и 4 марта 2013 г. ( $ML=3.9$ ) (см. рисунок 6). Плотная сеть из 25 временных автономных комплексов регистрации,

работавшая в период 2 марта – 15 мая 2012 г. в окрестностях угольного разреза, зафиксировала 42 сейсмических события с глубинами гипоцентров  $h=1-3$  км, которые не являются промышленными взрывами и пространственно увязаны с разрезом [8].



Рисунок 6 – Карта эпицентров землетрясений в районе угольного разреза «Бачатский».

Условные обозначения: 1 – магнитуда, период до 2012 г.; 2 – магнитуда (только события с  $M>2$ ), период 2012–2018 гг.

18 июня 2013 г. в районе разреза «Бачатский» произошло землетрясение с  $ML=6.1$ , вызвавшее значительную сейсмическую активизацию. Афтершоковый процесс продолжился и в последующие годы. Для его исследования используется детальная сеть сейсмостанций, количество которых менялось в интервале от 8 до 11 в разные периоды наблюдений. К концу 2018 г. зафиксировано около 2500 техногенных землетрясений (Рисунок 7).

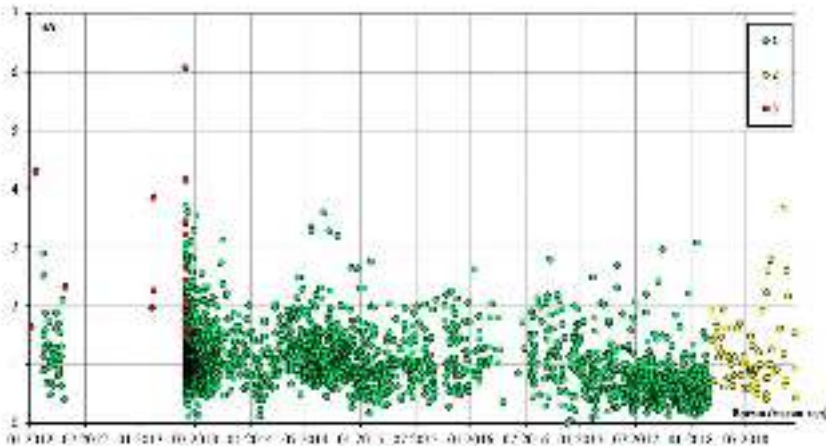


Рисунок 7 – Диаграмма распределения землетрясений в районе разреза «Бачатский» в плоскости «время – магнитуда» за период 2012–2018 гг. Условные обозначения: 1 – данные обработки с использованием станций детальной временной сети; 2 – данные обработки по станциям региональной сети с использованием локальной сети в районе Бачатского разреза; 3 – данные обработки по станциям региональной сети

Данные, представленные на рисунке 7, показывают, что сейсмический режим техногенной активизации в районе разреза «Бачатский» непрерывен и не стационарен: выделяются периоды фонового уровня сейсмичности, пониженного по энергии сильнейших землетрясений и с разреженной частотой слабых событий, и периоды активизаций с сильными землетрясениями и увеличенной частотой слабых событий [9]. Выявленный пульсирующий режим сейсмического процесса является характерным для техногенных сейсмических активизаций при добыче твердых полезных ископаемых [Опарин и др., 2005; Адушкин, Опарин, 2016]. Он обусловлен периодической разрядкой напряжений, создаваемых постоянным техногенным воздействием, и свидетельствует о повышенной сейсмической опасности в исследуемой области.

Фокальные механизмы, рассчитанные для ряда сильных афтершоков, 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 (Рисунок 8а). Рассчитанный механизм очага главного толчка 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.

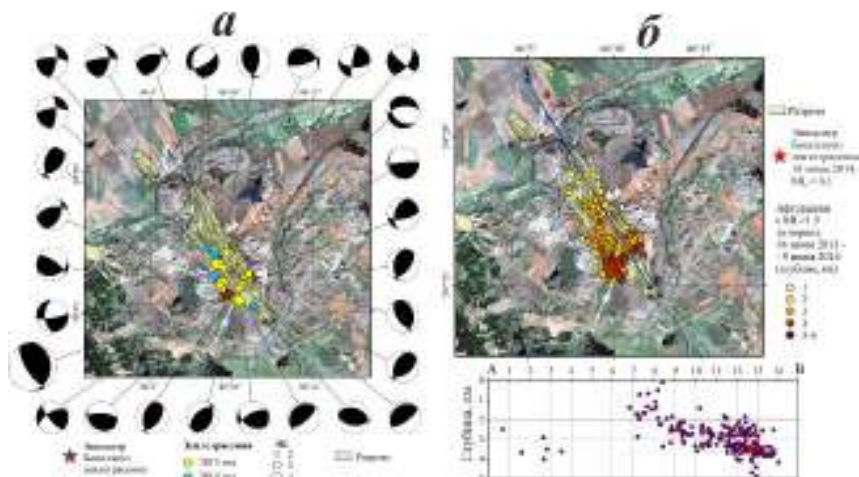


Рисунок 8 – Механизмы очагов (а) и глубины гипоцентров (б) главного толчка и крупных афтершоков Бачатского землетрясения

Эпицентры большинства сейсмических событий локализованы в пределах угледобывающего разреза. При этом основная 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). Таким образом, активизированы прилегающие к разрезу осадочные породы вплоть до глубин порядка 5 км [9].

Для сравнения характеристик сейсмического режима эпицентральной области Бачатского землетрясения с другими природными и техногенными активизациями в Алтае-Саянском регионе [3, 7] были построены графики повторяемости. 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 (Рисунок 9).

График повторяемости землетрясений для Чуйско-Курайской зоны и в целом 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 [5]. Графики повторяемости наведенной сейсмичности построены по материалам исследования локальными сетями станций в Кузбассе: около г. Осинники в 2005 г.; после крупной аварии на шахте «Распадская» в 2010 г.; и в районе г. Полысаево в 2007–2009 гг.; в районе разреза «Бачатский» после Бачатского землетрясения (см. рисунок 9).

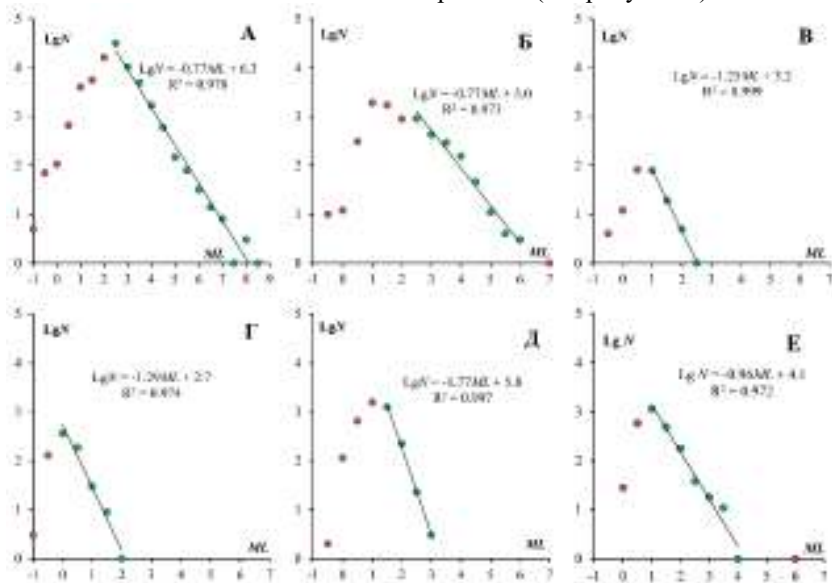


Рисунок 9 – Графики повторяемости землетрясений для сейсмически активизированных зон Алтае-Саянской области.

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», 2013–2018 гг.

В Таблице 1 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 (см. таблицу 1).

*Таблица 1 – Сведения об используемых для графика повторяемости данных и его характеристиках для различных территорий*

<b>Территория</b>	<b>Период наблюдений</b>	<b>Количество событий</b>	<b>Коэффициент наклона графика, <math>b</math></b>	<b>Представительная магнитуда, <math>M_L</math></b>
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. Можно предположить, что данное различие связано с разной глубиной залегания гипоцентров и соответственно разной плотностью сред, в которых протекает сейсмический процесс.

## 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  $ML=0-0.5$ ) зарегистрированных сейсмических событий благодаря плотным сетям высокоточных сейсмологических станций (вплоть до 40 станций на площадях менее 100 км<sup>2</sup>). 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). Получены данные, содержащие параметры 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, очевидно 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 [10]. 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Главы в монографиях

1. 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, 2012. – Разд. V. – С. 426–459.
2. 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.

### Статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК

3. 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.
4. Еманов А.Ф. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 37–43.
5. 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.
6. 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.
7. 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. – 2014. – Т. 456, №2. – С. 223–226.
8. 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. – 2014. – № 2. – С. 41–46.
9. Еманов А.Ф. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ( $M_L=6.1$ ) 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.
10. 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.

## Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций

11. **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.
12. 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.
13. Еманов А.Ф. Техногенная сейсмичность в Кузбассе / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2007 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 86–93.
14. Еманов А.Ф. Наведенная сейсмичность в районе г. Польшаево (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2008 году. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 101–106.
15. 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, 2011. – С. 92–102.
16. Еманов А.Ф. Афтершоковый процесс Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** // Динамика физических полей Земли. – 2011. – С. 173–185.
17. **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.
18. Еманов А.Ф. Техногенная сейсмичность шахты «Распадская» / А.Ф. Еманов, ..., **А.В. Фатеев** [и др.] // Землетрясения России в 2010 году. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 90–95.
19. Еманов А.Ф. Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.,  $M_L=6.1$  / 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, 2014. – С. 145–149.
20. 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, 2014. – С. 104–108.
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.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, 2015. – С. 103–108.
23. 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.). – 2015. – Т. 2, №2. – С. 68–72.

24. 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, 2015. – С. 190–199.

---

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 19.02.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 155. Зак. № 194

---

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3